

2 Astroparticules, cosmologie & neutrinos

Au sein de cinq équipes réparties sur plusieurs projets, les chercheurs et personnels techniques du LPSC sont impliqués à la fois dans la conception de nouveaux instruments, l'analyse des données et leur interprétation, ainsi que les aspects théoriques liés à ces thématiques. Ces dernières recouvrent la physique de l'univers primordial, la nature de la matière noire et de l'énergie noire, les amas de galaxies, le rayonnement cosmique et la physique des neutrinos.

Un siècle après sa découverte, l'origine et la propagation du rayonnement cosmique (RC) d'origine galactique et extragalactique restent toujours mal comprises. L'expérience AMS-02, sur la station spatiale internationale depuis 2011, a déjà collecté plus de 100 milliards de rayons cosmiques galactiques du GeV au TeV. Les chercheurs du LPSC ont joué un rôle moteur dans l'analyse des noyaux de charge $Z=1$ à 8, mettant en évidence une cassure dans les spectres. Dans le cadre de l'interprétation de ces données et pour la recherche indirecte de matière noire (en particules chargées ou photons gamma), des outils largement utilisés par la communauté ont aussi été développés. Aux plus hautes énergies (au-delà de 10^{18} eV), le RC devient très rare et d'énormes surfaces de détection sont nécessaires. Ces rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (RCUHE) génèrent de grandes gerbes atmosphériques pouvant être détectées au sol et dans l'atmosphère. L'observatoire Pierre Auger alliant une surface de 3 000 km² à une détection hybride, a déjà permis des avancées considérables des connaissances sur les RCUHE. Les chercheurs du LPSC contribuent au contrôle en ligne des détecteurs de particules et ont complété une R&D de détection radio des gerbes. Ils participent, avec l'aide des services techniques, au projet AugerPrime d'amélioration de l'Observatoire avec un apport important dans la conception de la nouvelle électronique, et une contribution à l'assemblage de détecteurs à scintillation. Ils sont également impliqués dans la recherche de photons d'ultra haute énergie qui pourraient fournir des informations cruciales sur les sources de RCUHE.

Dans le domaine de l'astroparticule, le projet MIMAC s'intéresse à la détection directe et directionnelle de matière sombre. Le projet a pris de l'ampleur ces dernières années, avec l'établissement de nouvelles collaborations au niveau national et international suite à plusieurs avancées expérimentales. Un prototype de module bi-chambre fonctionne ainsi en continu depuis 2016 au laboratoire sous-terrain de Modane, ce qui a permis l'observation de traces 3D de la descendance du radon. L'équipe est impliquée dans l'expérience de détection directe non-directionnelle NEWS-G, en construction, grâce à son expertise acquise via le développement d'une ligne de « quenching » compacte COMIMAC. Ces développements instrumentaux ont également conduit à un projet de valorisation Mimac-FastN, sur la spectroscopie de neutrons rapides entre 10 keV et plusieurs dizaines de MeV.

Du côté de la cosmologie, l'année 2018 a vu la publication des résultats dits « Legacy » du satellite sur le CMB, marquant la fin de cette activité au LPSC. Faisant suite à la caméra prototype NIKA, basée sur les détecteurs KIDS, la caméra NIKA2 a été installée au télescope de 30 m de l'Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) fin 2015. Ces trois dernières années, les chercheurs du LPSC ont eu la responsabilité du « commissioning » de l'instrument, tout en étant leaders du « Grand programme » d'observation d'amas de galaxies en SZ. Toujours aux longueurs d'ondes millimétriques, les développements instrumentaux autour des KIDS ont permis le développement des récents projets KISS et CONCERTO, dans lesquels le LPSC est impliqué. La cosmologie observationnelle au LPSC se poursuit aussi aux longueurs d'onde du visible, avec le projet de télescope au sol LSST (première lumière prévue en 2021) qui vise, entre autres, à contraindre les propriétés de l'énergie noire : le LPSC est impliqué dans la construction (chargeur de filtre), l'étalonnage de la caméra et dans l'étude de différentes sondes cosmologiques de cet instrument (oscillations acoustiques de baryons et amas de galaxies). Plus récemment, le LPSC a rejoint le projet de satellite Euclid (lancement prévu pour 2022), fournissant une contribution instrumentale et autour de la science des amas de galaxies. Au-delà de ces projets observationnels, une activité de cosmologie théorique de gravité quantique à boucle est menée au LPSC, ouvrant la possibilité de mesurer des effets de physique « à l'échelle de Planck » dans le rayonnement fossile et/ou dans des trous noirs en rebond.

Enfin, le dernier grand thème de cette partie concerne la physique des neutrinos et en particulier la possible existence d'un neutrino stérile, existence qui aurait d'importantes conséquences en physique des particules et en cosmologie. Initiée en 2013, l'expérience STEREO vise à la recherche d'une telle particule auprès du réacteur de l'ILL. Après de fortes contributions pour la conception, la construction et l'intégration de l'expérience (en particulier sur le veto muon, l'électronique, et le contrôle en ligne de l'instrument), les chercheurs du LPSC ont désormais une forte implication dans l'analyse des données. Avec 185 jours de données accumulées, une part significative de l'espace des paramètres pour un 4^e neutrino a déjà été exclue. La prise de données et l'analyse se

poursuivent, avec en ligne de mire 4 cycles réacteurs prévus en 2019 et 2020, pour atteindre la sensibilité finale de l'expérience.

Le LPSC joue un rôle moteur dans de nombreux projets fascinants d'astroparticules, de cosmologie et de neutrinos. Les avancées sur la période 2016-2018 sont développées dans les pages suivantes.

2.1 Équipe AUGER

Équipe de recherche : membres permanents

C. Bérat, F. Montanet

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

J. Souchard (doctorant), M. Stolpovskiy (post-doctorant)

Personnels des services techniques

M. Chala, M. Heusch, P. Stassi, C. Thomassé (Service Détecteur & Instrumentation)

J-L. Bouly, J. Bouvier, J-P. Girard, É. Lagorio, N. Ponchant, J-P. Scordilis (Service électronique)

P. de Lamberterie (Ingénieur qualité)

F. Melot (Service Informatique)

The Pierre Auger Observatory, in Argentina, is the present flagship experiment studying ultra-high energy cosmic rays (UHECR). Our activities within the Pierre Auger Collaboration are described below. The first part is devoted to our contributions to the operation of the observatory. The second one concerns the analysis of a R&D project on microwave detection, and the search for UHE photons in the UHECR flux. The last part is focused on our participation to AugerPrime, the upgrade of Observatory.

2.1.1 Introduction

L'équipe de recherche Auger du LPSC fait partie de la collaboration internationale Pierre Auger qui a conçu, construit et exploite l'Observatoire éponyme, ensemble instrumental performant déployé sur 3000 km² dans la pampa argentine, détectant les rayons cosmiques sur plus de trois décades en énergie. Plus de 400 scientifiques de 16 pays différents collaborent pour déterminer l'origine et la nature de ces particules les plus énergétiques de l'Univers et comprendre comment elles atteignent des énergies aussi extrêmes, un million de fois supérieure à celle des protons accélérés au LHC. Quand ces rayons cosmiques entrent en collision avec les molécules de la haute atmosphère, ils créent une cascade de plus de 10 milliards de particules secondaires, appelée gerbe atmosphérique, qui peut s'étendre sur plus de 40 kilomètres carrés quand elle arrive au sol. C'est en observant ce phénomène au sol et lors de son développement dans l'atmosphère qu'on parvient à étudier la nature et l'origine de ces rayons cosmiques. Mais leur flux est de l'ordre de 1 par kilomètre carré et par an et cette extrême rareté impose à l'Observatoire son immense surface de détection.

L'Observatoire utilise conjointement les deux techniques de détection des gerbes atmosphériques qui ont déjà fait leurs preuves, alliant un détecteur de surface (SD) constitué de 1660 cuves à effet Cherenkov (WCD) échantillonnant les particules des gerbes arrivant au sol, et d'un détecteur de fluorescence (FD) comprenant 27 télescopes mesurant le développement longitudinal des gerbes. La vaste surface de collection et la stratégie de détection hybride de l'Observatoire ont permis des avancées considérables de nos connaissances des rayons cosmiques d'ultra haute énergie (RCUHE). Citons parmi les résultats les plus récents la preuve que les plus énergétiques viennent d'au-delà de notre galaxie, et l'indication d'anisotropies dans leurs directions d'arrivée. Pour améliorer les performances de l'Observatoire, la collaboration travaille sur le projet AugerPrime, dont un des volets les plus importants est la mise en œuvre de nouveaux détecteurs à scintillation.

Pendant les 3 dernières années, l'équipe a essentiellement poursuivi ses activités sur le contrôle en ligne du SD et a achevé l'activité de R&D sur la radio détection des gerbes dans les longueurs d'onde centimétriques ; elle s'est engagée dans la recherche de photons d'ultra haute énergie, et s'est investie davantage dans AugerPrime, puisqu'en complément des développements concernant la nouvelle électronique embarquée, dans laquelle elle a joué un rôle essentiel, l'équipe a pris en charge l'intégration de détecteurs à scintillation. Il est à noter aussi que chaque membre de l'équipe s'implique dans plusieurs activités de communication auprès des collégiens et lycéens, autour de la thématique du rayonnement cosmique et de l'Observatoire Pierre Auger.

2.1.2 Fonctionnement de l'observatoire Pierre Auger

Contrôle du réseau

L'équipe Auger a pris part, quasiment dès son entrée dans la collaboration Auger, au contrôle en ligne du SD. Le fonctionnement du réseau de détection peut être suivi via une interface web, permettant d'afficher les principaux paramètres des WCD (état du système d'alimentation solaire, paramètres des photomultiplicateurs, taux de déclenchement). Cette activité se poursuit, avec d'une part le suivi du fonctionnement du réseau et d'autre part le développement de nouvelles fonctionnalités. Les plus récents développements concernent plus directement la qualité des données acquises, le suivi des performances sur le long terme, et des contributions essentielles à la mise en place de périodes de « shifts » pour une surveillance partagée et permanente du SD.

Salle de contrôle à distance

Le fonctionnement des télescopes de fluorescence opérant les nuits sans lune et claires, doit être surveillé constamment, et nécessite donc la présence de « shifteurs » à l'Observatoire, chaque mois, pendant environ une vingtaine de nuits d'affilée. Depuis 2014, un système de remote shifts s'est mis en place dans la collaboration : à partir de salles de contrôle reproduisant celle existant à l'Observatoire, il est possible de contrôler et piloter à distance les détecteurs de fluorescence et les Lidars qui mesurent la transparence de l'atmosphère au-dessus de l'Observatoire. L'avantage majeur de la mise en œuvre de « shifts » à distance est de supprimer les coûts liés aux missions. De plus, le décalage horaire permet de limiter la part de travail nocturne des « shifteurs » sur le site de l'Observatoire. Le groupe Auger a installé au LPSC une telle salle qui est opérationnelle depuis le printemps 2017. L'équipe prend en charge chaque année des shifts à distance.



Contrôle commande à distance

AERA est un instrument dédié à l'étude de l'émission des ondes radio, dans la gamme des 30-80 MHz, par les gerbes atmosphériques induites par les rayons cosmiques. Le réseau constitué de 152 antennes occupe une surface de 17 km². Au LPSC nous avons développé une interface graphique de contrôle commande accessible depuis une interface Web. Cette interface a nécessité quelques actions de mise à jour et de maintenance, menées par un informaticien du LPSC.

2.1.3 Analyse de données

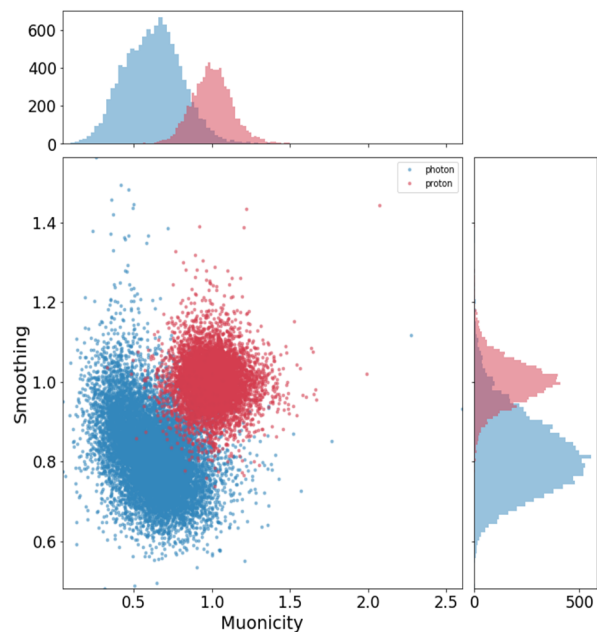
Détection radio des gerbes atmosphériques

L'équipe a poursuivi ses travaux de R&D de détection radio des gerbes atmosphériques à des fréquences de quelques GHz, dans le cadre du projet GIGAS financé par l'ANR. L'objectif était d'utiliser l'émission induite par le bremsstrahlung moléculaire (MBR) lors du passage de la gerbe dans l'atmosphère comme nouvelle observable pour une meilleure identification de la composante électromagnétique de la gerbe. Les détecteurs GIGAS étaient intégrés dans un sous-réseau du SD. Trois réseaux de capteurs ont été développés et installés, GIGAS-61 (~90 km²) utilisant comme capteurs des antennes cornet commerciales, puis GIGADuck-L (~7 km²) et GIGADuck-C (~7 km²) chacun avec 7 capteurs constitués d'antennes plus sensibles et d'une électronique à plus bas bruit. Nous avons démontré le bon fonctionnement des détecteurs installés par un étalonnage soigneux des paramètres utiles pour décrire leurs sensibilités, à savoir la surface effective, la température du système et la bande passante. La performance de ces détecteurs a été examinée en fonction de la simulation réaliste du processus MBR développée dans le cadre du projet. L'association avec la simulation complète du détecteur nous a permis de vérifier l'augmentation de la sensibilité obtenue avec les détecteurs GIGADuck. Une description complète du dispositif expérimental, de sa calibration, des modélisations informatiques associées et de nos méthodes d'analyse a été publiée. Le rayonnement MBR des grandes gerbes atmosphériques s'avère bien plus faible que ce que les publications faites avant 2012 avançaient. Malgré la grande sensibilité de nos capteurs aucun signal n'a pu être attribué de manière non ambiguë à ce mécanisme.

