Résumé français de thèse

La structuration de l'Univers à grande échelle : une fenêtre sur ses composantes sombres

Stéphane ILIC

Table des matières

1	Introduction	2
2	La corrélation FDC-matière pour la détection de l'effet iSW	3
3	L'impact des superstructures dans le FDC	5
4	Modélisation exacte de l'effet iSW	7
5	Sonder la matière sombre à travers la réionsation de l'Univers	8

1 Introduction

Pour resituer le contexte de ma thèse, il est tout d'abord nécessaire de rappeler ce que l'on nomme communément les "composantes sombres" de notre Univers. En particulier, l'une d'entre elle est au coeur de ma thèse : il s'agit de l'élusive Énergie Sombre, l'une des plus grandes inconnues de la cosmologie moderne. Selon le modèle standard de "constante cosmologique" adopté par la majorité des cosmologistes, cette énergie sombre emplit tout l'Univers et est assimilable à une énergie intrinsèque au vide, constante à la fois dans le temps et dans l'espace. Simple possibilité théorique jusqu'à la fin du XXème siècle, sa véritable existence fut mise en évidence en 1998 à travers l'observation de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Depuis lors, l'étude de l'énergie sombre est unes des préoccupations majeures de la communauté scientifique en cosmologie, et également un des axes principaux de ma thèse. Les différents modèles qui cherchent à expliquer cette intrigante composante sombre sont nombreux, tout comme les "sondes" et observables utilisées par les cosmologistes pour les discriminer. Ces dernières vont de la mesure de luminosité des supernovae lointaines (la première historiquement à mettre en évidence l'évidence sombre) à des mesures basées sur des effets géométriques tels que les oscillations acoustiques des baryons. Une des voies que j'ai exploitée pour caractériser l'énergie sombre s'appuie sur deux éléments fondamentaux de la cosmologie moderne :

- la structuration de l'Univers à grande échelle : bien que les hypothèses d'homogénéité et d'isotropie sont tout à fait valides pour décrire l'évolution d'ensemble de l'Univers, son expansion et sa relation avec son contenu (à travers la métrique FLRW), ces assomptions ne sont plus applicables à plus petite échelle où l'Univers apparaît très structuré, avec la présence d'amas de galaxies et de grands vides cosmiques. Au premier ordre linéaire (i.e. aux très grandes échelles) cette structuration et son évolution sont très bien décrites par la théorie des perturbations.
- le fond diffus cosmologique (FDC), cette "première lumière de l'Univers" qui trouve son origine dans l'Univers primordial 380000 ans après le Big Bang au moment précis du découplage entre photons et baryons du fait du refroidissement de l'Univers par son expansion. Quasi-isotrope, elle présente des petites anisotropies de température et de polarisation (dites primaires) très tenues qui traduisent les petites variations de densité d'énergie dans l'Univers au moment du découplage photons-baryons. Ces petites homogénéités ont constitué les "graines" initiales à l'origine de l'ensemble des structures qui se sont ensuite formées dans l'Univers par attraction gravitationnelle. En sus des anisotropies primaires, les photons du FDC portent également la trace des interactions secondaires qu'ils ont subit sur leur trajet jusqu'à nous, tels que par exemple l'effet Sunyaev-Zel'dovich, un décalage spectral dû à une apport d'énergie en provenance du gaz chaud intergalactique dans les amas de galaxies.

La sonde qui m'intéresse en particulier est basé sur un effet de type gravitationnel subi par les photons du FDC, appelé effet Sachs-Wolfe intégré (iSW). Ces derniers traversent avant de nous parvenir de multiples potentiels gravitationnels associés aux grandes structures de l'Univers (galaxies, amas et vides cosmiques). Or il se trouve que d'après la théorie des perturbations, l'accélération de l'expansion de l'Univers a pour effet d'étirer et d'"aplatir" ces potentiels pendant le passage des photons. Ainsi, cela a pour conséquence de modifier l'énergie photons du FDC, avec un gain lors de la traversée d'une surdensité et une perte lors du passage dans un vide; l'amplitude et les propriétés de l'effet dépende naturellement des caractéristiques de l'énergie sombre. L'effet iSW a par conséquent une influence directe, mais qui se trouve être ténue, sur le spectre de puissance des fluctuations de températures du FDC. Cette contrainte a obligé les cosmologistes à utiliser des données externes pour détecter l'effet iSW. La première approche développée et toujours classiquement utilisée consiste à corréler le FDC avec un relevé de galaxies qui trace la distribution de la matière dans l'Univers, et donc les potentiels gravitationnels sous-jacents. Cette méthode est au coeur d'un pan de ma thèse et est traitée dans la section suivante.



