

Cosmologie et Matière noire (GT 6)
Prospective IN2P3/Irfu 2012

P. Antilogus (LPNHE), E. Armengaud (Irfu-SPP), H. Aussel (Irfu-SAP), F. Bernardeau (IPhT), P. Brun (Irfu-SPP), A. Ealet (CPPM), E. Ferrer Ribas (Irfu-Sedi), K. Ganga (APC), J. Guy (LPNHE), J.-B. Melin (Irfu-SPP), E. Moulin (Irfu-SPP), S. Pires (Irfu-Sedi), J. Rich (Irfu-SPP), R. Teyssier (Irfu-SAP)

1 Synthèse

La cosmologie est l'étude des propriétés globales de l'Univers. Elle inclut essentiellement les champs de recherche suivants:

- La mesure des propriétés moyennées de l'Univers observable: taux d'expansion (H_0) et densités moyennes de ses principaux composants (matière noire, énergie noire, baryons, photons et neutrinos).
- L'étude des inhomogénéités à grande échelle et des objets gravitationnellement liés (galaxies et amas de galaxies).
- La détection de la matière noire.
- L'étude des modèles théoriques d'Univers primordial qui peuvent expliquer la composition et la structure de l'Univers observable.
- L'étude de la formation et des caractéristiques des tout premiers objets compacts (étoiles et quasars).

Les deux premiers sont intimement liés puisque la formation gravitationnelle des structures dépend fortement des densités relatives des composantes sombres et baryoniques. Ils sont souvent combinés sous le nom de "paramètres cosmologiques" ou "cosmologie observationnelle". La détection de la matière noire (froide) est largement indépendante de la cosmologie observationnelle, formant une communauté scientifique séparée. L'étude de l'Univers primordial vise à unifier la cosmologie théorique avec la physique des particules théorique, à l'aide de modèles d'inflation et de baryogénèse. Enfin, l'étude des "premières lumières" de l'Univers provenant d'étoiles et de quasars est quasiment absente de l'IN2P3 et présente à l'IRFU uniquement au sein du SAP. Nous dirons donc peu sur cet important sujet.

Les résultats de la cosmologie observationnelle sont en général bien décrits par le modèle Λ CDM, maintenant standard, dans lequel la densité moyenne correspond à 1% près à la densité critique, $3H_0^2/8\pi G$, et avec des abondances relatives d'énergie noire, matière noire et baryons à redshift nul valant $(\Omega_\Lambda, \Omega_{\text{CDM}}, \Omega_b) = (0.726 \pm 0.015, 0.228 \pm 0.013, 0.0456 \pm 0.0015)$ (WMAP 2009). L'énergie noire est compatible avec une énergie du vide indépendante du temps, ou de manière équivalente avec une constante cosmologique, et est responsable de l'accélération actuelle de l'expansion de l'Univers. La matière noire froide domine les objets gravitationnellement liés que sont les galaxies et amas de galaxies. Ces conclusions sont basées sur l'interprétation de données provenant:

- des anisotropies du fond diffus micro-onde cosmique (CMB)
- des distances de luminosité des supernovae de type Ia (SNIa)
- du spectre de puissance des inhomogénéités de densité (grandes structures - LSS) et en particulier de l'empreinte sur celui-ci des oscillations acoustiques baryoniques (BAO)
- des déformations des images de galaxies lointaines par effet de lentille gravitationnelle
- du nombre et de la composition des amas de galaxies

Alors que les paramètres de Λ CDM sont maintenant connus avec une précision correcte, leurs valeurs n'ont aucune justification théorique bien établie.

Les chercheurs français sont impliqués dans tous les domaines de la cosmologie qui ont mené à la construction de Λ CDM. En cosmologie observationnelle, l'IN2P3 et l'IRFU sont en particulier

impliqués dans PLANCK (anisotropies du CMB), SNLS (SuperNova Legacy Survey) et BOSS (Baryon acoustic Oscillation Spectroscopic Survey). Pour la recherche de matière noire froide non baryonique, mentionnons l'expérience XENON, ainsi que le rôle majeur dans l'expérience de recherche de WIMPs par détection directe EDELWEISS. Des recherches intenses de photons et neutrinos provenant de l'annihilation de WIMPs ont été menées par HESS et ANTARES. La communauté des cosmologues de l'IN2P3/IRFU/IPhT regroupe environ 200 membre (voir table de la section 1).

Les dix dernières années ont vu l'émergence du modèle Λ CDM et la mesure de ses paramètres avec une précision meilleure que 10%. Le but des dix prochaines années sera d'améliorer la précision sur ces paramètres et, plus important, de rechercher des désaccords avec Λ CDM indiquant une nouvelle physique. Un but important dans ce contexte est d'améliorer les limites sur la variation temporelle de la densité d'énergie noire (paramètres cosmologiques w et w_a). Il est aussi fondamental de placer des contraintes sur des déviations de la théorie gravitationnelle standard (la relativité générale) à grande échelle en mesurant proprement l'histoire de l'expansion de l'Univers et la formation simultanée des grandes structures. Ce sont les objectifs principaux du Large Synoptic Survey Telescope (LSST) et de la mission spatiale Euclid, qui doivent commencer à produire des données vers la fin de la décennie. LSST est un grand relevé photométrique du ciel conçu avant tout pour des mesures de cisaillement gravitationnel faible mais qui va aussi étudier le BAO et les SNIa. Euclid est conçu avant tout pour le cisaillement gravitationnel et le BAO mais pourrait aussi étudier les SNIa. Des résultats intermédiaires sur le BAO devraient être produits par eBOSS, une extension de BOSS.

Avec la mesure finale des anisotropies de température du CMB par Planck, les études sont maintenant centrées sur sa polarisation. La recherche des "modes B" est particulièrement importante car elle fournirait une indication directe en faveur de l'inflation. C'est le but de QUBIC, un observatoire interférométrique du CMB mené par la France qui doit être construit en Antarctique.

La détection directe ou indirecte de matière noire sous forme de WIMPs est une piste expérimentale cruciale pour tenter de comprendre la physique qui se cache derrière la paramétrisation Λ CDM. Des expériences de détection directe à l'échelle de la tonne deviennent réalisables, comme EURECA, la suite prévue d'EDELWEISS, et les suites de XENON. Pour la détection indirecte via l'observation de produits d'annihilation des WIMPs, CTA devrait améliorer les résultats déjà obtenus par HESS.

Il est clairement très difficile d'extrapoler au-delà de 10 ans. Le rapport de prospective écrit il y a sept ans seulement ne mentionnait ni le BAO (découvert en 2006), ni les crises financières de 2007-2011, qui ont toutes deux un impact important sur la pratique de la cosmologie de 2011. Nous pouvons néanmoins mentionner deux projets qui n'ont pas (encore) bénéficié de la participation IN2P3/IRFU. Le premier est le Square Kilometer Array (SKA), un radiotélescope conçu en partie pour fournir un relevé quasiment plein-ciel jusqu'à des redshifts $z \sim 2$. En second, un effort est en cours pour construire des télescopes optiques de 30 mètres de diamètre. De tels instruments pourraient permettre la mesure directe de la dépendance en temps du taux d'expansion via la dépendance en temps des positions des raies spectrales.

2 Introduction

La cosmologie en 2011 se trouve dans une situation intéressante. Au cours de la dernière décennie, des mesures de précision ont été obtenues sur le Fond Diffus Cosmique micro-onde (CMB), les Supernovae de type Ia (SNIa) et les grandes structures (LSS) déduites des relevés de redshifts et des études de cisaillement gravitationnel. Les données sont pour l'essentiel bien décrites par le modèle Λ CDM, maintenant standard, dans lequel l'Univers actuel consiste en un mélange d'énergie noire (responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers), de matière noire et de baryons, plus un fond de photons du CMB et de neutrinos (Table 1 et Figure 1). Les inhomogénéités observées de l'Univers sont proches de celles prédites à partir d'un spectre invariant d'échelle de fluctuations initiales de densité, qui peuvent être expliquées par les modèles inflationnaires de l'univers primordial.

Certaines tensions entre les données et le modèle Λ CDM-inflation suggèrent d'autres physiques comme des neutrinos supplémentaires ou des modifications des lois de la gravité, mais elles ne sont pas suffisamment convaincantes pour avoir empêché un assez large consensus autour de Λ CDM.

Néanmoins, il manque deux ingrédients fondamentaux au modèle Λ CDM. Tout d'abord, la matière noire non-baryonique n'a pas été identifiée. L'hypothèse la plus explorée est que la matière noire serait faite d'une forme de particule élémentaire avec des interactions faibles. Les candidats les plus populaires sont des particules supersymétriques, des particules "de Kaluza-Klein" et les axions.

Le second ingrédient manquant est une base théorique pour Λ CDM. Les quantités observées de matière noire, d'énergie noire et de baryons n'ont pas d'explication naturelle à partir de théorie bien établie. Pour la matière noire ce n'est pas une surprise car elle n'a pas été identifiée et aucun candidat n'a été trouvé en accélérateur. Pour l'énergie noire, paramétrisée par une échelle d'énergie donnée par sa densité, $\rho_V = (2 \times 10^{-3} \text{eV})^4$, il n'y a aucune connection évidente au modèle standard de la physique des particules. Le nombre de baryons (par rapport aux photons) devrait être expliqué par la violation de CP dans l'univers primordial mais aucun modèle n'a clairement émergé. Enfin, le spectre observé quasi invariant d'échelle des fluctuations de densité peut être produit par des modèles inflationnaires simples mais ces modèles n'ont pas de fondements dans des théories ou des modèles de physique des particules. En résumé, le rêve d'unifier "l'infiniment petit" avec "l'infiniment grand" doit encore être réalisé.

Le but de la cosmologie observationnelle et théorique de la prochaine décennie est de briser cette impasse. La percée la plus importante pourrait venir de la découverte de la matière noire soit par observation directe, soit par une observation convaincante de produits d'annihilation. La physique sur accélérateur peut donner des indices sur les candidats matière noire (si la supersymétrie est trouvée au LHC) et aussi sur l'origine du rapport baryons sur photons dans des processus violant la symétrie CP impliquant des quarks lourds ou des neutrinos.

Pour l'énergie noire, le but principal est d'améliorer les limites actuelles sur la variation temporelle de sa densité. De telles variations peuvent donner des indices concernant sa nature. Elles sont paramétrisées par w , le rapport entre la pression et la densité de l'énergie noire. Si l'on suppose que w est indépendant du temps (du redshift), les observations actuelles imposent $w = -1$ à $\sim 10\%$ près, c'est-à-dire une constante cosmologique (voir Table 1 et Figure 1). Si l'on permet à w d'évoluer avec le redshift, les contraintes sont considérablement moins fortes: $\sim \pm 20\%$ à $z = 0$ et inexistantes pour $z > 1$. Le projet EUCLID (combiné avec PLANCK) aura une précision de de $\sim 1\%$ pour toute la gamme $0 < z < 1.5$.

Sur un plan plus fondamental, on peut espérer placer des contraintes sur les écarts de la théorie gravitationnelle standard (relativité générale) en mesurant l'histoire de l'expansion de l'univers et la formation de la structure à grande échelle.

Les cosmologues français ont joué un rôle important dans l'établissement du modèle Λ CDM

Table 1: Densités des trois principales composantes du modèle standard Λ CDM rapportées à la densité critique, $3H_0^2/8\pi G$. D'après [Komatsu et al (WMAP), ApJSupp 180 (2009)]. Sont aussi indiquées les limites sur le rapport pression/énergie du fluide d'énergie noire, dans le cas d'une équation d'état constante w ($= -1$ pour une constante cosmologique), et dans le cas d'une dépendance avec le redshift de la forme $w(z) = w_0 + w_a z/(1+z)$ [Sullivan et al, ApJ 737 (2011)].

composante	$\Omega_i = \rho_i/(3H_0^2/8\pi G)$
baryons	$\Omega_b = 0.0456 \pm 0.0015$
matière noire froide (CDM)	$\Omega_{CDM} = 0.228 \pm 0.013$
énergie noire (DE)	$\Omega_{de} = 0.726 \pm 0.015$
total	$-0.0179 < 1 - (\Omega_{de} + \Omega_{cdm} + \Omega_b) < 0.0081$
$w = p_{de}/\rho_{de}$	$w = -1.068_{-0.068}^{+0.069}$
$w(z) = w_0 + w_a z/(1+z)$	$w_0 = -0.905_{-0.196}^{+0.196}$
	$w_a = -0.984_{-1.097}^{+1.094}$

et vont continuer à jouer un rôle important dans la phase suivante. Parmi les réalisations importantes on peut citer les diagrammes de Hubble précis de SNIa par SNLS, l'observation de cisaillement gravitationnel à grande échelle aux VLT et CFHT, l'élimination par EROS et EDELWEISS de classes de candidats de matière noire sous forme d'objets sombres ou de WIMPs, et, bientôt la mesure définitive des anisotropies de température par la mission PLANCK. Parmi les grands projets pour l'avenir on peut citer le grand survey photométrique LSST et la mission spatiale EUCLID. Les tableaux 2 et 3 donnent un résumé de la participation de la France en cosmologie.

Dans les sections suivantes sont présentés les deux projets LSST et EUCLID, suivis par un résumé des différents domaines de la cosmologie et par les projets de recherche de matière noire.

