

<p style="text-align: center;">Document du groupe de travail Cosmologie et Matière noire pour la préparation de la prospective Dapnia/IN2P3</p>
--

Groupe de travail

Pierre Astier (LPNHE, Paris), Edouard Audit (DAPNIA/SAP)
Gabriel Chardin (DAPNIA/SPP), Jacques Dumarchez (LPNHE, Paris)
Joël Feltesse (DAPNIA/SPP), Yannick Giraud-Héraud (PCC/CdF & APC, Paris)
James Rich (DAPNIA/SPP), Sylvie Rosier-Lees (LAPP, Annecy)
Daniel Santos (LPSC, Grenoble), Gérard Smadja (IPN, Lyon)

3 septembre 2004

Synthèse

La communauté impliquée dans les domaines de la cosmologie et de la recherche de la matière cachée représente un ensemble d'environ 90 physiciens permanents. Cette communauté présente un grand dynamisme et connaît une croissance régulière du nombre de physiciens impliqués. La communauté française a des contributions majeures dans plusieurs programmes phare comme PLANCK, avec son précurseur ARCHEOPS, dans les expériences EDELWEISS, ANTARES ainsi que le *Supernova Cosmology Project*. Les équipes françaises sont également impliquées de façon importante dans des collaborations internationales comme HESS ou AMS. La visibilité des équipes françaises, qui ont joué un rôle de pionnier dans une large fraction de ces domaines, est donc excellente et s'articule autour des grandes questions posées actuellement avec acuité par la cosmologie et le modèle de concordance.

COSMOLOGIE

Le modèle de *concordance* de la cosmologie s'appuie sur un grand nombre d'observations dont les approches sont parfois indépendantes et complémentaires. Les équipes françaises y ont joué un rôle important que ce soit dans le domaine des études des anisotropies du fond diffus cosmologique (ARCHEOPS et PLANCK), dans celui de l'utilisation des supernovæ de type Ia comme chandelles standard (*Supernova Cosmology Project*), dans celui des observations à grand champ (*Canada-France Redshift Survey* et VIRMOS sur le VLT) ou dans celui des relevés X avec XMM. Les grandes questions ouvertes aujourd'hui sont la nature de

l'énergie noire et de la matière noire ainsi que la recherche d'une trace directe de la période inflationnaire.

Toutes ces questions seront abordées par les programmes observationnels qui sont développés au sein des équipes du DAPNIA et de l'IN2P3 pour les dix prochaines années. Il s'agit notamment d'un côté du programme <<supernovæ de type Ia et astrophysique à grand champ>> autour de la caméra MEGACAM installée sur le télescope Canada-France-Hawaï et de l'autre du programme PLANCK de l'ESA, satellite destiné à l'analyse des anisotropies du fond diffus cosmologique qui sera lancé en août 2007. Dans le domaine des observations infrarouges les résultats les plus importants viendront de deux grandes missions spatiales : le satellite HERSCHELL (et son instrument SPIRE) dont le lancement est couplé avec celui de PLANCK, et l'instrument MIRI qui équipera le JWST (lancement 2011).

Au regard des questions qui seront encore ouvertes, à l'horizon 2015-2025, la nécessité d'un satellite dédié à la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique s'est dégagée de façon extrêmement claire et une réflexion internationale est engagée avec différentes hypothèses : pilotage NASA (*Einstein Probes*), pilotage ESA voire CNES (projet SAMPAN). Cette perspective implique d'ores et déjà la mise en place d'un programme intensif de R&D sur le développement de matrices de bolomètres, nécessité que l'on retrouve aussi dans le cas des observations X qui devront permettre de faire de la spectro-imagerie avec une résolution spectrale près de 20 fois supérieure à celle des instruments actuelles.

Dans le domaine de l'observation optique à grand champ aussi, l'avenir se situe manifestement dans l'espace. Les équipes françaises impliquées dans cette réflexion sont en train de coordonner leurs efforts en évaluant les différents schémas techniques (spectromètre, taille de miroir, *etc.*) et organisationnels (projet JDEM-NASA/DOE ; projet DUNE qui serait piloté par l'ESA voire par le CNES directement dans le cadre d'une collaboration inter-agences européennes).

MATIERE CACHEE

Les principales expériences actuelles se distinguent par leur mode de détection des éventuelles interactions de WIMPs. Les expériences de détection directe cherchent à mettre en évidence en laboratoire une population identifiée de reculs nucléaires, les expériences de détection indirecte cherchant de leur côté à observer les produits d'annihilation des WIMPs.

Détection directe

Les trois expériences actuellement les plus sensibles, CDMS aux Etats-Unis, EDELWEISS et CRESST en Europe, utilisent des détecteurs cryogéniques permettant un rejet actif du bruit de fond radioactif. Elles bénéficient d'une sensibilité d'environ 10^{-6} picobarn. La majeure partie des efforts des équipes françaises dans le domaine de la détection directe s'est actuellement investie dans les développements d'EDELWEISS. La première phase d'EDELWEISS s'est achevée en mars 2004 et a permis de tester pour la première fois un ensemble de modèles de supersymétrie. La deuxième phase de l'expérience doit permettre de progresser de plus d'un ordre de grandeur en sensibilité et de tester une fraction beaucoup plus large de théories supersymétriques, jusqu'à un niveau de sensibilité de quelques 10^{-8} picobarn. Au-delà de cette étape, qui implique des équipes françaises, allemandes et russes, avec une contribution française prédominante, la stratégie des équipes impliquées s'organise dans le projet européen EURECA. La première phase d'EURECA doit permettre, sur une période d'étude de 4

ans, de tester l'ensemble des points de développement nécessaires à la mise en oeuvre d'une masse cible de l'ordre d'une tonne, nécessaire à terme pour tester une très large fraction des modèles de supersymétrie et identifier de façon inambiguë d'éventuels candidats WIMPs. Le coût de l'expérience 1 tonne est estimé à environ 50 M€. la contribution française à cet effort pourrait représenter environ 20 à 25 % de cet investissement afin de conserver un rôle majeur dans ce projet.

