

ASTROPARTICULES et COSMOLOGIE OBSERVATIONNELLE

L'Univers comme source de particules

L'Univers est une source de particules unique par différents points de vue.

Historiquement, la physique des particules est née de la découverte du rayonnement cosmique il y a un siècle environ. Des entités de matière trop fugaces pour être observées « simplement » au cours de notre vie quotidienne, ont été identifiées et caractérisées. L'Univers produit des particules – d'origine solaire, galactique ou extragalactique selon la nature et l'énergie de celles-ci – qui interagissent avec notre atmosphère. Si les mécanismes d'interaction avec notre environnement local et les particules créées alors sont bien connus aujourd'hui (sauf pour les énergies les plus extrêmes), les lieux de production de ce rayonnement cosmique demeurent largement mystérieux. Identifier ces lieux, comprendre comment les particules sont accélérées et interagissent avec le milieu galactique et extra-galactique constituent les objectifs de la physique du rayonnement cosmique. Les enjeux sont de nature astrophysique bien sûr mais aussi liés à la physique fondamentale car les candidats « exotiques » ne manquent pas.

Tous les astres émettent un rayonnement électromagnétique d'origine thermique. C'est ainsi que l'on détecte usuellement étoiles et galaxies. Mais l'on peut également détecter, aujourd'hui, les

photons émis sous forme d'un rayonnement de corps noir parfait par l'Univers dans son ensemble, lorsqu'il 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 de corps noir à 3 K 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.

*Une cuve du
détecteur Auger dans
la pampa argentine.
Crédits :
Auger collaboration*



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 à leur paroxysme, les trous noirs sont des sondes privilégiées pour tester les théories novatrices.

Des instruments dédiés

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.

Après le succès de l'expérience ballon Archeops, c'est à présent le satellite Planck qui doit décoller en 2008 pour mesurer le fond à 3 K. Après le succès du vol navette de AMS-I, c'est l'expérience ballon CREAM et prochainement AMS-II

à bord de la station spatiale internationale qui détecteront le rayonnement cosmique du GeV au PeV. Après avoir participé aux études de faisabilité du projet EUSO de détection spatiale des gerbes atmosphériques générées par les rayons cosmiques de très haute énergie, le LPSC a rejoint les collaborations AUGER et CODALEMA qui cherchent à comprendre l'origine et la nature des particules les plus énergétiques qui frappent la Terre.

Enfin, suite à l'expérience acquise avec MacHe3, la R&D en détection directe de matière noire se poursuit de façon plus ambitieuse avec MIMAC.



*L'instrument Cream et le ballon, juste avant le lâcher en Antarctique.
Crédits : Cream collaboration*

Analyser et interpréter

Les mesures, aussi difficiles soient-elles à faire, 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.



*Vue d'artiste du satellite Planck dans l'espace.
Crédits :
ESA/AOES Medialab*

Détection et phénoménologie du rayonnement cosmique, activités théoriques conjointes

Michel Buenerd, Aurélien Barrau, Laurent Derome, Mariane Mangin-Brinet, Antje Putze (th), Johann Sallaz-Damaz (th)

The AMS experiment will perform a high sensitivity study of the charged particles Cosmic Ray (CR) flux, searching for antimatter and dark matter, and performing unmatched abundance measurements of nuclear CRs. The LPSC group participates to the construction of the Cherenkov imager for particle velocity and charge measurements, allowing isotope separation for light nuclei. CREAM is a balloon experiment which was flown already twice over Antarctica, to measure the very high energy (1 - 1000 TeV) Nuclear Cosmic Ray flux (CR), investigate the energy region where Super Novae front shock acceleration signature is expected for protons, and study the CR transport in the Galaxy. The LPSC group has built a Cherenkov imager for particle charge measurements over the full range of charge ($1 < Z < 30$), and for backscplash and albedo particle rejection. This detector is now integrated for a first flight during the winter 2007/2008.

Participation au projet AMS

L'expérience AMS recherchera l'antimatière d'origine primordiale, la matière noire et étudiera le rayonnement cosmique de particules chargées (RC) ainsi que le rayonnement gamma cosmique pendant plusieurs années d'opération sur la station spatiale internationale (ISS). L'installation de l'expérience a été retardée par la perte de la navette spatiale Columbia mais devrait avoir lieu dans les années à venir.

L'équipe AMS du LPSC participe au sous-détecteur RICH. L'imageur Cherenkov d'AMS aura pour fonction principale d'identifier les ions du rayonnement cosmique :

- En masse pour les noyaux $A \lesssim 12$ dans le domaine d'impulsion de 1 à 12 GeV/c par nucléon.
- En charge dans tout le domaine d'énergie d'AMS ($< \sim 1$ TeV/n).

Le principe du détecteur est celui de l'imageur annulaire à focalisation de proximité dont la simplicité d'architecture faisait le meilleur candidat pour une expérience embarquée et de longue durée.

Notre équipe a participé à la phase préliminaire du programme expérimental AMS01 qui fut un évident succès. Elle a travaillé sur l'analyse et apporté une contribution majeure à l'interprétation des résultats (voir rapports annuels précédents et publications). Sur l'instrumentation du spectromètre, elle a activement participé à la construction de l'imageur Cherenkov. Deux générations de prototypes ont été construites et étudiées au LPSC. Des tests ont été menés au CERN pour évaluer les performances du détecteur. Les activités récentes sont essentiellement concentrées autour de la caractérisation des tuiles du radiateur Cherenkov.

La vitesse des particules doit être mesurée dans l'imageur Cherenkov (RICH) d'AMS avec une précision relative de 1 pour mille, pour conduire, une fois combinée avec les informations fournies par le trajectomètre (détecteur de traces silicium à microbandelettes), à une détermination de la masse à 1 %.

Cette contrainte de précision sur la mesure de la vitesse se traduit par la nécessité de déterminer l'indice

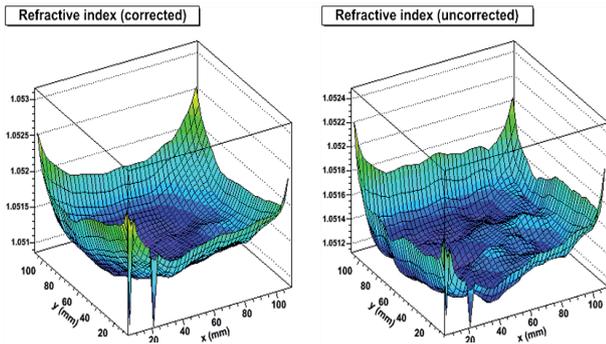
de réfraction du matériau radiateur avec une précision $\Delta n \sim 10^{-4}$.

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

L'indice optique de l'aérogel des tuiles produites par le Budker Institute de Novosibirsk n'est pas connu avec la précision requise et il a dû être mesuré précisément. La méthode classique du prisme étant limitée au bord de tuile où l'indice est éminemment variable, une autre méthode, basée sur la mesure du gradient d'indice par déflexion d'un faisceau laser, a été développée et mise en œuvre au LPSC.

Une installation expérimentale dédiée à la détermination cartographique de l'indice de réfraction de ces tuiles par mesure de déviation laser, a été conçue au LPSC et mise en place dans une salle propre du laboratoire. Elle inclut un banc optique, une source laser rouge (le bleu étant trop absorbé dans certains aérogels), une platine porte-échantillon mobile en rotation verticale et en position dans les deux directions dans le plan vertical, un espace de glissement du faisceau de 3 m environ au bout duquel un écran est lu par une caméra CCD. La caméra et l'ensemble des fonctions de commandes de position sont interfacés sur un PC. La lecture des données et tous les mouvements sont automatisés pour la cartographie d'une tuile, simplifiant ainsi énormément la tâche de l'opérateur dont l'action se limite au contrôle, au changement et à la manipulation des tuiles.

En parallèle à ces mesures optiques, les tuiles ont été aussi cartographiées mécaniquement. Pour cela, un comparateur mécanique est mis en œuvre afin de disposer de 25 points de mesure par tuile. Cela conduit à une carte précise de l'épaisseur pour chaque élément. Ces mesures permettent aussi de connaître le défaut de parallélisme des faces, qui est utilisé pour corriger les mesures optiques. On peut alors calculer précisément le volume de la tuile et déterminer son indice moyen, connaissant sa masse mesurée par ailleurs.



Indice optique mesuré sur une tuile d'aérogel du radiateur d'AMS, avant et après correction du gradient par les données géométriques.

L'ensemble des tuiles utilisées pour le RICH d'AMS a été caractérisé au LPSC. Elles ont été stockées dans un environnement contrôlé afin de lutter contre les effets hydrophiles. Ces tuiles sont maintenant en cours de livraison en Espagne afin d'être intégrées dans le RICH.

Dans les mois à venir, l'équipe AMS du LPSC participera à l'intégration du RICH dans le détecteur AMS qui aura lieu au CERN.

Participation à l'expérience CREAM

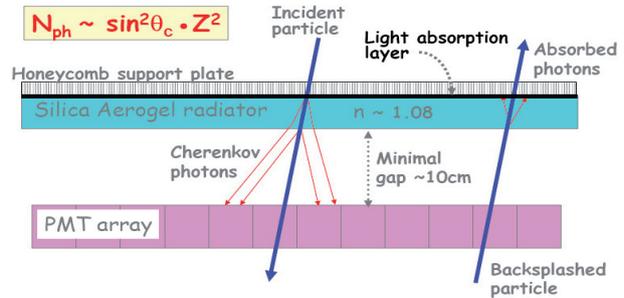
L'objectif scientifique du programme expérimental est d'aborder les questions ouvertes sur la nature et l'origine du rayonnement cosmique de particules chargées (RC), et en particulier les interrogations qui concernent :

- Les Supernovæ comme sources du RC.
- L'histoire des rayons cosmiques dans la galaxie.
- Le spectre en énergie du RC et le mécanisme d'accélération qui le produit.
- Le changement d'indice spectral γ ($dN/dE \sim E^\gamma$) du spectre inclusif du RC vers 10^{15-16} eV (« knee » dans la terminologie anglo-saxonne, genou en français), et son origine.