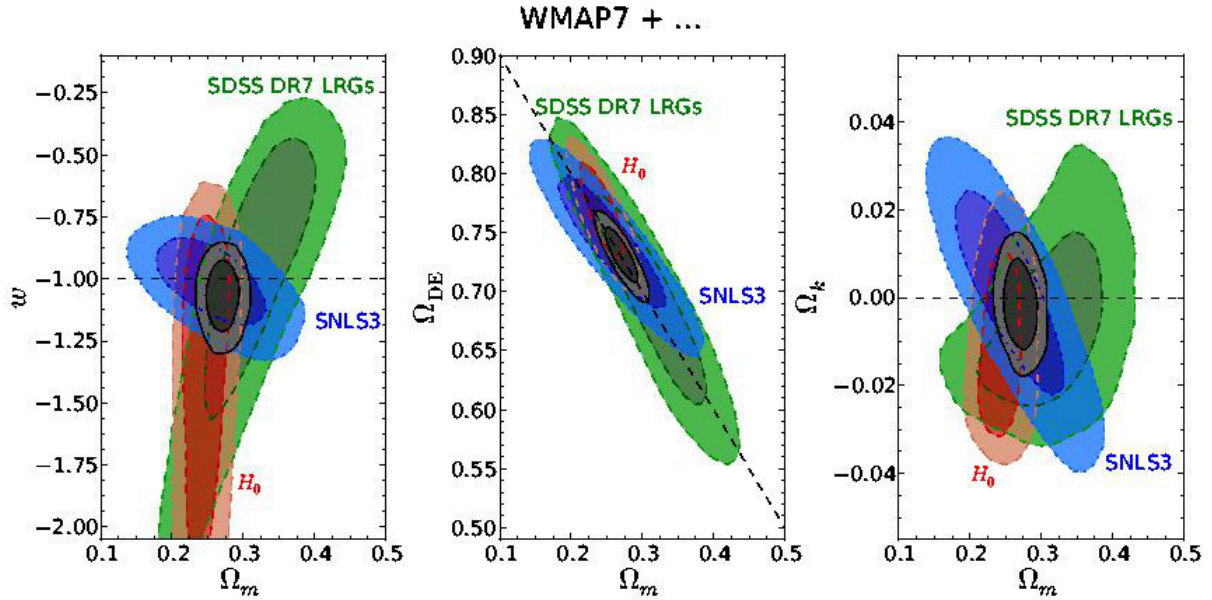


Figure 1: Confidence contours in the cosmological parameters for models with a constant dark energy equation of state: Ω_m ($= \Omega_{cdm} + \Omega_b$), Ω_{DE} , Ω_k ($= 1 - \Omega_m - \Omega_{DE}$), and w [Sullivan et al, ApJ 737 (2011)]. The paramètre w is the ratio of the dark pressure to dark energy density and is equal to -1 for a cosmological constant. The SNLS3 contours are in blue, the SDSS DR7 LRG (BAO) contours in green and the H_0 prior in red. WMAP7 constraints are included in all contours. The contours enclose 68.3% and 95.4% of the probability.

Table 2: Effectifs par sujet de recherche: Cosmologie observationnelle (surtout les paramètres cosmologiques), détection directe et indirecte de la matière noire, et la cosmologie théorique. Pour le SAP/SEDI, nous avons mis entre parenthèses les effectifs qui étudient surtout les objets (premières étoiles, amas de galaxies) d'intérêt cosmologique mais pas directement liés aux paramètres cosmologiques.

Lab	Observational	Direct	Indirect	Theory	Total
APC	32.5	0	0	22	52.5
CPPM	11				11
CSNSM		7			7
IPNL	7	6			13
LLR	0	0	0	0	0
LAPP			7.5	6	13.5
LPC	1.2		1.5	2	4.7
LPNHE	20		3.5	3	26.5
LPSC	7.2	3.8			11
LUPM	1		2	4	7
Subatech		7.5			7.5
LAL	12				12
SPP	10	5	4		19
SAP/SEDI	6.5 (17)	1		7	14.5 (17)
IPHT			1	14	15
Total	108.4	30	19	58	214

Table 3: Effectifs par status

Lab	CNRS	Univ.	Postdoc	Thèse	CEA
APC	15	11	10	17	1
CPPM	6	1	3	1	0
CSNSM	5	0	1	1	0
IPNL	1	6	3	3	0
LLR	0	0	0	0	0
LAPP	5.5	3	2	3	0
LPC	1.2	2.5	0	1	0
LPNHE	7.5	8	2	9	0
LPSC	5	2	1	3	0
LUPM	2.5	3.5	0	1	0
Subatech	1	2.5	3	1	0
LAL	7	1	3	1	0
SPP	0	0	1	5	13
SAP/SEDI	1	0	5	2.5	6
	(1)		(4.5)	(2.5)	(9)
IPHT	2	0	3	3	7

3 LSST

Le Large Synoptic Survey Telescope (LSST) est un télescope grand champ au sol conçu pour fournir un ensemble d'images profondes de la moitié du ciel visible toutes les 3-4 nuits. Ces observations fourniront un jeu de données sans précédent aussi bien en qualité qu'en quantité comme en témoigne le "science-book LSST" publié en 2009 et co-écrit par plus de 200 auteurs actifs dans LSST (<http://arxiv.org/abs/0912.0201>). Ces données permettront d'étudier la matière et l'énergie noires, ainsi que de nombreux sujets astrophysiques comme les petits objets du système solaire, la formation et la structure de la Voie Lactée ou la recherche d'objets variables dans un très large domaine temporel.

Le projet LSST comprendra un télescope de 8.4 mètres de diamètre (6.5 m effectif, ouvert à f/1.25) implanté au Chili, équipé d'une caméra de 3.2 milliards de pixels de 10μ à lecture rapide (2s). L'ensemble couvrira un champ de 9,6 degré-carré sur le ciel, qui sera balayé à la cadence d'un champ toutes les 40 secondes à travers les filtres ugrizy (correspondant à 2 poses de 15s par observation d'un champ). Le survey de LSST couvrira une surface de plus de 18,000 degrés carrés, chaque champ étant observé plus de 825 fois au cours des 10 ans du programme avec un nombre de visite médian par filtre de u: 57, g: 80, r: 184, i: 184, z: 160 et y: 160, chaque visite correspondant à une magnitude AB à 5 sigma de u: 23.9, g: 25.0, r: 24.7, i: 24.0, z: 23.3, y: 22.1. La co-addition de ces images atteindra une magnitude AB de 27.5 en r pour une densité de surface de ~ 40 galaxies par arc minute carré. La technique de détermination de redshift par photométrie, basée sur les seules mesures de couleurs, devra impérativement être employée, car les dispositifs de spectroscopie n'auront pas la capacité de mesurer ne serait-ce que les seules supernovae. Les capacités du dispositif sont résumées dans le paramètre appelé étendue, produit de la surface du miroir du télescope par le champ, $A\Omega=318\text{m}^2\text{deg}^2$, qui surpasse de deux ordres de grandeur les dispositifs actuels. L'optique sera active (mais non adaptative) et vise une réponse impulsionnelle (Point Spread Function, PSF) optique de 0,2 secondes d'arc à mi-hauteur, largement suffisante pour que le seeing domine la PSF de l'image sur tout le champ. Le programme de physique envisagé collectera 15 terabytes de données chaque nuit, pour collecter, en 10 ans, 5 millions d'images de 6.3 GB chacune pour un total de 2.5 millions de pointés dans le ciel, soit 65 PetaByte de données pour l'archive de l'ensemble des images de science calibrées.

Le projet LSST est proposé par la communauté astronomique américaine. Il a aussi capté, sous son angle "expérience d'énergie noire", l'attention de la communauté des physiciens des particules américains et en France de ceux de l'IN2P3. Aujourd'hui LSST compte 36 institutions et universités dont deux non US : l'IN2P3 et le Chili. C'est un projet multi-agences, la NSF ayant la responsabilité du télescope et du data-management et le DOE ayant la responsabilité de la caméra.

LSST établira des contraintes précises sur la nature de l'énergie noire, via un ensemble de techniques expérimentales distinctes et complémentaires. Quatre de ces méthodes : la mesure des oscillations baryoniques, les sondages des amas de galaxies, la mesure du flux des supernovae de type Ia et la mesure des distorsions gravitationnelles, ont été soulignées dans le rapport de la Dark Energy Task Force (DETF), mise en place conjointement par la National Science Foundation (NSF) et le comité HEPAP du DOE. Ce rapport conclut qu'aucune des techniques envisagées n'est suffisamment éprouvée ou puissante pour établir à elle seule des contraintes fortes et qu'une combinaison des 4 (réalisable avec LSST) sera indispensable. Le rapport DETF indique aussi qu'un grand projet de sondage dit de 4ème génération (du type LSST) pourrait faire des avancées importantes sur l'énergie noire, particulièrement si les incertitudes systématiques associées à chaque technique peuvent être bien contrôlées.

LSST a été sélectionné en août 2010 par la revue décennale "Astro2010", organisée par l'US National Research Council, comme l'observatoire sol à réaliser en 1ère priorité dans la décennie.

Depuis la publication de cette recommandation, le DOE et la NSF ont intégré LSST dans leur calendrier, le projet a ainsi passé en 2011 deux revues majeures , le PDR pour la NSF et CD1 pour le DOE, ouvrant ainsi la voie pour un début officiel de construction en 2014 et un début de la science en 2019. Par ailleurs des financements privés ont été collectés par le projet, lui permettant de démarrer les études et la production de certain éléments dont la réalisation est très longue, tel le miroir primaire dont la construction a débuté en 2008.

En France l'IN2P3 a intégré l'effort sur la caméra de LSST en 2007 à travers une participation de l'APC, du LAL et du LPNHE. Ces trois laboratoires ont depuis été rejoint par le CC-IN2P3, le CCPM, le LMA et le LPSC et des discussions sont en cours pour une intégration du LPC Clermont. L'IN2P3 a été le 1er membre non US à intégrer le board du LSST en 2009. Cet effort en France rassemble aujourd'hui plus de 90% des groupes travaillant sur l'énergie noire à l'IN2P3, correspondant à un total de plus de 40 physiciens. La contribution technique de l'IN2P3 à la caméra de LSST est importante (plus de 17 FTE en 2011, pour un total de ~ 150 FTE pour la période 2011-2017) et couvre plusieurs domaines :

- le design, la validation et la production de l'ensemble des ASICS front end de contrôle et de lecture des CCD;
- une participation à la R&D sur les CCD et à la future réception de la production correspondante (le plan focal compte 201 CCD de 4kx4k);
- une participation à l'effort de calibration et la responsabilité du design, de la validation et de la construction du système permettant la qualification de la caméra lors de son montage;
- la responsabilité du design, de la validation et de la production du système de changement de filtre (chaque filtre faisant 70 cm de diamètre pour ~ 25 kg);
- Le design global du slow controle et une participation clef à son implémentation;
- L'IN2P3 fournit également une expertise sur le coating pour les études des filtres.

Par ailleurs des discussions sont en bonne voie pour que le CC-IN2P3 fournisse 50% des besoins futurs de calcul pour le traitement central des données, le NCSA coordonnant cet effort et effectuant l'autre 50%.

4 EUCLID

4.1 Les objectifs scientifiques

EUCLID est une mission spatiale sélectionnée par l'ESA en octobre 2011, dédiée à l'étude de l'accélération de l'expansion de l'Univers par la mesure de grands relevés de ciel de plus de 15 000 degrés carrés aussi bien en photométrie qu'en spectroscopie. EUCLID étudiera ainsi les grandes structures de l'Univers jusqu'à un temps cosmique de 10 milliards d'années soit à plus de 75 % de l'âge de l'Univers. La mission est optimisée pour deux sondes cosmologiques, le cisaillement gravitationnel faible et la mesure des oscillations acoustiques baryoniques mais pourra aussi adresser de nombreux autres tests cosmologiques comme les mesures d'amas et suivre un certain nombre de supernovae lointaines.

La mesure de cisaillement dans EUCLID est dérivée de la mesure de la forme de galaxies lointaines et de leur redshift. EUCLID mesurera la forme de 30 galaxies par arcmin² jusqu'à des redshifts $z \leq 2$ dans une bande large visible R+I+Z et ce, jusqu'à une magnitude AB de 24.5 (à 10 sigma). Les mesures des redshifts photométriques de ces galaxies seront précises à $\sigma_z/(1+z) < 0.05$ grâce à la présence de 3 filtres infrarouges couvrant les bandes (Y, J, H) jusque'à une magnitude AB de 24 (à 5 sigma), complémentaire à la photométrie visible du sol qui sera obtenue dans les bandes visibles classiques à partir de données publiques ou à travers des collaborations internationales comme DES, KiDS, Pan-STARRS ou LSST. La forme des galaxies est obtenue par une mesure très précise de leur ellipticité, avec une précision meilleure que 2×10^{-4} et des variations spatiales contrôlées à mieux que 2×10^{-3} . La mesure des oscillations baryoniques dans EUCLID est basée sur la mesure précise des redshifts de plus de 50 millions de galaxies dans la fenêtre de redshifts, $0,7 < z < 2$ soit plus de 3000 galaxies par degré². Les redshifts sont obtenus par un relevé spectroscopique du ciel basé sur un spectrographe sans fente de résolution $\lambda/\Delta\lambda \approx 250$ qui permet la détection de raies d'émission H α pour plus de 45 % des objets détectés jusqu'à un flux limite de 3×10^{-16} erg s⁻¹ cm⁻² pour des objets étendus de 1 arcsecond. Les redshifts obtenus pour chaque galaxie seront précis à mieux que $\sigma_z/(1+z) \leq 0.001$.