FIGURE 1 – Illustration graphique de l'effet Sachs-Wolfe intégré subi par les photons du FDC, ici lors de la traversé d'une surdensité de matière (un amas de galaxies). Dans le cas d'un Univers dominé par la matière, l'effet en question est nul (chemin vert) du fait que les potentiels gravitationnels soient constant dans ce type de cosmologie. À l'inverse dans un Univers dominé par l'énergie sombre, les photons du FDC (chemin bleu) gagnent de l'énergie au moment de remonter et de sortir du potentiel, car ce dernier a été étiré et est devenu moins profond.

2 La corrélation FDC-matière pour la détection de l'effet iSW

En faisant appel à la théorie des perturbations, il est possible de calculer la corrélation théorique existante entre un relevé de galaxies donné projeté sur le ciel (caractérisé par sa fonction de sélection, i.e. la distribution en redshift des galaxies qu'il contient) et les anisotropies du FDC dans lesquelles se cachent les variations de température induite par l'effet iSW. Simultanément, cette corrélation croisée galaxies-CMB peut être mesuré sur des données réelles, sous la forme d'une fonction de corrélation dans l'espace de son choix (réel, harmonique, ondelettes). Deux principaux tests sont alors possibles : confronter les prédictions aux résultats obtenus avec les données (pour tester la validité d'un modèle), ou plus simplement commencer par chercher si cette corrélation existe bien réellement (prouvant ainsi l'existence de la matière sombre).

Cette approche de corrélation croisée a été maintes fois tentée dans la littérature en utilisant de nombreux relevés dans un grand éventail de longueurs d'onde. A l'heure actuelle, aucune corrélation n'a encore donné de résultat définitif sur la détection de l'effet iSW, avec parfois même des incohérences entre différentes études utilisant des données identiques. L'apparente confusion qui règne dans le domaine trouve principalement sa source dans les actuels relevés de galaxies eux-mêmes, dont la profondeur n'est pas suffisante et/ou dont la couverture du ciel trop faible pour être des bons traceurs de l'effet iSW. Dans ce contexte, une possibilité serait d'attendre la prochaine génération de grands relevés galactiques (Pan-STARRS, LSST, Euclid, etc.) qui adresseront la plupart de ces limitations – mais pas avant un certain nombre (et un nombre certain!) d'années. Néanmoins, il reste très intéressant de mener une étude approfondie du futur potentiel de ces relevés – un travail que j'ai mené au tout début de ma thèse. J'ai eu l'occasion d'explorer à travers un travail de prédiction les pistes d'amélioration des techniques actuelles pour exploiter au maximum ces futures données, et prendre en compte les biais possibles qui peuvent y apparaître.