Dans ce but, la collaboration CREAM (Cosmic Ray Energetics and Mass) mesure le spectre en énergie des éléments nucléaires du RC dans le domaine d'énergie qui s'étend de 10^{12} à 10^{15} eV. La résolution en charge de l'instrument est un point critique pour l'ensemble des objectifs scientifiques, la proposition du LPSC faite conjointement avec le CESR de Toulouse et l'UNAM (Université de Mexico) a été d'améliorer la mesure de charge au moyen d'un compteur Cherenkov (CHERCAM).

La figure suivante montre schématiquement le principe de l'architecture du compteur CHERCAM, dérivée de celle utilisée pour l'imageur d'AMS. Il est constitué d'un plan de radiateur en aérogel de silice (indice de réfraction $n=1,05$) séparé d'un plan de photomultiplicateurs (diamètre 25 mm environ) par un espace de glissement d'environ 10 cm. En régime asymptotique ($\beta \sim 1$), la lumière Cherenkov produite est proportion-

nelle à Z^2 et sa mesure par comptage de photons fournit une détermination précise de la charge Z de la particule détectée comme illustré sur la figure ci-dessous. La topologie très spécifique de cette réponse peut être utilisée pour valider exclusivement les événements détectés avec une grande sélectivité et éliminer efficacement le bruit de fond d'Albedo.

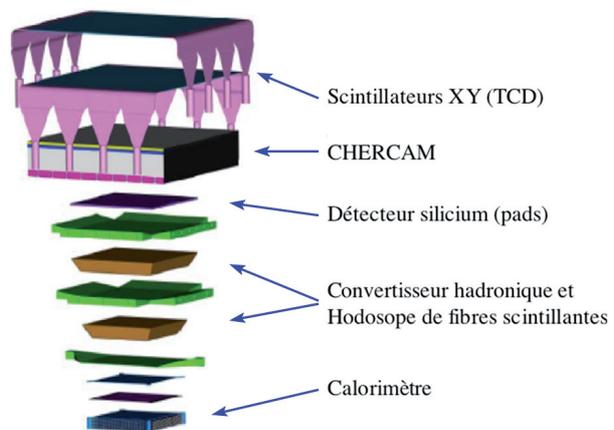


Principe de l'architecture du compteur CHERCAM.

La participation du LPSC à l'expérience CREAM a été définitivement approuvée par le CS de l'IN2P3 fin novembre 2005. Cette étape avait été anticipée avec le développement d'un prototype d'imageur et de l'électronique de lecture. Le prototype a été testé en faisceau en octobre 2006 et octobre 2007. Le détecteur a été construit en un an, au cours de l'année 2006. Il a été livré testé à l'U.Maryland en janvier 2007, où il a été intégré dans l'ensemble expérimental CREAM.

La demande de financement auprès de l'ANR a été retenue parmi les programmes blancs pour la période 2007-2009. L'activité pour l'année 2007 est la préparation du vol de décembre prochain et la participation à cette campagne de vol.

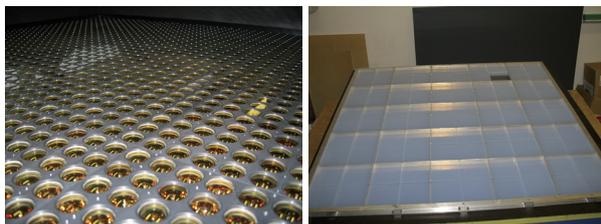
La figure ci-dessous illustre l'architecture de CREAM III et sa composition en sous-détecteurs qui va voler sous ballon à haute altitude en décembre 2007.



Architecture de CREAM III.

Les images page suivante illustrent les étapes de la construction du détecteur, les résultats des tests en

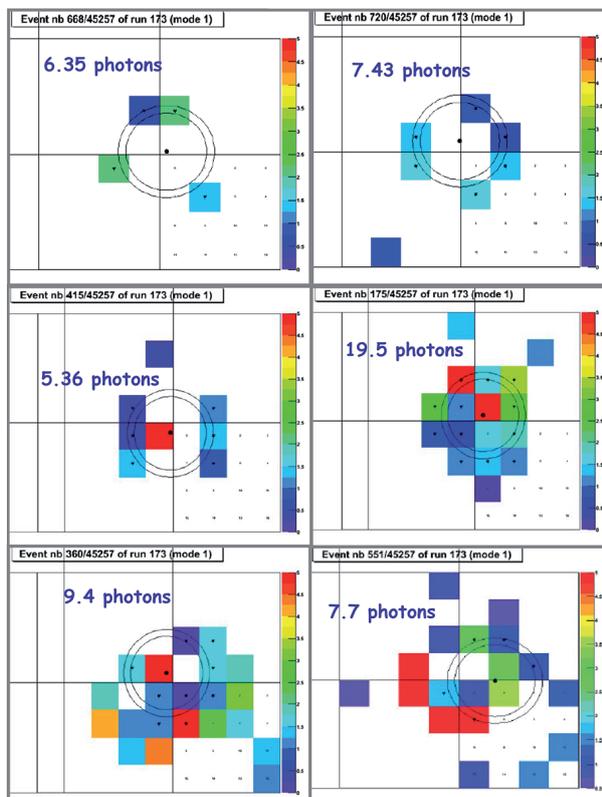
faisceau au CERN avec des particules de haute énergie, et l'intégration du détecteur à College-Park.



Intégration du détecteur (décembre 2006 - janvier 2007) : Plan de photomultiplicateurs, et Plan du radiateur Cherenkov aérogel.



Détecteur ChERCAM en cours d'intégration (décembre 2006, LPSC) et intégration dans CREAM, et Ensemble de l'instrument CREAM III intégré (U.Maryland, College Park, janvier 2007).

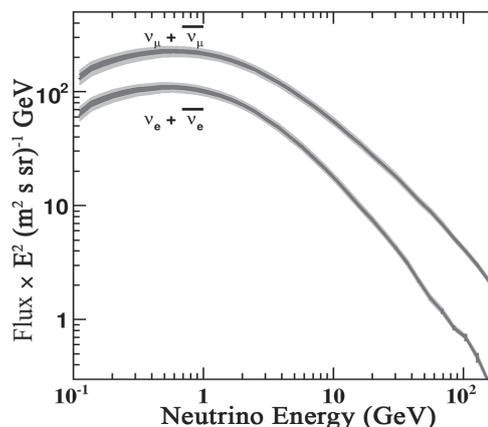


Résultats des tests en faisceau du prototype (octobre 2006) : Exemples d'anneaux Cherenkov mesurés avec le prototype au CERN (electrons 150 GeV, octobre 2006) et distribution de la multiplicité de photons mesurés, comparée au résultat de la simulation.

Phénoménologie de l'interaction du rayonnement cosmique dans l'atmosphère: calcul du flux de neutrino atmosphérique

Nous avons initié depuis 2000 une activité de phénoménologie de l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère et le champ magnétique terrestre. La motivation première de cette activité a été de comprendre l'origine des particules détectées sous la coupure géomagnétique par AMS01, vol précurseur effectué en 1998 sur la navette spatiale. Ce travail de phénoménologie entrepris s'articule autour d'un outil de simulation Monte-Carlo qui comprend la génération des particules du rayonnement cosmique primaire, sa propagation dans le champ magnétique terrestre, l'interaction dans l'atmosphère et la production de particules secondaires.

Le rayonnement cosmique constitue un outil unique d'étude des oscillations des neutrinos. Les paramètres d'oscillation sont déterminés grâce à la comparaison du flux de neutrinos estimé et du flux mesuré. Cette estimation nécessite une connaissance précise des flux théoriques de neutrinos atmosphériques. La principale difficulté est d'avoir une simulation la plus correcte possible de l'interaction des particules et de la production de particules secondaires. La stratégie utilisée jusqu'alors a été d'utiliser des paramétrisations ajustées sur des mesures de sections efficaces sur cible fixe. Cette approche s'avère insuffisante si l'on veut obtenir avec la simulation des résultats d'une grande précision (de l'ordre du pourcent). Pour l'améliorer on a utilisé des mesures de flux de particules dans l'atmosphère pour contraindre et ajuster les sections efficaces. La figure ci-dessous montre les estimations de flux de neutrinos obtenues dans le cadre de ce travail.

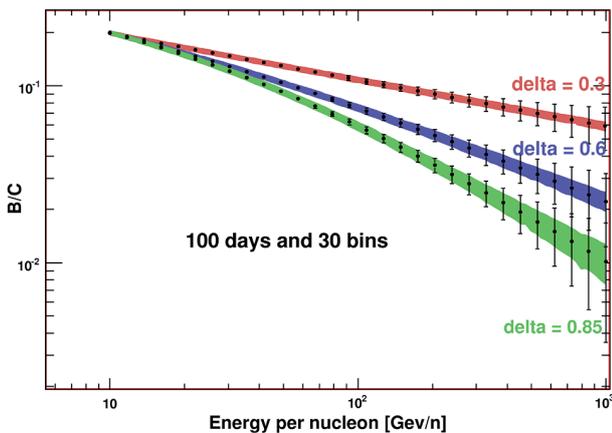


Flux de neutrinos (gauche) et rapports de flux (droite) calculés pour le site de Super-Kamiokande et moyenné sur 4π . Les zones gris clair représentent l'intervalle de confiance à 95 % estimé à partir de la simulation (seule l'erreur venant des sections efficaces de production est considérée). Les zones gris sombre correspondent aux intervalles de confiance à 95 % obtenue en ajustant les sections efficaces sur les mesures de flux atmosphériques.