La combinaison de ces deux sondes sur le même volume du ciel avec le même instrument permettra une vérification et un contrôle des erreurs systématiques dans l'interprétation finale. Cela permet aussi de contraindre les grandes structures par divers aspects complémentaires (mesure du potentiel, densité et vitesse) qui permet de tester les modèles d'énergie noire et de la gravité à toutes les échelles. De plus de nombreux autres tests cosmologiques seront aussi possibles avec les données d'Euclid, complémentaires des sondes primaires: citons en particulier, les mesures d'amas de galaxies, les distorsions dans l'espace des redshifts, et l'effet Sachs Wolfe intégré qui sont aussi très prometteuses. Enfin, par l'implémentation d'un champ deux fois plus profond et couvrant 40 degrés², EUCLID d'une part assurera le contrôle de la stabilité des instruments en revenant sur les mêmes objets tout le long de la mission et pourra de plus suivre aussi un certain nombre de supernovae lointaines ainsi que d'autres objets transients.

Un des aspects importants de la sélection d'une expérience spatiale comme EUCLID est sa capacité à générer de larges retombées scientifiques au-delà de son objectif principal. EUCLID générera d'importantes retombées sur l'évolution des galaxies qui intéressent particulièrement les scientifiques de l'INSU et du CEA/SAP. Le relevé profond permettra la détection de galaxies à des décalages spectraux compris entre 6.5 et 8 sur deux champs de 20 degrés carrés, alors que ces objets ne sont accessibles pour l'instant que sur des surfaces de quelques arcminutes au prix de centaines d'orbites du HST. Ceci permettra de contraindre la queue brillante de la fonction de luminosité et son évolution au cours du premier milliard d'années de l'univers, un test important des modèles de formation des galaxies. Ces galaxies seront des candidats naturels pour un suivi spectroscopique avec le JWST et le E-ELT. Le relevé principal, lui, fournira un échantillon de

55 quasars avec $z > 8.1$ qui permettront des études détaillées de la réionisation de l'univers via la mesure du degré de d'ionisation du milieu intergalactique dans leur ligne de visée. On ne connaît à présent qu'un seul quasar à redshift au-delà de 7. Mais c'est entre les décalages spectraux 1 et 3 qu'EUCLID fera la contribution la plus importante: en effet, il fournira pour 200 millions de galaxies un redshift photométrique précis, une bonne estimation de la masse stellaire, et une information morphologique. Ceci permettra une étude fine des transformations de populations de galaxies à une période correspondant au pic d'activité de la formation d'étoiles et des noyaux actifs dans l'univers, et par là même l'élucidation de ses principaux mécanismes. On pourra ainsi mesurer précisément au-delà de $z=1$ le taux de fusion de galaxies, ainsi que l'impact des environnements denses sur la formation d'étoiles. Cette information sera complétée pour 40 millions de galaxies par une mesure spectroscopique de la raie de $H\alpha$ et pour 50 000 entre $z=1.3$ et 2 par un diagnostic spectroscopique complet sur la présence d'un noyau actif. Ces échantillons permettront de comprendre quel est l'impact des AGNs sur l'arrêt de la formation d'étoiles, et les mécanismes qui président à la mise en place de la relation entre la masse des bulbes de galaxies et la masses de leurs trous noirs massifs centraux.

4.2 L'instrument

EUCLID est constitué d'un télescope de 1,2 m de type Korsch avec un champ de vue de $0,54 \text{ deg}^2$. Le télescope éclaire 2 instruments l'un dans le visible (VIS), l'autre dans l'infrarouge (NISP) séparé par une dichroïque. Le VIS est équipé de 36 CCDs et mesure la forme des galaxies avec une résolution de $0,2$ arcsecond en une bande R+I+Z couvrant (550-920 nm) et des pixels de $0,1$ arcsecond. L'instrument NISP est équipé de 16 détecteurs HgCdTe et des pixels de $0,3$ arcseconds. Il contient 2 canaux : un canal photométrique équipé de 3 bands (Y,J,H) couvrant la gamme (920-2000 nm) pour les mesures de redshifts photométriques et un canal spectroscopique basé sur des grisms couvrant la bande (1.1-2 microns). EUCLID sera lancé en 2019 par une fusée Soyuz ST-2.1B en L2 pour une durée de 7 ans.

4.3 La participation française, CEA et IN2P3

EUCLID est organisé autour d'un consortium européen de plus de 800 scientifiques dans 17 pays, mené par un groupe projet chargé des performances scientifiques, de la livraison des deux instruments VIS et NISP et du traitement des données incluant la fourniture de centre de données dédié. L'ESA est responsable de la livraison du satellite, du télescope et des détecteurs (visible et infrarouge). La France participe au niveau de 30 % de la contribution des pays, ce qui en fait un des contributeurs majeurs. Une dizaine de laboratoires français du CEA, de l'IN2P3 et de l'INSU sont partenaires et ont de fortes participations et responsabilités aussi bien au niveau de l'instrument (VIS et NISP) que du traitement de données. Le CC-IN2P3 est anticipé pour être le centre de traitement français des données de niveau 1. Le CNES participe fortement au projet en finançant d'une part les participations des laboratoires et en participant d'autre part directement au management du projet.

5 Supernovae de type Ia

Les supernovae de type Ia (SNe Ia), utilisées comme chandelles standard, permettent une mesure des distances de luminosité en fonction du redshift, jusqu'à $z=1$ depuis le sol, et à plus haut redshift à partir d'observations spatiales en infrarouge. En 1998, deux équipes utilisant cette technique ont mis en évidence l'accélération de l'expansion, ouvrant ainsi un nouveau domaine de recherche, celui de la recherche de la nature de l'énergie noire.

La dernière décennie a vu le développement de grands sondages dans le visible qui ont permis de détecter et mesurer les distances de plusieurs centaines de SNe Ia, décuplant ainsi la statistique des observations de la décennie précédente. A la pointe de ces expériences, l'analyse des trois premières années de données du Supernova Legacy Survey (SNLS) a permis une mesure de l'équation d'état de l'énergie noire à une précision de 7% (incluant les incertitudes systématiques), compatible avec la valeur attendue pour une constante cosmologique ($w = -1.06 \pm 0.07$, Sullivan et al., 2011). Il s'agit de la mesure la plus précise à ce jour; des équipes françaises y ont contribué de façon décisive (IN2P3, INSU et IRFU: développements instrumentaux avec la caméra MEGACAM, observations au CFHT, et analyse des données dans des laboratoires de l'IN2P3 et de l'IRFU). Parallèlement, la collaboration SNfactory (à laquelle participent des laboratoires de l'IN2P3 et l'INSU et plusieurs laboratoires américains) a mesuré des séquences spectrales d'une centaine de SNe Ia proches afin de mieux comprendre les mécanismes de ces explosions et d'améliorer leur utilisation cosmologique.

Quel rôle pourrait avoir cette sonde cosmologique à l'horizon de 2020, en particulier par rapport aux autres sondes de l'énergie noire (BAO, cisaillement gravitationnel, amas)?

Son atout principal est évident à la lumière de la situation actuelle: il s'agit de la sonde ayant le pouvoir statistique le plus important (pour la mesure de w ; notons en particulier qu'il n'y a pas de limitation due à la variance cosmique à bas z comme pour les BAO). Notons aussi qu'il s'agit d'une mesure exclusive des distances (d'autres sondes comme le cisaillement gravitationnel ou le comptage d'amas demandent une modélisation fine de la formation des structures jusqu'aux effets des baryons pour interpréter les observations et remonter aux propriétés de l'énergie noire).

Ses limitations sont de deux ordres. La première est astrophysique, il faut être à même de pouvoir caractériser et corriger une évolution attendue des propriétés des SNe Ia avec l'âge de l'univers (en particulier un changement de métallicité). La seconde a trait à la mesure: il s'agit d'une sonde particulièrement sensible à la précision de calibration photométrique (le principe de la mesure étant la comparaison de flux de SNe proches et distantes). C'est cette incertitude de calibration qui limite aujourd'hui la précision cosmologique.

De ce constat est né à l'IN2P3 un programme de développement de techniques de calibration instrumentale des grands télescopes par illumination directe. Conjointement, les collaborations SDSS et SNLS unissent leurs efforts pour intercalibrer les jeux de données et améliorer les mesures de distance; ce travail servira de base à l'analyse des SNe du projet DES (Dark Energy Survey).

A plus long terme, les deux grands projets d'imagerie grand champ pour 2020 sont LSST au sol, et EUCLID, en satellite. Pour ce qui concerne les SNe Ia, ces deux projets présentent une complémentarité exceptionnelle. Des observations coordonnées dans le temps d'un même champ profond amélioreraient considérablement le potentiel cosmologique des SNe dans ces deux expériences. Elles permettraient une grande efficacité de détection à $z > 1$, une large couverture spectrale sur l'ensemble du domaine visible et infrarouge proche, un échantillonnage spectral adapté avec 6 filtres visibles LSST et 3 filtre infrarouge EUCLID et une calibration rendue plus aisée. Dans ce cadre, un diagramme de Hubble de $\simeq 10000$ SNe Ia sur une large gamme en redshift pourrait être construit en minimisant les incertitudes systématiques dominantes aujourd'hui (calibration, modélisation, efficacité de détection/sélection), offrant ainsi des contraintes cosmologiques aussi compétitives mais surtout complémentaires aux deux autres

sondes mises en avant dans ces projets (BAO et cisaillement gravitationnel).

6 Large-Scale Structure

L'univers visible est fait de galaxies dont la distribution dans l'espace reflète leur formation dans un univers en expansion à partir de petites inhomogénéités initiales. Sur des échelles de 100 Mpc et moins, on observe des amas de galaxies et des structures filamentaires. Aux grandes échelles, la distribution devient uniforme et est caractérisée par un simple spectre de puissance ou, de manière équivalente, une fonction de corrélation entre galaxies.

La forme du spectre de puissance fournit des contraintes importantes sur les constituants qui gouvernent l'expansion et la formation des structures. Une des premières démonstrations convaincantes d'une densité sous-critique de matière a été la mesure de la fonction de corrélation sur des plaques photographiques au début des années 1990.

Dans la décennie qui vient de s'achever, le domaine a été transformé par les grands relevés basés sur des CCDs: SDSS et 2dF à bas redshift et DARK et VIMOS à grand redshift. Les spectres de puissance observés sont en général en accord avec Λ CDM. L'attention s'est de plus en plus concentrée sur deux aspects des LSS. Le premier est l'empreinte sur le spectre de puissance des oscillation acoustiques des baryons (BAO) dans l'univers pré-recombinaison. Ces oscillations génèrent un effet bien défini (oscillations dans le spectre de puissance, ou un pic dans la fonction de corrélation) qui permet une détermination robuste des paramètres cosmologiques (essentiellement Ω_M). Ces effets ont été vus pour la première fois dans SDSS et 2dF et, plus récemment, dans l'expérience de seconde génération WiggleZ. Le second aspects est l'étude de l'évolution des LSS via l'observation des anisotropies du spectre de puissance (redshift distortions) et via la dépendance en redshift du spectre de puissance lui-même. L'évolution du LSS fournit des contraintes sur le contenu en matière dans l'univers qui sont indépendantes des contraintes provenant de l'histoire de l'expansion déduite des supernovae ou du BAO. La compatibilité entre les descriptions de l'histoire de l'expansion et de l'évolution des LSS doit permettre de contraindre des déviations des lois de la gravité aux échelles cosmologiques. Des efforts dans cette voie ont déjà été menés par VIMOS.

La génération actuelle de relevés comprend WiggleZ et BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey) de SDSS-3. Ces programmes visent à observer la dépendance en redshift ($0 < z < 1$) du pic de BAO pour fournir des contraintes plus fermes sur les paramètres cosmologiques. De plus, avec la participation des physiciens de l'IN2P3 et de l'IRFU, ils devraient détecter le pic de BAO dans la distribution de l'hydrogène atomique à grand redshift ($2 < z < 4$). Cette distribution peut être déterminée en mesurant l'absorption de la lumière de quasars lointains dans la forêt Lyman-alpha.

De nouveaux projets de sensibilité accrue vont voir le jour dans les dix prochaines années. Une troisième génération de relevés spectroscopiques, par exemple eBOSS et BigBOSS, vise à étendre les mesures de BAO avec des galaxies jusqu'à $z=2$ et à fournir une mesure finale des fluctuations de l'hydrogène pour $2 < z < 3$. LSST va fournir une carte de l'univers profond de qualité extraordinaire, dont l'utilisation pour les LSS demandera néanmoins une utilisation efficace des redshifts photométriques ou des relevés secondaires de redshifts.

Il est aussi prévu de mesurer les redshifts des galaxies à partir de l'émission à 21 cm dans le projet à long terme SKA (2020) et ses précurseurs. Il est même possible de détecter le BAO dans l'émission à 21 cm sans identifier les galaxies individuelles: des efforts dans ce sens sont en cours en France et aux Etats-Unis.

Enfin, la mission spatiale Euclid fournira environ 50 million de redshifts dans le domaine $0.7 < z < 2$, fournissant de très précises mesures du BAO et des distortions en redshift.

7 Cisaillement gravitationnel

L'effet de cisaillement gravitationnel faible est une méthode unique pour contraindre les paramètres cosmologiques. Cet effet dévie les rayons lumineux qui passent à proximité de concentrations de matière déformant ainsi les images des galaxies d'arrière-plan. La mesure de ces distorsions fournit un moyen direct pour sonder et cartographier la distribution de matière noire dans l'Univers. D'autre part, cet effet permet de mesurer la distribution de la matière à différents redshifts, qui peut être directement comparé aux modèles théoriques de formation des structures.