Détection indirecte

Concernant la détection indirecte des WIMPs, la contribution française est très importante dans l'expérience européenne Antarès. Elle est également significative dans les expériences AMS et HESS, ainsi que de façon plus réduite dans l'expérience GLAST. Les performances de l'étape 0,1 km² d'ANTARES doivent permettre de définir la phase 1 km³ en rassemblant les équipes impliquées dans les programmes ANTARES, NEMO et NESTOR. Le coût de l'étape 1 km³ est actuellement étudié dans le cadre d'une *Design Study* européenne.

CONCLUSIONS

L'excellence des résultats obtenus, le caractère fondamental des questions étudiées et la haute valeur ajoutée associée aux développements mis en oeuvre dans ces expériences justifient la recommandation du renforcement des soutiens humains et financiers accordés à ce domaine de recherche.

Introduction

Ces dernières années ont vu l'émergence d'un modèle cosmologique dit de "*concordance*" décrivant un univers à grande échelle ayant les caractéristiques suivantes:

- la densité totale d'énergie de l'Univers est proche de la densité critique, $\Omega_T \simeq 1$
- environ 70% de cette énergie est sous la forme d'une "*énergie du vide*" effective responsable, aujourd'hui, de l'accélération de l'expansion de l'Univers.
- les 30% restants sont composés de 90% de matière noire froide (CDM) moteur de la formation des grandes structures via l'instabilité gravitationnelle et de 10% de matière baryonique.
- les grandes structures observées aujourd'hui se sont formées par instabilité gravitationnelle à partir de fluctuations de densité ayant un spectre invariant d'échelle en première approximation.

Ce modèle cosmologique, même s'il souffre de nombreuses lacunes (plus de 95% du contenu énergétique de l'univers est d'origine inconnue !) permet d'interpréter avec une remarquable cohérence la plupart des observations actuelles. Il apparaît difficile de sortir de ce scénario de *concordance* sans remettre en cause de manière profonde la gravité. C'est donc le cadre théorique légitime dans lequel se situe cette prospective.

Dans ce contexte, les efforts à venir (et pour une large part les efforts passés) en cosmologie seront motivés par les questions suivantes:

- **déterminer avec précisions les paramètres du modèle cosmologique et notamment ceux permettant de contraindre la physique de l'inflation ;**
- **élucider le contenu énergétique de l'Univers ;**
- **élaborer un scénario complet de la formation des structures de l'Univers.**

Il faut noter qu'au fur et à mesure que nos connaissances s'affinent ces trois grandes questions sont de plus en plus intimement liées. La formation des structures dépend en effet de manière fine de l'évolution globale de l'Univers et de son contenu, ce qui permet des contraintes mutuelles ; de plus la précision attendue pour les futures expériences nécessite la prise en compte de l'inhomogénéité de l'Univers pour un traitement optimum des données.

Cosmologie

SITUATION OBSERVATIONNELLE

Le modèle de *concordance* de la cosmologie s'appuie sur un grand nombre d'observations dont les approches sont parfois indépendantes et complémentaires :

- **le spectre des fluctuations du fond diffus cosmologique (CMB) mesuré avec une grande précision, dans un premier temps par les expériences embarquées sur ballon stratosphérique BOOMERANG, MAXIMA et ARCHEOPS, puis par le satellite WMAP.** L'interprétation des caractéristiques de ce spectre a permis de mettre des contraintes fortes sur le modèle cosmologique : la présence d'un plateau aux grandes échelles angulaires est la première indication d'un spectre de fluctuations indépendant d'échelle ; la présence d'un pic acoustique aux échelles de l'ordre de 1° implique un Univers dont le contenu en énergie est proche de la densité critique ; l'amplitude relative des deux premiers pics acoustiques induit une composante baryonique de la matière compatible avec les résultats obtenus en mesurant les abondances primordiales des éléments légers ;
- **la luminosité apparente des supernovæ de type Ia en fonction du décalage vers le rouge.** Ces mesures, corrélées avec d'autres observations comme celles menant à la mesure du spectre des fluctuations du fond diffus cosmologique précédemment citées, sont des arguments très forts en faveur d'une accélération actuelle de l'expansion de l'Univers ;
- **la distribution de matière à grande échelle obtenue à l'aide soit des relevés spectroscopiques des galaxies, soit des catalogues d'amas de galaxies, ou bien, plus récemment, des analyses de cisaillement gravitationnel.** Les distributions de galaxies déduites des relevés spectroscopiques ainsi que les catalogues d'amas issus des grands catalogues X et interprétées dans le cadre du modèle de formation des structures basé sur l'hypothèse de la présence de matière noire froide, ont montré pour la première fois que la densité de matière de l'Univers était de façon significative inférieure à la densité critique. Le cisaillement gravitationnel sur des galaxies distantes dû à la présence de matière sur la ligne de visée permet d'étudier de façon globale la distribution de matière de l'Univers sans se restreindre à la matière visible présente dans les galaxies. La cohérence de ces mesures avec le spectre de fluctuations initiales et les modèles de formation des structures est une étape importante vers l'élaboration d'un modèle cosmologique complet.
- **l'étude de l'émission X en direction des amas de galaxies.** Ces mesures ont montré qu'environ 90 % de la masse présente au cœur des amas n'était pas sous forme d'étoiles ou gaz chaud, donnant en outre une estimation fiable du rapport $\Omega_b/\Omega_{\text{CDM}}$. Cette invariance de la fraction de baryons dans les amas permet de les utiliser comme chandelles standard et ainsi de mesurer l'accélération de l'Univers avec une précision s'approchant de celle obtenue avec les SNIa. De plus ces observations ont permis de mesurer l'abondance des amas de galaxies et mis en évidence leur auto-similarité ce qui sont des prédictions des scénarios de formation hiérarchique des grandes structures.