Recherche des photons d'ultra haute énergie

Les modèles astrophysiques de production des RCUHE prévoient des flux de neutrinos et de photons associés aux interactions des particules primaires dans les sources elles-mêmes ou lors de leur propagation. Si une composante, possiblement minoritaire, de protons existe au-delà de 50 EeV et qu'ils interagissent avec les photons du CMB ou de l'EBL, des pions chargés ou neutres sont produits : $p + \gamma_{bg} \rightarrow p + \pi^0$, $n + \pi^+$. La désintégration des pions chargés produit des neutrinos et celle des neutres des photons d'énergie autour de quelques EeV. Les neutrinos et les photons produits ainsi sont dits « cosmogéniques ». Leur flux dépend alors de la masse des RCUHE, car fortement supprimé dans le cas de noyaux lourds. La recherche de photons cosmogéniques dans le flux des RCUHE est utile pour mieux comprendre l'origine de la coupure spectrale à haute énergie. La preuve de la présence de tels photons signerait d'une part la présence de protons dans le flux aux énergies extrêmes et d'autre part l'effet GZK, apportant ainsi des informations cruciales pour interpréter les observations. Cela ouvrirait également la porte à une astronomie avec les photons UHE, car n'étant pas déviés par les champs magnétiques galactiques et extragalactiques il serait possible de pointer vers leurs sources.

Depuis 2016 nous avons débuté une activité d'analyse pour identifier des photons UHE. Les gerbes qu'ils produisent ont une composante muonique faible, et un développement plus tardif dans l'atmosphère comparé à celui de gerbes hadroniques de même énergie. La position du maximum de développement, mesuré par le FD, est donc une variable discriminante, utilisée dans l'analyse des événements hybrides mais elle est limitée par le relativement faible cycle utile du FD. Si on veut bénéficier de l'ensemble des données enregistrées par le SD, il faut sélectionner les observables permettant de distinguer les gerbes de photons de celles de hadrons. Après un travail concernant l'évaluation du bruit de fond irréductible dû aux gerbes hadroniques avec un π^0 dominant l'énergie de la 1^{ère} interaction, une analyse basée sur une observable discriminante élaborée à partir de la forme des signaux enregistrés par les WCD a été développée dans le cadre d'un travail postdoctoral. Le cœur de la méthode est de modéliser les formes des signaux produits dans les cuves par des gerbes, cette modélisation devant conduire à des résultats distinctifs entre les gerbes de photons et les gerbes de hadrons. L'objectif est d'appliquer le modèle élaboré aux signaux réels, et d'évaluer si le résultat est similaire au modèle attendu pour les photons. Testée sur les simulations Monte-Carlo, la méthode permet une réjection du fond hadronique de 97% avec une efficacité d'identification des photons de 50%. Une autre approche pour identifier les gerbes de photons qui est développée consiste à combiner des observables discriminantes dans une analyse multivariée. Ces observables sont construites en estimant la part de signal liée au passage de muons, et celle venant de la composante électromagnétique. Chaque observable présente des performances différentes et complémentaires dans l'espace des paramètres de la gerbe considérée. Ces variables sont ensuite utilisées dans une analyse multivariée conçue pour être évolutive. Cette étude constitue le cœur d'un travail de thèse actuellement menée au sein de l'équipe.



Distribution des événements protons (rouge) et photons (bleu) simulés, dans l'espace des observables.

2.1.4 Le projet AugerPrime

Le projet AugerPrime est destiné à améliorer les performances de l'Observatoire Pierre Auger. Son principal objectif est d'obtenir une meilleure identification de la nature des rayons cosmiques primaires, afin de progresser dans l'interprétation des résultats et de répondre aux questions encore ouvertes sur l'origine et la composition des rayons cosmiques aux plus hautes énergies. L'élément clé est une caractérisation de la composition de la

gerbe atmosphérique, qui sera sensiblement améliorée par l'ajout de scintillateurs (SSD) sur chaque WCD. En effet, ces détecteurs ont une réponse aux muons et aux électrons/positrons/photons différentes de celles des détecteurs Cherenkov. Pour traiter à la fois les signaux des WCD et ceux des SSD, une nouvelle électronique d'acquisition et de contrôle aux performances accrues est développée.

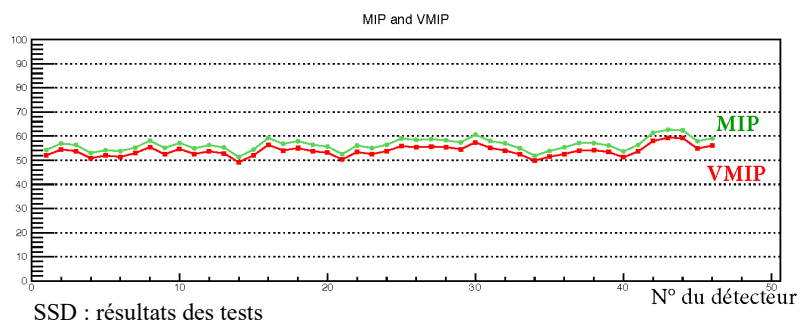
Grâce à la forte implication des services Électronique et Détecteurs et Instrumentation, l'équipe Auger du LPSC contribue de façon essentielle depuis plusieurs années au projet d'amélioration et de rénovation de l'électronique du SD, et s'implique également dans l'organisation et la mise en œuvre d'AugerPrime. La carte électronique unique du système a été conçue et intégrée au LPSC. Après les tests du premier prototype, deux nouvelles versions ont pu être produites et testées, pour



satisfaire les spécifications en termes de bruit et de consommation. La collaboration prévoit le déploiement d'environ 1400 SSD, ceux-ci étant assemblés dans 6 instituts européens. Le LPSC est l'un d'entre eux, et a pris en charge l'assemblage et les tests de 90 SSD. Chaque détecteur à scintillation est constitué de deux modules de scintillateur comprenant chacun 24 barres de plastique extrudé de 1,60 m de long et de 5 cm x 1 cm de section. La collection de lumière se fait par fibres optiques à décalage de longueur d'onde. Chaque barre est percée dans sa longueur de 2 trous dans lesquels doivent être insérées les fibres. Les extrémités de l'ensemble des fibres sont couplées optiquement à un unique photo-multiplieur. L'ensemble est assemblé

dans une boîte en aluminium (1,3m x 3,8 m). Après l'assemblage, les tests ont pour but de vérifier l'étanchéité à la lumière visible du détecteur et l'efficacité de collection de lumière en utilisant des muons du rayonnement cosmique. Après une phase d'approvisionnement et de stockage du matériel, nous

avons mis en place les procédures d'assemblage et de tests début 2018, et assemblé 45 modules entre juin et décembre 2018. Les 45 modules suivants seront assemblés au 1er semestre 2019. Les résultats des tests des modules déjà assemblés sont satisfaisants et démontrent que la procédure d'assemblage est maîtrisée.



2.1.5 Pour en savoir plus

Publications significatives sur la période :

The Pierre Auger Observatory: Contributions to the 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2017), 12-20 July 2017, Bexco, Busan, Korea <https://arxiv.org/abs/1708.06592>

Observation of a Large-scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays above 8×10^{18} eV The Pierre Auger Collaboration, Science 357 (2017) 1266-1270

GIGAS: a set of microwave sensor arrays to detect molecular bremsstrahlung radiation from extensive air shower, R. Gaior, I. Al Samarai, C. Bérat, et al. Nucl. Instr. Meth. A 888 (2018) 153-162

Thèse soutenue sur la période : aucune

1 thèse en cours (J. Souchard)

2.2 Équipe DARK

Équipe de recherche : membres permanents

A. Barrau, C. Combet, L. Derôme, D. Maurin, C. Renault, J.S. Ricol

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

M. Moneuse (Diplomarbeit), S. Aupetit, B. Bolliet, V. Bonnivard, A. Ghelfi, K. Martineau, F. Moulin (doctorants)

Personnels des services techniques

P. Boge, C. Geraci, H. Lucas Henriques, Y. Odièvre, E. Perbet, S. Roni, S. Roudier, F. Vezzu, L. Vivargent (service études et réalisations mécaniques)

M. Marton, M. Migliore (service détecteurs & instrumentation)

L. Eraud, E. Lagorio, N. Ponchant, JP. Scordilis, E. Tourba, C. Vescovi (service électronique) ;

G. Dargaux, F. Melot (service informatique) ;

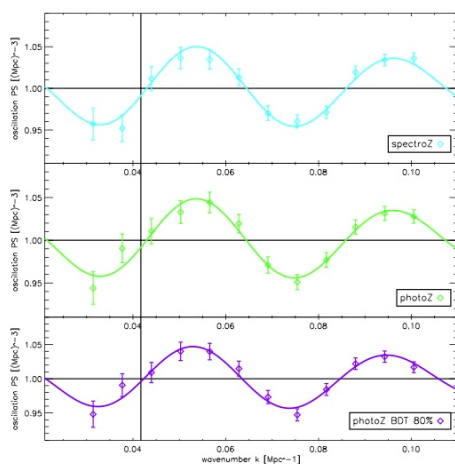
2.2.1 Introduction

L'équipe DARK s'est formée historiquement autour de trois thématiques permettant de définir une approche originale de la cosmologie à partir de plusieurs sondes. Ces projets ont été menés en parfaite cohérence depuis plus de 10 ans selon un calendrier progressif : l'étude du rayon cosmique de haute énergie et la phénoménologie associée à leur origine et leur propagation, effectuée en lien avec la détection indirecte de matière noire ; ces études ont été menées depuis les années 90 à travers une participation à des expériences « ballon » puis au sein de la collaboration AMS-02, expérience actuellement sise sur la station spatiale internationale ; le second thème concerne l'étude de l'inflation cosmologique et de la matière noire, dans le cadre du projet LSST, qui est né au LPSC dans les années 2000 ; plus récemment enfin, a été développée une activité théorique liée à la cosmologie et la gravité quantique.

2.2.2 Le projet LSST

Le projet LSST (Large Synoptic Survey Telescope) est un télescope en cours de construction au Chili qui permettra de dresser une carte 3D de l'Univers avec une profondeur et une précision inégalées. En ce qui concerne la cosmologie, il produira notamment un catalogue de plusieurs milliards de galaxies et de centaines de milliers d'amas de galaxies à partir de 2022. Ces données permettront une analyse sans précédent de notre univers. L'étude des oscillations acoustiques de baryons, ou de l'évolution du nombre d'amas de galaxies, par exemple, aideront à mieux comprendre l'énergie noire qui représente 69% de la densité d'énergie de l'Univers aujourd'hui. Il sera également possible d'obtenir des informations précieuses sur la matière noire qui représente 26% de la densité d'énergie.

Activités cosmologiques au sein de DESC



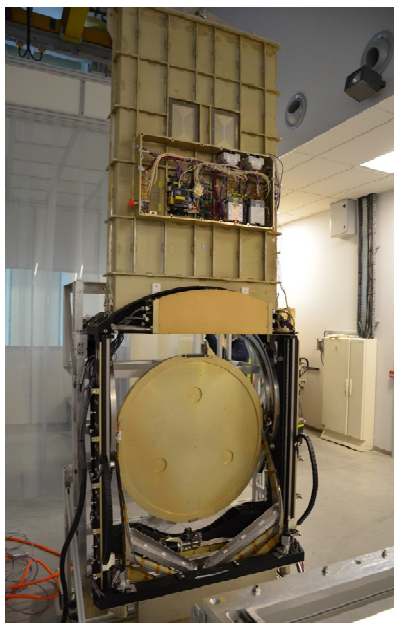
La science permise par LSST couvre un spectre très large de thématiques, qui sont étudiées dans le cadre de collaborations scientifiques indépendantes. Avec environ 900 membres, la Dark Energy Science Collaboration (DESC) est la plus grande de ces collaborations et s'intéresse à tout ce qui touche à l'exploitation cosmologique des données LSST. Sur la période 2016-2018, le groupe LSST du LPSC s'est impliqué dans DESC à plusieurs niveaux, et plus particulièrement dans le cadre de i) l'étude des structures à grande échelle (Large Scale Structures, LSS), ii) la reconstruction des redshifts photométriques (photo-z) et iii) l'utilisation cosmologique des amas de galaxies. Iv) la reconstruction de l'échelle des BAO : les approches ont permis de valider l'ensemble des éléments et ont produit des résultats très encourageants quant à l'efficacité de la reconstruction de l'échelle BAO jusqu'à de grandes distances.

Le spectre de puissance de matière - et plus particulièrement de l'échelle des oscillations acoustiques de baryons (BAO) -, mesuré via la distribution des galaxies dans l'univers, est une grandeur centrale de cosmologie observationnelle. Il s'agit en effet d'une sonde géométrique puissante de l'expansion de l'univers. Le groupe du LPSC a collaboré durant de nombreuses années avec l'équipe du LAL sur ce sujet. Sur la période 2016-2018, le cœur de l'activité a consisté à estimer l'impact des incertitudes liées aux photo-z, tels que LSST pourra les mesurer, sur la reconstruction du spectre de puissance (voir figure). Cette étude a été réalisée grâce à des simulations *end-to-end* développées en collaboration avec le LAL et à un code de reconstruction des photo-z développé au LPSC. Elle a permis de montrer que les photo-z ne seront un facteur limitant à la mesure de l'échelle BAO qu'à haut redshift : la variance cosmique domine le budget d'erreur à bas redshift et l'usage des photo-z aux redshifts intermédiaires ne dégrade que faiblement les résultats (par rapport à l'utilisation des redshifts d'entrée de la simulation).

Le comptage d'amas de galaxies (par unité de redshift et de masse) est une grandeur sensible à l'histoire de l'expansion de l'univers ainsi qu'à la croissance des structures. L'utilisation de cette sonde cosmologique requiert notamment la connaissance de la masse des amas, dont la mesure est étalonnée par l'effet de lentille faible (Weak lensing, WL). Nos activités en lien avec les amas de galaxies ont débuté en 2016, en collaboration avec l'équipe LSST nouvellement formée au LAPP. Nous nous sommes positionnés dans DESC autour de la ré-analyse de données sol existantes (par exemple CFTH) avec la chaîne d'analyse d'images développée par le projet LSST (le DM-stack). Nous avons également développé un outil de reconstruction de la masse des amas par WL à partir des catalogues produits par le DM-stack. En 2018, nous avons également rejoint le projet CLMassMod de DESC visant à produire un ensemble de codes permettant de tester les potentiels effets systématiques liés aux hypothèses de modélisation du WL. Ces activités sont en cours et se poursuivront au-delà de 2018.