Physique du rayonnement cosmique

La physique du rayonnement cosmique est l'un des objectifs majeurs à la fois de l'expérience AMS mais aussi de l'expérience CREAM. Elles 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 de 1 GeV à 1 TeV alors que CREAM les mesurera dans le domaine du TeV au PeV.

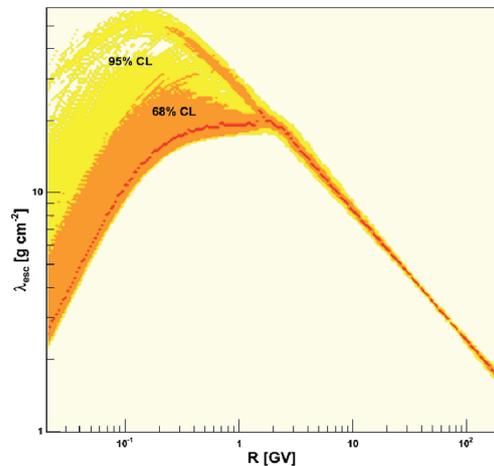
Une des difficultés de cette mesure est de bien prendre en compte les erreurs systématiques. En particulier, il faut lors de l'analyse des données considérer l'interaction et la fragmentation des ions dans l'instrument (pour AMS et CREAM) et dans l'atmosphère (CREAM). L'étude précise de ces phénomènes est donc indispensable. Ce travail nous a permis de montrer que les mesures effectuées par un ballon à haute altitude pouvaient être corrigées pour reconstruire le flux en haut de l'atmosphère (TOA). On a montré que l'incertitude systématique liée à la mauvaise connaissance des sections efficaces de fragmentation était suffisamment petite pour cette étude (voir figure ci-dessous pour la mesure du rapport B/C).



Rapport B/C pour différentes valeurs de l'indice de diffusion. La zone colorée correspond à l'erreur systématique introduite par les incertitudes associées aux sections efficaces dans la reconstruction du flux TOA. Les barres d'erreurs correspondent à l'erreur statistique attendue pour une mesure de 100 jours avec un détecteur d'acceptance 1 m²sr.

En parallèle, nous avons mis en place une collaboration avec des chercheurs du LAPTH (Annecy) et du LPNHE (Paris) pour étudier les processus de propagation du rayonnement cosmique. L'objectif de ce travail est d'utiliser les méthodes MCMC (Markov Chain Monte-Carlo) pour étudier les contraintes actuelles sur les paramètres de propagation dans différents modèles. Ce travail permettra de mieux comprendre et de mieux quantifier les contraintes actuelles mais aussi les potentialités des expériences à venir. La figure ci-dessous illustre cette activité et présente, dans le cadre du modèle de propagation dit « Leaky-Box », la

contrainte que l'on peut obtenir sur l'épaisseur moyenne de matière traversée par le rayonnement cosmique en utilisant l'ensemble des mesures actuelles.



La quantité de matière moyenne traversée λ_{esc} (en g/cm²) par une particule du rayonnement cosmique avec une rigidité R (en GV) peut être facilement déduit à partir des paramètres de propagation dans le modèle de « Leaky Box ». Pour déterminer les paramètres de propagation les données suivantes ont été utilisées : IMP7-8, ACE, ISEE3, Voyager 1 et 2 et HEAO3. La ligne rouge est obtenue avec le meilleur ajustement et les zones orange et jaune correspondent respectivement aux niveaux de confiance à 68 et 95 %.

Relativité générale et champs quantiques

Depuis quelques années, le groupe a développé une activité théorique autour des extensions de la relativité générale et des phénomènes quantiques en espace courbe. Ces deux dernières années, ont été étudiées :

Trous noirs en gravité de Lovelock

La relativité générale, n'étant pas quantifiable, n'est vraisemblablement pas la théorie ultime de la gravitation. Les circonstances où des effets de gravité quantiques peuvent se manifester demeurent néanmoins extrêmement rares. L'évaporation des trous noirs serait sans doute l'une de celles-ci. Le spectre de particules qu'ils émettent n'est pas tout à fait une loi de corps noir à cause de la forme complexe de la métrique au voisinage de l'horizon. Ce couplage entre les champs quantiques et les trous noirs est entièrement caractérisé par les facteurs de corps gris qui requièrent la résolution des équations de Klein-Gordon et de Dirac en espace courbe avec des conditions aux limites particulières. Ils reflètent le potentiel gravitationnel et la barrière centrifuge, avec un couplage géométrique au spin. Ces coefficients ont été, pour la première fois, calculés pour la gravité de Lovelock, c'est-à-dire présentant des termes d'ordres supérieurs en courbure scalaire. Ces calculs ont prouvé que la structure intrinsèque de l'espace-temps était reflétée par le processus d'évaporation.

Champs quantiques en espace courbe

Nous avons développé un formalisme général pour étudier la propagation des champs quantiques sur une métrique de fond arbitraire. Une approche semi-classique a d'abord permis de sonder les effets quantiques en espace de Schwarzschild (corps sphériques), Anti-de-Sitter (constante cosmologie négative) et Schwarzschild-Anti-de-Sitter. Un certain nombre d'effets nouveaux a été mis en évidence, en particulier une redérivation du processus de quantification. D'une façon plus générale, la démarche a été appliquée pour des espaces-temps ne présentant aucune symétrie particulière et une méthode générale de calcul du propagateur a été proposée. Certaines ambiguïtés des procédures canoniques de calculs quantiques en espace courbe ont été levées. Les équations du mouvement et le quadri-courant de probabilité peuvent être aisément généralisés. Ces résultats soulignent une analogie entre l'obtention des propagateurs en mécanique quantique des systèmes décrits par la relativité générale et celle des propagateurs des systèmes stationnaires en mécanique quantique non relativiste.

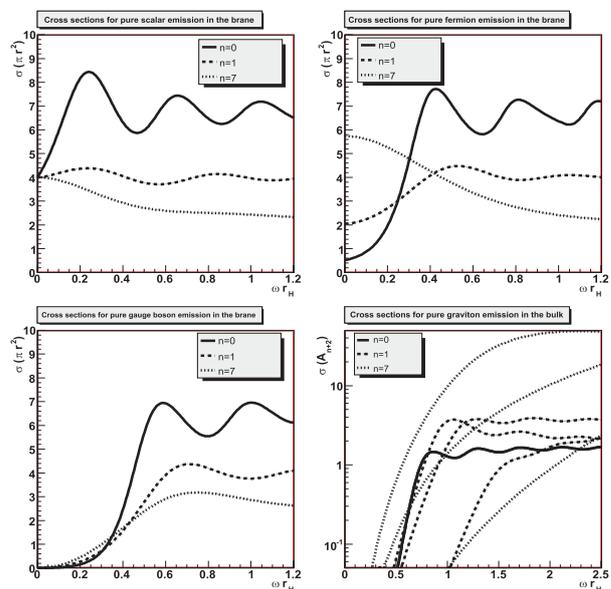
Entropie d'un trou noir branaire

La compréhension de l'entropie des trous noirs est un point nodal de physique théorique. Comment comprendre que les objets les plus simples de l'Univers (un trou noir est entièrement décrit par trois paramètres seulement) soient aussi ceux présentant la plus grande entropie? Où et comment l'information est-elle stockée? L'unitarité de la théorie quantique des champs est-elle violée? Ces questions ont été à l'origine de nombreuses avancées et de crises majeures en physique théorique. Le calcul de l'entropie des trous noirs à partir des micro-états (pour certains cas dits « surpéymétriques extrémaux ») reste l'un des seuls – peut être le seul – grands succès explicatifs de la théorie des cordes. C'est aussi le seul résultat réellement probant de la gravité quantique à boucle (moyennant une renormalisation adaptée de la constante de Newton). Du point de vue « externe », l'entropie est comprise comme une mesure du nombre de configurations « pré-effondrement » pouvant conduire au trou noir consi-

déré. Cette conjecture (dite de Bekenstein) n'a jamais été démontrée. Nous avons étudié sa plausibilité pour les trous noirs branaires. En calculant de façon exacte l'entropie rayonnée par le trou noir, nous avons montré qu'elle était très proche de l'entropie gravitationnelle perdue par celui-ci. Il s'agit de la première « confortation » de la conjecture de Bekenstein à D dimensions.

Perspectives

Nous travaillons sur la décohérence durant l'inflation. Le problème de l'émergence de la « classicalité » de l'Univers alors que celui-ci n'a, par définition, pas pu interagir avec un objet extérieur et que son état initial est fondamentalement quantique, est un problème bien connu de la cosmologie. Nous l'étudions dans le cadre de distributions quantiques plus générales qui permettent de mieux quantifier l'auto-décohérence du système.



Coefficients de couplage entre champs quantiques et trous noirs. En haut à gauche: scalaires sur la brane, en haut à droite: fermions sur la brane, en bas à gauche: bosons sur la brane, en bas à droite: gravitons dans le bulke. Dans ce dernier cas, les trois courbes correspondent aux modes tenseur, vecteur et scalaire.

Cosmologie observationnelle et détection de matière noire

Daniel Santos, Jonathan Aumont (th), François-Xavier Désert (LAOG), Lauranne Fauvet (th), Damien Girard (th), Juan Macías-Pérez, Frédéric Mayet, Stéphane Ranchon, Cécile Renault

Planck is an European Spatial Agency (ESA) mission dedicated to the measurement of the cosmic microwave background anisotropies that will be launched in 2008. The laboratory has responsibilities on 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 and is now strongly involved in the data analysis preparation (DPC).

