

## Prospectives Cosmologie DPhP 2017

**Contributeurs :** Eric Armengaud, Etienne Burtin, Laurent Chevalier, Jean-Marc Le Goff, Sotiris Loucatos, Christophe Magneville, Jean-Baptiste Melin, Nathalie Palanque-Delabrouille, James Rich, Vanina Ruhlmann-Kleider, Christophe Yèche

Le modèle de concordance de la cosmologie a été établi au début des années 2000 à la suite de la découverte successive de l'expansion accélérée de l'Univers et de sa platitude. Il a été conforté entre 2000 et 2010 par les premières mesures de précision effectuées sur le fond diffus cosmologique (par ex. WMAP) et sur les supernovae (par ex. SNLS). La découverte des oscillations acoustiques de baryons (BAO) en 2005 a consolidé l'édifice. Le modèle de concordance peut être décrit par un jeu minimal de six paramètres, suffisant pour expliquer l'ensemble des observations cosmologiques ( $\Omega_b h^2$ ,  $\Omega_c h^2$ ,  $100\theta_{MC}$ ,  $\tau$ ,  $\ln(10^{10} A_s)$ ,  $n_s$ ). Entre 2010 et aujourd'hui, les mesures de précision se sont multipliées (Planck, BOSS, SNLS/JLA, etc.). Le modèle a pu être sur-contraint, de nombreuses extensions au modèle minimal testées (en particulier univers non plat, propriétés de l'énergie noire, masse des neutrinos) et des modèles alternatifs ont été proposés. A ce jour, aucune déviation à la platitude n'a été observée, l'énergie noire se comporte comme une constante cosmologique ( $w_0=-1$ ,  $w_a=0$ ) et la masse des neutrinos n'a pas encore été mesurée. La nature de la matière noire reste inconnue. Les six paramètres minimaux suffisent toujours à décrire l'Univers et sont désormais mesurés avec une grande précision (voir table ci-dessous). Le modèle de concordance devient le modèle « standard » de la cosmologie. Cependant quelques tensions sur des paramètres sont présentes entre différents jeux de données. En particulier, le paramètre  $H_0$  déduit des anisotropies du fond diffus cosmologique (CMB) est plus faible que celui mesuré directement avec les échelles de distance ;  $\sigma_8$  mesuré localement avec les amas de galaxies est 10% plus faible que celui déduit des anisotropies du CMB. Ces tensions, à un niveau de confiance de l'ordre de  $2\sigma$ , font encore débat et pourraient être la conséquence de systématiques encore inconnues dans les données. Le modèle standard reste néanmoins aujourd'hui le modèle privilégié.

Paramètre	TT,TE,EE+lowP+lensing+ext (limites à 68%)
$\Omega_b h^2$	$0.02230 \pm 0.00014$
$\Omega_c h^2$	$0.1188 \pm 0.0010$
$100\theta_{MC}$	$1.04093 \pm 0.00030$
$\tau$	$0.066 \pm 0.012$
$\ln(10^{10} A_s)$	$3.064 \pm 0.023$
$n_s$	$0.9667 \pm 0.0040$

ext=BAO+SNLS/JLA+ $H_0$

*Planck Collaboration 2015 XIII.*

Le groupe cosmologie du DPhP a participé à l'effort de mesures de précision des paramètres cosmologiques, d'étude d'extensions du modèle standard et de modèles alternatifs, en

particulier avec les expériences SNLS, BOSS et Planck (voir les deux derniers rapports d'activité du SPP 2011-2013, 2014-2017 pour plus de détail).

Les objectifs scientifiques du groupe cosmologie dans les 5 à 10 ans restent axés sur la mise à l'épreuve du modèle standard à six paramètres, la recherche d'extensions et les tests de modèle alternatifs. La réussite de ces objectifs passe par l'étude de la gravitation aux grandes échelles et de l'inflation.

Pour atteindre ces objectifs, le groupe a décidé de poursuivre son implication dans les sondages de galaxies (en visible et proche infrarouge) et dans les sondages d'amas de galaxies (en visible et dans le millimétrique). Il souhaite de plus développer l'activité liée à l'étude du fond diffus cosmologique primaire à court et moyen terme. Enfin, il suit le développement des futurs sondages aux fréquences radio.

## **A – Les grands sondages de galaxies en optique et proche infrarouge**

Le groupe cosmologie s'est engagé depuis 2008 dans l'expérience BOSS (puis eBOSS et DESI). Il est en charge de la sélection de cibles, a fait la première détection des BAO dans les forêts Ly- $\alpha$ , et a mesuré le taux d'expansion de l'Univers à  $z=2.4$ . Il a par ailleurs développé une expertise en simulations numériques pour aborder les thématiques matière noire et masse des neutrinos à l'aide des forêts Ly- $\alpha$ . Depuis 2014, il a poursuivi dans eBOSS et diversifie ses intérêts scientifiques en étudiant la croissance des structures aux échelles cosmologiques (redshift space distortions, RSD). L'expérience eBOSS continuera à prendre des données jusqu'à 2020. En parallèle, depuis 2010, le groupe s'est lancé dans BigBOSS devenu depuis DESI en prenant en charge la sélection des cibles et en s'engageant à fabriquer les 30 cryostats de l'expérience. L'exploitation de la première phase de DESI devrait durer de mi-2019 à 2025. Alors que eBOSS récoltera de l'ordre d'un million de spectres de galaxies et quasars, DESI devrait permettre d'en obtenir entre 20 et 30 millions. Notons l'existence du sondage 4MOST (projet porté par l'ESO, complémentaire de DESI dans l'hémisphère sud) qui sera réalisé à partir de 2023 et dont le groupe suit les développements sans engagement fort pour l'instant.

