# Corrélation de sondes cosmologiques Éric Aubourg

La mesure d'une observable induit en général des contraintes sur une **combinaison** de paramètres cosmologiques.

#### Exemple : constante de Hubble

Intervient dès qu'on veut comparer des quantités absolues et relatives, pour convertir redshift en distance, ou dès qu'on utilise des fractions de densité critique  $\Omega$  puisque  $\rho_c \propto H_0^2$ .

Le CMB par exemple contraint approximativement  $\Omega_m h^3$  et  $\Omega_b h^2$ .





Si on mesure une observable variant comme p x q :



Si on mesure une observable variant comme p x  $q^{-1}$  :



La positions des pics du CMB est sensible principalement à la courbure de l'Univers, donc à  $\Omega_m + \Omega_{\Lambda}$ .



L'amplitude relative des pics pairs et impairs dépend principalement de la densité de baryons





L'amplitude globale des pics dépend de la quantité totale de matière.



#### Une expérience comme Planck qui mesure de nombreux pics limite donc les dégénérescences.

Cependant...



### Et si on combine le CMB avec autre chose ?



Komatsu et al. 2008

# Caractériser l'énergie noire ?

#### Géométrie

Échelles physiques : BAO

Distances : supenovae

Volumes : comptages d'amas

#### Croissance des structures et des fluctuations

Amas

ISW

Lensing

Redshift space distorsions

### Les oscillations de baryons

Cf. le cours de Jim Rich.

Mesure l'horizon acoustique à divers z.

$$r_{c} = \frac{c}{H_{0}\sqrt{\Omega_{m}}} \int_{0}^{z} \frac{1}{\sqrt{\frac{\Omega_{k}(z'+1)^{2}}{\Omega_{m}} + \frac{\Omega_{\Lambda}(z'+1)^{3(w+1)}}{\Omega_{m}} + (z'+1)^{3}}} dz'$$

Mesure angulaire : dépendance forte en  $\Omega_k$ , puis principalement en  $\Omega_m h^2$ . Dans un univers plat, la dégérescence  $\Omega_m$ —w dépend du z de la mesure.



#### Les supernovae

Cf cours à venir...

Historiquement, première mise en évidence de l'accélération de l'expansion de l'Univers

Mesure de D<sub>L</sub>(z).



#### Les supernovae



#### Chandelles « standardisables »

Physique complexe, traitement largement empirique

Calibration, k-corrections

Effets d'évolution (âge et chemins d'évolution stellaire, métallicité...) Les plus grandes structures liées Très sensibles au facteur de croissance Densité sensible à l'expansion Problème d'étalonnage en masse Gastrophysique compliquée

# Comptages d'amas



Redshift

# Les lentilles gravitationnelles

Cf cours d'Aurélien Benoit-Levy. Ici : cisaillement.

Fournit en particulier via la statistique à deux points une contrainte dégénérée entre  $\Omega_m$  et  $\sigma_8$ .

Améliorable via la tomographie

Donne accès aussi au taux de croissance des structures : une autre mesure des propriétés de l'énergie noire.



### Les lentilles gravitationnelles

#### Méthode de mesure du cisaillement :

- Mesure des ellipticités des galaxies du champ
- Lissage, correction de PSF du télescope
- Extraction des champs de convergence et de cisaillement
- Calculs des fonctions de corrélation / p(k)

# CFHTLS









Komatsu et al. 2010

# Comment aller plus loin ?

- Ces combinaisons a posteriori d'observations ayant des dégénérescences et des systématiques ont des limites
  - Peuvent indiquer l'existence d'erreurs systématiques, pas les réduire
  - N'utilisent pas le fait que les diverses observations utilisent le même ciel, et sont pour certaines causées par la même distribution de matière.

### Corrélation de relevés

#### Recherche de corrélation sur le ciel entre diverses méthodes, diverses observables

Augmentation du rapport signal-bruit

Élimination de certaines erreurs systématiques











Même effet que l'erreur soit statistique ou systématique, dès lors qu'elle n'est pas corrélée entre les deux observables.