Le système chargeur de filtres

Dans le cadre du système d'échangeur de filtres de la caméra, le LPSC a pris la responsabilité de la fourniture de tous les éléments nécessaires à la construction et au fonctionnement du système « Chargeur de filtres ». Les

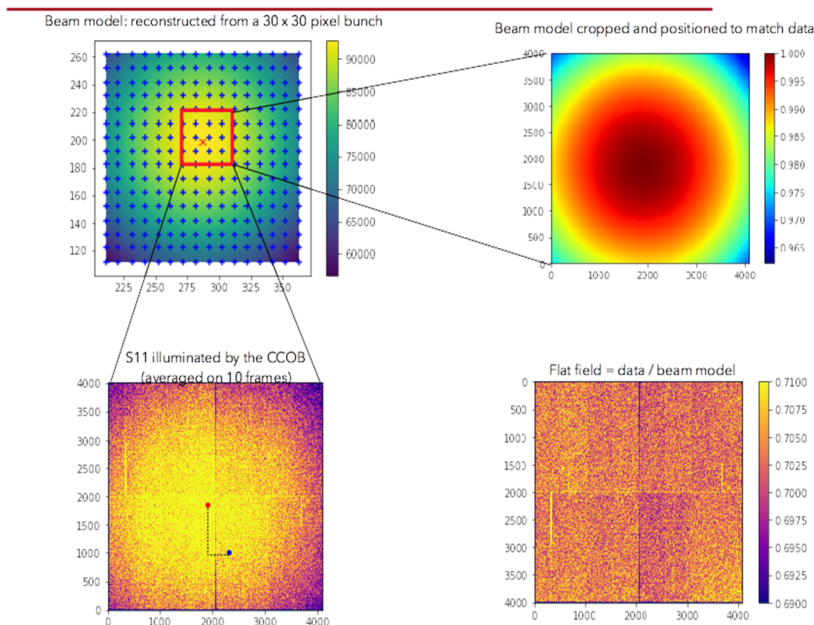


déplacements des filtres à l'intérieur du chargeur sont entièrement automatisés. La mise en œuvre de l'automate et l'environnement électronique nécessaire au pilotage est à la charge du LPSC. Par ailleurs la conception du chargeur doit répondre aux normes sismiques définies par le projet LSST. Le LPSC doit donc fournir un ensemble mécatronique documenté, testé et validé fonctionnant à partir de commandes de haut niveau. De plus il est requis que l'intérieur du chargeur de filtre respecte un niveau de propreté équivalent à une salle blanche de type ISO 6 : la construction du chargeur doit donc se faire dans des conditions de propreté rigoureuses. Le service d'études et de réalisations mécaniques et le service électronique sont ainsi fortement impliqués dans ce projet. En juin 2017, le chargeur de filtre a passé la *Manufacturing Design Review* avec succès. Un prototype complet du système changeur de filtres a été construit dans les laboratoires de l'IN2P3 impliqués et installé au LPNHE. Le prototype du chargeur de filtre construit au LPSC y a été installé et testé au premier semestre 2018. Tous les tests requis en mode autonome ont été réalisés. Le chargeur répond à toutes les spécifications relatives à ce mode.

La construction du premier modèle a commencé à l'automne 2018. Des éléments auxiliaires ont également été conçus au LPSC où ils sont en construction : l'enceinte de stockage qui accueillera les six filtres dans la salle blanche de LSST, le chariot de transport qui permettra de déplacer le chargeur depuis la salle blanche jusqu'à la zone sous pont du télescope qui sera livré en deux exemplaires, et le banc de maintenance pour inspecter les filtres par exemple.

Le banc d'étalonnage de la caméra

Le CCOB (Camera Calibration Optical Bench) se décompose en deux instruments qui vont fournir une mesure précise de la réponse du plan focal CCD et permettre la vérification du bon fonctionnement de la caméra. Dans un premier temps, lors de la phase d'intégration des CCDs dans le cryostat, l'ensemble du plan focal sera scanné avec un faisceau de diamètre comparable à la taille d'un CCD (~40 mm), en l'absence des optiques. Le faible pas de balayage va permettre l'obtention d'une carte de la réponse relative des pixels. C'est le CCOB_WB (pour Wide Beam).



Dans un second temps, le plan focal sera ponctuellement éclairé par un faisceau fin (~2 mm), de longueur d'onde et d'angle d'incidence variables. Cette dernière étape sera effectuée en présence des optiques de la caméra (filtres et lentilles) à SLAC puis, probablement, pour la maintenance au Chili. Cette seconde configuration a pour objectif, par exploitation de la position des images fantômes, l'évaluation du mésalignement des optiques et la mesure de la transmission des filtres. C'est le CCOB_NB (pour Narrow Beam).

Le CCOB-WB a été livré à SLAC en octobre 2017. Il a été

exhaustivement testé et se fonde sur un jeu de 6 LEDs correspondant aux 6 filtres de LSST. Des tests de validation de l'instrument développé au LPSC ont été menés depuis 2016 au LPNHE, puis à SLAC sur des CCDs scientifiques. Le LPSC est également chargé de l'analyse utilisant les données du CCOB afin d'obtenir la réponse relative de l'ensemble des pixels du plan focal. Cette analyse comporte deux étapes : la reconstruction du faisceau à 0.1% et l'utilisation de ce modèle de faisceau pour réaliser un *flat field* composite et mesurer la réponse relative des pixels. La réalité des CCD et des données prises à SLAC depuis la livraison nous ont contraints à repenser l'approche initialement envisagée pour la reconstruction du faisceau.

La conception du CCOB-NB a eu lieu en parallèle et les premiers éléments mis en place en 2018.

2.2.3 Rayonnement cosmique et matière noire

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

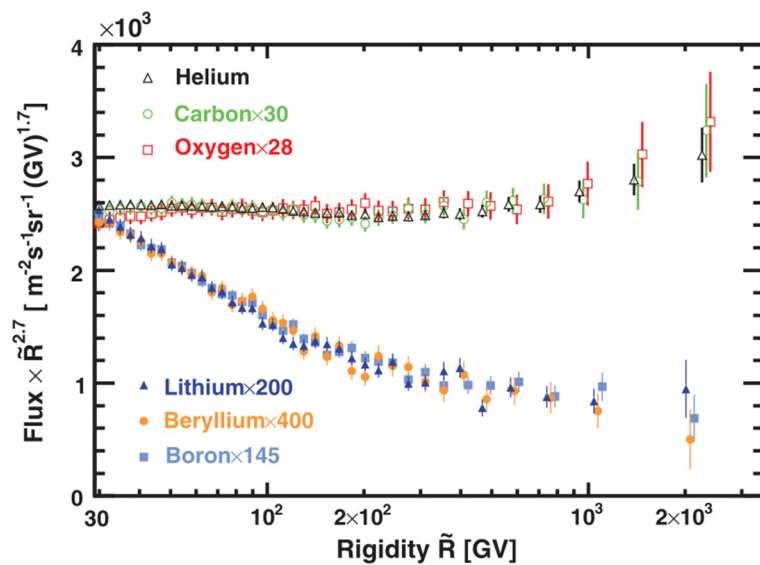
Bien qu'étudié depuis un siècle, le RCG reste un domaine scientifique de grande activité tant d'un point de vue expérimental que théorique. En effet, les questions de son origine et transport restent sans réponses claires. De plus, les composantes rares du RCG peuvent permettre de sonder de la nouvelle physique, via leur production lors de l'annihilation de la matière noire dans notre Galaxie.

Expérience AMS-02

L'expérience AMS a pour objectif l'étude du RCG dans le domaine d'énergie entre quelques centaines de MeV et la région du TeV. C'est un spectromètre, capable de mesurer avec précision l'énergie et d'identifier les particules du RCG, qui a été installé sur la station spatiale internationale (ISS) en mai 2011. L'expérience AMS permet

d'étudier avec une grande précision les particules chargées du RCG et de rechercher les composantes rares pouvant signer la présence de matière noire dans la Galaxie. Après près de 8 ans de prise de données, l'expérience AMS a déjà recueilli plus de 100 milliards d'événements. Les travaux de l'équipe s'articulent autour de plusieurs axes :

- Caractérisation du détecteur AMS à l'aide des données : les données recueillies permettent de mesurer et d'étudier précisément les performances de l'instrument, en particulier du RICH, imageur Cerenkov d'AMS développé au LPSC.
- Mesure des flux des noyaux du RCG. L'équipe participe activement à l'analyse des noyaux dans AMS. Elle a mis en place une chaîne d'analyse dédiée à la mesure des spectres et à l'estimation des systématiques, contribuant ainsi aux publications des flux des noyaux des charges $Z=1$ à $Z=8$. Ces études ont permis d'obtenir une mesure très précise des composantes primaires et secondaires essentielles pour comprendre les processus de propagation du RCG.
- Mesure des abondances isotopiques du RCG : grâce à la combinaison de la rigidité et de la vitesse fournie par le RICH, on peut mesurer la masse des noyaux, et donc estimer l'abondance isotopique des éléments du



RCG. En particulier le rapport $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ permet de mesurer le temps de confinement des noyaux dans la Galaxie. Une chaîne d'analyse basée sur des ajustements de patrons (templates) de masse a été mise en place pour la mesure de la composition isotopique des noyaux du RCG de $Z=2$ à $Z=5$.

L'équipe est aussi impliquée dans la collaboration CREAM qui a pour objectif la mesure du RCG entre 1 TeV et 103 TeV ce qui permet d'étendre le domaine d'énergie d'AMS. Après une série de vols en ballon stratosphériques, l'instrument ISS-CREAM a été installé sur la station spatiale internationale en août 2017.

Phénoménologie rayonnement cosmique et matière noire

La détection indirecte de matière noire consiste à rechercher des signaux issus de l'annihilation ou décroissance de celle-ci, en excès par rapport aux prédictions des processus astrophysiques standards. La difficulté principale de ces études est justement la maîtrise des fonds astrophysiques. Dans ce cadre, les données des expériences AMS-02 (particules chargées), Fermi-LAT, H.E.S.S. et bientôt CTA (en γ) ont conduit ces dernières années à des avancées majeures, nécessitant des révisions importantes des modèles utilisés.

L'équipe du LPSC est impliquée depuis de nombreuses années dans la caractérisation des fonds astrophysiques attendus, ainsi que dans l'évaluation des meilleures cibles pour la recherche de matière noire en γ . Elle a développé à cet effet plusieurs codes publics à destination de la communauté :

- le code USINE (<http://lpsc.in2p3.fr/usine>), pour la propagation du rayonnement cosmique chargé. Ce code, développé depuis les années 2000, a été rendu public pour la première fois en 2018. Avec ce code, il a été montré que la cassure observée dans le spectre B/C mesuré par AMS-02 trouvait son origine dans un changement de régime de diffusion (publié dans Phys. Rev. Lett.). Il a alors été possible de fournir le classement des sections efficaces nucléaires à mesurer prioritairement, afin de pouvoir tirer le meilleur parti de la précision des données AMS-02 (publié dans PRC, en tant que « Editors' Suggestion »).
- le code CLUMPY (<http://lpsc.in2p3.fr/clumpy>), pour le calcul des flux de g et n issus de la matière noire. Nous avons fourni en 2016, la troisième version publique de CLUMPY. Cette version inclut le signal issu de la distribution de matière noire extragalactique, ce qui nous a permis de réévaluer le signal γ attendu. Nous avons auparavant fait un calcul de sensibilité du futur observatoire CTA aux signaux issus de sous-halos de matière noire dans notre Galaxie (Hütten et al., 2016a,b,2018).
- La base de données du rayonnement cosmique (<http://lpsc.in2p3.fr/crdb>): cette base de données a été mise

en place en 2012, et elle est très utilisée par la communauté (plus de 200 000 requêtes depuis l'été 2014). Depuis 2016, le calcul du paramètre de modulation solaire en temps réel est proposé.

Carte du ciel (20°x10°) de l'émission gamma exotique produite par l'annihilation de matière noire, telle que prédite par CLUMPY.



2.2.4 Gravité modifiée : Loop Quantum Gravity

La recherche d'une théorie quantique de la gravitation est une nécessité conceptuelle. Au-delà du désir d'unification, il s'agit d'un impératif logique lié à l'existence de singularités et à la cohérence même de notre description du réel. Après un siècle d'efforts, aucune solution consensuelle ne s'est hélas détachée. La situation est vraisemblablement en train de changer grâce à la connexion qui se dessine enfin entre gravitation quantique et observation. C'est dans cette mouvance que se situe le travail mené au LPSC.

L'équipe a établi que, dans le cadre de la gravitation quantique à boucles appliquée l'Univers primordial, le temps était susceptible de disparaître dans les premiers instants. C'est un phénomène analogue à ce qui avait été postulé par Hartle et Hawking, mais qui intervient ici de façon naturelle et dynamique.

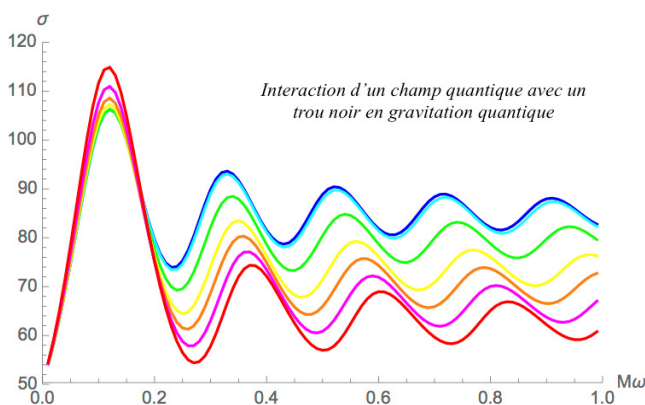
Au-delà de ce processus particulier, les spectres de puissance cosmologique primordiaux ont été calculés afin de contraindre le modèle grâce aux données disponibles (Planck) et de faire des prévisions pour les observations à venir (mode B du rayonnement fossile).

De plus, pour la première fois, l'effet des anisotropies (important dans ce contexte), du potentiel d'auto-interaction du contenu dominant de l'Univers et du choix des conditions initiales a été intégré afin d'étudier génériquement les caractéristiques inflationnaires. Il s'ensuit qu'à la différence de la situation usuelle, le modèle est très explicitement prédictif.

L'équipe a également ouvert l'étude des effets transplanckiens dans ce cadre en montrant la manière dont les prédictions sont sensibles aux relations de dispersions modifiées.

Enfin, en raffinant les approximations afin de se rapprocher de la théorie mère, il a été montré que le scénario du « rebond » pouvait se mêler à une phase stationnaire dont les premiers éléments phénoménologiques sont prometteurs.