Le groupe souhaite poursuivre l'étude des grands sondages de galaxies après DESI. Plusieurs grands projets pour la période allant au-delà de 2025 existent. Deux retiennent l'attention du groupe aujourd'hui :

- DESI-2, entre 2025 et 2030, à la suite de DESI. Le projet serait une extension de DESI avec un nouveau bras infrarouge pour repousser la limite de détection des galaxies de  $z=1.5$  (première phase de DESI) à  $z=2.2$ . Une autre option d'évolution de DESI pourrait être de conserver les instruments mais de changer de cibles en se concentrant sur les émetteurs Ly- $\alpha$ .
- Maunakea Spectroscopic Explorer (MSE) sur le site du CHFT. Le télescope actuel (3.6m) serait remplacé par un 10-12m et équipé d'un spectrographe multi-objets à 4 bras dans le visible et le proche infrarouge.

Ces deux projets devraient permettre d'observer environ 100 millions de spectres. Enfin, la période >2032 est aussi déjà entrée dans les perspectives avec des projets, comme le Billion Object Apparatus (BOA), capables d'observer de l'ordre de 500 millions à 1 milliard de spectres de galaxies entre  $0.4 < z < 2.0$  sur un quart du ciel.

Pour l'instant, DESI-2 et/ou MSE à l'échelle 2025-2030 et BOA à l'échelle >2032 concentrent l'attention du groupe pour le futur.

## **B – Les amas de galaxies et le fond diffus cosmologique**

Le groupe a participé à l'analyse cosmologique avec les amas de galaxies de l'expérience Planck, en collaboration avec le DAp et l'APC. Cette analyse a en particulier révélé la tension sur le paramètre  $\sigma_8$  mentionnée dans l'introduction. Le groupe poursuit l'étude des paramètres cosmologiques avec les amas dans le cadre de la mission Euclid, en collaboration avec l'APC.

A l'international, l'avenir du CMB se focalise sur l'étude de sa polarisation et de son spectre aux petites échelles. Au sol, une collaboration internationale menée par les américains émerge (CMB-S4). Elle vise à multiplier le nombre de télescopes et de détecteurs (jusqu'à environ 500 000) sur les sites du plateau de l'Atacama et du Pôle Sud à l'horizon 2025<sup>1</sup>. Dans l'espace, trois projets sont proposés :

- PIXIE : projet américain de spectromètre polarisé environ 1000 fois plus sensible que son prédécesseur COBE-FIRAS, à l'horizon 2025, destiné à la détection des modes B et l'étude des avant-plans à faible résolution ;
- CORE : projet européen d'imageur polarisé ayant une résolution équivalente à celle de Planck mais environ 20 fois plus sensible, à l'horizon 2030, destiné à l'étude des modes B et des avant-plans ;
- LiteBIRD : projet japonais d'imageur avec une sensibilité et une résolution plus faible que celle à CORE, à l'horizon 2027, focalisé sur la détection des modes B.

L'intérêt du groupe se porte sur les projets CMB-S4 et CORE avec lesquels les structures et leurs interactions avec le CMB peuvent être étudiées.

## **C – Sondages aux fréquences radios**

Le groupe s'intéresse aux sondages radio depuis de nombreuses années. Les projets d'intensity mapping comme CHIME ou Tianlai semblent moins prometteurs aujourd'hui car concurrencés par les grands sondages de galaxies type BOSS/eBOSS/DESI et rattrapés par la première phase du projet SKA. L'observatoire SKA-1 sera mis en service vers 2024 (10% du projet total SKA-2). Le projet SKA-2 est prévu à l'horizon 2030. Le projet SKA-2 a un fort potentiel pour la cosmologie, en particulier parce qu'il permettra de constituer un grand catalogue d'environ un milliard de galaxies détectées en HI et de dépasser la précision statistique du CMB pour l'étude des conditions initiales non gaussiennes (primordial non gaussianity). Si la France décide de rejoindre l'organisation SKA, le groupe cosmologie envisage de développer cet axe de recherche.

---

<sup>1</sup> Notons qu'en France le projet QUBIC, actuellement en phase de démonstration, pourrait être le ticket d'entrée dans cette collaboration.

Ces trois axes expérimentaux (A,B,C) se focalisent sur des objectifs scientifiques communs dans les 5 à 10 ans et au-delà. Ils sont détaillés ci-dessous.