#### Le CMB peut être considéré comme une lumière d'arrière plan. La matière entre z=1000 et z=0 peut interagir avec les photons du CMB.

Diffusion

Déviation gravitationnelle

Les photons du CMB sont déviés par les fluctuations de densité.

 $\mathbf{x}(\mathbf{n}) \rightarrow \mathbf{x}(\mathbf{n} + \nabla \mathbf{\phi}(\mathbf{n}))$ 

x : température du CMB, ou polarisation (T, Q, U)

 $\varphi$  : potentiel projeté (avec le noyau de convolution)

Déviation ~ 3 arcmin (résultat de ~50 déflexions), cohérence à l'échelle du degré.

Fait apparaître des modes B (à petite échelle).

D'abord détecté par cross-corrélation, maintenant détecté uniquement dans le CMB.

# Effet Sachs-Wolf intégré (ISW)

Non compensation des décalages vers le bleu et vers le rouge lorsqu'un photon du CMB entre et sort d'un puits de potentiel qui évolue

Nul dans un univers plat sans énergie noire

Mesuré par corrélation entre le CMB et les grandes structures

ISW



Giannantonio et al. 2008

ISW



Très sensible à l'énergie noire

Effet à grandes échelles : variance cosmique



### Effets SZ : cinétique et thermique



### Effets SZ

Thermique : signature spectrale particulière

Catalogues d'amas

Cinétique : même spectre que le CMB

Sensible aux vitesses particulières des amas
## Les observables dans les grandes structures

Densité de matière, BAO

Cosmic Infrared Background

Vitesses : reconstruction, redshift space distorsion





z

# Traceurs : BOSS



SDSS/LOWZ/CMASS galaxies

QSO DR7/DR9

## Cosmic Infrared Background

Sources multiples : les premières étoiles, lumière redshiftée et/ou réémise par de la poussière...



# Distorsions dans l'espace des redshifts

Une mesure de redshift = distance (Hubble) + vitesse propre

À petite échelle, dispersion de vitesse : « finger of god »

À grande échelle, effondrement des structures

Mesure la fonction de croissance des structures

Sous-produit des expériences BAO : perspective pour BAO dans l'espace (0.5 milliard de galaxies)



Cabré & Gaztanaga 2008

# Distorsions dans l'espace des redshifts

Techniques déjà utilisées depuis longtemps à d'autres échelles (Dekel et al., champ de vitesse 3D des galaxies voisines...)

Utilisé dans le cadre des BAO pour reconstruire le régime linéaire.



A Lower Growth Rate from Recent Redshift Space Distortion Measurements than Expected from Planck



#### First Measurement of the Cross-Correlation of CMB Lensing and Galaxy Lensing

Nick Hand,<sup>1</sup>,<sup>\*</sup> Alexie Leauthaud,<sup>2</sup> Sudeep Das,<sup>3,4</sup> Blake D. Sherwin,<sup>5,6,4</sup> Graeme E. Addison,<sup>7</sup>



## Galaxy lensing : CFHT stripe 82 CMB lensing : ACT

Petite zone du ciel (130 deg<sup>2</sup>),  $3.2\sigma$ 



#### Detection of Gravitational Lensing in the Cosmic Microwave Background

Kendrick M. Smith

Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, 60637 USA

Oliver Zahn Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138 USA

> Olivier Doré Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, 60 St. George St, University of Toronto, Toronto ON Canada M5S 3H8





Pearson & Zahn 2014

parameters. We find that the CMB lensing–LSS cross correlation contains significant information on parameters such as the redshift distribution and bias of LSS tracers. We also find that the cross-correlation information will lead to independent probes of cosmological parameters such as neutrino mass and the reionization optical depth.