Les premiers relevés n'étaient pas particulièrement adaptés aux effets de cisaillement gravitationnel (avec un mauvais compromis entre la couverture du ciel et la profondeur du relevé, et une mauvaise photométrie). Depuis, plusieurs grands relevés tels que le Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey (CFHTLS), Garching-Bonn Deep Survey (GaBoDs), le Red-Sequence Cluster survey (RCS), et le VIRMOS-DESCART survey (VIRMOS) ont détecté des effets de cisaillement gravitationnel par les grandes structures, plaçant ainsi de fortes contraintes sur les paramètres cosmologiques. Les lentilles gravitationnelles faibles ont connu un grand succès en permettant de cartographier la distribution de matière noire dans un champ de 2 degrés carrés obtenu par le télescope spatial Hubble (HST) dans le champ COSMOS.

La prochaine grande avancée devrait arriver dans les prochaines années grâce aux futures missions couvrant une large fraction du ciel, dédiées aux lentilles gravitationnelles faibles et qui devraient commencer à produire des données dans une dizaine d'années: des missions comme le LSST (Large Synoptic Survey Telescope) au sol, qui devrait commencer dans la future décennie ou bien des missions spatiales comme EUCLID ou WFIRST (Wide Field Infrared Survey Telescope). Un des principaux objectifs de ces missions est de reconstruire des cartes très précises de la distribution de matière sombre et de son évolution grâce à la mesure des formes des galaxies d'arrière-plan et de leur distance.

Cependant, les contraintes qui peuvent être obtenues sur la cosmologie par l'effet de cisaillement gravitationnel faible s'appuient fortement sur la qualité des techniques utilisées pour analyser les données. Les méthodes actuelles sont satisfaisantes pour les données actuelles, mais nous avons besoin d'un facteur dix d'amélioration pour capitaliser sur les futures relevés. Par exemple, aucune des méthodes existantes ne permet d'estimer le cisaillement avec la précision requise pour le projet EUCLID. Si nous atteignons cette précision, de très fortes contraintes pourront être placées sur l'énergie sombre ($\sim 1\%$ sur le paramètre w de l'équation d'état de l'énergie noire et $\sim 10\%$ sur dw/da) et d'autres paramètres cosmologiques.

Une partie de la communauté des effets de cisaillement gravitationnel est désormais en train de travailler à l'amélioration de la précision des méthodes pour exploiter pleinement les futures données. Un grand nombre de méthodes d'estimation de cisaillement ont été comparées en l'aveugle dans STEP (Shear Testing Programme) en vue d'améliorer la précision des méthodes. Plusieurs méthodes ont atteint une précision de quelques pourcents dans les images simulées STEP. Toutefois, la précision requise pour des relevés futures sera de l'ordre de 0.1%. Un autre programme appelé GREAT (Gravitational Lensing Accuracy Testing) a également été proposé à la communauté des méthodes d'apprentissage automatique afin de rechercher de nouvelles méthodes pour atteindre la précision de mesure sur les formes de galaxies. La précision requise n'a pas encore été atteinte, mais nous devrions être prêts pour exploiter pleinement les futures missions couvrant tout le ciel.

8 CMB

Le fond diffus cosmique micro-onde, ou CMB, rayonnement fossile généré juste après le Big Bang, est une mine de renseignements sur la naissance et l'évolution de l'Univers. Découvert en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson, son existence et son spectre ont permis de confirmer le modèle du Big Bang de l'univers. D'autres mesures de ses variations spatiales nous ont fourni une compréhension d'un certain nombre de paramètres cosmologiques, tels que la densité d'énergie totale de l'Univers, son âge, et les abondances relatives de ses divers constituants.

La dernière décennie a vu un nombre impressionnant de réussites dans le domaine - une meilleure résolution angulaire, la détection de la polarisation et la montée des satellites. Des mesures à haut signal-sur-bruit du "pic Doppler" dans le spectre d'anisotropies à la détection de la polarisation dans le CMB, ces expériences ont réalisé l'objectif d'une "cosmologie de précision" avec le CMB. Les équipes françaises ont contribué à cet effort à travers l'expérience de ballons-sondes Archeops, qui a cartographié le CMB à des échelles angulaires intermédiaires, reliant les mesures COBE/DMR aux grandes échelles angulaires, avec les mesures à plus petite échelle angulaire effectuées par BOOMERANG, DASI, MAXIMA, et d'autres expériences.

Lancé en 2001, le satellite WMAP a été l'expérience la plus visible dans le paysage du CMB pendant la dernière décennie. Depuis son lancement, les trois articles les plus cités dans l'ensemble des journaux de physique et d'astronomie ont été de WMAP. Cependant, WMAP a fini son opération scientifique quand il a été clair que le satellite Planck observerait et répondrait à ses exigences de sensibilité. Planck, lancé en 2009, est une mission de l'Agence Spatiale Européenne avec deux instruments, dont l'un a été créé et est géré par un consortium international dirigé par les Français. Planck a déjà publié plus de 25 articles sur les sciences auxiliaires, et il est prévu de publier les résultats sur la cosmologie début 2013.

Dans l'avenir proche, Planck, et en particulier son instrument haute fréquence (HFI) sous direction française, va dominer le terrain. Les résultats cosmologiques initiaux sont attendus vers le début de l'année 2013, et les résultats complets de la mission seront dévoilés un an plus tard. Les corrections et améliorations inévitables nécessiteront encore un peu plus de temps, si bien que Planck sera toujours dans le paysage jusqu'à environ 2015. Le résultat de ce travail comprendra, parmi d'autres améliorations qualitatives et quantitatives par rapport à WMAP, une mesure ou une limite d'environ 0,05 sur le "rapport tenseur scalaire" des perturbations cosmologiques. Il s'agit d'un "smoking gun" de l'inflation, car il est difficile d'imaginer d'autres mécanismes cosmologiques de création de modes B avec le spectre prédit.

Ces modes B, signature d'ondes gravitationnelles primordiales, sont le but d'un certain nombre d'expériences modernes - surtout à l'étranger. Un seul groupe autre que Planck dans ce domaine a d'importantes contributions matérielles françaises - QUBIC. QUBIC va utiliser un nouveau système de détection dit à "interférométrie bolométrique", depuis le Dôme Concordia en Antarctique. La première lumière est attendue en 2014.

La détection des ondes gravitationnelles primordiales dues à l'inflation confirmerait la prédiction la plus unique et spectaculaire de l'inflation cosmique et constituerait la première sonde expérimentale de physique proche de l'échelle de Planck. Un des problèmes pour la conception d'une expérience de recherche de modes B est que la théorie prédit la forme, mais pas l'amplitude, de ces ondes de gravité reliques de l'inflation. Le satellite CORE (www.core-mission.org), proposé à l'ESA comme une mission M3, est une mission de polarisation dédiée qui, en plus de rechercher des ondes gravitationnelles de l'inflation, sera capable de réaliser un large éventail d'objectifs scientifiques, y compris la mesure du spectre de lentille gravitationnelle du CMB à la limite de la variance cosmique sur toutes les échelles linéaires (rendant possibles des mesures de la masse absolue des neutrinos dans le domaine attendu) et la cartographie de la polarisation de la poussière galactique dans les régions d'émission diffuse à des échelles de l'arcminute. La proposition CORE a répondu à la nécessité perçue de diversifier et élargir les objectifs scientifiques

de la mission pour la rendre plus attrayante pour une communauté plus large en cosmologie et en astrophysique. Cependant, cela pose de multiples problèmes de conception et de coûts, souvent considérés comme responsables au moins en partie de l'échec des propositions passées de ce genre à la fois en Europe, B-Pol, CORE, et aux Etats-Unis, CMBpol, et dans lesquelles la communauté française du CMB a été fortement impliquée.

Dans une moindre mesure, les chercheurs français participent aussi activement à des expériences menées par les USA. Il y a, par exemple, une collaboration française dans l'expérience au sol Polarbear et le ballon-sonde EBEX; principalement dans les domaines du traitement de données et l'optimisation de l'expérience. Ces expériences seront déployées dans la prochaine année et mettront en oeuvre des programmes d'observation de quelques années. Elles serviront également de validation de la technologie pour les futures missions satellites CMB, avec EBEX assurant la qualification spatiale des matrices de bolomètres TES, et Polarbear la validation de la technologie pour le satellite japonais LiteBird, dont le lancement est prévu autour de 2018.

Comme les détecteurs de CMB sont souvent désormais limités par le bruit de photons, plus de détecteurs sont nécessaires pour augmenter significativement la sensibilité de cette nouvelle génération d'expériences. Les détecteurs ne peuvent pas être fabriqués et testés individuellement, et la capacité de les produire en masse de manière fiable dans de grandes matrices et de les calibrer doit ainsi être développée. Bien que beaucoup de progrès ont été accomplis dans ce domaine, l'un des arguments contre CORE était que des preuves convaincantes n'avaient pas encore été données que les partenaires européens seraient en mesure de livrer le nombre nécessaire de détecteurs (environ 6000) dans le calendrier envisagé. Un autre défi est le rejet des rayons cosmiques, qui va devenir de plus en plus pertinent alors que les exigences en sensibilité et en erreurs systématiques deviennent de plus en plus strictes.

Cet environnement a incité un certain nombre de groupes en France à travailler sur les nouveaux détecteurs. La collaboration BSD (B-mode Superconducting Detectors - une collaboration d'instituts à travers la France) est dédiée à la fabrication de larges matrices de ces détecteurs ainsi que des composants micro-ondes planaires à architectures de détection améliorée.

De plus, un nouveau détecteur appelé Kinetic Inductance Device, ou KID, a été conçu à Caltech/JPL. Dans les KIDs, le rayonnement génère des quasiparticules par rupture des paires de Cooper directement, sans chauffer le substrat, comme dans des détecteurs conventionnels (par exemple, les TES bolométriques). Ils sont relativement simples à fabriquer et faciles à lire, on s'attend donc à ce qu'ils jouent un rôle important dans l'avenir du domaine. L'expérience NIKA (Neel IRAM KIDS Array) a réussi à faire des observations à l'aide de KIDS développé en France. NIKA, qui a été mis en service à l'IRAM de 30 m, représente l'aile française de cette autre branche du CMB, où des expériences telles que l'ACT et SPT sont actuellement menées pour observer aux plus petites échelles angulaires, optimisés pour sources extragalactique comme galaxies dans le sous-millimétrique et d'amas vu par l'effet SZ.

9 Amas de galaxies

Les amas de galaxies sont des sondes cosmologiques sensibles aux propriétés globales de l'Univers (comme les SNIa, BAO et CMB) mais aussi à sa dynamique gravitationnelle au niveau de la formation des structures. Ils permettent donc de tester le modèle de concordance au-delà de la seule géométrie globale. Ils sont principalement composés de matière noire (80%), de gaz chaud à quelques keV (15%) et de galaxies (5%). Les amas peuvent être détectés en optique/infrarouge via l'émission directe des galaxies ou par étude des déformations gravitationnelles faibles ou fortes des galaxies d'arrière-plan induites par la matière noire, en rayons X via l'émission bremsstrahlung du gaz, et dans le domaine millimétrique via l'effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ, la diffusion Compton inverse des photons du fond diffus cosmologique sur le gaz chaud intra-amas).

Au début des années 1990, l'étude de la fraction de gaz des amas ou de leur rapport masse sur luminosité a donné une première indication forte d'un Univers à faible quantité de matière avant l'avènement des supernovae de type Ia en 1998 (e.g. White et al. 1993 ou Carlberg et al. 1996, $\Omega_m = 0.24 \pm 0.05$ (*stat*) ± 0.09 (*syst*)). Au cours des années 2000, la fonction de luminosité X des amas a permis de déterminer une valeur de l'amplitude des fluctuations de densité de matière σ_8 plus faible que précédemment admise (e.g. $\sigma_8 = 0.77_{-0.04}^{+0.05}$, Pierpaoli et al. 2003). En parallèle, d'autres méthodes ont été proposées pour contraindre les paramètres cosmologiques avec les amas : étudier la fraction de gaz des amas, les comptages en fonction du redshift (e.g. Oukbir et Blanchard 1997) ou la fonction de corrélation. Ces observables permettent non seulement de contraindre Ω_m et σ_8 mais aussi la densité d'énergie noire Ω_Λ et son équation d'état w . Les mesures les plus récentes sont celles de Allen et al. 2008 pour l'évolution de la fraction de gaz (Ω_m mesuré à 5%, Ω_Λ à 25%) et celles de Vikhlinin et al. 2009 (w mesuré à 20%, Chandra Cluster Cosmology Project) pour l'évolution des comptages. Ces deux mesures ont été obtenues à l'aide d'observations X d'échantillons de quelques dizaines d'amas.

L'amélioration de ces contraintes passe par deux étapes cruciales : d'une part, l'augmentation du nombre d'amas dans les analyses (i.e. l'augmentation de la statistique), d'autre part, la diminution des systématiques en affinant notre compréhension de la physique des amas et en liant les paramètres observables (luminosité optique, nombre de galaxies, flux X ou SZ) plus précisément à la masse (paramètre physique lié à la théorie).

L'étape d'augmentation du nombre d'amas a commencé avec le lancement des sondages SZ grands-champs par le South Pole Telescope (SPT), l'Atacama Cosmology Telescope (ACT) et Planck à la fin des années 2000. Depuis l'an dernier, ces sondages commencent à fournir les premiers catalogues de plusieurs centaines d'amas. La détection d'amas en X en aveugle est aussi possible mais est actuellement restreinte à quelques dizaines de degrés carrés sur le ciel car très demandeuse en temps d'observation (projets XMM-LSS, XXL, Pierre et al. 2011 ou projet XCS). A partir de 2013, le satellite X germano-russe eROSITA effectuera un sondage de l'ensemble du ciel et devrait permettre la détection d'environ 100.000 amas. Le nombre d'amas détecté en optique a lui aussi augmenté à la fin des années 2000 avec la publication des catalogues basés sur les données de SDSS (e.g. MaxBCG, Koester et al. 2007). Le nombre d'amas connus en optique est passé de l'ordre du millier (essentiellement les catalogues Abell et Zwicky) à plusieurs dizaines de milliers. De plus, l'utilisation de plusieurs bandes optiques permet désormais de s'affranchir de la contamination par effet de projection.