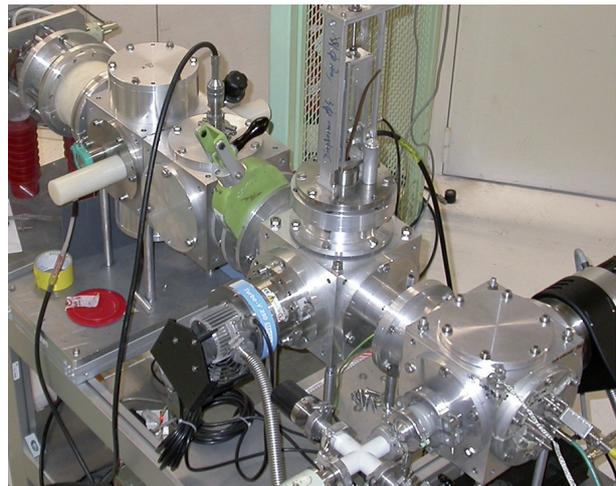
The existence and the nature of the non-baryonic dark matter are one of the most exciting topics in astroparticle research. The direct detection of WIMPs is one way to confirm the existence of such dark matter. The He3 is proposed to be used as a target for detecting fermionic WIMPs by spin-spin interaction. The He3 has very interesting properties showing a complementarity with the running projects. The team tries to validate a design of a detector using a micro-tpc matrix of gas chambers (MIMAC-He3).

Le projet MIMAC: Développement d'un détecteur de nouvelle génération pour la détection directe de WIMP

La recherche de matière sombre non-baryonique est l'une des voies parmi les plus actives de la recherche en astroparticules. Près de 85 % de la matière de notre Univers devrait se trouver sous cette forme encore inconnue. La détection directe de ces particules, les WIMP (Weakly Interacting Massive Particles) étant les candidats les plus favorables, présente des défis très importants liés principalement à l'identification de tous les événements qui pourraient être confondus avec le signal attendu et au seuil d'énergie de détection de reculs nucléaires.

Le projet MIMAC s'inscrit dans l'effort de définition d'une grande TPC (Time Projection Chamber) pour la détection de matière sombre non-baryonique. À cet effort participe la collaboration Drift (UK, USA) qui utilise le CS₂ afin de profiter de la dérive des ions négatifs. Pourtant la définition de la grande TPC (GTPC) qu'il faudra construire n'est pas encore achevée. L'une des caractéristiques importantes de la GTPC est de pouvoir fournir la directionnalité du recul nucléaire et également une excellente réjection des événements du bruit de fond. Ces deux caractéristiques peuvent co-exister seulement dans une chambre qui travaille à basse (100 mb) et à haute pression (1-2 bar). Un détecteur avec une structure matricielle pourra également avoir différents gaz, de différentes masses, afin d'avoir une autre information importante concernant la dépendance de la section efficace en fonction de la masse cible. Les activités pendant la période 2006-2007 ont été centrées autour de la mesure du facteur de « quenching » dans l'⁴He, pour l'⁴He, ³He et les protons dans la plage d'énergie entre 1 keV et 50 keV. Une caractérisation de l'énergie d'entrée à la sortie de la feuille d'interface a été faite par une mesure de temps de vol. La source

MIMAC, construite au laboratoire par le service de sources d'ions, qui constitue l'outil indispensable pour cette mesure est présentée ci-dessous.



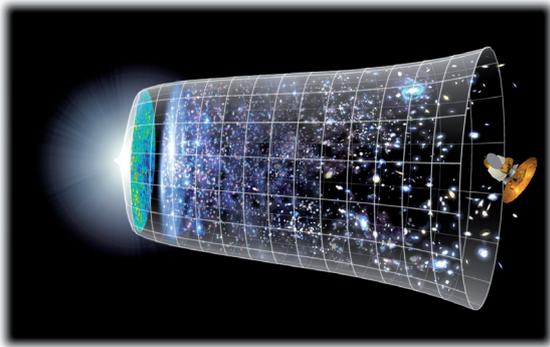
Le programme national d'Astroparticules a soutenu notre projet, début 2007 et l'Agence Nationale de la Recherche l'a retenu pour la période 2008-2011.

Étude du fond diffus à 3 K avec Planck

Intérêt du fond diffus cosmologique

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 à 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.



Histoire schématique de l'Univers d'après nos connaissances actuelles (Crédits : NASA/WMAP Science Team).

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 (Sampan (CNES), BPol (ESA)). On peut raisonnablement parler de « mesure ultime » car Planck devrait être capable de déterminer 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 telles 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 nou-

velle 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 quelques 10^{-6} , d'autre part à ce signal de la surface de dernière diffusion s'ajoute de nombreuses émissions. Ces émissions peuvent être d'origine astrophysique (extragalactiques, galactiques ou locales), mais également 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 pour Low Frequency Instrument et HFI pour High Frequency Instrument) regroupant respectivement environ 400 chercheurs dans une dizaine de pays en Europe et en Amérique pour un budget total d'environ 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 la préparation de l'analyse de données.

Contribution instrumentale

La période 2006-2007 marque la finalisation des contributions instrumentales du LPSC à Planck puisque l'ensemble du satellite dans sa version définitive doit être testé 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 de la conception et construction des compresseurs de la machine cryogénique.

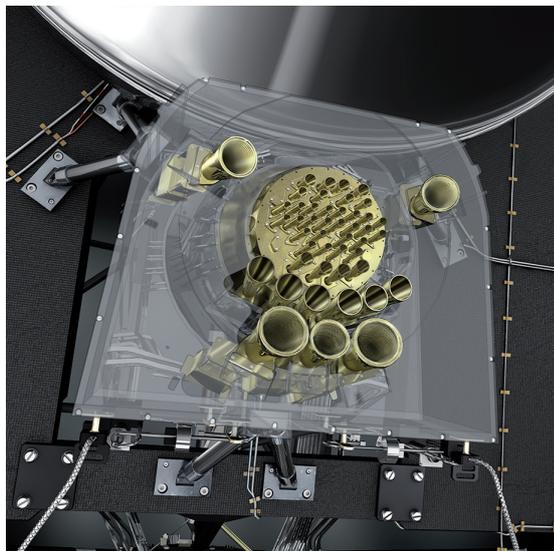
À Grenoble, notre activité s'est concentrée sur les tests fonctionnels et d'intégration des modèles de vol des deux électroniques (SCE et DCE), les tests unitaires et fonctionnels sur le logiciel de contrôle de la SCE et enfin le développement de l'interface pour la télémétrie et les télécommandes du SCE. Cette activité est détaillée dans les chapitres des différents services techniques concernés.

Préparation de l'analyse

Le plan focal de l'instrument HFI (voir figure) 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 être produites par l'interaction d'un rayon cosmique avec le bolomètre, par une fluctuation du « bruit de fond » induit par les cônes qui guident la lumière et qui sont refroidis à 4 K, par une variation de la réponse du détecteur ou bien encore par le bruit parasite produit par la machine cryogénique à 4 K. Notre groupe a la responsabilité du développement des outils nécessaires à cette étape de l'analyse appelée « preprocessing » qui s'effectue dans le cadre du Core Team de Planck-HFI. Ce « preprocessing » se fait de façon itérative et en interaction avec les étapes ultérieures de l'analyse, notamment la fabrication des cartes.

Assemblés dans un pipeline qui conduit des mesures brutes de tension aux bornes du bolomètre à la puissance venant du ciel absorbée par celui-ci et à la production d'un certain nombre de flags identifiant les mesures corrompues, ces outils ont été appliqués avec succès sur les premières simulations ainsi que sur les mesures des campagnes d'étalonnage au sol. L'analyse d'un premier jeu de simulations complètes et réalistes a été conduite au cours de l'automne 2007.



*Vue d'artiste du plan focal de LFI et HFI (plaque centrale).
Crédits : ESA/AOES Medialab.*

Étude sur la phase de pre-heating

Afin d'exploiter au mieux les données de très bonne qualité comme celles 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, l'inflaton, va transformer son énergie en rayonnement et matière. Cette activité a été poursuivie en 2006 et 2007 et a donné lieu à une publication « Non-linear Preheating with Scalar Metric Perturbations » (astro-ph/0709.3510).

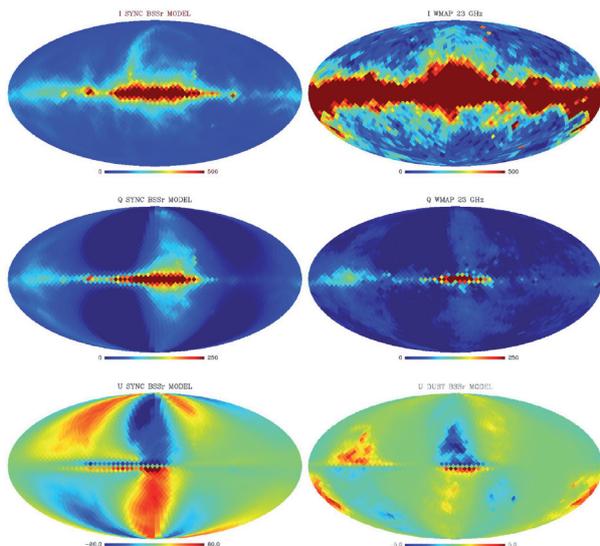
Étude des sources ponctuelles avec Archeops

L'étude des sources ponctuelles dans le domaine millimétrique est très importante pour la préparation de l'analyse de Planck et c'est pourquoi nous avons construit un catalogue de ces sources à partir des observations d'Archeops (Macías-Pérez et al. 2007). Ce catalogue est composé d'environ 300 sources dont une quarantaine ne contient pas de contrepartie dans d'autres domaines de longueur d'onde (Désert et al. 2007, accepté). Les sources observées par Archeops ont une origine Galactique et leur émission est due à la poussière, sauf pour les planètes Jupiter et Saturne et la nébuleuse du Crabe dont le spectre d'émission est encore mal connu (Macías-Pérez et al. 2007, soumis). Ces sources sont en général des nuages denses et froids, entre 8 et 20 K. Elles présentent un spectre électromagnétique en forme de corps noir modifié avec des indices spectraux corrélés à la température: l'indice spectral augmente dramatiquement à basse température. Certaines de ces sources se trouvent dans des régions HII et l'on pense qu'elles pourraient abriter des étoiles dans leurs premières étapes de formation. Avec le satellite Planck nous espérons détecter des milliers de ces nuages froids et pouvoir ainsi améliorer notre connaissance sur la formation stellaire.