CONTRIBUTIONS FRANCAISES DANS LE DOMAINE

Les équipes françaises ont joué un rôle important dans tous ces domaines de la cosmologie. En ce qui concerne les observations du fond diffus cosmologique, elles ont eu un rôle moteur dans le programme ARCHEOPS, ballon stratosphérique du CNES qui a permis notamment, grâce à l'analyse des données du vol de février 2002, d'obtenir la première mesure de Ω_T avec une précision de 2%. Ce succès a été construit avec un double objectif : tester les éléments de base de l'instrument HFI du satellite PLANCK (cryostat à dilution,...) et permettre à la communauté française d'obtenir des résultats scientifiques avant le lancement du satellite prévu en 2007. Sur les observations des supernovæ de type Ia, une équipe française du LPNHE Paris VI et VII est membre du *Supernova Cosmology Project*, un des deux groupes ayant mis en évidence l'accélération de l'expansion de l'Univers. Des astrophysiciens de l'Institut d'Astrophysique de Paris et du DAPNIA ont été les premiers à observer le cisaillement gravitationnel induit par la matière à grande échelle. Les astrophysiciens français ont aussi été pionniers dans la mise en place des relevés à grand décalage vers le rouge avec le *Canada-France Redshift Survey* et aujourd'hui avec le programme VIRAMOS sur le VLT. De plus, les groupes français ont eu une contribution importante dans l'étude des amas de galaxies, à la fois à travers les études des effets de lentilles gravitationnelles déjà citées et à travers l'étude de l'émission X en provenance du cœur des amas avec le satellite XMM (participation du DAPNIA/SAP). Enfin, des équipes françaises ont contribué de manière très significative à l'étude de la formation des structures au moyen de simulations numériques. Ces travaux, en plus de leur intérêt propre, sont un support indispensable à la plupart des grands projets observationnels.

QUESTIONS OUVERTES

Outre la détermination de plus en plus précise des paramètres cosmologiques, les prochains programmes observationnels en cosmologie seront motivés par les questions suivantes :

- **cartographie de la matière noire**
- **identification de l'énergie noire** : le problème de la nature de la matière noire est abordé dans une autre section de ce document. En ce qui concerne l'énergie du vide les seules investigations possibles aujourd'hui concernent leurs distributions spatiales et temporelles. En particulier, cette composante peut évoluer lentement avec le temps et les futurs programmes de recherche de supernovæ de type Ia pourraient donner des indications précieuses sur cette évolution ;
- **détermination du spectre initial des perturbations**
- **formation des structures** : l'étude de la façon dont les structures gravitationnellement liées se sont formées à partir des fluctuations primordiales. La grande question actuelle est de comprendre la physique complexe des baryons au sein des puits de potentiel de la matière noire. Ce point a un intérêt astrophysique évident mais il permet également de tester directement les lois de la gravitation. Le modèle standard de la cosmologie suppose la validité des théories de la gravité de Newton et d'Einstein tout en sachant qu'elles n'ont été effectivement testées qu'à l'échelle du système solaire. Dans ce domaine, un autre point intéresse particulièrement les physiciens des particules, à savoir la possibilité de mesurer la masse du neutrino à travers ses implications sur la formation des structures ;

- **trace directe de la période inflationnaire** : la recherche d'effets directs, conséquence de l'inflation primordiale qui a mené à notre Univers ayant une densité proche de la densité critique et de l'invariance d'échelle. L'une des voies les plus prometteuses dans ce domaine semble être l'étude de la polarisation B des anisotropies du fond diffus cosmologique, qui est créée par les ondes gravitationnelles primordiales produites à la fin de l'inflation. Cet effet devrait être observable si l'inflation s'est terminée à une époque où la température était plus grande que 10^{15} GeV sachant que l'échelle de Grande Unification est attendue autour de 10^{16} GeV. En conséquence, si l'inflation a quelque chose à voir avec cette échelle, l'effet devrait être détectable. Le fond diffus cosmologique nous ouvre donc l'une des quelques fenêtres possibles sur cette nouvelle physique.

PROJETS ACTUELS DE LA COMMUNAUTÉ

Toutes ces questions devront être abordées par les programmes observationnels qui seront développés au sein des équipes du DAPNIA et de l'IN2P3 dans les dix prochaines années.

En astronomie optique, les avancées les plus significatives sont attendues en provenance des programmes utilisant des grandes caméras CCD. Aujourd'hui la plus grande de ces caméras, construite par le DAPNIA, couvre un champ de 1 deg^2 et est montée sur l'instrument MEGACAM installée sur le télescope Canada-France-Hawaï (Mauna Kea, Hawaï). Le CFHT *Legacy Survey* qui a débuté en septembre 2003, permettra d'obtenir des résultats de première importance dans le domaine de la recherche des supernovæ de type Ia et dans celui du cisaillement gravitationnel. Sachant que quelques centaines de supernovæ seront observées sur une période de cinq ans, le diagramme (décalage vers le rouge)-(luminosité apparente de la supernova) permettra d'améliorer significativement la mesure de l'accélération de l'expansion tout en contraignant plus fortement les limites sur l'évolution temporelle de l'énergie du vide. Une telle évolution est prédite par les modèles qui identifient cette énergie du vide avec un champ scalaire tel que l'inflaton. En ce qui concerne le cisaillement gravitationnel, le *Legacy Survey* qui couvrira de l'ordre de 200 deg^2 ainsi que les relevés *COSMOS* et *GOODS* effectués depuis l'espace avec l'instrument HST/ACS donneront des contraintes très fortes sur les modèles cosmologiques par des mesures des statistiques du cisaillement. Ces observations permettront également de construire, pour la première fois, un catalogue d'amas sélectionnés en masse. La comparaison des résultats obtenus avec ces observations avec ceux obtenus avec les relevés spectroscopiques de galaxies (e.g. VIRMOS et SDSS) pourrait permettre de contraindre les théories alternatives de la gravitation et les différents modèles existant pour l'énergie sombre. Ces analyses s'appuieront pour une grande part sur des simulations numériques.