En parallèle, des considérations analogues aux trous noirs ont été appliquées et des hypothèses novatrices (caractère local de l'évaporation) qui pourraient permettre de mettre en évidence des effets de gravitation quantique arbitrairement loin de la masse de Planck ont été émises et étudiées.



Enfin, il a également été montré que le scénario - ancré sur des considérations quantitatives - du rebond des trous noirs en trous blancs permettait d'expliquer un certain nombre d'observations astrophysiques encore débattues (sursauts radio rapides, excès de rayons gamma en provenance du centre galactique).

L'ensemble du travail mené se place dans l'émergence d'une phénoménologie de la gravitation quantique qui entend permettre un premier lien entre théorie et expérience sur cette question cruciale.

2.2.5 Pour en savoir plus

Principales publications sur la période considérée :

“Impact of photometric redshifts on the galaxy power spectrum and BAO scale in the LSST survey” R. Ansari et al., A&A, accepté pour publication, arXiv: 1902.03004

“Observation of the Identical Rigidity Dependence of He, C, and O Cosmic Rays at High Rigidities by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station” Phys. Rev. Lett. 119, 251101 (2017)

“Observational exclusion of a consistent loop quantum cosmology scenario” Phys.Rev. D93 124011 (2016)

“Consistency and observational consequences of Loop quantum cosmology”, Linda Linsefors, Université Joseph Fourier (2016)

“Détection indirecte de matière noire : des galaxies naines sphéroïdes en photons gamma à la recherche d’anti-hélium avec l’expérience AMS-02”, Vincent Bonnavard, Université Joseph Fourier (2016)

“Analyse des données de l’expérience AMS-02 pour la propagation du rayonnement cosmique dans la cavité solaire et la Galaxie”, Alexandre Ghelfi, Université Joseph Fourier (2016)

“Beyond Einstein’s theory of gravitation: some aspects of Loop quantum cosmology, black holes and the dark universe”, Boris Bolliet, Université Joseph Fourier (2017)

“Dark matter indirect detection in gamma-rays”, C. Combet, Habilitation à diriger les recherches, Université Grenoble Alpes (2018)

Thèses soutenues sur la période considérée :

1. Linsefors - “ *Consistency and observational consequences of loop quantum cosmology* ” - 22 juin 2016 - Dir. A. Barrau
2. V. Bonnavard - « *Détection indirecte de matière noire : des galaxies naines sphéroïdes en photons gamma à la recherche d’anti-hélium avec l’expérience AMS-02* » - 23 septembre 2016 - Dir. D. Maurin
3. A. Ghelfi - « *Analyse des données de l’expérience AMS-02 pour la propagation du rayonnement cosmique dans la cavité solaire* » - 29 septembre 2016 - Dir. L. Derome
4. B. Bolliet - « *Gravité quantique et énergie sombre* » - 24 juillet 2017 - Dir. A. Barrau

L’équipe est également active en diffusion des connaissances. Le webdocumentaire lamatiere noire.fr et le *Cosmic Tour* en réalité virtuelle (disponible sur l’Oculus store) en sont des illustrations.

2.3 Équipe Matière Noire (MIMAC)

Équipe de recherche : membres permanents

D. Santos, F. Naraghi,

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

C. Couturier (post-doctorant), B. Tampon (doctorant, 2016-2018)

Personnel des services techniques

N. Sauzet (CDD), O. Guillaudin, JF. Muraz (service détecteurs & instrumentation)

G. Bosson, J. Bouvier, JL. Bouly, L. Gallin-Martel, F. Rarbi (service électronique)

T. Descombes (service informatique)

A. Dastgheibi Fard, M. Zampaolo (service Ultra-Basse radioactivité)

The MIMAC team activities have covered the directional Dark Matter detection with our bi-chamber prototype installed at Laboratoire souterrain de Modane, the implementation of the cathode signal for 3D fiducialization, the new low background detector developments, a new experimental facility for ionization quenching factor measurements (COMIMAC) and the direct detection exploration with a spherical detector in the frame of the NEWS-G collaboration. The neutron spectroscopy performed by one MIMAC chamber has been demonstrated and applied in the frame of the neutron metrology in collaboration with the Laboratoire de Métrologie et Dosimétrie Neutronique (LMDN) from the Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). The valorization of our MIMAC detection strategy has been selected by the valorisation programme of the CNRS and by the SATT-Linksum in their technological maturation frame.

2.3.1 Introduction

Les observations astrophysiques convergent depuis plusieurs décennies vers un modèle standard cosmologique et justifient l'hypothèse de l'existence de matière sombre aussi bien à grande échelle qu'à l'échelle locale de notre galaxie. La détection directe des particules constituant cette matière est un défi majeur de la physique. Les neutrons et les neutrinos par leur dispersion cohérente sur les noyaux constituent un fond ultime pour ce type de détection. Le projet MIMAC (Micro-tpc Matrix of Chambers) développe un détecteur directionnel de matière sombre, permettant ainsi de compter sur une signature nouvelle, unique et nécessaire, la directionnalité, afin de corrélérer le mouvement relatif de notre système solaire autour du centre galactique avec l'évènement rare détecté dans le détecteur.

L'état actuel de la recherche directe de matière sombre non-baryonique se repose sur des efforts considérables afin de détecter des reculs nucléaires qui proviendraient de collisions élastiques avec des WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) en les discriminant du fond. Ces évènements seront des « candidats » à valider par les autres expériences de détection directe mais la seule signature convaincante de la provenance d'une collision avec un WIMP du halo galactique est la directionnalité. En parallèle, la recherche de reculs nucléaires de basse énergie ($E < 10$ keV) présente la difficulté additionnelle du "quenching" en ionisation et en scintillation qui limitent le signal accessible à la détection et qui en général sont estimés ou mesurés avec des incertitudes importantes. Le paramètre de découverte est la trace de recul qui serait corrélée à la direction définie par la tangente à l'orbite de notre système solaire autour du centre galactique, qui est par ailleurs identifiée par la direction de la Constellation du Cygne. Les directions des noyaux de reculs permettent la construction d'une carte en coordonnées galactiques des évènements. Nous avons également montré que la directionnalité ouvre la voie d'une caractérisation de la masse de la particule et de la forme du halo galactique.

Le projet MIMAC (Micro-tpc Matrix of Chambers) propose de construire une grande matrice de micro-TPC à basse pression (50 mbar) afin de détecter par ionisation les traces de reculs nucléaires en 3D. Les noyaux cibles peuvent être changés en masse et/ou spin afin d'optimiser le transfert d'énergie cinétique et la section efficace d'interaction. Les noyaux cibles privilégiés pour l'instant ont été : ^{19}F , ^{12}C , ^1H , ^4He .

La matrice est conçue à partir des modules bi-chambres (deux chambres avec une cathode commune) identiques qui nous permettront de mieux contrôler le fond intrinsèque et pouvoir faire la coïncidence entre les différentes chambres. Le détecteur de chaque chambre est une micro-TPC, type Micromegas pixélisée (IRFU-Saclay), couplée

à une électronique rapide auto-déclenchée qui a été spécialement développée par le LPSC- Grenoble pour ce projet.

2.3.2 Le prototype de module bi-chambre de MIMAC

En juillet 2012, nous avons installé le premier module bi-chambre au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM). Nous avons constaté une excellente stabilité du gain en fonction du temps grâce à un système de circulation du gaz spécialement développé pour notre projet. L'étalonnage s'effectue par fluorescence, produite sur des feuilles de Cd, Fe et Cu, grâce à un générateur de rayons X, et ce avec une fréquence hebdomadaire. Nous avons amélioré l'installation en janvier 2016, voir figure. Depuis, le prototype bi-chambre fonctionne en permanence avec toujours un étalonnage hebdomadaire. Les données ont donné lieu à un article sur la progénie du Rn (voir point IV) et continue à nous fournir des données sur le fond au LSM et qui sont analysées par l'équipe.

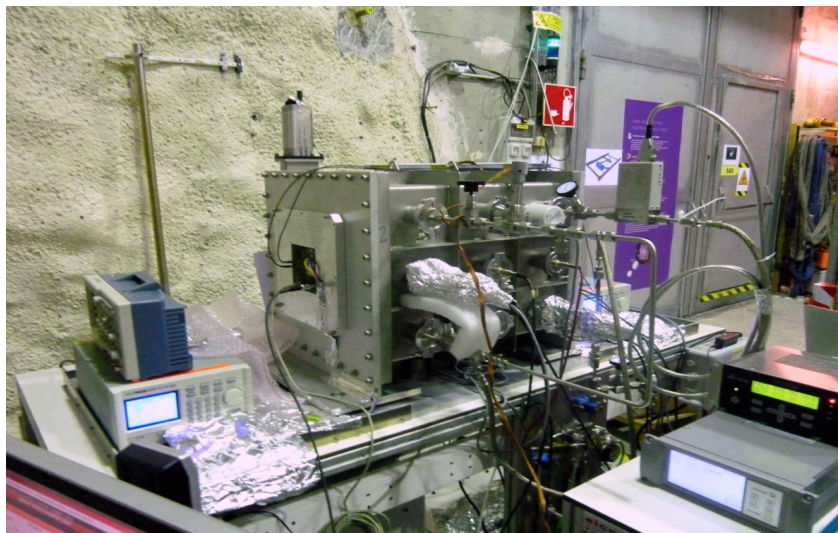


Fig. 1 : Prototype MIMAC bi-chambre installé au LSM (2016-2018)

2.3.3 Développement de la ligne de quenching COMIMAC

La mesure du facteur de quenching en ionisation est fondamentale dans le domaine de la détection directe de matière sombre puisque les noyaux de reculs sortant éventuellement d'une collision élastique avec un WIMP laissent une énergie en ionisation différente de l'énergie cinétique. Le rapport entre l'énergie en ionisation laissée dans le détecteur et l'énergie cinétique initiale de la particule est définie comme le facteur de quenching en ionisation. En particulier, dans un gaz, ce facteur de quenching dépend de l'énergie du noyau de recul, de l'état de pureté du gaz et de la pression.

L'équipe a construit une ligne de quenching afin de pouvoir mesurer les facteurs de quenching in-situ pour contrôler à tout moment les facteurs de quenching du gaz d'un détecteur installé dans un laboratoire souterrain. Cette mesure, au même titre que l'étalonnage en énergie permet de valider le bon fonctionnement du détecteur.



Fig. 2 : Vue de la ligne expérimentale COMIMAC installée au LPSC

La discrimination électron-recul

La **discrimination électron-recul**, une des clés majeures de la détection directe de matière sombre, a été mesurée dans le mélange gazeux de MIMAC avec des neutrons rapides monochromatiques sur l'installation Amande (IRSN) grâce à une analyse en Boost Decision Trees (BDT) faite par Quentin Riffard et publié en 2016.

Première mesure de traces en 3D de reculs nucléaires provenant de descendants du ^{222}Rn

Cette mesure est réellement unique puisqu'elle constitue une validation de la capacité à mesurer des traces en 3D de basse énergie, ainsi que leur énergie en ionisation. Ces événements, dont l'énergie cinétique se trouve dans la plage comprise entre 100 et 146 keV, ne laissent en ionisation que -30 à -45 keV dans la micro-TPC et constituent un fond qui se trouve dans tous les détecteurs, pouvant ainsi servir de « benchmark ». Cette mesure a été publiée en 2017.

Simulation comparée des différentes techniques directionnelles (cristaux, émulsions et TPC)

Le travail de l'équipe a conduit à la publication d'un article montrant clairement que l'information directionnelle du recul nucléaire est « préservée » **uniquement** dans le cas d'une TPC à basse pression comme MIMAC.

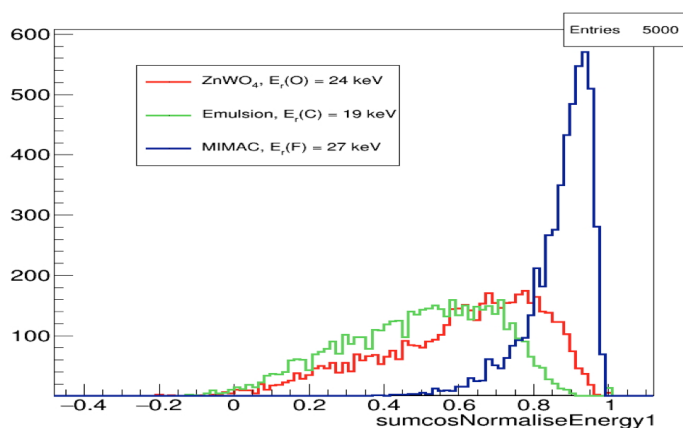


Fig. 3 : Comparaison de l'observable "directionnelle" définie afin de comparer la préservation de l'information directionnelle entre les différents milieux de détection

Le signal cathode

Le signal induit par le mouvement des électrons primaires pendant leur collection vers la grille, visible avant l'avalanche, a été validé et utilisé pour une mesure de la vitesse de collection de charges dans une chambre de MIMAC.

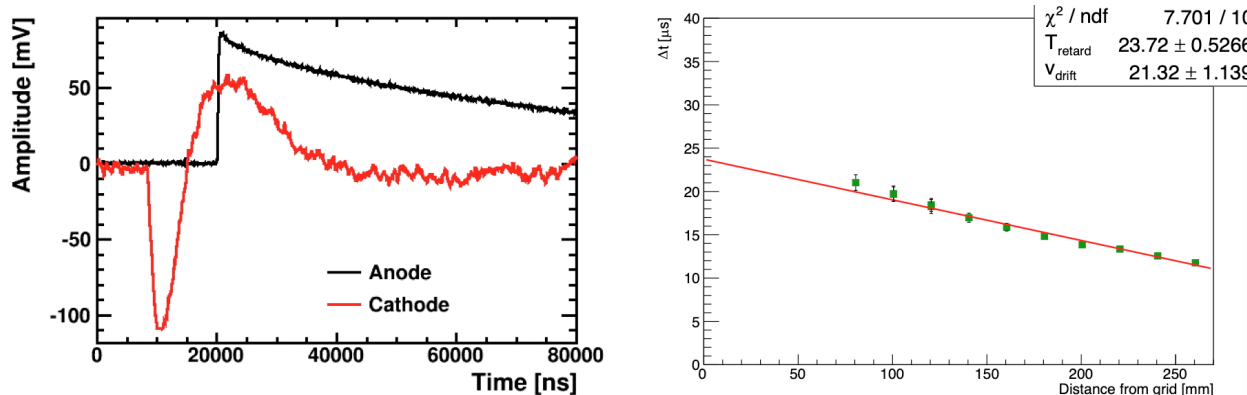


Fig. 4 : (Gauche): Le signal cathode, en rouge, produit par le mouvement des électrons primaires. Ce signal ouvre la possibilité de placer les traces en 3D dans le volume de détection.