### Objectifs scientifiques dans les 5 à 10 ans

1 – **Tester le caractère robuste de l'hypothèse de la constante cosmologique** : mesurer avec une précision accrue l'équation d'état de l'énergie noire (i.e. mesurer  $w_0$  et  $w_a$  pour détecter une éventuelle déviation par rapport à  $w_0=-1$ ,  $w_a=0$ ) au moyen de l'étude de la croissance des structures aux grandes échelles. Ces observations permettront de tester en particulier les modèles de gravité modifiée.

2 – **Mesurer la somme des masses des neutrinos** : les prochaines expériences (Euclid, DESI) ont la précision suffisante ( $\sigma\Sigma=0.02$  eV pour Euclid) pour faire une première mesure significative même si la somme des masses est minimale ( $\Sigma=0.06$  eV).

3 – **Résoudre la tension actuelle entre les sondes à bas z** (comptage d'amas mais aussi weak lensing) **et les sondes à haut z** (CMB primaire) sur le paramètre  $\sigma_8$  dans le cadre du modèle standard. Est-ce une systématique de mesure ou doit-on étendre le modèle ?

4 – **Contraindre les modèles inflationnaires** en recherchant des conditions initiales non gaussiennes dans les données des futurs sondages de galaxies.

### Organisation du groupe cosmologie

Aujourd'hui (oct. 2017), le groupe cosmologie est constitué de 10 chercheurs permanents<sup>2</sup> et 7 étudiants en thèse<sup>3</sup>. 9 chercheurs et 4 étudiants sont impliqués dans la lignée des expériences BOSS/eBOSS/DESI. Cette lignée a permis de travailler sur deux grandes thématiques scientifiques : celle des forêts Ly- $\alpha$  - sur laquelle le groupe est internationalement reconnu - et celle des RSD avec les quasars - plus émergente. Le groupe s'engage également sur un troisième thématique : les premières données de galaxies à raies d'émission. Une chercheuse (Vanina, aussi impliquée dans SNLS et dans DESI donc comptée ci-dessus dans les 9) et 2 étudiants travaillent sur les modèles alternatifs au modèle  $\Lambda$ CDM. Le dernier chercheur (Jean-Baptiste) et 1 étudiant travaillent sur la thématique des amas de galaxies en lien avec le DAp (groupe de M. Arnaud) et l'APC (groupe de J. Bartlett).

Les discussions de préparation des prospectives ont mis en avant que :

- le groupe cosmologie est majoritairement investi (9 permanents sur 10) dans la lignée d'expériences BOSS/eBOSS/DESI et aurait intérêt à diversifier son activité en s'impliquant dans un deuxième axe de recherche indépendant pour enrichir son environnement scientifique.

---

<sup>2</sup> Eric Armengaud, Etienne Burtin, Laurent Chevalier, Jean-Marc Le Goff, Christophe Magneville, Jean-Baptiste Melin, Nathalie Palanque-Delabrouille, James Rich, Vanina Ruhlmann-Kleider, Christophe Yèche

<sup>3</sup> Emmanuel Artis, Solène Chabanier, Charles-Antoine Claveau, Arnaud De Mattia, Thomas Etourneau, Clément Leloup, Pauline Zarrouk

- ce deuxième axe pourrait être le CMB avec l'implication dans une expérience espace (projet type CORE) ou sol (CMB-S4 américain ou participation européenne) ou bien dans un sondage cosmologique en radio dans le cadre de SKA.
- les thématiques scientifiques liées à ce deuxième axe devraient être situées à l'interface avec les activités scientifiques de BOSS/eBOSS/DESI de façon à augmenter les interactions entre chercheurs pour produire des analyses scientifiques croisées. Dans le cas d'un deuxième axe CMB, une thématique scientifique naturelle serait l'effet de lentille des structures sur le CMB (CMB lensing).
- le groupe aurait avantage à impliquer plus de permanents de BOSS/eBOSS/DESI sur la thématique émergente des RSD, très porteuse pour les expériences eBOSS et DESI, tout en s'assurant de garder la masse critique suffisante pour continuer à développer son expertise sur les Ly- $\alpha$ .
- le groupe est conscient que la cosmologie évolue très vite et que l'effet de lentille sur les galaxies (weak lensing) pourrait devenir une sonde très prometteuse après Euclid. Dans ce cas, la stratégie à long terme du groupe pourrait évoluer.
- La dernière embauche externe en cosmologie remonte à 12 ans. Le groupe a besoin d'une nouvelle embauche d'un jeune chercheur formé à la cosmologie pour renforcer et diversifier ses activités tout en créant des liens scientifiques nouveaux avec d'autres équipes internationales.

La mise en place concrète de ces propositions permettrait au groupe cosmologie du DPhP de diversifier son activité, de s'investir dans des approches émergentes, de multiplier les analyses au cœur et à l'interface des expériences dans lesquelles il est impliqué et ainsi de maximiser son impact dans la communauté scientifique.