La compréhension de la physique des amas est l'étape la plus difficile actuellement. A la fin des années 1990, les lois d'échelles X liant les quantités observables à la masse étaient connues au facteur 2 près. Le lancement des satellites XMM et Chandra en 1999 a permis d'étudier en détail les propriétés du gaz des amas : profil de densité, profil de température, profil de masse (e.g. Pointecouteau et al. 2005, Vikhlinin et al. 2006), lois d'échelles liant les observables à la

masse connues avec une précision de l'ordre de 10% (e.g. Pratt et al. 2009). En parallèle, les lois d'échelles optiques liant le nombre de galaxies à la masse sur des échantillons de grande taille ont vu le jour (e.g. Rozo et al. 2009) ainsi que les premières lois d'échelles SZ. Depuis deux ans, le travail sur les amas s'est focalisé sur les lois d'échelle combinant les différentes longueurs d'onde ce qui a entraîné les trois sous-communautés X-SZ-optique assez disjointes avant 2005 à réfléchir sur la physique des amas d'un point de vue plus global.

Les résultats combinés X-SZ-optique se multiplient et motivent désormais les demandes de financement de nouvelles expériences. Aujourd'hui plusieurs incohérences entre résultats à différentes longueurs d'ondes sont mis à jour (e.g. Planck Early Paper sur le catalogue MaxBCG). Chaque longueur d'onde a maintenant la capacité de mettre en défaut ou confirmer les résultats des autres longueurs d'onde. Dans les trois à cinq prochaines années, les trois sous-communautés devraient se nourrir et arriver à un modèle cohérent d'amas valide à toutes les longueurs d'onde. Ce travail commun devrait permettre d'obtenir des précisions sur l'ensemble des lois d'échelles de l'ordre de quelques pourcents.

A l'échelle de quelques années, les amas de galaxies seront détectés en SZ avec les instruments SPTPol, ACTPol (versions plus sensibles des détecteurs SPT et ACT), en X avec eROSITA et en optique/infra-rouge avec LSST et Euclid. Pour la période qui suivra Planck, la communauté française s'est pour l'instant uniquement engagée dans la voie optique/infra-rouge (LSST et Euclid) en ce qui concerne la détection. L'étude en détail d'amas déjà connus pour une meilleure compréhension de la physique des amas est une autre piste avec la mise en place d'un satellite X à hautes sensibilité/résolution (comme Athena) ou de détecteurs SZ au sol (comme la caméra NIKA/IRAM30m).

Une connaissance de plus en plus précise de la physique des amas alliée au nombre croissant de nouvelles détections devrait permettre aux amas de galaxies de jouer un rôle de premier plan dans la contrainte des paramètres cosmologiques à l'horizon 2020.

10 Détection directe de la matière noire

10.1 Présentation

L'identification d'une éventuelle matière noire non baryonique est l'un des problèmes les plus fondamentaux en cosmologie. Sauf à modifier les lois de la gravité d'une manière qui reste encore à déterminer, la solution qui paraît aujourd'hui la plus naturelle consiste à postuler l'existence de particules nouvelles par rapport au modèle standard de la physique des particules. Cette thématique est donc liée à la physique "BSM", et l'aspect théorique est décrit plus en détails en section 2 de ce rapport. Les extensions du modèle standard développées par les théoriciens prédisent un grand nombre de candidats possibles. Dans certains cas, la masse et les couplages des particules de matière noire sont suffisants pour permettre leur détection directe, c'est-à-dire la mise en évidence expérimentale de l'interaction de particules du halo local de matière noire avec un détecteur terrestre. À l'heure actuelle, essentiellement deux types de particules sont recherchées par des expériences dédiées : 1) les axions de masse comprise entre le meV et le μeV , qui peuvent être mis en évidence par des cavités électromagnétiques résonantes (expérience américaine ADMX). 2) les WIMPs, candidat le plus étudié, sur lequel nous nous concentrons maintenant. Il s'agit de particules associées à une possible nouvelle physique électrofaible, de masse typique 100 GeV et couplées aux noyaux par interaction faible. Les expériences de détection directe visent à mesurer le recul nucléaire produit par diffusion élastique de WIMPs sur un noyau-cible.

Les détecteurs doivent avoir une masse cible élevée et un très bas seuil de détection des reculs nucléaires (quelques keV). Surtout, il faut pouvoir rejeter les bruits de fond radioactifs à basse énergie. La réduction du bruit de fond et la faiblesse attendue du taux d'interaction requiert une réduction drastique de la radioactivité, une installation sous blindages en site souterrain, un contrôle appuyé de la radiopureté, et autant que possible l'autoblindage du détecteur. Pour atteindre un niveau de bruit de fond compatible avec les taux d'interaction attendus, une réjection active est en outre nécessaire. Les reculs nucléaires peuvent être distingués des reculs électroniques en utilisant une double mesure (par exemple ionisation-chauffage ou ionisation-scintillation) permettant de construire des variables discriminantes entre ces deux interactions. Par ailleurs, les reculs dus aux WIMPs doivent avoir une direction spécifique, une légère modulation annuelle de leur taux, et une dépendance spécifique de ce taux en fonction de la masse du noyau-cible.

10.2 Situation globale et implication française actuelle

La situation expérimentale globale a considérablement progressé depuis quelques années, suite à des avancées techniques décisives. Cette amélioration de la sensibilité s'est effectuée avec un gain d'un facteur deux environ chaque année. La sensibilité actuelle est ainsi en 2011 d'environ 10^{-8} pb, soit un gain de deux ordres de grandeur par rapport à la situation lors des prospectives de 2004 ! Dans ce contexte, la communauté mondiale associée à cette recherche s'est fortement étendue, à la fois en nombre de chercheurs impliqués et d'expériences mises en oeuvre et projetées.

- La technologie TPC au xénon double phase, utilisant du xénon cryogénique liquide en équilibre avec une phase gazeuse, a accompli des progrès remarquables. Elle a démontré une capacité appréciable (supérieure à 99%) de rejet de la radioactivité gamma combinée à une excellente réjection des interactions d'origine externe au détecteur grâce à une mesure de position et à l'effet d'autoblindage qui va croissant avec la taille du détecteur. L'expérience XENON100 est actuellement celle qui présente la meilleure sensibilité aux WIMPs. Elle a exclu une section efficace de 7×10^{-9} pb pour une masse de 50 GeV, avec

un volume fiduciel de 48 kg en 100 jours de prise de données. Cette expérience poursuit actuellement sa prise de données et, par rapport à la dernière publication, a déjà doublé son exposition tout en réduisant son niveau de contamination en krypton d'un facteur cinq. Cela devrait conduire l'expérience à atteindre prochainement une sensibilité de 2.0×10^{-9} pb. L'IN2P3 contribue depuis trois ans aux expériences XENON, le laboratoire Subatech étant impliqué dans la prise de données et l'analyse pour l'expérience XENON100.

- Les expériences CDMS (USA) et EDELWEISS (Europe) utilisent des détecteurs cryogéniques en germanium à double lecture phonons-ionisation. Les technologies utilisées ont toutes deux démontré une exceptionnelle capacité de rejet de la radioactivité gamma et des interactions ayant lieu à la surface de leurs détecteurs. Les expériences ont atteint une sensibilité comparable et ont combiné leurs données (expositions d'environ 400 kg.jours chacune), excluant une section efficace WIMP-nucléon de 3×10^{-8} pb pour une masse de 90 GeV. Historiquement, les forces majeures de nos instituts se situent dans EDELWEISS, où la France maintient une position de leadership et une maîtrise d'oeuvre complète sur les aspects détecteurs et cryogénie des très basses températures. Une avancée importante a été accomplie en 2008 par la conception et la réalisation de bolomètres chaleur-ionisation dotés d'électrodes interdigitées permettant le rejet des interactions de surface. Un an de prise de données en 2009-2010 avec ces nouveaux détecteurs a montré une amélioration spectaculaire de performances par rapport aux détecteurs précédents. Ceci a permis à l'expérience de rejoindre le groupe des meilleures sensibilités mondiales, et a amené l'expérience compétitrice américaine CDMS à intégrer dans sa stratégie de base ce développement technologique issu de la R&D IN2P3/IRFU. Le projet en cours EDELWEISS-III consiste à réaliser un ensemble de 40 détecteurs optimisés de 800 g afin d'atteindre prochainement une sensibilité de 5×10^{-9} pb, et à adapter l'infrastructure EDELWEISS-II existante à la nécessaire réduction de bruit de fond. La dynamique de collaboration française dans ce domaine dépasse le simple cadre IN2P3/IRFU, avec le rôle central de l'Institut Néel (CNRS/INP) pour la cryogénie d'EDELWEISS et d'EURECA, et l'expertise des détecteurs scintillation/chaleur de l'IAS Orsay (CNRS/INSU) pour l'expérience ROSEBUD et le projet EURECA.
- Si les expériences les plus sensibles a priori à l'heure actuelle n'ont reporté aucun signal WIMP, trois autres expériences ont observé des "anomalies" : une modulation annuelle du fond de basse énergie est observée depuis de nombreuses années dans des cristaux de NaI par DAMA (Italie) ; une structure exponentielle a été reportée en 2010 dans le spectre ionisation à très basse énergie d'un cristal en germanium de CoGeNT (USA) ; et un excès par rapport au bruit de fond prédit est observé dans la bande de recul des noyaux d'oxygène des détecteurs chaleur-scintillation de CRESST (Europe). Ces anomalies, quoique très marginalement compatibles entre elles, pourraient être expliquées en termes de WIMPs de basse masse (~ 10 GeV). Elles sont toutes trois fortement controversées d'un point de vue expérimental, mais stimulent néanmoins de forts développements pour améliorer la sensibilité des détecteurs aux WIMPs de plus basses masses dans la prochaine décennie.
- D'autres technologies sont en développement et pourraient s'avérer compétitives dans le futur. Mentionnons en particulier les développements récents et spectaculaires d'appareils type chambres à bulles (COUPP, PICASSO, SIMPLE), et de détecteurs gazeux permettant la mesure de la direction des reculs nucléaires (MIMAC, DM-TPC, DRIFT, etc). La détection directionnelle fournit en effet une signature supplémentaire, provenant du mouvement de notre système solaire relatif au halo galactique, qui permettra en particulier de discriminer un signal de WIMPs d'un fond de neutrons. Une activité de R&D dans ce domaine est menée au LPSC depuis plusieurs années, utilisant en particulier un

développement d'une chambre micromégas pixelisée de l'IRFU couplée à une électronique rapide développée au LPSC dans le cadre du projet MIMAC.

10.3 Futur à 10 ans: grandes orientations et projets

Les programmes expérimentaux de prochaine génération se donnent pour la plupart comme but de couvrir la plus grande partie du domaine des sections efficaces prédites par les modèles, c'est-à-dire de descendre en sensibilité jusqu'à des sections efficaces WIMP-nucléon d'environ 10^{-10} à 10^{-11} pb. S'il est vrai que les expériences sur accélérateur ont déjà éliminé une bonne partie des modèles SUSY les plus simples, il reste encore un espace de phase important accessible.

L'amélioration de sensibilité en section efficace d'environ deux ordres de grandeur nécessite la mise en oeuvre d'une masse de détecteur d'environ 1 tonne, pour obtenir les résultats en quelques années de prise de données. L'identification d'un signal faisant consensus nécessitera incontestablement la confirmation de plusieurs expériences impliquant des détecteurs différents et des noyaux-cible différents. La réalisation de ces objectifs occupera probablement la prochaine décennie.

Les progrès spectaculaires accomplis récemment dans le domaine sont tels que les projets d'expériences visant une tonne en masse sont en phase de préparation active. C'est le cas en particulier de deux programmes dans lesquels sont impliqués des équipes françaises, EURECA et XENON1t.

- L'intérêt de l'utilisation du xénon liquide repose clairement sur la courbe de progrès de cette technologie, essentiellement mise en oeuvre et démontrée par la collaboration XENON (avec XENON10 puis XENON100), et sur le potentiel qu'elle laisse entrevoir pour de plus grandes masses, où l'effet d'autoblindage et la redondance d'information sur la localisation de l'interaction sont les grands avantages de cette technologie. La suite logique de cette technique est le projet XENON1t, regroupant 15 laboratoires, qui sera installé comme son prédécesseur au laboratoire souterrain du Gran Sasso, et vise à réduire son bruit de fond d'un facteur 100 pour atteindre une sensibilité vers 10^{-11} pb. Le laboratoire Subatech est impliqué dans le développement d'un système de recirculation/stockage du xénon en phase liquide pour XENON1t. Ceci permet de maintenir une contribution française significative dans ces projets ayant un rôle majeur dans le domaine. Subatech contribue aussi au projet européen DARWIN visant à établir le meilleur scénario pour la recherche directe de la matière noire utilisant des liquides de gaz nobles (argon ou xénon). Une sensibilité d'environ 10^{-12} pb est ciblée avec une expérience comprenant 5 tonnes de xénon liquide à l'horizon 2020.
- Les détecteurs cryogéniques, en particulier les bolomètres en Germanium d'Edelweiss, ont obtenu des sensibilités proches du xénon liquide, à grande masse. La grande capacité d'identification des fonds grâce aux résolutions meilleures que 1 keV, l'identification et la suppression des sources de fond à basse énergie avec la technologie FID, et la possibilité de gagner encore sur les résolutions chaleur et ionisation ouvrent la voie à une exploration plus efficace des basses masses, en-dessous de 50 GeV. Le projet EURECA, actuellement en phase de rédaction de CDR, vise à utiliser jusqu'à une tonne de détecteurs pour explorer la zone des 10^{-10} pb. Un avantage majeur d'EURECA, à laquelle prennent aussi part les expériences CRESST et ROSEBUD de bolomètres à scintillation, est l'utilisation de plusieurs noyaux cibles afin d'améliorer la fiabilité d'un éventuel signal WIMP. Le créneau d'EURECA dans un premier temps consistera à mettre en oeuvre environ 150 kg de détecteurs (EURECA phase 1) à bas seuil (environ 4-5 keV), permettant d'être aussi sensible à des masses de WIMPs entre 10 et 50 GeV, un objectif réaliste compte tenu des performances actuelles. Les développements réalisés sur de nouveaux senseurs thermiques

à plus bas seuil à l'IN2P3 renforcent cette dynamique. Le passage à une tonne de masse effective se traduira par la fabrication d'environ un millier de détecteurs d'environ 1 kg, dans le scénario actuel. Cela demandera la mise en place d'une production industrielle sur plusieurs années. Des solutions sont envisageables dans le cadre de la collaboration amorcée avec les équipes SuperCDMS.