Suite à cela, j'ai décidé de chercher un traceur alternatif de la matière dans l'Univers, qui soit à la fois disponible dès maintenant, bien connu, tout en ayant les caractéristiques d'un relevé de galaxies de prochaine génération. Je me suis intéressé par conséquent à la corrélation du FDC avec un autre fond "diffus" : le fond diffus infrarouge (FDI). Ce dernier est un arrière-plan diffus présent dans tous les relevés couvrant l'infrarouge, et qui y est constitué de l'émission intégrée de galaxies lointaines (jusqu'à même des redshifts supérieurs à 1) infrarouges non-résolues, riches en poussières et en régions de formation d'étoiles. Grâce à l'expertise de chercheurs de l'IAS, j'ai acquis les connaissance théorique nécessaire à l'exploitation du FDI, et j'ai pu ainsi montrer que ce fond représente un excellent traceur des potentiels gravitationnels, en évitant beaucoup des défauts des relevés actuels (avec sa grande couverture du ciel et sa profondeur en redshift). L'avantage de son accessibilité immédiate au sein des relevés couvrant l'infrarouge est renforcée par le fait qu'il soit présent notamment dans les données du satellite Planck, dont je suis membre de la collaboration et de la "Core Team" de l'instrument HFI. Ayant acquis les connaissances nécessaires sur la modélisation du FDI, j'ai pu dériver la prédiction théorique de la corrélation croisée entre les deux fonds diffus cosmiques (micro-ondes et infrarouge) en modifiant pour mes besoins des codes numériques existants pour ce type de calcul. J'ai ainsi considéré un certain nombre d'expérience passées et présentes, et leurs longueurs d'onde d'observation respectives, et ai prédit la corrélation théorique résultante dans chacun de ces cas. En eux-mêmes, les spectres de puissance théoriques résultants ne nous renseignent pas réellement sur la détectabilité de l'effet iSW. J'ai donc par la suite calculé les niveaux de signifiance attendus pour cette corrélation, et j'ai pu montrer qu'ils excédaient ceux des relevés actuels en atteignant jusqu'à 7σ dans un scénario idéal. Néanmoins, il faut tout de même noter que l'extraction du FDI parmi les autres émissions astrophysiques généralement présentes dans les relevés infrarouges reste à l'heure un challenge. Il m'était donc nécessaire d'étudier des scenarii plus réalistes en prenant en compte les contaminations possibles des divers signaux impliqués. J'ai montré que la signifiance restait tout de même élevée dans les cas les plus optimistes (~ 5σ), assez pour rivaliser sérieusement avec la futur génération de relevés; de plus, les résultats restent suffisamment intéressants même dans les (exagérément) pires scenarii - assez tout du moins pour concurrencer les

résultats en provenance des relevés actuels. J'ai publié ces résultats prometteur dans un article (Ilić et al., 2011) dans le journal MNRAS. Je travaille en ce moment-même à l'application de ce travail sur les données réelles issues de la mission Planck.

Fréquence du FDI (GHz)	857	545	353	217
Longueur d'onde du FDI (μm)	350	550	850	1380
Cas idéal, S/N simple corrélation	6.26	6.83	6.98	6.95
S/N combiné	7.12			
Cas réaliste n°1, S/N simple corrélation				
$(f_{\rm sky} = 0.75, {\rm conta. \ FDC \ 1\%})$	5.36	5.73	5.39	3.56
conta. avtplans 1%)				
S/N combiné	5.88			
Cas réaliste n°2, S/N simple corrélation				
$(f_{\rm sky} = 0.15, \text{ conta. FDC } 1\%,$	2.40	2.56	2.41	1.59
conta. avtplans 1%)				
S/N combiné	2.63			

TABLE 1 – Résumé des rapports signaux-à-bruit de la corrélation FDC-FDI pour quatre des fréquences couvertes par l'instrument HFI du satellite Planck. Ces résultats sont donnés à chaque fréquence, ainsi que pour la combinaison des quatre, tout d'abord dans un cas idéal (pas de bruit, couverture du ciel totale) puis dans deux scenarii plus réalistes avec présence de contaminants.