Un nouveau détecteur bas-bruit

Un **nouveau détecteur bas-bruit** (BB) a été développé grâce à un financement du Labex Enigmass. Un nouveau détecteur type Micromegas a été développé pour MIMAC par O. Guillaudin (LPSC) en utilisant du Plexiglass et du Kapton à la place du PCB. La validation de la qualité des traces a été faite en janvier 2017 pour le prototype 10 cm x 10 cm. Le design du détecteur de 35 x 35 cm² a été finalisé en novembre 2017 et ses éléments sont actuellement en phase de fabrication, tout comme l'électronique nécessaire pour son utilisation.

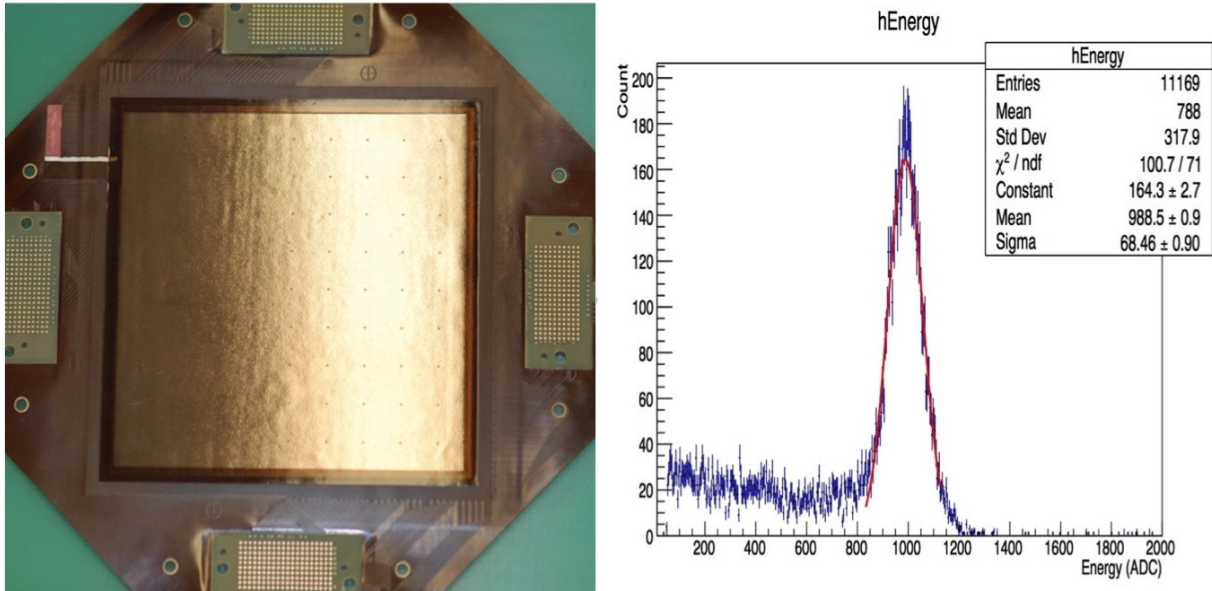


Fig. 5 : (Gauche) Nouveau détecteur Bas-Bruit (10 cm) développé au LPSC par O. Guillaudin. (Droite) : Spectre de rayons X de la source de ⁵⁵Fe (5,96 keV) qui montre une résolution de 16% (FWHM).

Collaboration avec l'Université de Tsinghua

La présence de Charling Tao à Pékin comme professeur à l'Université de Tsinghua nous a permis d'établir une collaboration très riche entre les deux équipes. Un post-doc de trois ans ainsi qu'une thèse sont financés par Tsinghua pour travailler sur MIMAC (respectivement Dr. Igor Moric et M. Yi Tao). Ces deux collaborateurs sont venus à deux reprises pendant plusieurs mois au LPSC en 2017 pour participer à l'analyse de données et aux expériences sur LHI et COMIMAC et ont travaillé sur la détermination de la longueur de traces et la résolution angulaire. Les articles sont en préparation.

Mesure expérimentale de la résolution angulaire de MIMAC sur LHI (LPSC)

Nous avons couplé une chambre MIMAC à la ligne expérimentale COMIMAC en janvier 2017 afin de mesurer la résolution angulaire de la mesure de traces en 3D obtenue avec celle-ci (voir figure 6). Elles confirment la possibilité d'obtenir une détection directionnelle avec une résolution angulaire suffisante. Le papier Y. Tao, I. Moric et al, a été soumis à JCAP en décembre 2018.

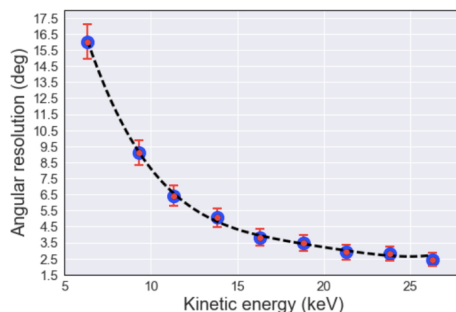


Fig. 6 : Résolution angulaire mesurée en fonction de l'énergie pour des traces de ¹⁹F produites par COMIMAC et LHI (Ligne Haute Intensité du Pôle Accélérateurs et sources d'ions)

Valorisation de MIMAC et COMIMAC

Un contrat de collaboration a été signé entre le laboratoire de métrologie de l'IRSN (LMDN) et le LPSC en 2010 pour 5 ans afin de démontrer que notre détecteur prototype MIMAC peut devenir un étalon primaire pour la caractérisation de champs neutroniques rapides. En 2016 nous avons signé une prolongation de ce contrat. Deux thèses sur ce sujet sous la direction de D. Santos ont été financées entre 2013 et 2018. La démonstration de la mesure de neutrons rapides dans la plage de basse énergie (27 keV et 127 keV) a été faite dans le cadre d'une thèse, soutenue en décembre 2015 et la validation expérimentale de la spectroscopie neutronique jusqu'à 6,5 MeV a été faite par Benjamin Tampon qui a soutenu sa thèse en décembre 2018.

2.3.4 Le projet NEWS-G (New Experiments With Sphere-Gas)

L'équipe participe à une recherche directe non-directionnelle à basses masses de WIMPs (projet NEWS-G (New Experiments With Sphere-Gas) basée sur un détecteur sphérique mono-voie dont le senseur est une simple bille placée en son centre. Ce détecteur sphérique, actuellement en cours de construction, sera installé durant 2020 au SNOLAB (Sudbury-Canada). Pour ce projet, il a été obtenu un financement ANR en Octobre 2015 (ANR-NEWS). Cette ANR est portée par Loannis Giomataris de l'IRFU-CEA Saclay.

Au sein de la collaboration NEWS-G, l'équipe du laboratoire a endossé la responsabilité de la mesure du facteur de quenching en ionisation jusqu'à très basse énergie (~100 eV) et ce grâce notamment aux possibilités offertes par notre ligne COMIMAC. Les mesures réalisées couvrent plusieurs noyaux cibles (^4He , ^1H , ^{20}Ne , ^{19}F). Dans le cadre de l'ANR-NEWS, l'équipe a spécifiquement conçu une chambre d'ionisation sphérique, d'un diamètre de 30 cm, capable de supporter une pression jusqu'à 10 bar et couplée à notre ligne COMIMAC grâce à une interface unique et originale (voir figure 7).

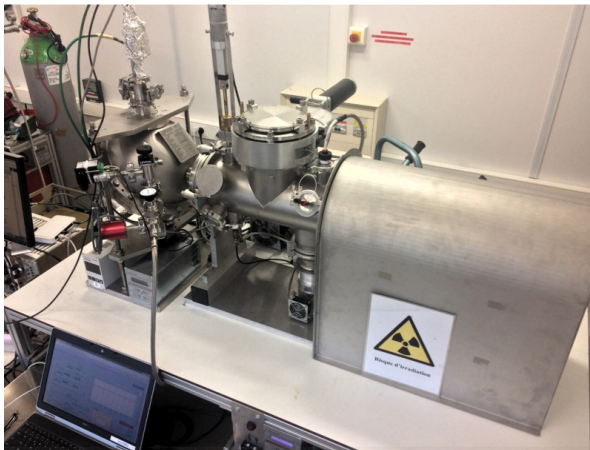


Fig. 7 : La nouvelle sphère de 30 cm couplée à la ligne de quenching COMIMAC au LPSC

Au cours de ces 4 dernières années, plusieurs campagnes de mesures des facteurs de quenching, notamment dans le $^{20}\text{Ne} + 0,7\% \text{CH}_4$ et dans le CH_4 pur, ont été réalisées. Enfin, ce dispositif a également été utilisé pour tester de nombreuses versions de senseurs développés par les équipes de l'IRFU et par celles de l'Université de Tessalonique.

2.3.5 Projet de valorisation MIMAC-FastN

Le projet MIMAC-FastN a pour objectif de valoriser une instrumentation développée au LPSC dans le cadre du projet MIMAC pour la détection directionnelle de matière noire non baryonique, en un spectromètre directionnel mobile de neutrons rapides, sur une large plage en énergie, de 10 keV à 600 MeV. Ce projet a fait l'objet d'un programme de prématuration de la direction de l'innovation et des relations avec les entreprises du CNRS en 2015, qui a permis d'aboutir à l'intégration à un programme de maturation de la société d'accélération de transfert de technologies (SATT) Linksium depuis septembre 2017. Ce programme vise à explorer la viabilité d'une potentielle start-up en vue de l'entrée dans un programme d'incubation.

Le travail accompli en 2017 et 2018 a permis de mettre en évidence, par simulation Monte Carlo et par mesure, une spécificité induite par la stratégie de détection 3D du système : la capacité à mesurer l'énergie de neutrons de plus de 5 MeV. Des mesures réalisées au CERN/CERF en juin 2018 jusqu'à 200 MeV ont validé la stratégie de détection, qui confère à l'appareil sa gamme de mesure étendue, unique sur le marché de la détection neutronique. Cette stratégie a fait l'objet d'un dépôt de brevet.

Une étude de marché a été réalisée en partenariat avec un prestataire de Linksium, avec pour objectif d'identifier les cas d'usage et de mesurer l'intérêt des potentiels clients pour les marchés visés. Cette étude a conduit à l'exposition de notre démonstrateur au salon mondial du nucléaire en juin 2018.

Les campagnes de mesure réalisées en 2017 et 2018 ont permis de réaliser la preuve de concept de l'appareil : reconstruction de spectres neutroniques mono-énergétiques avec des réactions D(d,n) et T(d,n) sur les installations d'AMANDE de l'IRSN et de GENEPI du LPSC, de 1 MeV à 15 MeV ; reconstruction de spectres neutroniques poly-énergétiques, avec une source de ^{252}Cf , au CERF (spectre de neutrons cosmiques), et au CAL (Centre Antoine Lacassagne à Nice).

Le développement d'un nouveau logiciel d'acquisition, associé à des évolutions sur la logique d'acquisition du FPGA et au développement d'un algorithme pour gérer l'empilement, permettent d'envisager des mesures dans des environnements avec des flux neutroniques plus élevés. Ces évolutions ont été testées lors de campagnes de mesure au CERF, et sur l'installation ALPHEE de l'IRSN.

Notre intégration à EURADOS (European Radiation Dosimetry Group) nous a ouvert de nouvelles opportunités, dans le cadre des projets de caractérisation des neutrons de haute énergie et des neutrons cosmiques.

2.3.6 Pour en savoir plus

Principales publications durant la période considérée :

- *A table-top ion and electron beam facility for ionization quenching measurement and gas detector calibration* (J. F. Muraz, J. Médard, D. Santos et al., *Nuclear Instruments and Methods* 832 (2016), 214-218).
- *First detection of tracks of radon progeny recoils by MIMAC*, Q. Riffard, D. Santos et al. 2017_JINST_12_P06021.
- *Dark Matter directional detection: comparison of the track direction determination*, C. Couturier, J. P. Zopounidis, N. Sauzet, F. Naraghi and D. Santos, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 01:027,2017a.
- *MIMAC low energy electron-recoil discrimination measured with fast neutrons.*, Q. Riffard, D. Santos et al., arXiv:1602:01738, JINST 11 (2016) P08011
- *Cathode signal in a TPC directional detector*, C. Couturier, Q. Riffard, N. Sauzet, O. Guillaudin, F. Naraghi and D. Santos, *Journal of Instrumentation*, 12(11): P11020,2017b.

Thèses soutenues durant la période :

B. Tampon, « *Qualification expérimentale de la micro-TPC LNE-IRSN-MIMAC comme instrument de référence pour les mesures en énergie et en fluence de champs neutroniques entre 27 keV et 6.5 MeV* », Décembre 2018, Dir D. Santos

2.4 Équipe Neutrinos

Équipe de recherche : membres permanents

S. Kox, J. Lamblin, F. Montanet, J.S. Réal, A. Stutz

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

L. Bernard, T. Salagnac, S. Zsoldos (doctorants), V. Hélaine (postdoc)

Personnels des services techniques

C. Bernard, M. Chala, M. Heusch (service détecteurs & instrumentation)

G. Bosson, J.L. Bouly, J. Bouvier, O. Bourrion, C. Li, N. Ponchant, J.P. Scordilis, D. Tourres, Ch Vescovi (service électronique)

The team is involved in the STEREO experiment. This experiment addresses the issue of the existence of a sterile neutrino with a mass around 1 eV and with a precise measurement of the reactor anti-neutrino spectrum. It takes place at the Institut Laue Langevin (ILL) Grenoble, at short distance from its research reactor. The group was involved in the conception, construction and integration of the experiment and is now focusing its research activities on the analysis and interpretation of the data.

2.4.1 Introduction

Les expériences d'oscillation des neutrinos de ces deux dernières décennies ont mesuré avec précision les angles de mélange et la répartition des masses des neutrinos dans un cadre à trois saveurs. Dans ce modèle à trois neutrinos, aucune disparition significative n'est attendue pour des neutrinos de quelques MeV et des distances de moins de 100 m. Néanmoins de nombreuses expériences réalisées à proximité des réacteurs nucléaires observent un flux d'antineutrinos électroniques plus faible que celui attendu à de telles distances, c'est ce qu'on appelle l'anomalie des neutrinos de réacteur (RAA).