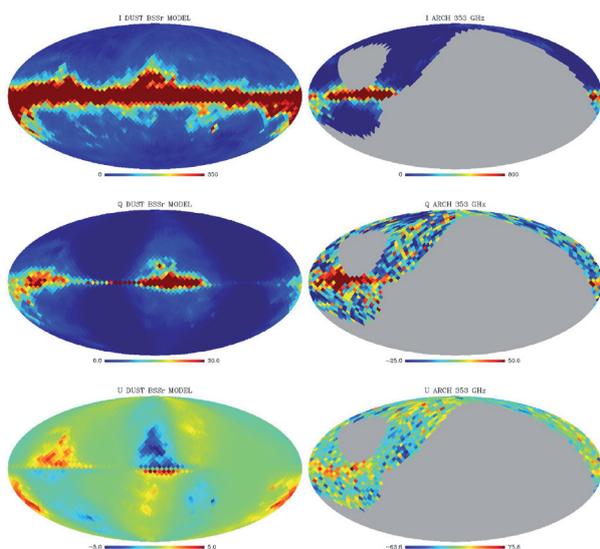
Modélisation des émissions d'avant-plan

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 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 (Macías-Pérez et al. 2008, en préparation). 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.

Nous constatons un très bon accord entre le modèle et les observations. Ces cartes ont été incluses dans le « Planck Sky Model » qui constitue la référence officielle de la collaboration Planck pour produire des simulations réalistes des futures observations et travailler sur les méthodes d'extraction des diverses informations et l'estimation des erreurs systématiques.



Cartes I , Q et U de l'émission du synchrotron de notre modèle (à gauche) comparé aux observations de WMAP à 23 GHz (à droite) où le synchrotron domine.

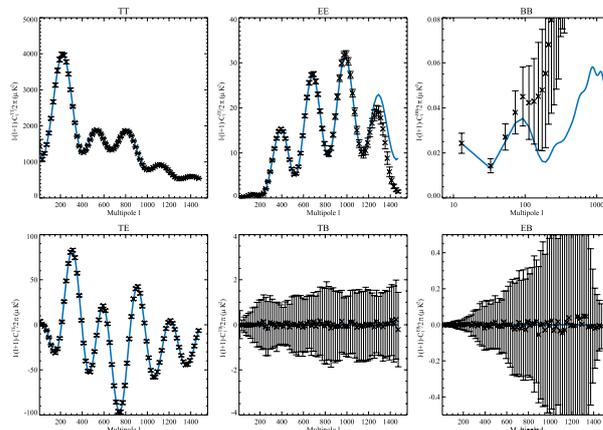


Cartes I , Q et U de l'émission de la poussière pour notre modèle (à gauche) comparée aux observations Archeops à 353 GHz (à droite).

Séparation de composantes en polarisation

Même si nos connaissances sur les émissions d'avant-plan polarisées s'améliorent, pour la mesure du spectre de puissance du CMB en polarisation nous avons besoin de méthodes de séparation de composantes qui permettent de soustraire les émissions d'avant-plan des données. Nous avons développé une méthode, PolEMICA, basée sur un modèle MD-MC (multi détecteurs - multi composantes) et l'algorithme EM (Aumont & Macías-Pérez 2007). Cette technique permet le traitement simultané des données en température et polarisation, et donc donne accès aux spectres associés aux modes TT, TE, EE, BB, TB et EB. Cette méthode est aveugle et donc conduit à la fois à une reconstruction de tous les paramètres du modèle: spec-

tres angulaires polarisés et spectre électromagnétique des composantes et au bruit des détecteurs mais aussi à l'ajout aisé de connaissances *a priori* sur ces composantes. Nous avons testé avec succès notre méthode sur des données simulées de Planck. La figure suivante illustre la reconstruction des spectres de puissances angulaires polarisé du CMB.



Reconstruction des spectres de puissance en température et polarisation du CMB avec l'algorithme PolEMICA pour des simulations du satellite Planck.

Études de non-gaussianité sur Archeops et WMAP

Après soustraction des émissions d'avant-plan, il est nécessaire de vérifier que les résidus de celles-ci sont négligeables par rapport à l'émission du CMB. Nous avons ainsi travaillé sur la construction de tests de non-gaussianité. Plus particulièrement, nous avons travaillé sur le « smooth test of goodness of fit » de Rayner & Best ainsi que sur les tests basés sur des fonctionnelles de Minkowski. Nous avons appliqué ces tests aux données d'Archeops et de WMAP (Curto et al. 2007). Dans le cadre d'Archeops nous avons montré que les résidus d'émissions d'avant-plan étaient inférieurs à 8% (95% C.L.). En outre nous avons pu vérifier l'hypothèse d'une non-gaussianité de type primordiale. Ainsi nous avons obtenu avec WMAP et Archeops des contraintes sur le paramètre f_{NL} qui définit la nonlinéarité du potentiel gravitationnel primordial. Ces limites sont $f_{NL} = 200 \pm 600$ pour Archeops.

Effet d'un champ magnétique primordial sur la polarisation du CMB

Certains modèles inflationnaires prédisent l'existence d'un champ magnétique primordial qui pourrait être à l'origine des champs magnétiques que l'on observe aujourd'hui dans les Galaxies. Si un tel champ est présent dans la surface de dernière diffusion au moment de la formation du CMB il va provoquer la rotation de l'angle de polarisation de l'émission du CMB par rotation de Faraday. Nous avons développé un outil pour la simulation de cet effet dans les cartes qui sont ensuite utilisées pour l'extraction du spectre de puissance du CMB.

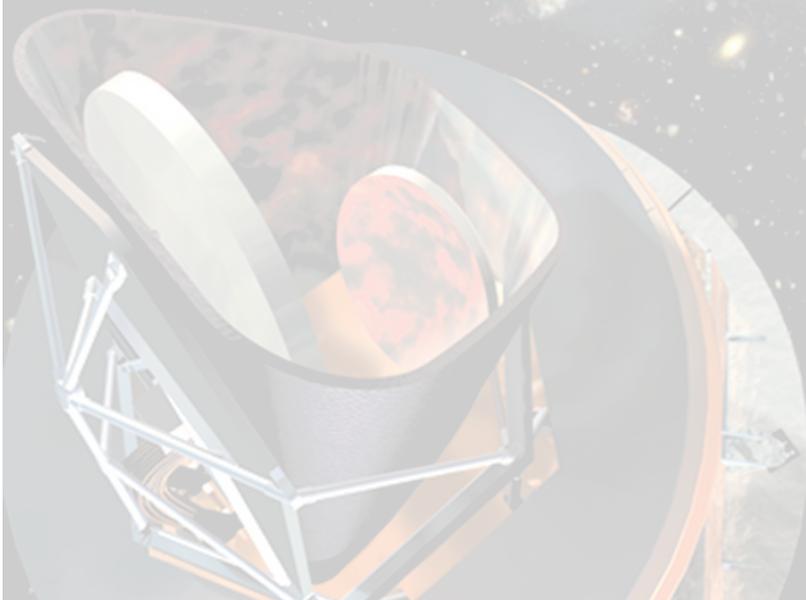
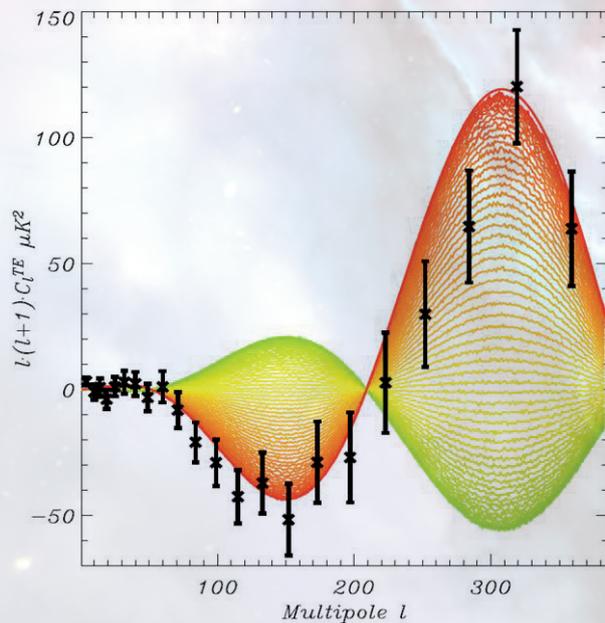


PLANCK

Looking back to the dawn of time
Un regard vers l'aube du temps

À cette fin nous avons formulé les hypothèses de couplage fort (recombinaison instantanée) et champ magnétique de faible intensité (rotation de Faraday de l'ordre du degré). À l'aide de cet outil et en utilisant les données de WMAP nous avons pu donner des contraintes sur la valeur de l'intensité du champ magnétique primordial actuellement inférieur à 15 nG (68 % CL). La figure ci-contre montre les variations du spectre de polarisation croisé TE en fonction de l'intensité du champ magnétique primordial comparé aux observations de WMAP en noir.

Spectre de puissance du CMB pour le mode TE mesuré par WMAP comparé aux modèles de champ magnétique primordial avec des intensités variables.



Rayons cosmiques d'ultra hautes énergies

Dy-Holm Koang, Corinne Bérat, Joël Chauvin, Didier Lebrun, François Montanet, Sylvain Moreggia (th), Kevin Payet (th), Colas Rivière (th), Anne Stutz

This LPSC research group in ultra high energy cosmic rays (UHECR) is involved in two experiments. The first one is taking place in the Pierre Auger south observatory in the Argentinian pampa. It is dedicated to the study of the atmospheric air showers produced by UHECR with fluorescence telescopes and particle detectors. The second one is the Codalema experiment installed at Nançay aiming to evaluate the capability of detecting UHECR with radio antennas.