- D'autre part, avoir la capacité de mesure de la directionalité avec les détecteurs à gaz est un atout supplémentaire pour confirmer la signature extraterrestre d'un signal, dans la stratégie à long terme de ce domaine. La collaboration MIMAC a validé son prototype en mai 2011 et l'installation à Modane du premier module bi-chambre est prévue pour début 2012. La technologie Mimac est la seule pour l'instant à avoir démontré la visualisation 3D des traces de reculs de noyaux (fluor) à 30 keV. La mise en oeuvre d'un prototype d'un m³ est envisagée. Elle permettrait d'obtenir une contrainte sur le couplage WIMP-proton spin-dépendant meilleure d'un ordre de grandeur par rapport aux limites existantes. Surtout, le prototype pourra tester la faisabilité d'un grand détecteur qui pourrait être envisagé en cas de signal clair dans les détecteurs calorimétriques.
- Les infrastructures souterraines nécessaires sont en interrelation avec ces programmes. Le programme XENON1t a été accepté au Laboratoire du Gran Sasso, mais le projet EURECA, impliquant des noyaux plus légers plus sensibles au bruit de fond neutron, a besoin de plus de profondeur à blindage équivalent. C'est pourquoi il a été soumis en 2009 à l'appel à lettre d'intention ouvert par le LSM pour l'extension possible du laboratoire. Le LSM est protégé par 1700 m de roche, dans le site le plus profond en Europe (5 fois moins de muons qu'au Gran Sasso). Avec le programme SuperNemo (voir la section 4), il constitue l'un des programmes phare de l'extension du LSM. Le site du LSM étant le meilleur en Europe pour la détection de la matière noire, une étape clé du développement de ces programmes sera l'acceptation du projet d'extension du LSM. Les équipes françaises, engagées historiquement dans le développement des bolomètres avec EDELWEISS et EURECA, dans la détection directionnelle avec MIMAC et plus récemment dans le développement des détecteurs à Xenon liquide dans la collaboration XENON et DARWIN, pourront avoir une visibilité internationale et un rôle déterminant pour les expériences de génération suivante au LSM.

10.4 Synthèse

Le contexte actuel en cosmologie et en physique des particules confirme la nécessité de la recherche de WIMPs par détection directe, qui est une priorité mondiale évidente pour la prochaine décennie. L'observation de nouvelles particules au LHC dans les prochaines années donnerait un élan supplémentaire aux expériences de détection directe de WIMPs. Même si l'absence totale de nouvelle physique au LHC à l'échelle électrofaible constituerait une sérieuse déconvenue, la question de la matière noire sous forme de WIMPs resterait néanmoins ouverte.

La détection directe est une activité en forte expansion, avec des progrès remarquables liés aux développements de nouveaux détecteurs. Les investissements dans ce domaine à l'échelle mondiale ont largement augmenté. Il faudra prévoir les moyens humains et techniques adéquats pour mettre en oeuvre les infrastructures nécessaires, en relation avec l'importance des implications des équipes françaises dans chaque projet. La France est bien positionnée dans les techniques les plus prometteuses, avec un apport technologique original sur le plan mondial. Elle a également un positionnement intéressant dans les R&D nécessaires pour les futurs projets concernant les WIMPs de basse masse et les détecteurs directionnels.

Il est possible que le miracle WIMP, qui pourrait reposer sur une coïncidence numérique, devienne moins attractif à long terme. Il faudrait alors envisager des stratégies expérimentales

permettant de tester d'autres modèles de matière noire, qui restent à définir si l'on excepte le cas spécifique des axions.

10.5 Axions

Le mécanisme de Peccei-Quinn (PQ) est une des solutions les plus prometteuses au problème de la violation de CP dans l'interaction forte. L'axion apparaît comme un boson de Nambu-Goldstone dans la brisure spontanée de symétrie $U(1)_{\text{PQ}}$. De plus, les axions peuvent être produits dans l'univers primordial et contribuer, en partie ou en totalité, à la matière noire froide.

Ces *axions invisibles* sont détectables avec des expériences réalistes pour tester cet aspect fondamental de la QCD. Le vertex générique $a\gamma\gamma$ permet la conversion axion-photon en présence d'un champ magnétique ou électrique par l'effet Primakoff. Il a été montré que la faible masse de l'axion permet que cette conversion ait lieu de façon cohérente à des distances macroscopiques, compensant la faible intensité de la force d'interaction.

La meilleure technique pour la recherche d'axions de faible masse provenant de la matière noire galactique est la technique dite d'haloscope. Dans un haloscope, les axions se convertissent en photons dans un champ magnétique statique par l'effet Primakoff. L'expérience ADMX (Axion Dark Matter Experiment) a implémenté ce concept avec une cavité cylindrique de 50 cm de diamètre et 1 m de long. La cavité baigne dans un champ magnétique de 8 T pour déclencher la conversion d'axion en photon. Pour l'instant ADMX a balayé un petit intervalle de masses entre 1.9 à 3.3 μeV . En 2012 l'expérience rentrera dans sa phase 2 où la sensibilité sera améliorée.

Une approche complémentaire est celle de l'hélioscope où l'on essaye de détecter les axions produits dans le coeur du soleil. En pointant un aimant intense vers le soleil, on peut rechercher des rayons X produits par la conversion axion-photon, un processus qui peut être vu comme un phénomène d'oscillation analogue à l'oscillation de neutrinos. Cette stratégie a été implémentée sur trois expériences à Brookhaven, à Tokyo, et au CERN. Le CERN Axion Solar Telescope (CAST) vient de finir sa campagne de mesures. CAST, après 8 ans de prise de données, a fortement amélioré les limites expérimentales et a même surpassé les limites astrophysiques dans une large partie de l'espace de paramètres.

Grâce à des améliorations possibles concernant le volume du champ magnétique, les optiques de focalisation des rayons X ainsi que le bruit de fond des détecteurs, la sensibilité de CAST peut être largement améliorée. Basée sur ces améliorations possibles et sur l'expertise de la Collaboration CAST, une nouvelle expérience appelée International Axion Observatory (IAXO) a été proposée. IAXO pourrait améliorer les limites actuelles de CAST sur la constante de couplage d'au moins un ordre de grandeur. Il serait possible de surpasser la limite sur la contrainte SN 1987A sur la masse de l'axion, $m_a \leq 10 - 20 \text{ meV}$, de tester l'hypothèse de refroidissement des naines blanches et d'explorer expérimentalement une grande partie de l'espace de paramètres disponible. De plus IAXO pourrait explorer des modèles plus génériques de WISPs (Weakly Interacting sub-eV particles) et ALPS (Axion like particles). Equipée avec des cavités microondes, cette expérience pourrait également être sensible aux axions reliques. En attendant IAXO à l'horizon 2017-2020, l'expérience CAST reprendra des données pour améliorer sa sensibilité, ceci grâce à la performance actuelle des détecteurs Micromegas qui est 20 fois meilleure qu'en début d'expérience.

11 Détection Indirecte

Les recherches indirectes de matière noire supposent que la matière noire astronomique est constituée de particules massives (de l'ordre du GeV au TeV) pouvant s'annihiler ou se désintégrer et interagissant faiblement avec la matière conventionnelle. L'établissement de la densité relique de matière noire dans l'Univers primordial (ou l'âge de l'Univers dans le cas de désintégrations) permet de donner un ordre de grandeur pour les valeurs naturelles des sections efficaces en jeu, qui se trouvent être de l'ordre des sections efficaces électrofaibles. La recherche indirecte a donc l'avantage de présenter un objectif quantitatif, relativement indépendant des modèles en ce que l'on suppose simplement que les particules de matière noire sont massives et interagissent faiblement. La valeur cible pour la section efficace d'annihilation est dite thermique, elle est typiquement de l'ordre de $\sigma v \sim 10^{-26} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$. Il n'est cependant pas exclu que cette valeur soit un ou deux ordres de grandeur plus grande. Le défi est alors d'observer les résidus de ces annihilations/désintégrations (la majorité des effets discutés ici s'appliquent à la fois aux annihilations et aux désintégrations). Les deux aspects centraux dans cette recherche sont le messenger et les cibles considérés. Selon le messenger, les sources vont être pointées ou non. Les résidus chargés d'annihilation/désintégration proviennent de notre Galaxie exclusivement et leur direction d'arrivée est rendue aléatoire au premier ordre par les champs magnétiques Galactiques. En raison des fonds conventionnels supposés plus faibles, les messagers chargés le plus souvent considérés sont des antiparticules (e^+ , \bar{p} , \bar{D}). Les résidus neutres sont les photons et les neutrinos, ils peuvent alors faire l'objet de recherches ciblées sur des sources identifiées, ou de recherches dans la composante diffuse. De manière générale, la recherche indirecte souffre d'incertitudes liées à l'estimation des signaux conventionnels. Les résidus d'annihilation/désintégration sont en effet produits *in vivo*, sans contrôle de la part de l'observateur et vont éventuellement de pair avec les processus astrophysiques standards. Pour autant cette recherche est essentielle car elle constitue le seul moyen connu de démontrer que si une nouvelle particule est découverte en collisionneur ou en recherche directe, c'est bien elle qui lie la matière au sein des galaxies et est responsable de l'organisation des grandes structures dans l'Univers.

Les régions de l'Univers ayant de l'intérêt pour la recherche indirecte de matière noire sont les régions les plus denses, dans lesquelles le terme source peut être important. Partant des petites échelles vers les grandes, citons le propre halo de notre Galaxie, le centre Galactique, d'éventuels grumeaux de matière noire peuplant le halo Galactique, les amas globulaires, les galaxies naines proches satellites de la Voie Lactée. A plus grande échelle, les régions dans lesquelles les processus exotiques peuvent se produire sont les galaxies et amas de galaxies, une émission collective des halos jeunes à grand décalage spectral, ou encore le plasma primordial avant la recombinaison. La connaissance des régions d'annihilation se fait par deux voies: l'étude de la dynamique des traceurs du potentiel gravitationnel (étoiles, galaxies, ...) et les simulations numériques de formation de structures. Dans le premier cas, les outils sont les observatoires astrophysiques conventionnels opérant dans le visible ou les bandes proches. La prospective dans ce cas implique donc une collaboration avec les laboratoires de l'INSU. Il est attendu que les contenus en matière noire de certaines sources soient mieux modélisés avec les observations future des télescopes JWST et ELT. L'étude des traînées d'étoiles à l'arrière des satellites de galaxies permettra également de caractériser les grumeaux de matière noire. Ces études seront également menées avec les données de la mission GAIA de l'ESA, dont l'objectif est la cartographie 3D des étoiles de notre Galaxie, incluant les mesures cinématiques des étoiles. Ces données seront essentielles pour décrire plus précisément les profils de matière noire dans notre halo, au sein des satellites de la Galaxie, et contraindre la population de grumeaux de matière noire. Cela permettra en particulier de s'atteler au problème des régions centrales des halos de matière noire (pics *vs.* coeurs). De nouvelles sources potentielles seront peut être révélées par les futurs grands relevés comme SDSS-III ou DES. Il est aussi possible que les données d'EUCLID

sur la distribution de matière noire dans l'Univers bénéficie à la communauté liée à la recherche indirecte. L'apport des simulations numériques à N-corps sera également essentiel, en particulier pour une compréhension plus fine des influences mutuelles de la matière noire et des baryons dans la formation des halos.

Un axe de recherche important procède par les canaux de rayons cosmiques chargés. Selon le libre parcours moyen des particules chargées champs magnétiques de la Galaxie (lié à leur pertes d'énergie), les sources peuvent être réparties dans l'ensemble de la Galaxie (c'est le cas des canaux en hadrons) ou locales (pour les leptons). Les mesures obtenues ces dernières années par PAMELA, ATIC et Fermi en particulier ont généré une copieuse littérature pour ce qui est de l'interprétation des mesures de leptons cosmiques en terme d'annihilation de matière noire. Ces études ont permis de pointer la grande difficulté de cette tâche, en raison de la présence de signaux d'origine vraisemblablement conventionnels qui n'avaient pas été suffisamment considérés dans les estimations préliminaires. L'avancée majeure viendra avec les analyses des données de l'expérience AMS-02 dont la durée de vie est prévue pour être de 10 ans. L'avancée en terme de précision associée à la grande statistique d'événements attendus est certainement prometteuse. Avant les interprétations en terme de matière noire, il sera pourtant indispensable d'étudier les processus conventionnels à l'oeuvre et les effets de propagation, et les données d'AMS-02 permettront cela, en particulier avec l'étude des rapport secondaires/primaires et de la composition isotopique du rayonnement cosmique. Des analyses croisées avec les observations en rayons gamma de haute et très haute énergie permettront d'identifier les sources proches, responsables en particulier des modulations observées dans les spectres en énergie des électrons et positons. La grande statistique accumulée permettra peut être d'observer un dipôle dans les directions d'arrivée de ces leptons, l'orientation duquel pourra donner des indices sur une éventuelle source de matière noire. Une recherche prometteuse concerne le canal \bar{D} , en particulier à basse énergie. En effet, en dessous de 500 MeV par nucléon, la production conventionnelle de \bar{D} diminue fortement, contrairement à la production exotique. AMS-02 pourra faire cette recherche, ainsi de l'expérience en ballon dédiée GAPS qui bénéficiera d'une coupure géomagnétique nettement plus favorable pour cette recherche en particulier. Des études préliminaires montrent que ce canal pourrait permettre d'être sensible aux sections efficaces thermiques jusqu'à des masses de particules de matière noire de quelques centaines de GeV. Il sera alors nécessaire de croiser les analyses d'AMS-02 et de GAPS pour estimer le fond conventionnel.