Essentiellement, deux explications sont possibles pour rendre compte de ces observations : la première consiste en une sous-estimation ou un traitement incomplet des incertitudes systématiques dans le modèle de prédiction du flux d'antineutrino émis, tandis que la seconde propose une interprétation faisant intervenir de la physique au-delà du Modèle Standard. Dans cette seconde interprétation, le déficit observé à courte distance est interprété, par analogie avec les déficits connus de neutrinos induits par les oscillations dans les secteurs solaire et atmosphérique, par une oscillation vers un nouvel état du neutrino, dit stérile, de masse comparable à 1 eV.

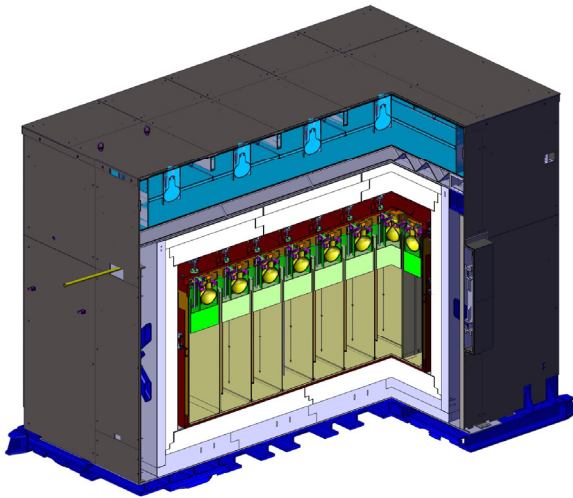
En plus du déficit moyen de 6,5%, plusieurs expériences ont mis en évidence des distorsions significatives de la forme du spectre mesuré par rapport aux prédictions : un excès d'événements autour de 5 MeV a ainsi été observé. Cette anomalie de forme et la RAA pourraient avoir la même origine ou être causées par des effets indépendants. Une des questions ouvertes est de savoir si la distorsion de forme et le déficit observé dépendent de la composition du combustible.

L'objectif de l'expérience STEREO est d'étudier expérimentalement les deux solutions proposées pour rendre compte de l'anomalie des neutrinos de réacteur. STEREO apportera aussi un éclairage nouveau et complémentaire en utilisant un combustible fortement enrichi en ^{235}U .

2.4.2 L'expérience STEREO

L'expérience STEREO est menée par une collaboration de 6 laboratoires, dont 2 Grenoblois (l'ILL et le LPSC) et 2 (LAPP et LPSC) membres du LABEX ENIGMASS. Les autres partenaires sont le CEA/IRFU de Saclay et le MPIK d'Heidelberg.

Installée à 10 m du cœur compact (< 1 m) du réacteur de recherche de l'ILL à Grenoble, l'expérience STEREO bénéficie du fort enrichissement du combustible en ^{235}U (93%), ce qui supprime les effets d'évolution de la forme



du spectre émis, et permet la mesure d'un spectre de référence des neutrinos issus uniquement de la fission de cet isotope. Le volume de détection est segmenté en 6 cellules identiques alignées dans la direction du cœur du réacteur. Si le neutrino stérile existe, il doit signer sa présence par des oscillations dont la phase est proportionnelle à L/E , L étant sa distance de propagation depuis le cœur du réacteur et E son énergie. La signature de l'oscillation est donc une modulation du nombre d'interactions d'antineutrinos avec l'énergie des neutrinos et la distance du cœur à laquelle ils sont détectés.

Le principe de détection des antineutrinos est la désintégration bêta inverse, où les antineutrinos interagissent avec les protons du scintillateur hydrogéné constituant la cible du détecteur. La lumière de scintillation est détectée par le dessus par 48 photomultiplicateurs (PMT). Un volume tampon en acrylique sépare le scintillateur des PMTs et permet d'homogénéiser la réponse sur l'ensemble du volume de la cellule. Le couplage optique entre l'acrylique et les PMTs est assuré par un bain d'huile minérale.

Durant la phase de construction, les responsabilités techniques du LPSC ont concerné la conception et la réalisation du détecteur veto muon, de l'électronique et de l'acquisition de données, du système d'injection de lumière, du contrôle lent ainsi que des blindages de mu-métal et de polyéthylène. Le LPSC a également eu une contribution essentielle dans la phase d'intégration et de maintenance de l'expérience en commençant par la mise à disposition de ses moyens pour l'assemblage des constituants du détecteur interne puis en assurant la coordination et une part importante des opérations d'installation et de maintenance sur le site de l'ILL. Depuis le démarrage de l'expérience, l'équipe du LPSC est responsable de la coordination de la prise de données et contribue fortement au contrôle de la qualité des données, à l'extraction des spectres neutrinos et à leur analyse en termes d'oscillation vers un neutrino stérile.

Le détecteur veto muon

Afin de réduire la part importante du bruit de fond due aux muons d'origine cosmique, le LPSC a eu la charge de concevoir et de réaliser un détecteur supplémentaire. Il s'agit d'un détecteur Čerenkov à eau couvrant l'ensemble du blindage. Il est utilisé en mode veto. Conçu et réalisé par le service détecteur et instrumentation, le détecteur veto muon a été installé et mis en eau à l'ILL en octobre 2016. Les premières données ont rapidement mis en évidence sa sensibilité aux gammas et neutrons provenant des expériences voisines. Une protection additionnelle composée de plaques de plomb et de bacs d'eau a rapidement été installée autour du détecteur afin de limiter leur impact. Lors de la première période de prises de données, des défauts sont apparus sur certaines bases des PMTs dont une résistance s'est avérée sensible à l'humidité. L'ensemble des bases a été modifié lors de l'arrêt 2017 et un système de refroidissement limitant l'humidité interne a été installé. La prise de données se déroule sans aucun incident depuis la remise en service avec une efficacité de détection pour les muons verticaux supérieure à 99%.

Électronique et acquisition de données

L'ensemble de l'électronique a été spécialement conçu au LPSC depuis les bases des PMTs jusqu'à l'acquisition de données. Le dispositif inclut des cartes Front-End 8 voies basées sur la lecture rapide des signaux des PMTs par des FADC 250 MHz 14 bits, et un FPGA offrant un traitement en ligne rapide. Il inclut également une carte Trigger permettant le déclenchement de l'acquisition, la lecture des cartes Front-End et la commande de la

carte de contrôle des LED utilisées dans le dispositif de calibration. La communication entre les cartes se fait par le fond de panier d'un châssis μ TCA. Un logiciel d'acquisition de données, dédié à STEREO et interfacé avec le logiciel cadre NOMAD développé à l'ILL, permet le contrôle et la surveillance de l'expérience.

L'ensemble de l'électronique de STEREO était prêt pour le démarrage de la prise de donnée en novembre 2016. Une période de mise en service d'environ 2 semaines a montré la bonne tenue du système d'acquisition jusqu'à plusieurs kHz de taux de comptage, au-delà des spécifications requises. Les réglages des différents paramètres de l'acquisition (seuils, mode de déclenchement, hautes tensions) ont pu être effectués rapidement grâce à la souplesse et à la polyvalence du système. La prise de données de STEREO se déroule sans aucun incident depuis la mise en service.

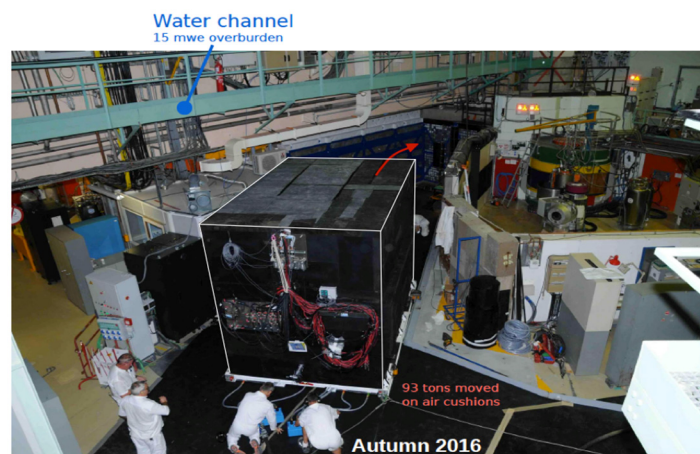
Assemblage et maintenance du détecteur interne

Bien que la responsabilité de la conception du détecteur interne ne soit pas du ressort des équipes du LPSC, l'intégration des différents éléments constituant le détecteur a été réalisée au LPSC au printemps 2016. Une des salles blanches du laboratoire a été utilisée pour l'intégration des PMTs dans leur volume tampon respectif et l'espace de montage du hall ARIANE a permis l'intégration finale des différents composants du détecteur interne de STEREO. L'ensemble des signaux des PMTs et des capteurs ont été testés avec l'électronique finale et le système d'injection de lumière à base de LED et de fibres optiques développé au LPSC. Un test d'étanchéité a été réalisé après fermeture de la cuve avant son transport sur le site de l'ILL en mai 2016.

Durant la première phase de prise de données de novembre 2016 à mars 2017, plusieurs défauts ont altéré la réponse du détecteur. Le plus important d'entre eux a été la fuite du bain d'huile minérale assurant le couplage optique entre le liquide et les PMTs pour une cellule de la cible et une cellule de la couronne externe. Il en a résulté une perte d'un facteur environ 2,5 du nombre de photons détectés par rapport aux autres cellules. Lors de l'arrêt du réacteur en 2017, les pièces en acrylique qui avaient fui et les plaques de séparations internes ont été réparées. L'équipe du LPSC a pris une part active dans la maintenance de la cuve du détecteur. Pour la Phase-II, qui a débuté en octobre 2017, le détecteur se trouve dans une configuration homogène avec une collection de lumière stable et conforme aux spécifications.

Intégration de l'expérience sur le site de l'ILL

L'équipe du LPSC a assuré la responsabilité de la coordination des travaux d'installation de l'expérience sur le site de l'ILL durant l'été 2016 puis ceux de démontage/remontage lors de l'arrêt de 2017. L'implication des services techniques et des physiciens du LPSC a été cruciale pendant ces périodes. Le montage se faisant dans l'enceinte d'un réacteur nucléaire pour un instrument soumis à autorisation de l'ASN, il a fallu mettre en place des procédures d'intervention et suivre un protocole d'assurance qualité. Les fortes contraintes d'encombrement ont imposé un montage du détecteur et de ses blindages sur une zone d'environ 20 m en retrait de la position de prise de données. Le dispositif complet (93T) a été déplacé à l'aide de coussins d'air fin septembre 2016. L'opération délicate du remplissage du détecteur avec les liquides scintillants s'est déroulée sans incident en novembre 2016.



Lors de l'arrêt du réacteur en 2017 une intervention sur l'ancienne ligne de faisceau située en amont de STEREO, a nécessité le retrait du détecteur de sa zone de mesure, ce qui a été mis à profit pour effectuer les réparations sur celui-ci.

Contrôle en ligne de l'expérience

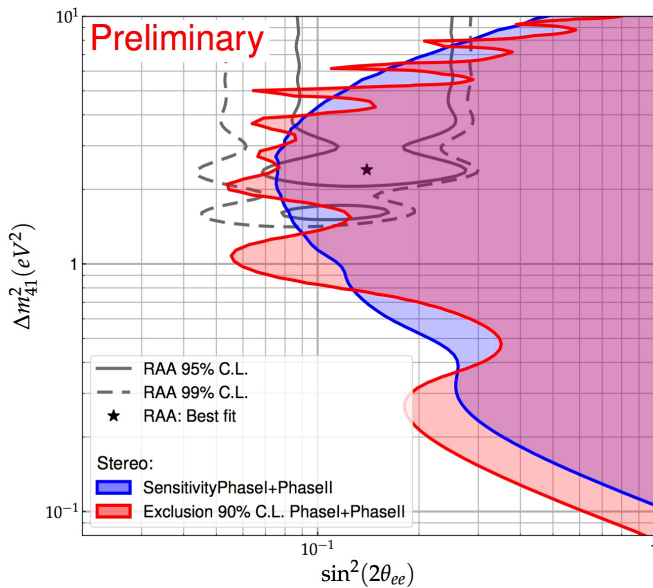
L'équipe du LPSC a développé un outil de contrôle en ligne pour faciliter la surveillance du bon fonctionnement de l'expérience et permettre une identification rapide de tout problème pendant les 3 années de prise de données de STEREO. Ce dispositif inclut le contrôle des paramètres clés pour la sécurité, mais aussi d'autres paramètres utiles aux diagnostics de qualité des données. Pour cela, un pré traitement des données est effectué au LPSC avant leur transfert au centre de calcul de Lyon pour stockage. Les informations pertinentes sont alors stockées dans une base de données pour être visualisées à l'aide d'un site web développé et hébergé au LPSC.

Exploitation des résultats

La phase de construction de STEREO est actuellement terminée et les opérations de maintenance réalisées durant l'été 2017 sont également terminées. La période d'exploitation des données a commencé par l'étude des données de la Phase-I et se poursuit actuellement avec l'étude des données de la Phase-II. La sensibilité finale devrait être atteinte début 2020 après les quatre cycles réacteurs prévus en 2019 et 2020.

L'exploitation des données acquises avec le détecteur STEREO se déroule en plusieurs étapes : d'une part la reconstruction du spectre en énergie des événements détectés, la recherche des paires corrélées de signaux prompt et retardés et la mesure du bruit de fond accidentel avec des critères de sélection optimisés. Le bruit de fond corrélé d'origine cosmique est quant à lui étudié avec précision lors des longues périodes d'arrêt du réacteur dont a bénéficié STEREO. Une procédure originale basée sur l'identification de la nature du signal prompt et la caractérisation du bruit de fond mesuré en période de réacteur OFF permet d'extraire le spectre neutrino mesuré dans chacune des 6 cellules. Enfin, la dernière étape consiste à comparer les spectres mesurés et à tester les différentes valeurs possibles de l'espace des paramètres du 4^{ème} neutrino. Un soin particulier a été apporté à l'étude des sources d'erreurs systématiques dans la réponse du détecteur. L'équipe du LPSC s'est fortement impliquée dans l'ensemble de ces étapes avec des contributions importantes concernant l'étude de la réponse du détecteur, l'extraction du nombre de neutrinos et l'analyse statistique.