The participation in the Auger project involves the study of neutrinos induced showers, the simulation of the surface detector water tanks, the maintenance of the PMTs settled on the tanks, and the online monitoring of the experiment. R&D works are also undertaken for the future northern hemisphere observatory.

In Codalema, the group is responsible for the particle detectors and is involved in the analysis of signals produced by the EAS and detected simultaneously by the antennas and by the particle detectors, as well as in the simulation of the radio signals. Beside this, the group takes part in R@Auger, to perform the detection of UHECR with antennas at the AUGER site, with the benefit of the Auger surface detector.

Études des RCUHE dans AUGER et CODALEMA

Après avoir terminé fin 2004 une étude de faisabilité de la mission EUSO, projet pionnier de détection depuis l'espace des rayons cosmiques d'ultra haute énergie (RCUHE), le groupe s'est engagé dans deux expériences au sol sur la même thématique: AUGER et CODALEMA. L'intégration officielle de l'équipe dans la collaboration AUGER date de mars 2006 après la signature d'un « Memorandum Of Understanding » entre LPSC/IN2P3 et la collaboration; le projet CODALEMA est soutenu par l'ANR pour la période 2006-2008.

L'Observatoire Pierre Auger est actuellement le plus grand détecteur de rayons cosmiques en fonctionnement. Situé à Malargüe en Argentine, il utilise conjointement deux techniques de détection (mode hybride) des gerbes atmosphériques issues des interactions des rayons cosmiques avec l'atmosphère et doit apporter des réponses aux énigmes actuelles des RCUHE.



Timbre de 0,75 peso argentin émis en l'honneur de l'Observatoire Pierre Auger.

CODALEMA est une étude multidisciplinaire du potentiel de la radiodétection impulsionnelle aussi bien pour les rayons cosmiques que pour la radioastronomie et la physique de l'atmosphère. Le dispositif expérimental pour l'étude des rayons cosmiques, installé à l'observa-

toire de Nançay est formé d'un réseau de particules de surface et d'un réseau d'antennes dipolaires. Le groupe participe à R@AUGER, projet de R&D: un petit réseau d'antennes autonomes (du type de celles utilisées pour CODALEMA) est déployé sur le site d'AUGER avec l'objectif d'observer des coïncidences avec les événements d'AUGER.

L'observatoire Pierre Auger

Le site sud de l'observatoire Pierre Auger, actuellement en phase finale de déploiement, est constitué de 1600 détecteurs Cherenkov répartis sur 3000 km² dans la pampa argentine et de quatre observatoires de fluorescence. L'Observatoire doit fonctionner pendant une vingtaine d'années, mais la collaboration AUGER envisage déjà la construction d'un réseau plus important dans l'hémisphère nord (Colorado) afin de parfaire ses mesures, c'est le projet AUGER-Nord.

L'analyse des événements observés a déjà produit des résultats fondamentaux. Ainsi l'excès du nombre d'événements détectés au-delà du seuil en énergie dit GZK (40 EeV) annoncé par l'expérience AGASA n'a pas été confirmé et l'explication de l'origine des RCUHE semble plutôt être astrophysique et extragalactique. De plus, les 27 événements de plus grande énergie (supérieure à 60 EeV) ne proviennent pas de façon égale de toutes les directions du ciel et la plupart d'entre eux pointent vers les positions des noyaux actifs de galaxies les plus proches, à moins de quelques centaines de millions d'années-lumière de nous (figure 1). Ces résultats sont le point de départ d'une nouvelle astronomie: celle des rayons cosmiques de haute énergie.

L'implication du LPSC concerne essentiellement le réseau de détecteurs de surface. Celui-ci échantillonne les particules de la gerbe arrivant au sol grâce à des détecteurs Cherenkov cylindriques espacés de 1500 m chacun. Ces particules sont essentiellement des gammas, électrons et muons avec des énergies en deçà de 10 MeV pour les gammas et les électrons et autour d'1 GeV pour les muons. Chaque cuve (1,2 m de haut

et 3,6 m de diamètre) est remplie d'eau ultra pure contenue dans une enveloppe en tyvek®. La lumière Cherenkov est vue par trois photomultiplicateurs (PMs – Photonis XP 1805) de 9 pouces placés sur le haut de la cuve. Les signaux des PMs sont numérisés par des convertisseurs rapides (40 MHz) et normalisés au signal que fournirait un muon vertical au centre de la cuve (VEM). Le signal des différentes cuves ayant déclenché au passage d'une gerbe est alors utilisé pour estimer l'énergie de la particule primaire à partir de la densité de signal à 1000 m du cœur de la gerbe. L'information sur la nature de la particule peut être déduite de la forme du signal.

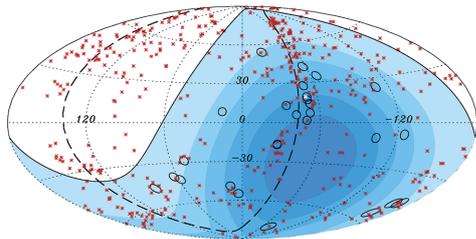


Figure 1 : Représentation de la sphère céleste en coordonnées galactiques (projection Aitoff) montrant les directions d'arrivée des 27 rayons cosmiques les plus énergétiques détectés par Auger. Les énergies sont supérieures à 57.10^{16} eV. Les directions d'arrivée sont représentées par des cercles de rayon $3,1^\circ$ et la position de 472 AGNs situées à moins de 75 megaparsecs par des étoiles rouges. La région bleue correspond à la zone d'observation d'Auger et la zone plus foncée indique une exposition plus grande. Le plan supergalactique est indiqué par une courbe en pointillé. Ce plan correspond à une zone dans laquelle il y a une concentration de galaxies proches.

Le groupe est impliqué dans l'analyse des données, notamment dans la recherche parmi les gerbes très inclinées de celles éventuellement issues de la désintégration de neutrino tau. Cette analyse nécessite en parallèle un important travail de simulation, que ce soit celle de l'interaction du neutrino, de la gerbe induite par le tau ou de la réponse des cuves aux différentes particules de la gerbe. Le groupe s'est donc impliqué dans ces différentes étapes de la simulation. D'un point de vue technique le groupe participe au contrôle en ligne des détecteurs de surface et à la maintenance de l'électronique des détecteurs de surface du site sud. Il contribue également aux études de R&D pour le site nord, en particulier à l'élaboration d'un nouveau module optique.

Recherche de neutrino tau

L'Observatoire Pierre Auger a la possibilité de détecter des neutrinos de ultra haute énergie. Cette détection est possible de deux manières différentes : soit par l'étude de gerbes de neutrinos descendantes, soit par la détection de gerbes de taus, induites par l'interaction de neutrinos tau dans la croûte terrestre, ou dans les montagnes environnantes, peu avant la surface. Dans ce cas, le neutrino est détecté à travers le tau associé.

De plus, même si le tau est créé trop loin de la surface pour pouvoir sortir de la Terre, sa désintégration en-

traîne la création d'un nouveau neutrino. C'est ce qu'on appelle la régénération. Et un tel neutrino « régénéré » peut à son tour créer un tau qui a une probabilité non nulle d'être détecté par le dispositif expérimental. En théorie, la probabilité de détection pourrait être augmentée de manière non négligeable par de tels événements issus d'une ou plusieurs régénérations.

Nous avons développé une nouvelle simulation de la propagation des neutrinos dans la Terre pour pouvoir quantifier le potentiel d'une telle méthode de détection. La simulation implique la description précise de la propagation des neutrinos, par la connaissance des sections efficaces courant chargé et courant neutre, ainsi que des distributions caractérisant la perte d'énergie lors de l'interaction, et de la propagation des taus et des neutrinos dans la matière. Nous nous sommes basés sur les travaux des références [1,2], et des paramétrages des fonctions de distribution de partons CTEQ6 [3].

Ce travail a entre autre permis la validation d'autres simulations développées dans la collaboration, dont les résultats ont contribué à la réalisation d'un papier à paraître au nom de la collaboration [4]. Ce travail a également donné lieu à une note interne. La simulation a permis par ailleurs une étude de l'importance de la régénération dans la propagation.

Dans ce cadre, nous avons entamé une étude de la polarisation du tau produit lors des interactions des neutrinos tau dans la roche. L'incertitude sur celle-ci, absente pour le moment de l'analyse, est considérée comme la cause la plus importante d'erreurs systématiques pour le calcul de l'acceptance du détecteur aux gerbes de taus. Cette étude permettrait donc une réduction de l'erreur systématique sur l'acceptance et une amélioration significative de la limite sur les flux de neutrinos tau.

Simulation de la réponse des cuves du réseau de surface

Les analyses de données sont basées sur de nombreuses études issues des simulations, c'est pourquoi celles-ci doivent être fiables. L'équipe du LPSC s'est investie dans un maillon essentiel de cette chaîne de simulation à savoir la réponse des cuves aux différentes particules de la gerbe de la production de lumière jusqu'à la numérisation du signal.

La simulation des détecteurs Cherenkov à eau du réseau est basée sur Geant4. Afin de simuler correctement la réponse des cuves il est nécessaire de prendre en compte de manière la plus réaliste possible les différents paramètres tels que la géométrie des cuves et des photomultiplicateurs, la composition des matériaux et les propriétés optiques des matériaux impliqués dans le transfert des photons de l'eau jusqu'à la photocathode des PMs. Certains paramètres ne sont pas parfaitement connus mais peuvent être ajustés afin de reproduire les caractéristiques du signal. C'est le cas par exemple pour la longueur d'atténuation de l'eau et la réflectivité du tyvek® qui ont une influence directe

sur la constante de décroissance du signal induit par un muon vertical.