En ce qui concerne le fond diffus cosmologique, le programme le plus important sera la mission PLANCK de l'ESA qui sera lancée en 2007 et autour duquel s'est fédéré l'ensemble de la communauté française. Il permettra d'obtenir pour neuf fréquences entre 30 et 857 GHz, une carte complète du ciel avec une résolution angulaire pouvant atteindre 5 arcmin. Ses observations permettront de parachever la mesure des anisotropies de température jusqu'à des moments multipolaires (l) de l'ordre de 2000 en étant essentiellement limitées par la capacité à soustraire les avant-plans bien que sur cet aspect il sera beaucoup mieux armé que WMAP grâce à sa couverture en fréquence importante. En ce qui concerne la mesure de la polarisation du fond diffus, PLANCK donnera un spectre de puissance précis de la



Figure 1: Instrument de qualification de PLANCK-HFI sur sa platine d'étalonnage (cf. <http://planck.fr/>).



Figure 2: Le télescope Canada-France-Hawaï avec la caméra Megacam installée au foyer primaire.

polarisation E jusqu'à des l de l'ordre de 1000 mais sera limité dans sa capacité à mesurer les modes B.

De plus, PLANCK fournira un catalogue d'environ 10 000 amas détectés grâce à la mesure des distortions du spectre du fond diffus cosmologique par interaction des photons avec les électrons à haute température présents au coeur des amas (effet Sunyaev-Zel'dovich). D'un point de vue général, l'effet Sunyaev-Zel'dovich est un outil en principe beaucoup plus efficace que la mesure du rayonnement X pour détecter les amas de galaxies à grand redshift. Ceci en fait une sonde importante pour contraindre les scénarios de formation des amas et donne une nouvelle approche pour déterminer les paramètres cosmologiques qui sera pleinement exploitée dans le cadre de la mission PLANCK.

Grâce à sa résolution angulaire supérieure à celle d'ARCHEOPS, OLIMPO, projet de mission embarquée sous ballon stratosphérique, pourrait, s'il est définitivement approuvé, mesurer les anisotropies du fond diffus cosmologique à petite échelle et étudier avec plus de détails les amas de galaxies.

Afin d'optimiser l'analyse des données polarisées de PLANCK, la mission embarquée sous ballon PILOTE qui utilise les bolomètres développés au DAPNIA pour l'instrument PACS, devrait mesurer la polarisation des avant-plans, notamment des nuages et poussières galactiques.

En ce qui concerne la modélisation numérique en cosmologie, le projet HORIZON est parvenu à rassembler au niveau national la très grande majorité des personnes ayant des compétences dans ce domaine. Ce projet a pour objectif de fédérer les activités en simulation numérique autour d'un projet ciblé sur l'étude de la formation des galaxies dans un contexte cosmologique. Il permettra entre autre de développer les compétences et de former les équipes nécessaires pour utiliser au mieux les très grands moyens de calculs. Par ailleurs, le projet transdisciplinaire COMBUSTION ET SUPERNOVÆ qui regroupe différentes communautés (astrophysiciens, mathématiciens appliqués, combustionnistes..) avec pour objectif de comprendre et modéliser les mécanismes physiques de l'explosion des SNIa, apportera un soutien théorique important aux équipes utilisant ces astres complexes pour la cosmologie.

Dans le domaine des observations infrarouges les résultats les plus importants viendront de deux grandes missions spatiales. Le satellite HERSCHELL, et plus particulièrement pour la

cosmologie le spectro-imageur SPIRE dont l'électronique est réalisée au DAPNIA, sera lancé en 2007. L'instrument MIRI qui équipera le JWST est en partie conçu et réalisé au DAPNIA (module optique) et sera opérationnel en 2011. Ces deux instruments permettront d'observer l'univers à très grand redshift et ainsi d'étudier la formation des premières structures.

PROSPECTIVE A 15 ANS

Au regard des questions qui seront encore ouvertes à l'horizon 2015, les futures expériences de mesure du fond diffus cosmologique doivent avoir pour objectif soit la mesure des anisotropies de température à très haute résolution angulaire, soit la mesure de la polarisation pour laquelle des niveaux de sensibilité 100 fois meilleurs sont requis. Aux petites échelles angulaires, la polarisation B des anisotropies du fond diffus cosmologique est principalement due aux effets de lentille gravitationnelle induits par la matière sur les photons du fond diffus. Ceci en fait, au même titre que pour les observations optiques à grand champ (mais en sondant jusqu'à $z = 1000$ au lieu de 2-3), un outil pour l'étude de la formation des structures impliquant des contraintes sur la masse des neutrinos. L'effet d'un neutrino massif sera observable si sa masse est supérieure à 0,05 eV, ce qui est attendu suite aux résultats obtenus avec les mesures d'oscillations de neutrinos.

Dans le cadre des réflexions actuellement en cours aussi bien au niveau national qu'international (appel d'offre *Einstein Probes* de la NASA, appel à thèmes de l'ESA, appel à idées du CNES, prospective Astroparticules menée par la CID 47), la nécessité d'un satellite, à l'horizon 2015-2025, dédié à la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique s'est dégagée de façon extrêmement claire.

Pour atteindre cet objectif, derrière lequel se retrouve l'ensemble des équipes de l'IN2P3 et du DAPNIA travaillant dans le domaine, il apparaît essentiel de participer aux programmes de R&D sur les détecteurs développés dans le Monde pour permettre à la communauté française de contribuer significativement aux programmes observationnels des années futures. C'est le choix effectué par le CSNSM d'Orsay, le LPSC de Grenoble et le PCC/CdF-APC/Paris 7 qui contribuent de façon importante au projet coordonné par Alain Benoît du CRTBT (Grenoble) de développement de matrices de bolomètres fonctionnant dans les domaines sub-millimétrique et millimétrique. De façon plus volontariste, les équipes du CSNSM et du PCC/CdF-APC/Paris 7 considèrent qu'il est important, dans le cadre de programmes observationnels au sein d'une collaboration internationale, de mettre en œuvre les nouvelles idées de détecteurs destinés au futur satellite en participant à des expériences préliminaires au sol ou en ballon. Le projet BRAIN/CLOVER, auquel sont associées, outre ces deux laboratoires, des groupes des universités de Cardiff, de Cambridge, de Roma La Sapienza, et du côté français du CESR de Toulouse, de l'IAS d'Orsay et du LISIF de l'Université Paris VI est un projet d'expérience au sol de mesure de polarisation B du fond diffus cosmologique. L'objectif est d'installer à l'échéance de 2008 deux instruments devant fonctionner sur le site du Dôme C en Antarctique : un imageur couvrant les moments multipolaires de $l=50$ à $l=600$ (CLOVER) et un interféromètre bolométrique couvrant les moments multipolaires de $l=50$ à $l=150$ (BRAIN). La première phase de ce projet en cours de définition sera un démonstrateur constitué d'une ligne de base interférométrique qui pourrait être installée sur le site en décembre 2005.