Les mesures réalisées pendant les périodes d'arrêt du réacteur ont clairement mis en évidence une dépendance du bruit de fond avec la pression atmosphérique. Cet effet ne pouvant être négligé lors de l'extraction du nombre de neutrinos par la méthode classique de soustraction ON-OFF, l'équipe du LPSC a développé une méthode alternative et originale, basée sur des caractéristiques du bruit de fond corrélé indépendantes de la pression atmosphérique, de la température du liquide ou des fuites de lumière. Le pouvoir discriminant du scintillateur permet en effet d'identifier deux composantes à partir de la variable PSD étalonnée : l'une correspondant à des électrons de recul (comme pour le signal neutrino) et l'autre à des protons de recul (bruit de fond). La grande statistique accumulée lors de l'arrêt du réacteur a permis de déterminer avec précision que la forme de la distribution PSD était indépendante de la pression atmosphérique pour chaque bin d'énergie. Cette propriété a été mise à profit pour extraire le signal neutrino à partir d'un ajustement des distributions PSD mesurées lors des périodes réacteur ON : la composante neutrino est alors la contribution excédentaire parmi les reculs d'électrons. Cette méthode permet ainsi d'obtenir les spectres en énergie des neutrinos mesurés dans les 6 cellules de détection et de s'affranchir de la soustraction ON-OFF et des corrections associées.



Les spectres mesurés dans les 6 cellules du détecteur STEREO ont des formes similaires, ce qui a nécessité de développer une analyse statistique minutieuse. Les résultats actuels, obtenus avec une statistique de 185 jours de données en réacteur ON excluent une part significative de l'espace des paramètres attendu pour un hypothétique 4^{ème} neutrino. La zone rouge de la figure ci-contre représente les zones des paramètres (angle de mélange en abscisse et écart des masses en ordonnées) rejetées avec 90% de niveau de confiance. La zone bleue représente la sensibilité théorique de rejet pour une analyse avec une statistique correspondant à 185 jours de données. La zone des paramètres autorisés par l'anomalie des neutrinos de réacteur est délimitée par les courbes grises.

En continuant à collecter des données, STEREO améliorera sa sensibilité et testera la région restante jusqu'à des amplitudes d'oscillation encore plus faibles.

2.4.3 Pour en savoir plus

Principales publications durant la période :

The STEREO Experiment [N. Allemandou et al. 2018 JINST 13 P07009](#)

Trigger and readout electronics for the STEREO experiment, O. Bourrion et al., JINST 11 (2016) C02078,

Sterile neutrino constraints from the STEREO experiment with 66 days of reactor-on data [H. Almazán et al. \(STEREO Collaboration\) Phys. Rev. Lett. 121, 161801](#)

Search for a sterile neutrino with the STEREO experiment : shielding optimisation and energy calibration, F. Kandzia, Thèse, Université Grenoble Alpes (2017), [⟨NNT : 2017GREAY086⟩](#)

Recherche d'un neutrino stérile avec l'expérience STEREO : développement de l'électronique et identification des neutrinos, T. Salagnac, Thèse, Université Grenoble Alpes (2017), [⟨NNT : 2017GREAY068⟩](#)

Recherche d'un neutrino stérile avec l'expérience STEREO : construction du veto à muons et estimation du bruit de fond corrélé, S. Zsoldos, Thèse, Université Grenoble Alpes (2016) , [⟨NNT : 2016GREAY047⟩](#)

Thèses soutenues durant la période : 3

- 1- S. Zsoldos- « Recherche d'un neutrino stérile avec l'expérience STEREO : construction d'un veto à muons et estimation du bruit de fond corrélé » - 30 septembre 2016 - Dir. J.- S. Réal
- 2- T. Salagnac - « Recherche d'un neutrino stérile avec l'expérience STEREO : développement de l'électronique et identification des neutrinos » - 16 octobre 2017 - Dir. J. Lamblin
- 3- F. Kandzia - "Search for a sterile neutrino with the STEREO experiment : shielding optimisation and energy calibration" - 11 décembre 2017 - Dir F. Montanet

2.5 Équipe Cosmologie Observationnelle (Planck NIKA)

Équipe de recherche : membres permanents

A. Catalano (CR1), J.F. Macías-Pérez (DR2), F. Mayet (PR), L. Perotto (CR1)

B. Comis (postdoc 2016-2017), A. Jiménez (PhD, 2018-), F. Kéruzore (PhD, 2018-), V. Pelgrims (postdoc 2016-2018), F. Ruppin (PhD, thèse soutenue en 2018), A. Ritacco (PhD, thèse soutenue en 2016)

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

B. Comis (postdoc 2016-2017), A. Jiménez (doctorant, 2018-), F. Kéruzore (doctorant, 2018-), V. Pelgrims (postdoc 2016-2018), F. Ruppin (doctorant 2015-2018), A. Ritacco (Doctorante, 2014- 2016)

Personnel des services techniques

O. Bourrion, C. Vescovi, D. Tourres (*service électronique*)

J. Marpaud, M. Marton, P. Stassi (*service détecteurs & instrumentation*)

The group research activities focus on cosmology with two main areas: cosmic microwave background (CMB) anisotropies and clusters of galaxies. The group is involved in instrumental developments as well as in data analysis and interpretation. We have contributed significantly to the current two main satellite experiments focused on cosmology: PLANCK and EUCLID. Furthermore, we are leader in the development on ground based experiments - NIKA, NIKA2 and KISS- using innovative detector original technology, KID (Kinetic Inductance Detectors). The multi-wavelength (microwave, millimeter, infrared and visible observations) and multi-scale (from few arcmin to few tens of arcsec resolution) covering of these experiments allows us to perform a large range of research activities: CMB polarisation cosmology, Galactic foreground emission in polarisation and galactic magnetic fields, high redshift sources, Sunyaev-Zeldovich effect on clusters of galaxies, physics and cosmology with clusters of galaxies.

2.5.1 Introduction

Les activités de notre équipe sont centrées autour de la cosmologie observationnelle avec deux axes de recherche principaux : 1) l'étude des anisotropies du Fond Diffus Cosmologique (CMB) ainsi que des émissions d'avant-plan, et 2) la cartographie et l'exploitation cosmologique des amas de galaxies. Dans ce cadre nous menons plusieurs activités de recherche incluant : la conception, construction, tests et installation d'instruments innovants pour la cosmologie ; le développement de nouvelles méthodes d'analyse et de traitement des données, ainsi que leur exploitation cosmologique.

Les membres de l'équipe ont travaillé pendant une dizaine d'années dans l'expérience satellite Planck pour la mesure des anisotropies du CMB en température et polarisation ainsi que pour la détection et l'exploitation cosmologique des amas des galaxies. Nous sommes engagés actuellement dans le projet satellite EUCLID autour de la cosmologie avec les amas de galaxies et nous participons aux tests au sol de l'instrument. Nous avons été également moteurs dans le développement, la construction, l'installation et le commissioning des expériences millimétriques NIKA et NIKA2, ainsi que pionniers dans leur exploitation scientifique notamment en ce qui concerne la polarisation et l'étude des amas de galaxies.

Plus récemment nous avons travaillé au développement de nouveaux instruments millimétriques, KISS (commissioning en cours) et CONCERTO (en conception), qui visent des mesures spectroscopiques dans le cadre de l'étude des amas des galaxies et de la distribution de matière dans l'univers lointain. En outre, nous avons été fortement engagés dans les activités de vulgarisation pour Planck et participons activement dans le cadre d'EUCLID.

Afin de mener nos activités de recherche nous sommes membres de plusieurs collaborations internationales (Planck, NIKA, NIKA2 et EUCLID) dans lesquelles nous prenons des responsabilités incluant : membres du core team et responsables des analyses pour Planck ; project scientist, responsable et membres de l'editorial board, et leaders du grand programme SZ pour NIKA2 ; project scientist et instrument scientist pour KISS ; et responsables de test au sol pour EUCLID. Nous avons également obtenu des financements ANR (NIKA et NIKA2Sky) ainsi que des financements européens ERC H2020 (projets RADIOFOREGROUNDS et CONCERTO). Enfin, nous avons aussi obtenu des prix internationaux grâce à notre travail sur Planck (prix Gubber et ...).

2.5.2 Le projet PLANCK

Le satellite Planck, qui fut lancé en 2009 et en fonctionnement jusqu'en 2013, avait comme but la mesure ultime du Fond Diffus Cosmologique (CMB pour Cosmic Microwave Background) en intensité, et la plus précise en polarisation. Le groupe du LPSC a d'une part assuré le suivi des données de Planck livrées en 2016 (Planck results 2015 et Planck intermediate results 2016, 2017) et participé à l'élaboration des *Planck Legacy results* de 2018. Notamment, l'équipe a réalisé une nouvelle analyse cosmologique de la carte de Planck de l'effet SZ dans les amas de galaxies. D'autre part, elle a obtenu dans le cadre d'un consortium international, le programme H2020-COMPET-2015, RADIOFOREGROUNDS (2016-2018), pour l'exploitation des données de Planck, WMAP et QUIJOTE afin d'améliorer la compréhension des émissions d'avant-plan en polarisation (synchrotron et poussière galactique) qui limitent la connaissance du CMB et notamment des modes B en polarisation. L'équipe du LPSC a eu la charge de la reconstruction du champ magnétique galactique, qui joue un rôle primordial dans les émissions galactiques polarisées [Pelgrims et al, 2018a,b].

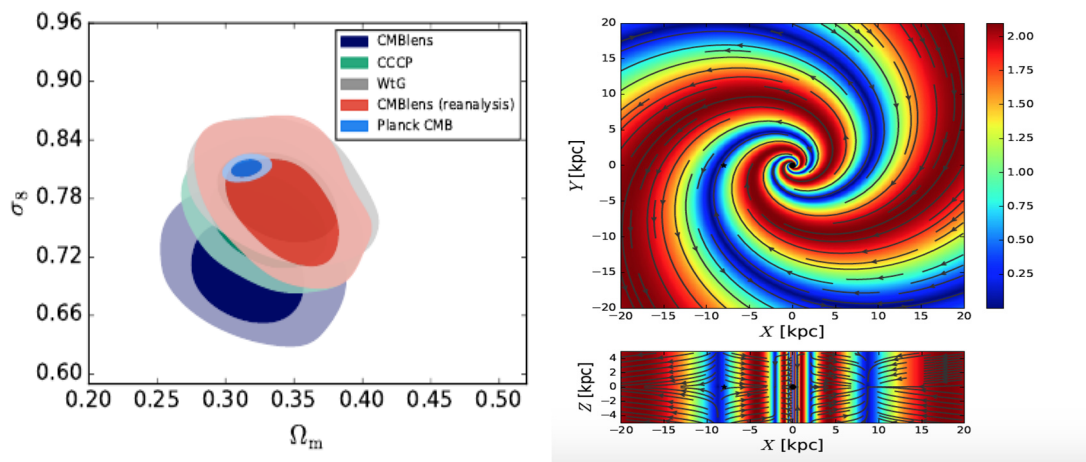


Figure 1. Gauche : contraintes cosmologiques à partir de l'effet SZ dans les amas de galaxies mesurés par Planck. Droite : géométrie du champ magnétique galactique obtenue à partir de la mesure de l'émission polarisée de la poussière avec Planck.

2.5.3 Les projets NIKA et NIKA2

NIKA2 est une caméra cryogénique millimétrique bi-bande, opérant à 150 et 260 GHz avec 2600 KIDs (Kinetic Inductance Detectors) refroidis à 100 mK, qui a été installée au télescope de 30 mètres de l'IRAM en octobre 2015 et totalement instrumentée en janvier 2016. Le LPSC a joué un rôle majeur dans le développement et la construction de NIKA2, prenant en charge la conception et construction de l'électronique de lecture des KIDs (voir section du service électronique), la construction de la boîte refroidie à 100 mK (voir section du service d'études et de réalisation mécanique) après que la validation ait eu lieu au laboratoire.

NIKA2 a été construit par une collaboration internationale dont le LPSC est membre fondateur, et qui a été récompensée par l'IRAM avec 1300 heures de temps garanti reparti sur 5 larges programmes. Les membres du LPSC ont des rôles importants au sein de la collaboration : Instrument Scientist, leader et membres de l'editorial board, responsables de l'électronique de lecture et du commissioning en intensité, et leaders du large programme SZ.

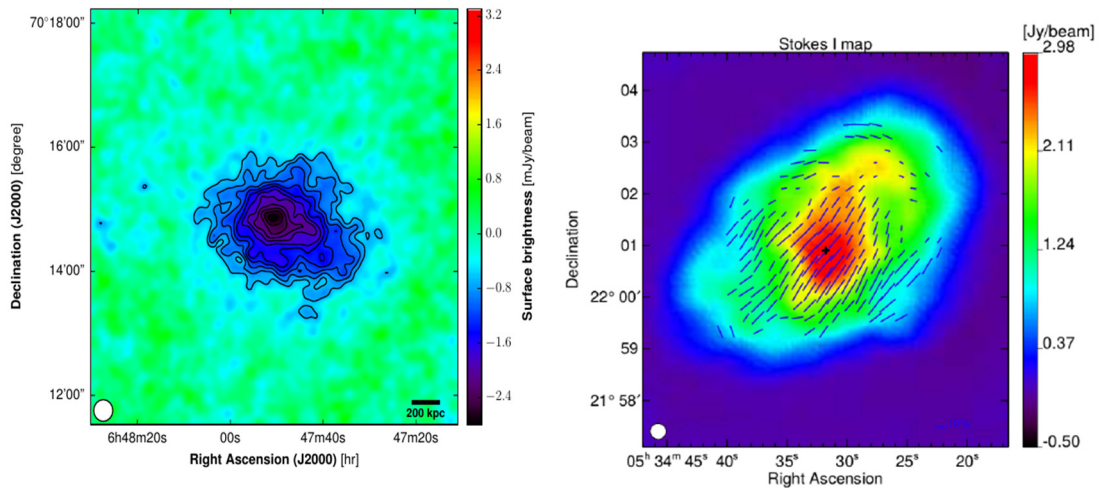


Figure 2. Gauche : Observations de l'effet SZ thermique dans l'amas PSZ2G144 avec NIKA2 [Ruppin et al, 2018]. Droite : observations en intensité (image en couleur) et en polarisation (traits noir) du Crab avec NIKA.

Polarisation avec NIKA

Le LPSC a aussi été moteur dans la construction et l'exploitation scientifique de NIKA, qui était un prototype de NIKA2, et qui a été en fonctionnement au télescope jusqu'en 2015. Le LPSC a notamment pris en charge la conception et la construction du système permettant des mesures en polarisation avec NIKA, ainsi que son exploitation scientifique. En particulier pour la première fois au monde, les observations en polarisation avec des KIDs ont été réalisées [Ritacco et al, 2018], qui constitue le principal calibrateur en polarisation pour les instruments CMB [Aumont et al, 2018].