3 L'impact des superstructures dans le FDC

Bien qu'elle soit robuste et prometteuse, la technique de cross-corrélation décrite précédemment pourrait bénéficier d'autres approches complémentaires à la détection de l'effet iSW, en particulier vis à vis du flou qui règne actuellement sur la confirmation ou non d'une détection par cette méthode. Dans cette idée, mon travail de thèse a porté sur un autre angle d'attaque sur l'effet iSW, à savoir non plus une corrélation croisée matière-FDC "globale", mais plutôt l'empreinte individuelle sur le FDC des plus grandes structures de l'Univers, toujours par le même effet. L'idée ici est de se concentrer sur ces grandes structures qui d'après la théorie induisent l'effet iSW avec la plus grande amplitude, du fait du temps de traversée plus long des photons dans celles-ci. Néanmoins, même dans cette situation-ci, pour une unique structure l'amplitude de l'effet est trop faible pour être détectée directement, noyée sous les fluctuations primordiales du FDC à l'amplitude environ dix fois supérieure. Pour contourner ce problème, une approche statistique est à nouveau nécessaire, en envisageant d'"empiler" l'effet de plusieurs structures pour réduire ce bruit primordial et renforcer le signal recherché. Une telle méthode fut développée et utilisée pour la première fois par Granett et al. (2008), qui ont annoncé avoir directement mis en évidence (signifiance de 4σ) l'effet iSW par empilement de vignettes du FDC (tel qu'observé par la mission WMAP) aux positions de super-structures sous-jacentes détectées au préalable par leurs soins au sein du relevé de galaxies SDSS. Cependant d'après les mêmes auteurs, la forte amplitude mesurée de l'effet (en partie responsable de sa grande signifiance) semble problématique dans le cadre du modèle standard de la cosmologie : les auteurs mentionnent par exemple leur travaux en utilisant des simulations N-corps, ou d'autres études dans la littérature utilisant la théorie des perturbations. Dans ce contexte incertain, mon travail sur le sujet a d'abord consisté à revisiter cette étude de Granett et al. avec mon propre protocole de mesure, amélioré et complété dans le sens où j'ai cherché à vérifier entre autres que la taille du signal mesuré dans le ciel soit compatible avec les structures considérées, et à envisager qu'une prise en compte de la taille des structures pouvait augmenter la signifiance de la mesure. J'ai aussi associé à cette étude une variété de tests statistiques pour vérifier la signifiance de ces résultats, délicate à évaluer et sujette à de possibles biais de sélection. J'ai pu mettre en évidence dans ce premier temps des caractéristiques très particulières et assez suspectes dans les résultats pour les structures de Granett et al. notamment au sujet de la taille du signal observé, significativement plus grand que les structures sous-jacentes.



FIGURE 2 – Figure 1 de Granett et al. (2008). Empilement de vignettes du FDC (ILC des données WMAP après 5 ans d'observation) moyennées à la position de 50 super-vides (gauche) et 50 super-amas (milieu) identifiés dans le relevé de galaxies SDSS LRG. L'image empilée pour la combinaison des 100 structures est montrée sur la droite. Les cercles noirs délimitent les zones utilisées dans la photométrie d'ouverture qui a servie à mettre en évidence le point chaud (pour les amas et la combinaison) et le point froid (pour les vides) au centre de ces images.

Néanmoins, devant le nombre limité d'objets considéré par Granett et al. (une centaine), j'ai poursuivi dans cette approche en appliquant cette même méthode de détection à d'autres catalogues de structures disponibles, beaucoup plus conséquents et supposément plus raffinés dans leur algorithme de détection des structures. Les résultats pour un de ces nouveaux catalogues (Sutter et al., 2012) suggère la présence d'un signal à des échelles et amplitudes plus modérées, mais à des niveaux de signifiance plus faibles que le catalogue de Granett et al.. D'un côté, ces résultats sont nettement moins dissonants avec nos intuitions vis à vis de l'effet iSW, et sont d'avantage compatibles avec la théorie, en particulier avec certains travaux très récents de simulations N-corps associées à des algorithmes de "ray-tracing" ; de l'autre, les signaux mis en évidence possèdent également leur lot de particularités difficiles à expliquer. Ces résultats ont été publié dans un article (Ilić et al., 2013) dans le journal A&A. Parallèlement à cela, en tant que membre du Core Team (HFI) de la collaboration Planck, j'ai effectue également le même travail de détection de cet effet en utilisant les données du nouveau satellite. Je fus pour l'occasion le leader d'une des sections de l'article de la collaboration dédié à l'effet iSW (Planck 2013 results. XIX), soumis et accepté récemment pour publication dans le journal A&A.



FIGURE 3 – Sur la gauche, profils de photométrie (et leur signifiance) extraits des résultats d'empilements pour les vides du catalogues de Sutter et al. (231 en haut, 983 en bas). Sur la droite, image empilée des 231 plus grands vides du catalogue, le signal le plus significatif obtenue avec les catalogues étendus.