Dans le domaine de l'observation optique à grand champ aussi, l'avenir se situe manifestement dans le développement d'une caméra à grand champ dans l'espace. Un tel instrument permettra d'étendre la recherche des supernovæ à des décalages vers le rouge plus

importants menant à des contraintes sur l'évolution de l'équation d'état (w) de l'énergie noire tout en réduisant considérablement les fluctuations induites, lors des observations au sol, par les turbulences atmosphériques. Pour le cisaillement gravitationnel, l'absence de contribution du fond de ciel, la stabilité des conditions d'observation et l'amélioration du *seeing* permettront une exploration plus profonde de la distribution de matière de l'Univers. L'utilisation conjointe des informations issues des SNIa et du cisaillement gravitationnel fera de cet instrument un outil unique pour contraindre la nature de l'énergie noire. La réflexion sur ce futur satellite grand champ est menée activement dans un contexte international en évolution rapide. Les équipes françaises impliquées dans cette réflexion sont en train de coordonner leurs efforts en évaluant les différents schémas techniques (spectromètre, taille de miroir, *etc.*) et organisationnels (projet JDEM-NASA/DOE ; projet DUNE qui serait piloté par l'ESA voire par le CNES directement dans le cadre d'une collaboration inter-agences européennes).

En ce qui concerne les observations en rayons X, la R&D s'oriente essentiellement vers la conception de matrices de micro-bolomètres X permettant de faire de la spectro-imagerie avec une résolution spectrale près de 20 fois supérieure à celle des instruments actuelles. Une R&D basée sur une technique de gravure silicium développé pour les matrices de bolomètres infrarouges de HERSCHELL/PACS est en cours au DAPNIA. Les projets de satellite X embarquant cette technologie, notamment le projet XEUS, sont prévus vers 2018. Ce type d'instruments permettra d'étudier tout l'*univers chaud* et plus particulièrement les premiers trous noirs et la formations des premières structures.

Matière Noire

Comme nous l'avons souligné dans l'introduction, le modèle de *concordance* indique que 90% de la matière dans l'univers est sous forme de matière noire froide non baryonique. Identifier cette composante non baryonique est une question scientifique majeure aussi bien pour la cosmologie que pour la physique des particules.

La supersymétrie, extension du Modèle Standard, est également un ingrédient essentiel des théories de supercordes. Ces théories permettent d'unifier la gravitation aux autres interactions fondamentales. Elles proposent de façon naturelle des candidats de particules massives interagissant faiblement avec la matière ordinaire, les WIMPs, qui pourraient permettre de résoudre l'énigme de la matière cachée.

Les modèles supersymétriques prédisent des sections efficaces d'interaction WIMP-nucléon typiques de l'interaction faible. Les sections efficaces prédites par ces théories varient entre quelques 10^{-5} picobarn pour les modèles les plus optimistes jusqu'à des sections efficaces aussi faibles que 10^{-10} picobarn, voire même plus faibles encore pour certains modèles. La mise en évidence des interactions de ces particules massives reliques du *Big-Bang* s'inscrit donc en parallèle de la production directe de telles particules auprès du LHC, au CERN, à partir de 2008 environ.

D'autres candidats, tels les axions ou les particules de Kaluza-Klein, permettent d'envisager d'autres solutions à l'énigme de la Matière Cachée, même si elles apparaissent moins motivées que l'hypothèse des WIMPs, dont la détection engage la majeure partie des efforts de la communauté astroparticules, française comme internationale. Nous n'aborderons que très brièvement ces projets.

Les principales expériences actuelles se distinguent par leur mode de détection des éventuelles interactions de WIMPs. Les expériences de détection directe cherchent à mettre en évidence une population identifiée de reculs nucléaires en laboratoire souterrain, afin de se protéger du bruit de fond induit par le rayonnement cosmique. Les expériences de détection indirecte cherchent de leur côté à observer les produits d'annihilation des WIMPs, soit avec la signature directionnelle (rayonnement gamma et neutrino) des zones d'accumulation comme le centre du Soleil, de la Terre, des amas globulaires ou encore des galaxies, soit à travers un excès global diffus d'antiparticules ou de rayonnement gamma à haute énergie (particules chargées, rayonnement diffus gamma voire neutrinos).

DÉTECTION DIRECTE : SITUATION ET STRATÉGIE DE DÉTECTION

Les expériences actuellement les plus sensibles de détection directe des WIMPs cherchent à mettre en évidence une population de reculs nucléaires qui ne puisse pas être attribuée à des interactions de neutrons. Les trois techniques actuellement testées s'appuient sur la détection des couples charge-chaleur, lumière-chaleur et charge-lumière. Ces trois formes de perte d'énergie mettent en jeu près de 100% de l'énergie de l'interaction pour la chaleur, 5% environ de l'énergie pour un recul nucléaire et environ 15 % pour un recul électronique sous forme d'ionisation, alors que moins de 1% environ de l'énergie d'un recul nucléaire apparaît sous forme de lumière (quelques pourcent au mieux pour un recul électronique). Les sources de reculs nucléaires qui peuvent constituer un bruit de fond physique aux interactions de WIMPs sont constituées par les interactions des neutrons, et par les reculs nucléaires



Figure 3: Le cryostat à dilution $^3\text{He}/^4\text{He}$ d'EDELWEISS-II, d'un volume utile de 100 litres, permet d'atteindre des températures inférieures à 10 mK en se dispensant presque totalement de fluides externes (azote et hélium liquides)



Figure 4: Vue de deux parmi les quatre télescopes de l'expérience HESS, basée en Namibie. Cette expérience permet de réaliser des cartographies de précision de sources gamma étendues comme le Centre Galactique, où l'annihilation des WIMPs pourrait se révéler.

de surface associés aux chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium et du radon externe.