Afin de valider les simulations, différentes comparaisons entre les données expérimentales et les simulations ont été effectuées [5]. Il a été montré grâce à la simulation et au résultat d'une expérience faisant varier le niveau d'eau dans une cuve qu'il était possible de distinguer entre différents couples de valeurs longueur d'atténuation de l'eau et réflectivité du tyvek® donnant la même constante de temps pour le VEM (figure 2). En effet en faisant varier le niveau d'eau dans la cuve on change l'importance relative du tyvek® et de l'eau sur la collection de lumière.

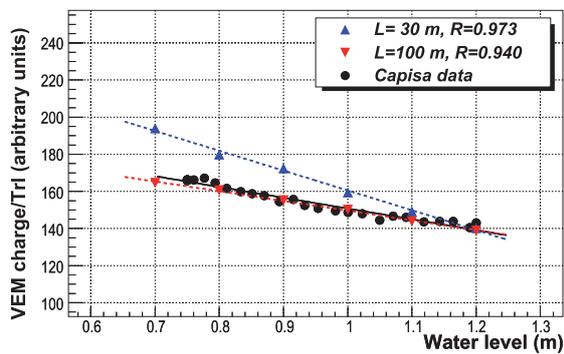


Figure 2 : Signal observé lors du passage d'un muon vertical dans une cuve du réseau de surface en fonction de la hauteur d'eau de la cuve. Le signal est normalisé à la hauteur d'eau. En bleu et rouge les simulations pour 2 couples de valeurs longueur d'atténuation de l'eau et réflectivité du tyvek®.

Les réponses à des muons d'inclinaisons différentes ont été obtenues à Orsay avec une cuve équipée d'un hodoscope à muon. Il a été montré que lorsque l'angle zénithal du muon augmente, la charge collectée sur les PMs n'est pas tout à fait proportionnelle à la longueur du parcours du muon dans la cuve et cette déviation par rapport à la linéarité a bien été reproduite par la simulation. Le signal d'étalonnage en ligne a lui aussi été reproduit de manière satisfaisante. C'est un mélange d'électrons, de gammas et de muons de différentes directions et énergies à partir duquel on déduit la charge d'un VEM.

Contrôle en ligne des détecteurs de surface

L'observatoire Pierre Auger doit fonctionner en continu pendant plusieurs années. Un outil de contrôle en ligne [6] a été développé pour aider l'équipe chargée de surveiller le bon fonctionnement de l'ensemble des détecteurs du site, ainsi que celui du dispositif d'acquisition des données.

Pour contrôler l'ensemble du réseau de détecteurs au sol, différents capteurs sont installés dans chaque cuve. La température est mesurée sur chaque base de photomultiplicateurs, sur la carte électronique et sur chaque batterie. La tension et le courant alimentant chaque photomultiplicateur sont également réguliè-

ment mesurés ainsi que la tension des panneaux solaires, celle des batteries, et leur état de charge.

L'étalonnage des cuves est effectué en ligne chaque minute. Pour vérifier leur comportement, plusieurs valeurs sont calculées localement dont la valeur des piédestaux, le pic et la charge correspondant au signal d'un muon vertical et le rapport entre les signaux de dynode et d'anode. Ces informations qui servent à l'étalonnage de la cuve sont envoyées toutes les 6 minutes au système d'acquisition central, et stockées dans une base de données appropriée (basée sur MySQL). Celle-ci est ensuite interrogée pour contrôler si les valeurs ne sont pas révélatrices d'un dysfonctionnement de l'un des éléments. L'interface avec la base de données est un serveur web (Apache), et les outils servant à la gestion du site web sont principalement développés via les langages PHP, CSS et Java.

Des alarmes, qui préviennent si des anomalies de fonctionnement sont détectées, sont entrées dans une table de la base de données. L'interface web vérifie régulièrement s'il y a de nouvelles entrées dans cette table d'alarmes et le signale sur la page web. Le « shifter » est supposé agir en conséquence, suivant les consignes d'action indiquées.

Le groupe du LPSC s'est impliqué dans le développement du code (C++) qui interroge la base de données, vérifie les valeurs et la cohérence des différents paramètres stockés en appliquant des critères définis préalablement par les experts des détecteurs, et qui au final permet de générer les alarmes si les photomultiplicateurs ou les stations du réseau présentent des anomalies risquant de perturber l'acquisition des données et leur qualité. Le groupe participe aussi au développement des pages web associées à la gestion et à la présentation des alarmes existantes (figure 3) et à la responsabilité de l'authentification des utilisateurs du site web et de la gestion de leurs préférences.

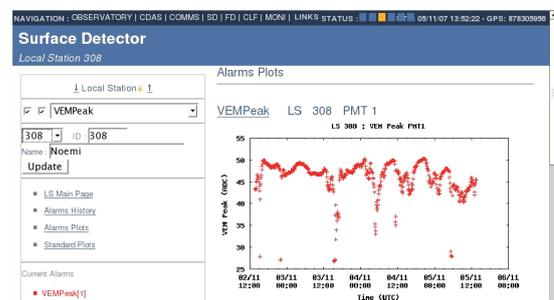


Figure 3 : Copie d'écran de l'interface web présentant les alarmes du réseau de surface pour le contrôle en ligne.

Maintenance de l'électronique du réseau de surface

L'étude des données servant à l'étalonnage des détecteurs de surface depuis leur mise en route a permis de mettre en évidence des pannes systématiques sur certaines voies des PMs. Ces pannes peuvent être ré-

parées, mais dans le but d'éviter les interventions fréquentes et difficiles sur le terrain il a été jugé nécessaire de déterminer la cause des pannes afin d'y remédier. Le groupe s'est donc impliqué dans la réalisation d'un banc de test afin de tester les PMs défectueux et/ou leur électronique associée. Un montage mécanique approprié permet de placer le PM, son électronique et une source de lumière fournie par le dépôt des muons cosmiques dans un plastique scintillant NE102, dans une étuve afin de reproduire les conditions climatiques de Malargüe. Un système d'acquisition permet d'enregistrer les signaux issus des photomultiplicateurs, et différentes sondes assurent le contrôle de la température et de l'hygrométrie au niveau du PM mais aussi celui des tensions et courants des différents points d'alimentation de la chaîne du PM (courant anodique, tension générée, tensions au niveau des dynodes...)

Les études menées sur ce banc de test ont permis d'identifier les causes d'un certain nombre de dérèglements: mauvais contacts au niveau des grilles et des dynodes des PMs, mauvais fonctionnement du convertisseur DCDC et rôle de la condensation.

R&D pour le site nord

Extension de la dynamique

L'Observatoire Pierre Auger prévoit d'équiper la surface du site nord, plus grande que celle du site sud, avec des cuves sensiblement identiques mais ne disposant que d'un seul PM. Actuellement une fraction des événements mesurés dans le site sud est affectée de signaux saturés. La saturation apparaît lorsque la gerbe cosmique passe à proximité d'un détecteur de surface (~500 m pour une gerbe de quelques 10^{19} eV). Pour permettre la mesure dans de meilleures conditions de l'énergie des gerbes initiées par des particules au-delà de 10^{20} eV, une augmentation de la dynamique d'un facteur 100 a été estimée.

Une des deux approches envisagées étudiée au LPSC est l'utilisation d'un photodétecteur supplémentaire. Le détecteur de photon qui doit compléter le photomultiplicateur principal doit avoir des caractéristiques proches de celui-ci (faible variation du gain en température, même réponse en longueur d'onde...). Une solution simple pour cette extension est l'utilisation d'un PM ayant une surface de collection 100 fois moindre mais dont la photocathode et de système de dynodes sont similaires à celui du PM principal. Ce type de PM existe aussi bien chez Photonis que Hamamatsu, il peut être doté de la même électronique et de la même haute tension que le PM principal. Les études portent sur la réponse des PM, l'optique d'entrée, le montage mécanique ainsi que sur la méthode d'inter-étalonnage entre le PM principal et le petit PM supplémentaire.

Enceinte étanche et Module-senseur

Les détecteurs de surface d'Auger doivent fonctionner en continu. Les cuves étant exposées en plein air et en l'absence d'un système coûteux de régulation, les

photomultiplicateurs et l'électronique associée sont soumis à des variations climatiques importantes (0 à 50°C, humidité) qui pourraient être accentuées sur le site nord, prévu dans le Colorado. En plus d'une isolation thermique renforcée, il a été préconisé pour le site nord une enceinte étanche qui contiendrait la base du PM et l'électronique associée. Par ailleurs, l'ensemble se présentera sous forme d'un module-senseur compact pour faciliter le travail de réparation et de contrôle.

Deux systèmes sont à l'étude, tous deux basés sur un corps conique en plastique moulé de forme proche du capot utilisé actuellement dans le sud pour mettre le PM à l'abri de la lumière. Le premier a une fenêtre d'entrée en plexiglas épousant la surface de la photocathode. Le deuxième laisse libre cette surface, mais comporte un double joint torique au niveau du col du PM. Tous les deux seront fermés d'un fond métallique sur lequel sera fixé l'électronique. Pour minimiser les connecteurs, les passages se feront préférentiellement à l'aide du système presse-étoupe. Deux prototypes sont en cours de réalisation pour des tests avec PM et l'électronique dans une enceinte climatique ainsi que des études de la connectique.

Expérience CODALEMA à l'Observatoire de Radioastronomie de Nancay

L'existence d'ondes radio associées au développement des grandes gerbes atmosphériques induites par les rayons cosmiques d'ultra haute énergie a été prouvée dans les années 60. Toutefois ce n'est que récemment qu'il est devenu envisageable de construire de très grands réseaux d'antennes décimétriques, notamment grâce aux progrès réalisés en électronique numérique. L'objectif recherché est d'obtenir les caractéristiques du rayon cosmique primaire (direction, énergie, nature) avec une précision comparable à celle des techniques de fluorescence mais avec un cycle utile de 100 %.