4 Modélisation exacte de l'effet iSW

Les résultats de mon étude sur les empilements dans le FDC ont introduit un certain nombre d'interrogations concernant la véritable nature et les caractéristiques du signal iSW attendu. Un élément manquant crucial s'est fait sentir au moment de tirer des conclusions de l'ensemble de mes résultats, à savoir une manière de prédire théoriquement et de façon exacte l'effet iSW engendré par les superstructures précédemment citées. La nécessité d'avoir un tel outil à disposition est en effet apparue alors assez clairement, afin de ne pas avoir à s'appuyer uniquement sur des intuitions et des prédictions parfois approximatives (simulations N-corps et théorie linéaire). La première étape pour réaliser cet objectif vu de reproduire les structures du type de celles de Granett et al. ainsi que leur évolution dans le temps, ce que j'ai réussi à faire par l'intermédiaire de simulations exactes basées sur la relativité générale et la métrique de Lemaître-Tolman-Bondi (la métrique à symétrie sphérique la plus générale qui soit). Une fois leur évolution au cours de l'histoire de l'Univers (d'après la cosmologie standard actuelle) calculé, j'ai pu prédire alors l'effet iSW théorique complet de ces structures en résolvant les équations des géodésiques de photons traversant ces structures et comparés à des photons se déplaç en arrière-plan.

A mon niveau d'avancement actuel dans cette étude en cours, j'ai pu déjà montrer que l'amplitude centrale du signal mesurée dans les données réelles (pour les vides de Granett) est globalement compatible avec les prédictions théoriques que j'ai produites. Néanmoins, le signal mesuré dans les données réelles présente des caractéristiques non-reproductibles et non-compatibles avec ces mêmes prédictions, en particulier la présence d'un large "anneau chaud"



FIGURE 4 – Trajectoires de photons (lignes colorées épaisses) traversant un vide de 130 Mpc de rayon physique à z = 0.44 (N.B. : il s'agit des propriétés réelles d'un des vides du catalogue de Granett et al.), montrées en coordonnées comobiles normalisées par le rayon comobile du vide en question. La couleur des trajectoires correspond au décalage en température subi par les photons comparés aux photons dans l'arrière-plan homogène. Notez ici que l'échelle est en mK : l'effet iSW final à la sortie du vide (quelques μ K) est imperceptible ici. Les grand et petit cercles noirs indiquent respectivement le rayon du vide avec ou sans sa partie sur-dense compensatrice. Les lignes noirs pointillées représentent le même front d'onde de photons à différents instants de sa propagation. La flèche rouge indique la direction de propagation des photons.

autour du point froid observé. Cette anneau est crucial dans les résultats originaux de Granett, car son absence ramènerait la signifiance du signal annoncé à des niveau bien plus modérés. Par conséquent, ces nouveaux résultats semblent jeter un doute supplémen-taires sur les affirmations et les conclusions de l'article de Granett et al., notamment sur l'origine du signal observé. Une extension de ces prédictions aux autres catalogues étendus que j'ai considéré permettra de vérifier la signifiance de leurs signaux associés et leur compatibilité avec la théorie. Je suis actuellement sur le point de finaliser cette étude, qui amènera selon toute vraisemblance à une publication au cours de l'année à venir.