Les trois expériences actuellement les plus sensibles, CDMS aux Etats-Unis, EDELWEISS et CRESST en Europe, utilisent des détecteurs cryogéniques. La sensibilité actuelle de ces expériences se situe aux alentours de 10^{-6} picobarn et permet d'explorer un premier ensemble de modèles supersymétriques parmi les plus optimistes. La deuxième génération d'expériences, qui mettront en jeu des masses de cible comprises entre 5 kg pour CDMS, 10 kg pour CRESST et jusqu'à 35 kg pour EDELWEISS, devraient permettre d'atteindre des sensibilités de quelques 10^{-8} picobarn, et de tester une part beaucoup plus large des modèles de supersymétrie. A l'horizon 2010, en fonction des résultats obtenus par cette deuxième génération d'expériences, il pourrait devenir nécessaire de mettre en jeu une masse totale de cible d'environ 1 tonne, qui permettrait d'explorer ou de confirmer la détection de particules supersymétriques jusqu'à des sections efficaces de l'ordre de quelques 10^{-10} picobarn. Afin de confirmer un candidat WIMP potentiel, on cherchera à mettre en évidence cette population de reculs nucléaires en l'observant sur au moins deux noyaux cible différents, d'où l'exploration actuelle de plusieurs techniques concurrentes de discrimination.

Axions

Créé pour résoudre l'énigme de l'absence de la violation de CP dans les interactions fortes, l'axion pourrait également permettre de résoudre l'énigme de la Matière Cachée de l'univers. Cependant, en dehors de contraintes phénoménologiques, rien ne vient contraindre sa contribution à la densité de l'univers. Les contraintes issues de l'évolution stellaire et des supernovae réduisent fortement le champ du domaine de masse accessible. Les principales expériences actuelles sont l'*US Axion Search* au LLNL, CAST auprès du CERN, et les expériences de détection directe de WIMPs utilisant des cristaux dont l'orientation des plans cristallins est connue (conversion cohérente). Sauf pour l'expérience réalisée au LLNL, il semble cependant difficile pour ces expériences d'atteindre un domaine d'axions à la fois

autorisé par les contraintes astrophysiques et contribuant de façon significative à la densité de matière de l'univers. Le retour d'expérience de CAST et d'EDELWEISS doit permettre aux équipes françaises qui participent à ces projets de définir une éventuelle étape ultérieure de recherche directe d'axions.

STRATÉGIE FRANCAISE 2004-2010

La majeure partie des efforts français en termes de détection directe se concentre actuellement sur EDELWEISS, collaboration franco-allemande qui a choisi de développer la détection charge-chaleur, bénéficiant d'excellentes résolutions sur les deux quantités mesurées. La technique de détection simultanée du couple lumière et chaleur est explorée en France par les équipes de l'IAS d'Orsay et de l'IPN de Lyon, parallèlement à l'investissement très important réalisé ces dernières années dans l'expérience germano-anglaise CRESST.

La principale limitation potentielle des détecteurs charge-chaleur est constituée par les événements de surface, pour lesquels la collecte incomplète de charge peut simuler des interactions de WIMPs, faiblement ionisants. Un programme de R&D de senseurs en couches minces de composition contrôlée (Nb_xSi_{1-x} ou Y_xSi_{1-x}) permettant une identification des événements de surface est poursuivi au CSNSM à Orsay. Les performances de ces détecteurs à couches minces dans l'étape EDELWEISS-II doit permettre de définir la génération future de détecteurs charge-chaleur en la comparant aux performances de la génération actuelle de détecteurs.

Parallèlement à ce programme, deux actions ont été engagées afin de rassembler les forces européennes autour d'une expérience de détection directe mettant en jeu une tonne de matériau-cible. Le réseau *Dark Matter* d'ILIAS, coordination européenne pour le domaine Astroparticules, et la *Design Study* EURECA (*European Underground Rare Event search with Calorimeter Array*) doivent permettre de clarifier d'ici 2008 la ou les techniques qui seraient retenues pour l'étape "1 tonne", nécessaire à terme, soit pour préciser les caractéristiques d'un WIMP détecté dans les expériences de deuxième génération lancées actuellement, soit dans l'optique d'une première détection. Au delà d'EDELWEISS-II, la contribution française à cette génération d'expériences se situe clairement dans cette perspective européenne.

Face aux projets européens, les Etats-Unis étudient de leur côté un projet d'ampleur similaire à EURECA, CRYOARRAY, basé sur l'expérience issue de CDMS-II. Parallèlement aux détecteurs cryogéniques, trois projets utilisent des cibles de gaz rares, dont les plus avancés utilisent le xénon : XMASS au Japon, ZEPLIN en Angleterre, et XENON aux Etats-Unis. La validité de cette dernière technique reste cependant à démontrer pour la détection de la Matière Cachée, les résultats actuels de ZEPLIN étant sujets à forte caution.

Il est important de noter que pour égaler les performances des détecteurs à discrimination du bruit de fond radioactif la technique de modulation annuelle requiert dès à présent une masse active de détecteurs de plus de 200 kg, sans aucun bruit de fond et pendant au moins 4 ans. De ce fait, une éventuelle signature de modulation annuelle ne devrait *a priori* être envisagée que dans une étape ultérieure, nécessairement très ambitieuse.

Dans la mesure où la section efficace d'interaction WIMP-nucléon serait favorable ($\geq 10^{-8}$ picobarn), il est possible d'envisager une signature directionnelle du recul en utilisant une cible gazeuse à pression modérée. Une activité de R&D sur la technique de détection ionisation-trace de recul, étudiée dans le projet anglo-américain DRIFT, pourra être poursuivie en France, notamment dans le cadre des développements de type MICROMEGAS.