Deux grandes R&D sont actuellement en cours: LOPES à Karlsruhe et CODALEMA à l'Observatoire de Nancay. Dans ces deux expériences, le réseau d'antennes est associé à un réseau de détecteurs de particules (scintillateurs plastiques) afin de valider les conclusions « radio » par une technique plus éprouvée.

En 2004, l'expérience initiée par SUBATECH et le LAL utilisait le réseau décimétrique de Nancay (antennes log-périodiques) et disposait d'un réseau « particules » sommaire ne permettant pas de reconstruire les paramètres de base des événements (position, énergie...). Le LPSC a proposé en 2004 le déploiement d'un réseau de 13 stations: scintillateurs de $80 \times 80 \times 4$ cm³ vu par deux photomultiplicateurs polarisés avec deux tensions différentes pour couvrir une large dynamique de signaux: de 0,3 à près de 3000 VEM (Vertical Equivalent Muon). En réalité, c'est tout le

dispositif CODALEMA qui a été refait, effort soutenu financièrement par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) dans le cadre d'un programme interdisciplinaire regroupant physiciens des particules, astrophysiciens et physiciens de l'atmosphère.

Actuellement, l'expérience CODALEMA est pleinement opérationnelle. Elle regroupe 16 antennes décimétriques (SUBATECH), 13 détecteurs de particules (LPSC), une électronique de décision (LPSC) et une acquisition (SUBATECH, LAL et LPSC) entièrement nouvelles. Les antennes décimétriques sont des dipôles courts (60 cm) actifs avec un gain isotrope et une transmission à peu près constante dans le domaine de fréquence choisi (25-80 MHz). Pour le moment, les antennes forment une croix de 610 m par 487 m selon les axes est-ouest et nord-sud et ne mesurent que la polarisation est-ouest du champ. Les treize stations particules couvrent un carré de 240 m par 240 m. Le trigger de l'expérience est obtenu par la coïncidence des cinq stations centrales.

Le temps et la direction d'arrivée de la gerbe sont déterminés de façon indépendante par les deux réseaux, à partir du temps de réception des signaux antennes d'une part, et des scintillateurs d'autre part. Il a été montré sans ambiguïté que les gerbes de haute énergie, voisine de 10^{17} eV et au-delà, conduisent non seulement à une détermination identique des plans « particules » et « antennes » mais correspondent aussi à des multiplicités quasi maximales pour les deux réseaux. Le seuil d'un scintillateur est fixé à 15 mV et celui d'une antenne à 5 fois la valeur du bruit (quelques mV). D'autre part, le signal des antennes les plus lointaines arrivent avant les signaux particules, ce qui exclut l'hypothèse d'une influence d'un réseau sur l'autre.

Le LPSC a la responsabilité entière du réseau « particules » : conception, réalisation des détecteurs et de l'électronique associée, logiciels d'acquisition, d'analyse des données (reconstruction de la gerbe, estimateur d'énergie CIC...) et de simulations. D'autre part, un effort important est fourni dans le domaine de la radio : analyse des données antennes, simulations de l'émission radio (ReAIRES, calculs analytiques ou semi analytiques), simulations des caractéristiques des antennes avec le code HFSS, etc. Les résultats les plus importants obtenus pour l'instant sont d'une part la détermination du seuil de détection radio ($\sim 10^{17}$ eV), sachant qu'il existe un bruit irréductible (le bruit galactique), d'autre part la mise évidence d'une forte anisotropie de détection radio entre les événements arrivant du nord et ceux arrivant du sud. Cette anisotropie semble favoriser l'hypothèse que l'émission radio serait produite par rayonnement synchrotron des électrons et positrons dans le champ géomagnétique plutôt que par l'excès de charge e^+e^- . Le déploiement de nouvelles antennes, en particulier mesurant la composante nord-sud, et l'accumulation d'une statistique plus importante devrait permettre de comprendre comment extraire du signal radio les caractéristiques

du rayon cosmique primaire, et cela avant que le démonstrateur MAXIMA (voir paragraphe suivant) prévu vers 2012 sur le site d'AUGER soit opérationnel.

Détection Radio des rayons cosmiques à l'Observatoire Pierre Auger

Un programme de R&D sur la détection radio des rayons cosmiques à l'Observatoire Pierre Auger a été mis en place depuis le dernier trimestre 2006. La première phase du programme en 2007 et 2008 se propose d'étudier la faisabilité puis de caractériser le système de détection qui pourrait déboucher sur le déploiement d'un réseau d'antennes de 20 km² au cours d'une seconde phase en 2009. Ce démonstrateur radio devrait contribuer comme élément d'un ensemble de détection multi-hybride (i.e. conjointement avec un réseau au sol et un télescope de fluorescence), à l'étude des rayons cosmiques vers $E \sim 10^{18}$ eV. La première phase consiste en plusieurs études conjointes menées en parallèle sur différents concepts d'antennes et d'acquisition issus des expertises acquises en Europe par des équipes travaillant sur LOPES à Karlsruhe (D), LOFAR à Astron (NL), sur CODALEMA à Nançay (F), ainsi qu'une équipe jointe de Leeds et Ohio State University.

Forte de l'acquis obtenu à Nançay avec un réseau câblé déclenché par un réseau de scintillateurs, l'équipe de CODALEMA a voulu franchir une étape supplémentaire en proposant puis réalisant en 2007 l'installation d'un mini-réseau de 3 antennes dipôles équipées au sein de stations de mesure entièrement autonomes [8]. Pour son faible niveau d'interférences radio fréquences, le site du déploiement a été choisi à 1 km du Central Laser Facility proche du centre du réseau de l'Observatoire et à environ 40 km de Malargüe. Les stations (voir photo 1), installées dans des enclos de protection animale, sont réparties en triangle à une distance de 100 mètres autour d'une cuve Cherenkov qui a été aimablement rajoutée pour la circonstance par l'Observatoire. Cette cuve Cherenkov, elle-même située au centre d'un triangle du réseau normal, doit fournir une référence en temps pour la détection d'un rayon cosmique, mais aussi, par la diminution locale de la maille du réseau d'Auger, devrait permettre de baisser le seuil de déclenchement à 3 cuves du réseau.

La complète autonomie des stations est assurée au niveau énergétique, au niveau électronique par un trigger autosuffisant, et au niveau de la transmission de données sans fil. L'alimentation électrique est fournie par 2 panneaux solaires de 85 W alimentant de manière régulée deux batteries de 12 V en série d'une capacité de 100 Ah [9]. L'électronique, développée par Subatech, consiste à déclencher un oscilloscope numérique fonctionnant à 200 Ms/s acquérant le signal pleine bande provenant des antennes, par un circuit trigger à seuil installé sur une voie filtrée analogiquement. La gestion des données, ainsi que l'information temps donnée par le système GPS, est assurée par une

carte unifiée (UB) développée pour le détecteur au sol d'Auger. Les données sont transférées par WiFi jusqu'à un PC central installé à 1 km sur le bâtiment du CLF. La liaison radio du CLF avec le système d'acquisition central de l'Observatoire permet le transfert des données ainsi qu'un contrôle à distance des stations.



Photo 1 : Station autonome permettant le déclenchement et l'acquisition de données d'un réseau d'antennes radio sur le site d'Auger.

Au cours de l'année 2007, plusieurs interventions ont été nécessaires sur le site pour des opérations de débogage rendues délicates par l'éloignement, l'isolement et la rudesse du climat local.

Le cycle utile de fonctionnement a été relativement réduit par l'apparition de différentes pannes imprévisibles dont les réparations n'ont pu être réalisées dans des délais aussi brefs que souhaités. Certains problèmes liés au fonctionnement et au rayonnement des stations elles-mêmes au voisinage d'antennes sensibles ont été résolus. Ces solutions s'avéreront sûrement précieuses au moment d'envisager un grand réseau. Toutefois, à l'heure où sont rédigées ces lignes, les stations fonctionnent depuis plus d'un mois sans discontinuer. Les données révèlent cependant un problème de décalage en temps GPS des stations entre elles ainsi qu'avec la cuve centrale, rendant délicate l'observation de coïncidences entre antennes. Une solution est en cours d'étude, et c'est avec une confiance raisonnable que la poursuite du programme ambitieux de réseau d'antennes autonomes est envisagée pour 2008. D'autres équipes explorent des techniques « antennes » différentes, l'objectif commun final étant de construire à l'horizon 2012 un démonstrateur européen de 20 km² (projet MAXIMA) avec la meilleure technologie « antenne » possible.

- 1 S.I. Duta, M.H. Reno, I. Sarcevic et D. Seckel, Phys. Rev. D63, 094020
- 2 R. Gandhi, C. Quigg, M.H. Reno et I. Sarcevic, Phys. Rev. D58, 093009 (1998)
- 3 J. Pumplin, D.R. Stump, J. Huston, H.L. Lai, P. Nadolsky, W.K. Tung, hep-ph/0201195
- 4 "Limit on the diffuse flux of ultra-high energy tau neutrinos with the surface detector of the Pierre Auger Observatory", The Pierre Auger collaboration, en préparation.
- 5 P. Ghia et al., Testing the surface detector simulation for the Pierre Auger Observatory, 30th International Cosmic Ray Conference, Merida, 2007
- 6 J. Rautenberg et al., Online Monitoring of the Pierre Auger Observatory, 30th International Cosmic Ray Conference, Merida, 2007
- 7 A.M. van den Berg for the Pierre Auger Collaboration. "Radio detection of high energy cosmic rays at the Pierre Auger Observatory", Proceeding of ICRC 2007, Merida, Mexico
- 8 A. Bellétoile, Thèse de l'Université de Nantes, Octobre 2007
- 9 C. Bernard, J. Chauvin, D. Lebrun, J.-F. Muraz, P. Stassi : « Stations solaires pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger ». Rapport Technique SDI/LPSC AUG01B,2006