Commissioning de NIKA

Après les premières observations effectuées avec NIKA2, s'en est suivi une intense phase de commissioning, comprenant observations techniques et développement des outils d'analyse de données, auxquels le LPSC a été le principal contributeur.

En Septembre 2016, le LPSC a pris la responsabilité du commissioning et de la caractérisation des performances de NIKA2 auprès de l'IRAM. Les analyses menées au LPSC ont permis de mettre au jour la non-planéité de la lame dichroïque et ont motivé son remplacement en septembre 2016. La première campagne d'observations techniques avec l'instrument NIKA2 final a eu lieu en février 2017 et la phase de commissioning s'est achevée en avril 2017, à l'issue d'une campagne de vérification scientifique. A partir d'observations de sources astrophysiques, nous avons réalisé une première caractérisation des performances de NIKA2, décrites dans [Papier performance Adam et al (2017)]. NIKA2 a démontré d'excellentes capacités pour cartographier l'ensemble du champ de vue offert par le télescope de 30 mètres, avec une haute résolution angulaire, et une sensibilité comparable aux meilleurs instruments millimétriques actuels. Ces premiers résultats, indiquant des performances en adéquation avec les spécifications requises par l'IRAM, ont motivé l'acceptation de l'instrument par l'IRAM et son ouverture à la communauté pour des observations scientifiques dès octobre 2017. Cette étape clef franchie avec succès, le LPSC s'est engagé à livrer la caractérisation finale des performances.

En utilisant un vaste jeu de données, incluant plusieurs milliers d'observations effectuées en 2017 et 2018, nous avons démontré la stabilité des performances de NIKA2 sur une année et pour une large gamme de conditions d'observation. En particulier, nous avons i) amélioré la méthode d'estimation de l'atténuation du signal par l'atmosphère pour garantir une correction robuste jusqu'à un facteur deux d'atténuation, ii) optimisé les coupures de sélection et iii) développé des méthodes de correction des effets systématiques dépendant de la température externe. Ces développements ont permis de réduire l'incertitude de la calibration pour atteindre une stabilité au niveau des meilleures expériences millimétriques actuelles. De nombreux tests de robustesse et stabilité des performances ont été effectués et un pipeline de calibration a été fourni à l'IRAM. Les résultats de la caractérisation complète des performances, la description des méthodes développées et des tests effectués ont été rassemblés dans un document de référence (120 pages) et remis à l'IRAM en décembre 2018 pour

accompagner et officialiser la livraison de l'instrument. Les performances de NIKAZ, confirmées sur un large jeu de données, en font le meilleur instrument à ce jour pour la cartographie millimétrique haute-résolution de sources diffuses ou étendues, tels les amas de galaxies. NIKAZ, ouvert à la communauté dès octobre 2018, restera en opération au télescope de 30 mètres de l'IRAM pour au moins une décennie.

Grand Programme d'observation SZ de NIKAZ

Le Grand Programme d'observation SZ de NIKAZ bénéficie de 300 heures d'observation accordées par l'IRAM dans le cadre du temps garanti attribué à la collaboration NIKAZ. Ce programme international de recherche comporte 10 laboratoires participants (IN2P3, INSU, CEA, Rome, Madrid, Tenerife) avec 24 chercheurs impliqués. L'objectif scientifique est d'étalonner en masse un échantillon représentatif constitué de 50 amas de galaxies sélectionnés en SZ (catalogues Planck et ACT) à un décalage vers le rouge moyen à élevé ($0,5 < z < 0,9$) et couvrant un ordre de grandeur en masse. L'observation de ces amas permettra de mener une étude complète de leur morphologie et de leur évolution. De plus, ces données seront combinées aux données X du satellite XMM-Newton afin d'étudier les profils thermodynamiques radiaux (densité, pression, masse, température, entropie). Ces derniers sont essentiels pour une compréhension complète de la relation observable-masse des amas de galaxies et du profil moyen de pression qui permettront in fine d'exploiter les grands relevés d'amas pour contraindre la cosmologie.

Le Grand Programme SZ de NIKAZ a officiellement débuté en octobre 2017. Lors des premières campagnes, 10 amas ont été observés et s'ajoutent à celui observé en phase de vérification scientifique (avril 2017). Grâce à ce dernier nous avons montré [F. Ruppin et al., A&A 2018] que NIKAZ produit des cartes SZ avec une résolution du même ordre que celle du satellite XMM-Newton et avec la sensibilité requise pour l'analyse conjointe X/SZ. Les données NIKAZ ont été utilisées conjointement avec les données SZ provenant d'autres instruments (MUSTANG, Bolocam et Planck) afin d'établir de manière non paramétrique les meilleures contraintes sur la distribution électronique de la pression de l'amas de son centre à sa périphérie. Il a été identifié un excès de pression thermique dans la région sud-ouest de l'amas et l'équipe a montré que l'impact de cette dernière sur le profil de pression et sur les estimations du signal SZ intégré et de la masse sont notables. Ces travaux soulignent le fait que NIKAZ aura un rôle crucial à jouer pour la caractérisation du profil moyen de pression et de la relation d'échelle signal SZ-masse.

Par ailleurs, l'équipe a mené une étude prospective du Grand Programme SZ. En collaboration avec les universités de Rome et de Madrid, l'équipe a défini une réplique synthétique de l'échantillon d'amas du grand programme SZ de NIKAZ, basée sur la simulation à N-corps MUSIC. Cette approche originale a permis d'étudier les systématiques induites par la méconnaissance des sous-structures et des perturbations, notamment sur la pente et la dispersion du profil moyen de pression [F. Ruppin et al., A&A 2019].

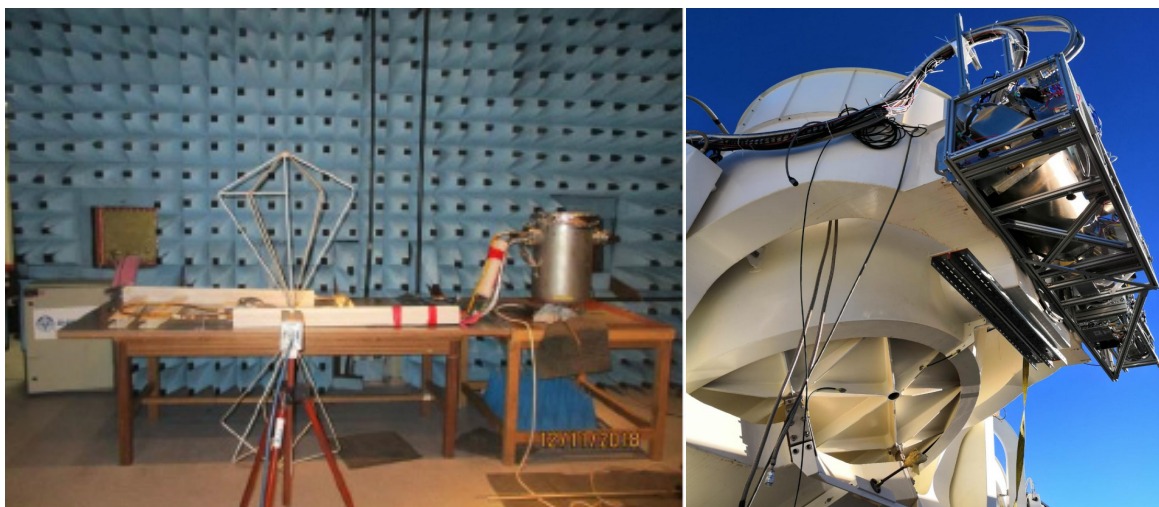


Figure 3. Gauche: dispositifs pour les tests EMC des détecteurs et harnais de vol du NISP dans les installations d'IRBUS Intespace. Droite: instrument KISS installé dans le télescope QUIJOTE 1 au Teide Observatory, Tenerife

Au sein de l'astrophysique millimétrique un grand nombre de sujets scientifiques demandent des spectromètres à faible résolution spectrale mais avec un grand champ de vue. De par leur caractéristiques techniques (rapidité, linéarité, grand facteur de multiplexage, etc.) les KIDs sont particulièrement adaptés pour équiper de tels instruments, et nous participons activement à leur développement dans le cadre d'une collaboration multi-instituts (LPSC, Institut Néel, IPAG et IRAM) à Grenoble.

KISS est un spectromètre à transformée de Fourier basse résolution (2-3 GHz), fonctionnant entre 100 et 300 GHz avec 600 KIDs, qui a été installé fin 2018 au télescope QUIJOTE dans l'observatoire du Teide à Tenerife. KISS a pour objectif la mesure de l'effet SZ dans les amas de galaxies proches dans le but de cartographier leurs propriétés physiques telles que la pression et la masse. Le LPSC a été moteur dans la conception et la fabrication de l'instrument en prenant en charge la construction de l'interféromètre de type Martin-Pupplet, l'électronique de lecture, l'installation, et le commissioning qui se déroule actuellement.

L'équipe s'est également engagée dans la construction de l'instrument CONCERTO qui sera installé en 2021 au télescope APEX de l'ESO, dans le désert d'Atacama (Chili) et qui est financé par une ERC advanced grant. CONCERTO cherche d'une part, à mesurer la distribution de matière et le taux de formation d'étoiles à haut redshift via des observations des raies CII, et d'autre part, la détection d'amas de galaxies via l'effet SZ. L'équipe du LPSC participe activement à la conception et à la fabrication de l'instrument avec la prise en charge de l'électronique de lecture et la fabrication de l'interféromètre de type Martin-Pupplet.

2.5.5 Le projet de satellite EUCLID

Le satellite EUCLID, qui sera lancé par l'ESA en 2022 a pour but l'étude de la distribution de matière sombre dans l'Univers et la compréhension de la nature de l'énergie noire. EUCLID réalisera un relevé du ciel de 15000 degrés carrés dans le visible (instrument VIS) et l'infrarouge (instrument NISP) pour mesurer l'effet de lentille gravitationnelle, le clustering de galaxies et la distribution d'amas de galaxies dans l'Univers. L'équipe du LPSC a pris en charge les tests EMC (electro-magnetic compatibility) des détecteurs et les harnais de vol du NISP, elle contribue à la préparation des études des amas de galaxies et participe à la cellule de communication d'EUCLID.

Pour les tests EMC du NISP l'équipe a conçu et construit un cryostat innovant permettant à la fois l'irradiation des détecteurs du NISP avec des ondes radio (entre 13 MHz et 18 GHz) et leur fonctionnement cryogénique en conditions d'étanchéité à la lumière visible et infrarouge (voir aussi le rapport du services détecteurs et instrumentation ainsi que celui du service études et réalisations mécaniques). Elle a également pris en charge la réalisation des tests dans une chambre anéchoïque chez AIRBUS Intespace à Toulouse, ainsi que l'analyse des données obtenues et le reporting des résultats au CNES et à l'ESA. Grâce à ces tests nous avons pu démontrer que les LEDs de calibration n'affecteront pas les mesures scientifiques et nous avons mis en évidence un léger excès de bruit de lecture induit par le rayonnement à 75 et 100 MHz. Cet excès fait actuellement l'objet d'un suivi.

L'équipe participe également au groupe du SGS (Science Ground Segment) en charge du pipeline d'analyse pour les amas de galaxies : notamment en ce qui concerne la sélection et caractérisation de leurs propriétés en combinant les données EUCLID avec les données externes comme celles de Planck et NIKA2. Enfin, l'équipe a contribué à la réalisation d'un film de vulgarisation scientifique.

2.5.6 Pour en savoir plus

Principales publications durant la période :

Adam, R, "Observing clusters of galaxies with Sunyaev-Zel'dovich effect and the Polarization of the CMB: from Planck to NIKA", **PhD thesis UGA**, Sept, 2015

Ritacco, A., "Polarimetry at millimetric wavelengths with NIKA and NIKA2", **PhD thesis UGA**, Oct 2016

Ruppin, F., "Cosmology and dark matter with SZ observations of clusters of galaxies", **PhD thesis UGA**, Oct 2018
Planck results 2015, **Planck Legacy results 2018**, **Planck intermediate results 2016**, **2017** et **2018**, **Planck Legacy Archive**, <https://www.cosmos.esa.int/web/planck/publications>

NIKA 150 GHz polarization observations of the Crab nebula and its spectral energy distribution, Ritacco et al., *Astron. Astrophys.* 616 (2018) A35

Polarimetry at millimeter wavelengths with the NIKA camera : calibration and performance, Ritacco et al, *Astron. Astrophys.* 616 (2017) A33

Absolute calibration of the polarisation angle for future CMB Q - U -mode experiments from current and future measurements of the Crab nebula, Aumont, J., Macías-Pérez, J.F. Ritacco, A. & Ponthieu, arXiv [1805.10475A](https://arxiv.org/abs/1805.10475)

Galactic Magnetic Field Reconstruction I : Constraints from polarized diffuse emission : Methodology and simulations, Pelgrims, V., Macías-Pérez, J.F. & Ruppin, F., arXiv:1807.10515, 2018a

Galactic Magnetic Field Reconstruction I : Constraints from polarized thermal dust sky as seen by Planck, Pelgrims, V. & Macías-Pérez, J.F, arXiv1807.10516, 2018b

The NIKA2 large-field-of-view millimetre continuum camera for the 30m IRAM telescope, R. Adam et al., Astron. Astrophys. 609 (2018) A115

First Sunyaev-Zel'dovich mapping with NIKA2: implication of cluster substructures on the pressure profile and mass estimate, F. Ruppin et al., Astron. and Astrophys. 615 (2018) A112

Impact of ICM disturbances on the mean pressure profile of galaxy clusters: a prospective study of the NIKA2 SZ large program with MUSIC synthetic clusters, F. Ruppin et al., arXiv:1901.04580

Spatially and Spectrally resolved Sunyaev-Zel'dovich effects. A millimetre/submillimetre probe of the warm and hot universe, Mroczkowski et al 2019, SSRv, 215, 17

Thèses soutenues Durant la période : 2

1. A. Ritacco - « *Polarimétrie aux longueurs d'onde millimétriques avec les instruments NIKA et NIKA »*2 - 14 octobre 2016 - Dir. J.F. Macias-Perez
2. F. Ruppin - « *Cosmologie via les observations d'un amas de galaxies par effet Sunyaev-Zel'dovich avec NIKA2 »* - 27 septembre 2018 - Dir. F. Mayet