DÉTECTION INDIRECTE DES WIMPS

La détection indirecte des WIMPs à travers les interactions de leurs produits de désintégration est complémentaire de la détection directe. Elle présente une sensibilité plus importante que la détection directe pour les modèles mettant en jeu des couplages à forte composante axiale, alors qu'elle présente une sensibilité inférieure à la détection directe pour les modèles présentant une composante scalaire appréciable.

Signal gamma

On recherche un signal gamma qui peut s'appuyer sur une signature directionnelle (principalement en direction du centre de la galaxie) ou sur l'existence d'un pic ou d'un épaulement dans le fond diffus gamma. Jusqu'à une énergie de quelques centaines de GeV, l'observation se fait en satellite (expériences AMS-II, GLAST). Au-delà de cette énergie, les expériences au sol, utilisant la conversion des gerbes dans l'atmosphère et la détection de la lumière Cerenkov produite, prennent ensuite le relais. Plusieurs expériences (par exemple, expériences WHIPPLE, CAT, CELESTE, HESS) ont tenté ou tentent actuellement d'utiliser cette signature afin de mettre en évidence les désintégrations de WIMPs. Un excès de gammas à très haute énergie a été détecté par l'expérience japonaise CANGAROO. Cependant, l'expérience HESS, plus sensible et à laquelle participe la France, si elle confirme bien un excès gamma dans la direction du centre galactique, ne confirme pas le spectre observé par CANGAROO. A plus basse énergie, le spectromètre SPI à bord du satellite INTEGRAL a mis en évidence une émission gamma à l'énergie de 511 keV produite par l'annihilation de $1.3 \cdot 10^{43}$ positons par seconde dans un volume compatible en position et en taille avec le bulbe galactique. A défaut de sources astrophysiques assez intenses, ces positons pourraient être produits par l'annihilation de particules de matière noire légère, attendue préférentiellement dans les zones de forte densité au centre galactique. Les expériences HESS, MAGIC, GLAST et AMS-II doivent permettre de clarifier la sensibilité en termes de détection indirecte de WIMPs. Des équipes françaises participent à ces expériences à l'exception de MAGIC. Les compétences européennes des équipes impliquées dans HESS et MAGIC devraient se rassembler à terme dans le projet HESS-II, qui constituerait alors le projet majeur en astronomie gamma à l'horizon 2010.

Signal neutrino

L'observation d'interactions de neutrinos de haute énergie en provenance du centre du Soleil et, dans une moindre mesure, du centre de la Terre, constituerait une signature très forte d'une détection indirecte de matière cachée, en l'absence de bruit de fond notable dû aux neutrinos atmosphériques. L'expérience AMANDA, principalement américaine et située au Pôle Sud, constitue avec l'expérience japonaise Superkamiokande la référence actuelle en ce domaine, et a déjà détecté plus d'un millier de neutrinos, principalement atmosphériques. La sensibilité atteinte par cette expérience se situe à environ un ordre de grandeur en couplage scalaire de la sensibilité actuelle des expériences de détection directe, l'apport de ces expériences se situant plutôt dans les couplages à forte composante axiale. En Europe, l'expérience ANTARES utilisera à partir de 2005 un total de 11 lignes dans son étape 0.1 km², autorisant l'observation du centre galactique, peu accessible à AMANDA. D'ici à la fin de la décennie, l'expérience ICECUBE, successeur d'AMANDA, mettra en oeuvre un détecteur d'un volume total utile d'environ 1 km³. Au niveau européen, dans lequel s'inscrit la participation française, les trois projets ANTARES, NEMO et NESTOR se rassemblent en une Design Study européenne unique devant conduire à la réalisation d'un détecteur d'une taille

d'environ 1 km^3 . L'expérience Superkamiokande, avec un volume nettement plus faible mais un seuil en énergie plus bas, a montré une sensibilité excédant celle d'AMANDA aux basses masses de WIMPs. Une expérience neutrino Mégatonne européenne, étudiée conjointement par la France et l'Italie, permettrait donc a priori d'atteindre à l'horizon 2015 des sensibilités comparables ou supérieures, au moins à basse masse, avec celle des détecteurs 1 km^3 .

Signal solaire

Des WIMPs peuvent s'accumuler au centre de nombreux objets, en particulier du Soleil. Ils auraient pour effet d'en réduire la température centrale, c'est pourquoi ils ont été activement recherchés dans les années 90 pour tenter de trouver une solution au déficit de détection des neutrinos solaires. Toutefois les données sismiques obtenues avec les instruments GOLF et MDI du satellite SoHO laissent aujourd'hui peu de place pour cette hypothèse. Il convient cependant de remarquer que les modes acoustiques ne sondent pas le cœur nucléaire, là où une signature de matière noire pourrait être visible. Seuls les modes de gravité peuvent vraiment sonder cette région. Leur détection, qui a débuté avec GOLF, sera l'objectif du projet international GOLFNG en construction au DAPNIA. La première étape est un prototype sol mis en service en 2005 à Ténérife. Une version spatiale dans le cadre du programme ILWS est en discussion avec les agences ESA et NASA.

Antiparticules chargées

Les expériences en ballon, mais surtout en satellite (AMS-II, PAMELA) permettent de s'affranchir pour une large part du bruit de fond cosmique et d'identifier de faibles proportions d'antiprotons, de positrons et, éventuellement, d'antidéutons, produits d'annihilation possibles de WIMPs. Des équipes françaises sont impliquées dans les expériences AMS-II et GLAST. L'analyse des données issues de ces expériences, sans signature directionnelle en raison de la charge des particules détectées, doit permettre de définir à la fin de la décennie l'éventuelle poursuite de ce type d'expérience en vue de la détection indirecte de WIMPs.

Conclusions

Dans le domaine de la cosmologie, les programmes actuellement opérationnels (CFHTLS) ou dont le démarrage est prévue à moyen terme (PLANCK ET HERSCHEL) permettront d'affiner considérablement la connaissance des paramètres cosmologiques. Le renforcement des équipes en charge du traitement de données ainsi que la mise en place des moyens de calcul adéquats devront être assurés par les différentes tutelles (CNRS, CEA, CNES, ...).