En ce qui concerne le canal neutrino, les cibles sont les annihilations au coeur du Soleil et de la Terre, ainsi que les régions centrales denses de la Galaxie. Ces sources relativement proches sont ici considérées en raison de la faible interaction des neutrinos conduisant à de petites surfaces effectives pour les observatoires terrestres. Les premières limites étaient issues de Kamioka, elles étaient en particulier très compétitives par rapport aux recherches directes de matière noire, en particulier pour les recherches d'interactions dépendant du spin. Dans ce cas, le facteur important était le taux de capture dans le Soleil, qui fait intervenir les diffusions WIMP-noyaux et non la section efficace d'annihilation. Les expériences actuelles Antares et IceCube conduisent de telles recherches, et recherchent également des annihilations. Les limites sur la section efficace d'annihilation sont actuellement de l'ordre de $10^{-21} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ (IceCube) dans une gamme masse entre 200 GeV et 10 TeV. Les avancées attendues pour la recherche de matière noire sont liées à l'abaissement du seuil de détection des neutrinos, en particulier avec les améliorations de IceCube (DeepCore) et l'augmentation des volumes de détection avec PINGU. Le projet KM3Net aura l'avantage par rapport à IceCube d'avoir une meilleure visibilité de la région centrale de la Galaxie, où les annihilation/désintégrations sont supposées être plus fréquentes. Que ce soit avec DeepCore ou KM3Net, la sensibilité pourrait être améliorée de plusieurs ordres de grandeur par rapport aux résultats actuels. Quant au projet GVD (GigaTon Volume Detector) au lac Baïkal, le seuil en énergie sera probablement trop élevé pour espérer être sensible aux types de particules discutés ici.

Actuellement des recherches indirectes en rayons gamma de très haute énergie sont conduites par les télescopes Tcherenkov au sol HESS, MAGIC et VERITAS, ainsi que par le satellite Fermi. Les sources étudiées par les expériences au sol dépendent de leurs positions sur le globe, en particulier HESS observe la région centrale de la Galaxie depuis l'hémisphère sud, dans les meilleures conditions. C'est actuellement de ces observations, ainsi que de l'observation des galaxies naines que les meilleures contraintes sur les particules de matière noire sont obtenues, pour des gammes de masses allant de la centaine de GeV à la dizaine de TeV. Dans le cas des analyses prenant pour cibles les galaxies naines, les limites actuelles sont de l'ordre de quelques $10^{-23} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ entre la centaine de GeV et 10 TeV avec les télescopes Tcherenkov, avec une incertitude d'un ordre de grandeur liée à la modélisation des halos de matière noire. Actuellement la meilleure limite avec des télescopes Tcherenkov est obtenue avec la recherche dans la composante diffus, les limites atteignent $\sim 3 \times 10^{-25} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ au delà de 400 GeV sous l'hypothèse d'un profil piqué. Il est à noter que si des excès étaient observés dans d'autres canaux, la recherche en rayons gamma a cela d'essentiel qu'elle permet de pointer les sources dans le ciel et d'étudier précisément la morphologie de l'émission. Entre autre sujets, la discrimination entre une particule de matière noire s'annihilant et se désintégrant pourrait se faire avec l'étude de la morphologie d'un éventuel signal en gamma. La différence entre ces deux cas réside dans le fait que le signal est proportionnel à la densité de matière noire le long des lignes de visées dans le cas de désintégrations, alors qu'il s'agit du carré de la densité pour des annihilations. Les phases suivantes (HESS II, améliorations de MAGIC et VERITAS) des instruments actuels permettront d'en améliorer encore la sensibilité aux signaux de matière noire. HESS II en particulier couvrira le domaine des basses énergies pour les télescopes au sol et sera tout à fait complémentaire avec les observations spatiales. Le satellite Fermi quant à lui a déjà permis de contraindre l'espace des paramètres dans une région de masse complémentaire aux observations actuelles, de quelques GeV jusqu'au TeV. Une analyse combinée des données de Fermi sur les galaxies naines ne tenant pas compte de l'incertitude sur les halos permet d'exclure les candidats plus légers que 30 GeV. Les limites correspondantes s'extrapolent au TeV vers les mêmes ordres de grandeurs que pour les télescopes Tcherenkov. La prise de données par Fermi va se poursuivre le long de la décennie à venir, cela permettra d'améliorer les limites sur les cibles déjà observées. La limite actuelle à 30 GeV pourra être étendue à environ 100 GeV avec l'accumulation de 10 ans de données. Il sera également possible d'accumuler la statistique pour la recherche d'excès dans la composante diffuse. L'observation par Fermi des 4π du ciel permettra de rechercher les traces d'annihilations de matière noire dans les halos jeunes à partir de l'étude des anisotropies du diffus. Pour ce qui est du futur de la recherche en gamma depuis le sol, le Cherenkov Telescope Array (CTA) porte tous les espoirs en la matière. Il permettra une amélioration d'un facteur 10 en sensibilité sur les recherches ciblées, qui se traduira directement en contraintes sur les particules de matière noire. Les analyses de galaxies naines avec CTA seront sensibles à des sections efficaces de l'ordre de $10^{-24} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$, avec un pic de sensibilité à 500 GeV et une bonne sensibilité aux masses de 1 à 10 TeV. Il convient de noter que pour la plupart des sources de matière noire considérées en gamma, un potentiel signal conventionnel pourrait apparaître et devra être préalablement étudié. Cela a été le cas pour la source au centre Galactique par exemple et pourrait se reproduire avec l'observation des amas de Galaxies, dont un signal pourrait provenir de matière noire et être induit par la population de rayons cosmiques. Les limites sur les particules de matière noire pourraient être améliorées même en présence d'un signal conventionnel, en particulier avec l'étude fine des spectres en énergie et la recherche de coupures. CTA bénéficiera en outre d'un mode de recherche de sources à l'aveugle (similaire au balayage du plan Galactique par HESS) plus performant, qui ouvrira la possibilité de rechercher à l'aveugle des grumeaux de matière noire dans notre Galaxie. Les perspectives pour ces analyses indiquent qu'elles seraient sensibles aux sections efficaces thermiques entre 300 GeV et 3 TeV environ. Aux plus basses énergies, les dernières années ont vu le déclin de l'interprétation en terme de matière noire de

l'émission à 511 keV du centre Galactique. Si un successeur est trouvé à Integral, les analyses correspondantes permettront de confirmer cette interprétation et d'en identifier la source. Dans le domaine radio enfin, l'interprétation des données de WMAP a conduit à l'identification d'une composante dont l'origine pourrait être la matière noire. Cet effet nommé "WMAP haze" dans la littérature pourrait avoir pour origine l'émission synchrotron d'une population d'électrons produite de façon exotique dans les régions centrales de la Galaxie. Les données du satellite Planck permettront de confirmer la présence de cet effet, et si tel était le cas, la possibilité offerte par Planck d'observer plus de bandes spectrales pourra confronter l'interprétation en terme de matière noire. L'accumulation de données dans Fermi donnera également un éclairage sur cet aspect, avec l'étude d'une possible contrepartie au WMAP haze en rayons gamma de haute énergie.

Une autre contrainte indirecte sur les annihilations/désintégrations de matière noire vient des considérations sur l'injection d'énergie dans le plasma primordial *via* les annihilations/désintégrations. Ces dernières pourraient avoir pour effet de diminuer l'amplitude des oscillations du plasma et ainsi diminuer la normalisation du spectre de puissance du fond diffus cosmologique. Pour les canaux d'annihilation leptoniques les données de WMAP permettent d'ores et déjà d'exclure les candidats plus légers que 8 GeV. Les données de Planck permettront d'étendre l'exclusion jusqu'à la centaine de GeV si aucune anomalie n'est observée. De même, les mesures de Planck concernant la ré-ionisation de l'Univers permettront de contraindre les annihilations/désintégrations de matière noire comme source exotique de réchauffement du milieu interstellaire avant la ré-ionisation.

12 Simulations

Les simulations numériques ont joué un rôle central en cosmologie au cours des trente dernières années. Les calculs de distribution des galaxies à grande échelle ont renforcé le paradigme cosmologique actuel, en montrant un accord remarquable avec les observations. De plus, on dispose maintenant d'une vue détaillée de la structure des halos de matière noire en général (le profil dit NFW) et du halo de la voie lactée en particulier. Cela a des conséquences importantes sur les recherches de matière noire par détection directe. Notre compréhension de la formation des galaxies a aussi bénéficié dans les années passées des progrès des simulations cosmologiques impliquant la dynamique du gaz, avec les premières simulations réalistes de disques de galaxies. Les simulations cosmologiques sont encore en développement, de façon à atteindre une plus grande précision et une modélisation physique plus précise. Nous décrivons maintenant les défis des outils de simulation de prochaine génération.

Un aspect important des futurs grands relevés comme Euclid sera de mesurer le spectre de puissance de la matière avec une précision meilleure que 1%, voire 0.1%. Si les calculs théoriques de ce spectre de puissance ont une précision similaire, il sera alors possible d'extraire les paramètres cosmologiques avec précision. Pour cela, il faut utiliser des simulations cosmologiques avec des boîtes de très grande taille, tout en résolvant des échelles suffisamment petites pour répondre au besoin des relevés. Cela nécessitera des simulations avec plus de mille milliard de particules, un tâche formidable pour le calcul à l'échelle Exascale dans la prochaine décennie. Les codes à N corps capables de telles performances n'existent pas. Cela nécessitera une adaptation significative des codes existants (GADGET, RAMSES).

Un autre défi des générations futures de simulations à N corps est de pouvoir explorer des modèles alternatifs à la Relativité Générale, et plus généralement au paradigme Λ CDM. Un modèle intéressant qui a récemment émergé est la gravité en $f(R)$ pour laquelle sont développés des solveurs de Poisson. D'autres modèles sont à l'étude, comme DGP ou TeVeS. Ils requièrent tous des développements significatifs des codes existants pour pouvoir être testés avec les grands relevés à venir.

Enfin, des progrès importants dans le contexte de la formation des galaxies sont attendus dans les prochaines années. Cette thématique ne relève pas totalement de la cosmologie mais elle aura un rôle important pour les futurs relevés. Notre compréhension de la physique des baryons, comment se forment les galaxies et comment elles modifient la distribution de masse totale, sont des questions fondamentales pour les relevés visant l'étude de l'énergie noire. La physique des baryons est peut-être la plus grande source d'incertitudes systématiques sur le spectre de puissance de la matière aux échelles petites et intermédiaires. Le feedback des noyaux actifs de galaxies, par exemple, est maintenant considéré comme une solution élégante, quoique phénoménologique, au problème de "sur-refroidissement" dans les amas de galaxies. Il a néanmoins un impact important sur les prédictions théoriques des effets de lentille faible, et doit donc être correctement compris et calibré. Pour la détection directe de matière noire, la physique de la formation de notre Voie Lactée a aussi des conséquences importantes pour la distribution de matière noire proche du Soleil. La contraction adiabatique du halo peut modifier la densité de matière noire près du Soleil, et il a été suggéré que la formation d'un disque noir augmenterait le signal.

Les perspectives pour la prochaine décennie en cosmologie numérique sont prometteuses. Les nouveaux défis sont l'arrivée du calcul Exascale, et de nouveaux modèles physiques comme des gravités modifiées, des particules de matière noire exotiques et de nouvelles idées en formation des galaxies et des amas.

13 Théorie

Les recherches en cosmologie théorique ont un champ d'intérêt très varié. Elles couvrent la physique de l'univers primordial, la physique du fond diffus cosmologique, l'étude des mécanismes à l'origine des ondes gravitationnelles ou du champ magnétique primordial, les problèmes posés par l'étude du développement des grandes structures de l'univers et la construction de modèle de matière noire et d'énergie noire. Dans ces domaines les outils théoriques utilisés, ou les approches employées, sont parfois similaires et s'attachent aussi bien à la construction d'outils théoriques adaptés qu'à la construction d'observables susceptibles d'être confrontés aux observations. Les grands projets observationnels qui structurent cette activité sont les mesures du fond diffus cosmologique avec Planck, la cartographie des grandes structures de l'univers à l'aide de catalogues de galaxies et ou de cisaillement cosmique que doit entreprendre Euclid, la recherche d'ondes gravitationnelles avec LISA, enfin le LHC et les contraintes apportées par les recherches directes ou indirectes de matière noire.