5 Sonder la matière sombre à travers la réionsation de l'Univers

Enfin, un peu plus en retrait dans l'ensemble de mon travail de thèse, j'ai travaillé sous un angle particulier sur une certaine époque de l'histoire de notre Univers : la réionisation, le passage d'un Univers neutre à un Univers entièrement ionisé avec l'arrivée des premières étoiles, quasars, et autres sources ionisantes. Cette transition, ainsi que la période qui la précède (appelés "Âges Sombres", du fait de l'absence d'étoiles alors) sont fondamentales pour comprendre la formation des premières structures dans l'Univers, et leur étude requiert des connaissances poussées dans de nombreux domaines de l'astrophysique. Néanmoins, faute d'observables assez précises, nos connaissances sur cette période restent encore limitées à l'heure actuelle, en attendant l'avènement des prochaines générations de télescopes dédiés. Notre approche au cours de mon stage fut de considérer la possible influence et participation de l'élusive "matière sombre" aux Âges Sombres (ÂS) et à la réionisation de l'Univers, par des processus d'annihilation ou de désintégration. En effet, beaucoup d'incertitudes persistent encore sur la nature exacte de la MS, mais une grande partie des particules candidates actuelles seraient susceptibles de s'annihiler (particules lourdes) et/ou se désintégrer (particules légères) spontanément. Ce type de mécanismes pourraient avoir potentiellement injecté de l'énergie dans le milieu intergalactique (MIG) pendant les AS, contribuant à la réionisation de l'Univers par plusieurs processus : ionisation, excitation et chauffage des atomes du MIG. Je suis parti d'un code numérique existant dédié au calcul théorique des quantités physiques pertinentes de cette époque de l'Univers (fraction d'atomes ionisés, température du MIG, etc.), puis j'y ai ajouté l'influence de la MS en modélisant quelques uns de ses candidats les plus sérieux : annihilation d'un modèle de matière sombre lourde et désintégration de particules de matière sombre légère. J'ai fait varier leur masse, durée de vie et section efficace d'interaction en prenant soin de modéliser de la façon la plus précise les dépôts d'énergie de ces hypothétiques particules. J'ai pu montrer ainsi que pour une large classe de modèles, la MS peut en effet avoir eu un rôle tout à fait non-négligeable dans les AS et la réionisation de notre Univers; néanmoins, j'ai aussi illustré d'une part qu'elle ne pouvait être responsable de l'intégralité de la réionisation (des sources astrophysiques classiques sont nécessaires) et que son influence avait principalement lieu à des époques difficilement sondables. De plus, son influence est souvent effacée par d'autres sources et reste indétectable dans les observables classiques utilisées actuellement en cosmologie pour étudier ces époques.

Pour contourner cette obstacle, un point très important de mon étude fut de mettre en évidence que la température du MIG était fortement influencée par les désintégrations et annihilations de MS, et ce jusqu'à des époques très proches de nous et potentiellement accessibles par des mesures observationnelles. Néanmoins, les potentielles contraintes apportées par ces mesures de température sont limités par deux facteurs : la limite supérieure en redshift qui nous est accessible aux mesures (et qui prive souvent d'un bras de levier discriminatoire à haut redshift), et la dégénérescence qui existe avec un autre effet dissocié de la matière sombre : la second réionisation de l'hélium (aux alentours de z = 3 - 4) qui booste également le température du MIG et qui est difficilement différenciable des potentiels effets de la matière sombre. Après avoir inclus dans mes prédictions théoriques l'intégralité de ces effets, j'ai compilé l'ensemble des mesures de température disponibles dans la littérature, puis j'ai utilisé des chaînes de Markov pour poser des contraintes inédites et intéressantes sur les paramètres libres de mon modèle. Ceux-ci incluent non seulement des paramètres cruciaux de la matière sombre (et ce pour plusieurs modèles), mais aussi des propriétés de la seconde réionisation de l'hélium elle-même. J'ai présenté ces résultats au cours d'une conférence sur l'ère de la réionisation à Strasbourg en 2012, et me prépare à raffiner et publier cette étude dans l'année à venir.



FIGURE 5 – Evolution de la température du MIG telle qu'elle est prédite pour les modèles de désintégration de matière sombre légère (ligne pleine) et de désintégration de matière sombre lourde (tirets) qui ajustent au mieux les points de données issus de la littérature (croix de couleurs variées).



FIGURE 6 – Résultats de l'exploration MCMC p
Pour le modèle de désintégration de matière sombre légère sous les contraintes des mesures de température du MIG : distribution postérieures marginalisées et contour 2D montrant les intervalles et corrélations entre les paramètres libres, ainsi que leur limites de confiance à 68 et 95%. Les unités de m_{LDM}, τ_{LDM} et $\Delta T_{\rm reion}^{\rm He}$ sont respectivement eV, s, and K.