Les projets futurs auront pour objectif d'explorer plus avant des questions fondamentales comme la nature de la matière noire et de l'énergie noire ainsi que la physique de l'Univers primordial (inflation, pre-*Big-Bang*, ...). La phase d'élaboration de ces projets, qui s'ouvrent aujourd'hui, nécessitera un effort important de R&D et une participation active des équipes françaises à des programmes intermédiaires pour leur permettre d'obtenir une place importante dans les futurs programmes.

Les résultats des expériences de détection directe et indirecte, associés à la production en accélérateur auprès du LHC dans un environnement contrôlé, doivent permettre de contraindre très fortement, et probablement de mettre en évidence, la supersymétrie avant la fin de la décennie. L'importance de la thématique de la Matière Cachée et la forte valeur ajoutée associée aux développements instrumentaux associés conduisent là aussi à recommander un renforcement des moyens humains et financiers accordés à ce domaine.

Parallèlement à une participation accrue dans les grands projets internationaux en cours de définition comme EURECA, nous recommandons dans ce domaine également une continuité dans l'effort de développements cohérents, notamment en ce qui concerne les développements de matrices de détecteurs, d'électronique ultra bas bruit ou encore de cryogénie. C'est en accordant un soutien ambitieux aux développements en amont, comme l'ont fait les Etats-Unis avec CDMS et l'Allemagne avec CRESST, que la France pourra conserver un rôle important dans ce domaine en plein développement.

ANNEXE 1

Communauté française des chercheurs, enseignants-chercheurs, post-docs et étudiants en thèse travaillant en cosmologie et/ou recherche de matière noire

Les chiffres donnés dans la table ci-dessous, bien qu'indicatifs, appellent plusieurs commentaires:

- pour évaluer la communauté française travaillant en cosmologie et/ou recherche de matière noire, nous n'avons pas comptabilisé les membres des équipes travaillant dans le domaine de la détection indirecte de matière noire considérant que leur objectif scientifique principal était plus du domaine de l'astrophysique à haute-énergie
- Dans un domaine en forte progression au niveau international et pour laquelle la communauté française est encore assez jeune, il conviendra de soutenir la progression des effectifs afin de renforcer la place tenue actuellement par les équipes françaises. Si le nombre de chercheurs statutaires soutenus, au moins au niveau de l'IN2P3, par un recrutement régulier, semble actuellement satisfaisant, le rythme des recrutements au DAPNIA est préoccupant et menace à terme l'impact de certaines équipes.
- le nombre de post-docs et d'étudiants en thèse correspond à un rapport temporaires/permanents de 0,5, et fait apparaître un déséquilibre surprenant pour une discipline en pleine progression. Un renforcement du nombre de contrats de postdoctorants apparaît souhaitable

	CEA	CNRS	Université	postdoctorants ATER	étudiants en thèse
CEA/DAPNIA/SAp	14	3		5	3
CEA/DAPNIA/SPP	13				5
CPPM (Marseille)		6			
CSNSM (Orsay)		4			1
GAM (Montpellier)			2	1	1
IPN (Lyon)		3	6	2	2
LAL (Orsay)		5	2	1	2
LAPP (Annecy)		5	1		2
LPC (Clermont-Ferrand)			1		
LPNHE (Paris)		7	3	2	5
LPSC (Grenoble)		3	2		3
PCC-CdF (Paris)		6	3	3	3
total	27	42	20	14	27

ANNEXE 2

Ressources nécessaires pour assurer le programme scientifique décrit dans ce document de prospectives

Dans l'évaluation de nos demandes de moyens, nous devons tenir compte du fait que dans le domaine de la cosmologie/matière noire les projets majeurs sont financés par des organismes extérieures (CNES, ESA, ESO, NASA....) et en contre-partie font appel à des corps de métier spécifiques qui ne sont pas obligatoirement présents dans les laboratoires de l'IN2P3. Par contre, un soutien de nos tutelles (IN2P3 et DAPNIA) est nécessaire pour une partie de la R & D et pour soutenir des projets intermédiaires.

- **CMB**

- programmes en cours : PLANCK
soutien à l'analyse de données, programme ballon OLIMPO
- objectifs à 15 ans : satellite de mesure de la polarisation du CMB
- programme intermédiaire : R & D détecteurs ; expériences au sol de mesure de la polarisation du CMB (Dôme C) (2 M€ sur 3 ans)
financement de R & D via le programme Astroparticules puis le CNES
financement d'une expérience au sol (Brain/Clover) via l'IN2P3, d'un programme ballon PILOTE pour l'étude des avant-plans polarisés

- **Energie sombre**

- programmes en cours : CFHTLS
soutien à l'analyse de données
- objectifs à 15 ans : satellite astronomie à grand champ (DUNE/JDEM)
- programme intermédiaire : R & D détecteurs
financement de R & D via le programme Astroparticules puis le CNES

- **Modélisation numérique**

- programmes en cours : HORIZON, COMBUSTION ET SUPERNOVÆ
- objectifs à 15 ans : créer en France une communauté de physiciens numériques bien intégrée à l'astrophysique.
- programme intermédiaire : implantation de meso-équipements de calcul ; faire reconnaître les métiers du numérique par les tutelles.

- **observations en X**

- programmes en cours : XMM
soutien à l'analyse de données
- objectifs à 15 ans : satellite XEUS

- programme intermédiaire : R & D détecteurs ; matrices de micro-bolomètres ; projet SIMBOL-X dans le cadre du programme CNES de vols en formation
financement de R & D via le programme Astroparticules puis le CNES

- **détection de matière noire**

- programmes en cours : EDELWEISS
financement de la phase 100 détecteurs d'EDELWEISS II (cela correspond à un financement supplémentaire de 2,5 M€ comparé aux 4,5 M€ de la première étape avec 28 détecteurs)
- objectifs à 15 ans : détecteur 1 tonne (30-50 M€)
- programme intermédiaire : R & D détecteurs avec un financement de R & D via le programme Astroparticules et *Design Study* européenne EURECA en collaboration avec les équipes de CRESST (Allemagne, Angleterre) et de divers instituts européens dont le CERN : coût 5-7 M€ sur 3-4 ans.