Planck CMB lensing et Herschel H-ATLAS

#### Degeneracy is broken when combining data



#### A DIRECT MEASUREMENT OF THE LINEAR BIAS OF MID-INFRARED-SELECTED QUASARS AT Z≈1 USING COSMIC MICROWAVE BACKGROUND LENSING

J. E. GEACH<sup>1,2</sup>, R. C. HICKOX<sup>3</sup>, L. E. BLEEM<sup>4,5,6</sup>, M. BRODWIN<sup>7</sup>, G. P. HOLDER<sup>2</sup>, K. A. AIRD<sup>8</sup>, B. A. BENSON<sup>4,9</sup>,

## WISE+SDSS QSO selection x SPT







Boughn & Crittenden 2004 NVSS + WMAP 1an 3 σ Hernandez- Monteagudo et al. 2013 SDSS(LRG+CMASS) + WMAP 9an 1.6  $\sigma$ 

### Integrated Sachs-Wolfe effect map recovery from NVSS and WMAP 7yr data

R. B. Barreiro<sup>1</sup>, P. Vielva<sup>1</sup>, A. Marcos-Caballero<sup>1,2</sup>, E. Martínez-González<sup>1</sup>







### Planck 2013 results. XIX. The integrated Sachs-Wolfe effect



Planck CMB

Planck CMB	lensing	(potentiel)
------------	---------	-------------

Estimator	C-R	NILC	NILC	SEVEM	SMICA					
	$A^{\mathrm{T}\phi}$	SNR	$A^{\mathrm{T}\phi}$	SNR	$A^{\mathrm{T}\phi}$	SNR	$A^{\mathrm{T}\phi}$	SNR	$A^{\mathrm{T}\phi}$	SNR
$\begin{array}{ccc} T\phi & \ell \ge 10 \\ T\phi & \ell \ge 2 \end{array}$	$0.52 \pm 0.33$ $0.52 \pm 0.32$	1.5 1.6	$0.72 \pm 0.30$ $0.75 \pm 0.28$	2.4 2.7	$0.58 \pm 0.31$ $0.62 \pm 0.29$	1.9 2.1	$0.68 \pm 0.30$ $0.70 \pm 0.28$	2.3 2.5	$0.78 \pm 0.32$	2.4
KSW	$0.75 \pm 0.32$	2.3	$0.85 \pm 0.32$	2.7	$0.68 \pm 0.32$	2.1	$0.81 \pm 0.31$	2.6		
Binned	$0.80 \pm 0.40$	2.0	$1.03 \pm 0.37$	2.8	$0.83 \pm 0.39$	2.1	$0.91 \pm 0.37$	2.5		
Modal	$0.68 \pm 0.39$	1.7	$0.93 \pm 0.37$	2.5	$0.60 \pm 0.37$	1.6	$0.77 \pm 0.37$	2.1		



#### Evidence of Galaxy Cluster Motions with the Kinematic Sunyaev-Zel'dovich Effect

Nick Hand,<sup>1,2</sup> Graeme E. Addison,<sup>3</sup> Eric Aubourg,<sup>4</sup> Nick Battaglia,<sup>5</sup> Elia S. Battistelli,<sup>6</sup> Dmitry Bizyaev,<sup>7</sup> I Richard Bond <sup>8</sup> Howard Brewington <sup>7</sup> Ion Brinkmann <sup>7</sup> Benjamin R. Brown <sup>9</sup> Sudeen Das <sup>10,11</sup>

M NNN





Detection of warm and diffuse baryons in large scale structure from the cross-correlation of gravitational lensing and the thermal Sunyaev-Zeldovich effect

Ludovic Van Waerbeke,<sup>1,\*</sup> Gary Hinshaw,<sup>1,2,†</sup> and Norman Murray<sup>3,4,‡</sup>



constant gas bias model OK



# Detection of Thermal SZ - CMB Lensing Cross-Correlation with Planck

JCH & Spergel, JCAP 02 (2014) 030 arXiv:1312.4525





 $\sigma_8 \left(\frac{\Omega_m}{0.282}\right)^{0.26} = 0.824 \pm 0.029$ 





arXiv:1303.5048v1



Detection of *B*-mode Polarization in the Cosmic Microwave Background with Data from the South Pole Telescope