La construction de modèles d'univers primordial est susceptible d'éclairer à la fois la physique des hautes énergie et le problème de la quantification de la gravitation. Ainsi la quantification des champs en espace temps courbe pose des problèmes encore largement ouverts. La construction de modèles inflationnaires, réalistes ou phénoménologiques, et l'élaboration de leurs signatures observationnelles, a aussi connu des développements récents. La phase inflationnaire est en effet le moment pendant lequel sont générées les fluctuations de métrique à l'origine des grandes structures de l'univers qu'on observe aujourd'hui, soit à travers les grands relevés cosmologiques soit à travers les anisotropies de température du fond diffus cosmologique. Ces observations sont donc a priori autant de sondes de la physique de l'univers primordial et les résultats attendus de Planck vont offrir un moyen unique de placer de nouvelles contraintes sur les modèles inflationnaires. Dans cette perspectives, de gros efforts ont déjà été entrepris pour caractériser les modèles en fonctions de signatures non-Gaussiennes éventuelles qu'ils produiraient. Ces travaux se développent dans 2 directions, la caractérisation des non-Gaussianités selon la nature des modèles inflationnaires, par exemple forme dite locale ou *squeezed* du bispectre, et le calcul détaillé des couplages de modes induits au moment de la recombinaison. Les premiers résultats obtenus à partir de l'écriture des couplages gravitationnelles et électromagnétiques au 2ème ordre doivent encore être consolidés et étendus au cas de la polarisation du fond diffus.

Une autre signature potentiellement importante de la physique de l'univers primordial serait la détection d'ondes gravitationnelles générées lors de transitions de phases primordiales. Des modèles semi-analytiques sont en cours de développement qui devraient permettre d'évaluer précisément le fond d'ondes stochastiques induits par les collisions de bulles (contenant les phases brisées) et par la turbulence magnétohydrodynamique associée. Dans ce contexte LISA pourrait détecter le fond d'ondes gravitationnelles induit dans certains modèles de transition électrofaible. Incidemment, ces mêmes effets pourrait être à l'origine du champ magnétique intergalactique dont l'origine reste a priori mystérieuse.

La nature de la Matière Noire est actuellement un sujet de recherche de très grande actualité, en particulier à cause du grand nombre de résultats expérimentaux qui suggèrent autant de nouvelles directions de recherche théorique. Le LHC donnera probablement ses premiers résultats intéressants pour la matière noire à partir de 2012. Les expériences de détection indirecte (telles que les satellites PAMELA, FERMI ou le détecteur installé sur la Station Spatiale Internationale AMS-02) ont déjà apporté des résultats, quelque fois étonnants, ou le feront d'ici 2013. Enfin, plusieurs expériences de détection directe ont publié des résultats qui montrent une situation en évolution continue. L'évolution expérimentale est telle que l'échelle de masse du TeV (échelle où la matière noire et plus généralement la physique des particules au delà du modèle standard doivent pouvoir être mis en évidence) sera explorée entièrement d'ici quelques années. Les suggestions d'une possible découverte de signaux de matière noire chez certaines expériences,

d'un côté, et les contraintes de plus en plus fortes qui viennent d'autres expériences, de l'autre, ont suscité un foisonnement d'activité théorique. Les modèles 'traditionnels' pour expliquer la matière noire (supersymétrie, dimensions supplémentaires...) ont été étoffés par de nouvelles idées: e.g. modèles avec un secteur caché très complexe (comprenant nouvelles forces et nouvelles symétries), modèles de matière noire de très grande ou très faible masse ou encore la possibilité que la matière noire soit instable. Les prochaines années nous en apprendront sans doute plus sur la nature de la particule qui constitue la matière noire ou, du moins, sur la classe de modèles la plus prometteuse.

Au delà d'un problème de cosmologie, la nature de l'énergie noire, ou plus généralement l'origine de l'accélération de l'univers, est un sujet maintenant central de physique fondamentale. Les modèles d'énergie noire sont très variés et sont susceptibles de produire de nombreux types de signatures observationnelles dans l'univers local (par exemple en brisant le principe d'équivalence avec l'introduction d'une 5ème force). Ces signatures concernent cependant en grande partie le développement des grandes structures de l'univers et les recherches dans ces deux domaines sont donc maintenant couplées. La nature de l'impact d'une composante d'énergie noire sur la croissance des structures dépend en effet de la dynamique associée à ce nouveau degré de liberté. La démarche déjà entreprise et qui devrait être poursuivie dans les études futures consiste à classifier les signatures observationnelles en fonction de la nature des nouveaux couplages induits par ce nouveau champ, couplages intrinsèques ou couplages avec les champs de matière. Dans ce contexte, le problème mathématique posé par la croissance non-linéaire des structures constitue maintenant une activité spécifique de cosmologie théorique qui fait appel à des outils, des techniques, largement empruntés à la théorie des champs. Il s'agit ici de prolonger les prédictions des théories linéaires, à des régimes quasi-linéaires ou même non-linéaires. Au moins dans certains cas, les comparaisons avec les simulations numériques montrent que les théories de perturbations sont pertinentes, dans le sens qu'elles permettent d'entendre le régime de validité des prédictions théoriques. L'avantage sur la réalisation de simulations numériques est que ces calculs peuvent être mis en oeuvre sur de grandes classes de modèles, en particulier en présence d'énergie noire, de neutrinos massifs, etc. Nous avons maintenant des résultats bien établis à l'ordre de 2 boucles. Il s'agit à moyen terme de valider des schémas perturbatifs et d'en évaluer leur performance. Il s'agit aussi de prolonger ces calculs à des quantités non seulement accessibles aux simulations numériques mais aussi aux observations - passage de l'espace réel à celui des redshifts quand il s'agit de comparer aux mesures de spectres dans les catalogues de galaxies, de quantités tridimensionnelles à des quantités projetées correspondant aux observations de cisaillement cosmique.

14 Recommandations et perspectives

Les chercheurs français sont impliqués dans tous les domaines de la cosmologie qui ont mené à la construction de Λ CDM. En cosmologie observationnelle, l'IN2P3 et l'IRFU sont en particulier impliqués dans PLANCK (anisotropies du CMB), SNLS (SuperNova Legacy Survey) et BOSS (Baryon acoustic Oscillation Spectroscopic Survey). Pour la recherche de matière noire froide non baryonique, mentionnons l'expérience XENON, ainsi que le rôle majeur dans l'expérience de recherche de WIMPs par détection directe EDELWEISS. Des recherches importantes de photons et de neutrinos provenant de l'annihilation de WIMPs ont été menées par HESS et ANTARES. La communauté des cosmologues de l'IN2P3/IRFU/IPhT regroupe environ 200 membre (voir table de la section 1).

Les dix dernières années ont vu l'émergence du modèle Λ CDM et la mesure de ses paramètres avec une précision meilleure que 10%. Le but des dix prochaines années sera d'améliorer la précision sur ces paramètres et, plus important, de rechercher des désaccords avec Λ CDM indiquant une nouvelle physique. Un but important dans ce contexte est d'améliorer les limites sur la variation temporelle de la densité d'énergie noire (paramètres cosmologiques w et w_a). Il est aussi fondamental de placer des contraintes sur des déviations de la théorie gravitationnelle standard (la relativité générale) à grande échelle en mesurant proprement l'histoire de l'expansion de l'Univers et la formation simultanée des grandes structures. Ce sont les objectifs principaux du Large Synoptic Survey Telescope (LSST) et de la mission spatiale Euclid, qui doivent commencer à produire des données vers la fin de la décennie. LSST est un grand relevé photométrique du ciel conçu avant tout pour des mesures de cisaillement gravitationnel faible mais qui va aussi étudier le BAO et les SNIa. Euclid est conçu avant tout pour le cisaillement gravitationnel et le BAO mais pourrait aussi étudier les SNIa. Des résultats intermédiaires sur le BAO devraient être produits par eBOSS, une extension de BOSS.

Avec la mesure finale des anisotropies de température du CMB par Planck, les études sont maintenant centrées sur sa polarisation. La recherche des "modes B" est particulièrement importante car elle fournirait une indication directe en faveur de l'inflation. C'est le but de QUBIC, un observatoire interférométrique du CMB mené par la France qui doit être construit en Antarctique.

La détection directe ou indirecte de matière noire sous forme de WIMPs est une piste expérimentale cruciale pour tenter de comprendre la physique qui se cache derrière la paramétrisation Λ CDM. Des expériences de détection directe à l'échelle de la tonne deviennent réalisables, comme EURECA, la suite prévue d'EDELWEISS, et les suites de XENON. Pour la détection indirecte via l'observation de produits d'annihilation des WIMPs, CTA devrait améliorer les résultats déjà obtenus par HESS.

Il est clairement très difficile d'extrapoler au-delà de 10 ans. Le rapport de prospective écrit il y a sept ans seulement ne mentionnait ni le BAO (découvert en 2006), ni les crises financières de 2007-2011, qui ont toutes deux un impact important sur la pratique de la cosmologie de 2011. Nous pouvons néanmoins mentionner deux projets qui n'ont pas (encore) bénéficié de la participation IN2P3/IRFU. Le premier est le Square Kilometer Array (SKA), un radiotélescope conçu en partie pour fournir un relevé quasiment plein-ciel jusqu'à des redshifts $z \sim 2$. En second, un effort est en cours pour construire des télescopes optiques de 30 mètres de diamètre. De tels instruments pourraient permettre la mesure directe de la dépendance en temps du taux d'expansion via la dépendance en temps des posi-

tions des raies spectrales.

Appendix 1

Table 4: Communauté IN2p3/irfu des chercheurs, enseignants-chercheurs, post docs etc étudiants en these travaillent dans cette domain

Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années des débuts et de fin des investissements	Pays partenaires	Nombre de physiciens français participant au projet	Nombre de techniciens et ingénieurs français en nombre d'hommes par an.	Commentaires
	LSST	survey photométrique	avant projet détaillé	RetD, construction 2007-2018, running 2019-2030	USA, Chili...	40 (6FTE 2011 + 2 doctorants)	30FTE(2007-10) 17FTE(2011-20) 25FTE/an (2012-2015)	Projet IN2P3 seul. Début de la construction 2014. Début de la science 2019
	Euclid	mission spatiale ESA	2011 fin phase A; sélectionnée oct 2011; lancement 2019	2012-2019 (hors operation)	13 pays européens	20 FTE/an	30 FTE/an	inclus ccin2p3
	eBOSS	survey spectroscopique	approuvé; démarrage automne 2014	2014-2020	US+Europe (France, UK, Espagne, Allemagne)	20	0	
	BigBOSS	survey spectroscopique	phase de R&D	R&D 2012-13; construction 2014-17; observation 2018-24	US+Europe (France, UK, Espagne, Allemagne)	20	10	
	EdelweissIII	Matière noire (35kg)	en construction	2011-2012	Allemagne, UK, Russie	15		
	EURECA	Matière noire (1tonne)	écriture CDR	2012-2018	Allemagne, UK, Russie, Espagne	25	2013à2016: 5CEA, 5CNRS	
	XENON100	Matière noire	Approuvé, financé	2011-2013	Chine, USA, Israel, Italie, Pays-Bas, Portugal, Suisse	5.5		Plus 1PhD
	XENON1T	Matière noire	50% Approuvé, financé, 50% en cours	2011-2019	Chine, USA, Israel, Italie, Pays-Bas, Portugal, Suisse	5	1	Plus 1PhD
	QUBIC	Interféromètre bolométrique (Polarisation du CMB)	Design achevé, financement paratier obtenu (ANR)	2012: construction des éléments, 2013: Intégration; 2014 running	Italie, Irlande, UK, USA	28 dont 2 doctorants	2012:12FTE; 2013:10.5 FTE; 2014:8FTE	In2p3 et INSU

Appendix 2

Table 5: Estimated financial requirements and time scale for new projects

Priorité	Nom du projet	Type de projet	Etat d'avancement	Années de début et de fin des investissements	Cout total en incluant le personnel(en MEuro)	Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) en MEuro	Contribution IN2P3+CEA (en incluant le personnel) en MEuro	Autres contributions Françaises en MEuro	Commentaires
	LSST	survey photométrique	avant projet détaillé	RetD, construction 2007-2018, running 2019-2030	camera seule 152M\$; LSST constr. 557 M\$	camera (2077-2017) 3.5ME + calcul	camera (2007-2017) 16.5ME + calcul	TGIR + Autre: 5ME (2007-17)	
	Euclid	mission spatiale ESA	2011 fin de phase A; sélectionnée en oct 2011; lancement 2019	2012-2019 (hors opération)	ESA:594ME; pays:444ME; cout sans opération (2012-2019) Pays:317ME France:91ME	2.2 ME CCIn2p3	470 total FTE permanents(hors CDD) avec CEA +IN2P3 +INSU +CNES(44Me)	CNES 35 Me non margé, hors personnel (47 Me margé+ CNES)	contribution CEA et IN2P3 en financement CNES
	eBOSS	survey spectroscopique	approuvé; démarrage automne 2014	2014-2020	10ME	1ME	1ME		
	BigBOSS	survey spectroscopique	phase de R&D	R&D 2012-13; construction 2014-17; observation 2018-24		1ME	3ME		
	EdelweissIII	Matière noire (35kg)	en construction	2011-2012	1.7ME		0.4ME	0.8ME (ANR)	
	EURECA	Matière noire (1tonne)	écriture CDR	2012-2018	10-30ME		3-10ME		
	XENON100	Matière noire	Approuvé, financé	2011-2013	1ME		0.035ME		
	XENON1T	Matière noire	50% Aprouvé, financé, 50% en cours	2011-2019	8ME		0.8ME	0.3ME (Région Pays de la Loire)	
	QUBIC	Interféromètre bolométrique (Polarisation du CMB)	Design achevé, financement paratier obtenu (ANR)	2012: construction des éléments, 2013: Intégration; 2014 running	2ME			ANR: 0.64ME	