# H-ATLAS high-z sources: an optimal sample for cross-correlation analysis [arXiv:1401.4094]





arXiv:1112.4478v2

### The Synergy between Weak Lensing and Galaxy Redshift Surveys

Roland de Putter<sup>1</sup>, Olivier Doré<sup>1</sup>, Masahiro Takada<sup>2</sup>

Combining weak lensing tomography and spectroscopic redshift surveys

Yan-Chuan Cai<sup>\*</sup> and Gary Bernstein Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104 Center for Particle Cosmology, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104

Fonction de croissance des structures G :  $P(z) = G^2(z)P_{CMB}$   $f = d \ln G/d \ln a$  : taux de croissance b : biais

Les RSD mesurent f/b et fG. Le lensing casse la dégénérescence en mesurant b. f et G très sensibles au modèle d'énergie noire.
# De la détection aux contraintes

### Pour le moment,

on détecte des corrélations

contraintes sur le biais

contraintes faibles sur le modèle cosmologique

Étape suivante !



### Cross-correlation du shear mesuré au sol et depuis l'espace ?

- Systématiques observationnelles différentes (optique, PSF...)
- Mesure sur le cœur / la périphérie des galaxies

## Comparing HST with Subaru



# Comparing HST with Subaru



### e<sub>2 Subaru</sub>-e<sub>2 HST</sub> e<sub>1 Subaru</sub>-e<sub>1 HST</sub> 14 18 20<R<21 20<R<21 $\mu_{\Delta} = 0.0110 \ \sigma_{\Delta} = 0.0371$ $\mu_{\Delta} = 0.0050 \ \sigma_{\Delta} = 0.0204$ 21<R<22 21<R<22 $\mu_{\Delta}$ = 0.0283 $\sigma_{\Delta}$ = 0.0705 16 $\mu_{\Delta} = \textbf{0.0117} \ \sigma_{\Delta} = \textbf{0.0667}$ 12 22<R<23 22<R<23 $\mu_{\Delta} = \texttt{0.0011} \ \sigma_{\Delta} = \texttt{0.1187}$ $\mu_{\Delta} = 0.0040 \ \sigma_{\Delta} = 0.0964$ 14 23<R<24 23<R<24 $\mu_{\Delta}$ = -0.0091 $\sigma_{\Delta}$ = 0.1680 $\mu_{\Delta}$ = 0.0162 $\sigma_{\Delta}$ = 0.1264 10 24<R<25 24<R<25 = -0.0035 $\sigma_{\Delta}$ = 0.1938 $\mu_{\Delta}$ = 0.0016 $\sigma_{\Delta}$ = 0.1676 $\mu_{\Delta}$ Normalized Counts Normalized Counts 25<R<26 25<R<26 $\mu_{\Delta}$ = -0.0188 $\sigma_{\Delta}$ = 0.2190 $\mu_{\Delta}$ = 0.0149 $\sigma_{\Delta}$ = 0.2143 8 6 6 4 4 2 2 \_0∟ \_0.6 0 -0.4-0.2 0.0 0.2 0.4 0.6 -0.4-0.2 0.0 0.2 0.4 0.6 $\Delta = e_{1Subaru} - e_{1HST}$ $\Delta\!=\!e_{2Subaru}\!-\!e_{2H\!S\!T}$

### Binned by magnitude.

Tony Tyson

## LSST + Euclid ? Shear + mag ?

# Shear + magnification ?

Deux effets de lentilles gravitationnelles :

distorsion des formes des galaxies

modification de leur magnitude apparente

systématiques différentes. Magnification insensible à l'alignement intrinsèque

**Shear and Magnification: Cosmic Complementarity** 

### L. Van Waerbeke

University of British Columbia, 6224 Agricultural Road, Vancouver, V6T 1Z1 B.C., Canada.





Les corrélations de sondes sont un moyen d'augmenter le rapport signal/bruit et de combattre les effets systématiques

Sujet très chaud, beaucoup de détections en 2013-2014

Encore des gains nécessaires pour contraindre les modèles

Va devenir un outil standard avec l'arrivée de très grands relevés (LSST, Euclid, DESI...).