

Revue critique des techniques pour caractériser l'énergie noire et enjeux

Julien Guy
LPNHE

Conseil scientifique de l'IN2P3
25 octobre 2012

Plan

- Une définition de l'énergie noire pour l'expérimentateur
- Sondes cosmologiques de l'énergie noire
- Comparaison des techniques
- Conclusion orientée projets

Cadre

- **Modèle standard de la cosmologie Λ CDM**, composé de 6 paramètres:

- 3 paramètres adimensionnels de densité :

densité de baryons, densité de matière noire froide, radiation

(la constante cosmologique n'est pas un paramètre libre pour l'univers plat, l'univers plat est une prédiction du modèle d'inflation, ingrédient essentiel pour décrire le CMB)

- 2 paramètres pour le spectre des fluctuations primordiales (norme et pente)

- 1 paramètre dimensionné (temps caractéristique) : le paramètre de Hubble

(d'autres paramètres effectifs existent pour décrire le CMB : épaisseur optique de diffusion compton)

- **Ce modèle est en accord avec toutes les observations**

(sauf peut-être pour l'amplitude des structures de matière noire à l'échelle galactique)

- **Mais il n'est pas satisfaisant théoriquement**

Pourquoi la constante cosmologique correspond à une densité proche de la densité critique ? pourquoi proche de la densité de matière aujourd'hui (très différent dans le passé?) 95% de la densité d'énergie inconnue.

Energie noire

- Comme thème de recherche théorique

- établir le mécanisme responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers
- éventail très large de possibilités

constante cosmologique, quintessence, potentiel d'un champ de 'nouvelle' physique des particules, modification de la relativité générale (f(R), ...)

- Pour l'expérimentateur, il s'agit de tester deux prédictions du modèle LCDM

1) Mesurer le taux d'expansion de l'Univers en fonction du temps

- Test du taux de « dilution » de la densité moyenne avec l'expansion
- Un paramètre empirique adapté : $w = \text{pression}/\text{densité}$
- Au deuxième ordre $w = w_0 + (1 - w_0)a$ (FoM $\sim 1/(\sigma_{wp} \times \sigma_{wa})$)

$$H^2(t) \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \sum_i \rho_i + \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{a^2} \quad \rho(z) = \rho_0 (1+z)^{3(1+w)}$$

2) Mesure le taux de croissance des structures,

depuis le CMB, pour tester la relativité générale (RG)

- mesure du spectre de puissance des fluctuations de densité

- un paramètre « growth rate » (inv. d'échelle en RG) $f \equiv d \ln D(a) / d \ln a$

Plan

- Une définition de l'énergie noire pour l'expérimentateur
- Sondes cosmologiques de l'énergie noire
- Comparaison des techniques
- Conclusion orientée projets

Sondes cosmologiques de l'énergie noire

* **mesures directes du taux d'expansion :**

- mesure de distance de luminosité (SNe Ia, (+? SNe II, GRB?)) vs z
- mesure de distance angulaire et radiale (oscillations de baryons, BAO) vs z

* **mesure directe du taux de croissance des structures :**

(impliquant uniquement la gravitation)

- weak lensing (WL, spectre de puissance du shear, directement fonction du spectre de puissance de la matière)
- Effet Sachs-Wolf intégré (faible pouvoir statistique)
- lensing du CMB (mode B à grand l , intégré depuis CMB)

* **mesure indirecte du taux d'expansion :**

Beaucoup de façon de faire (liste non exhaustive)

- weak lensing (corrélation angulaire du shear est fonction de la géométrie)
- comptage d'amas (densité d'amas de galaxies en fonction de z et leur masse)
- spectre de puissance des galaxies (grands relevé spectro.)

* **mesure indirecte du taux de croissance des structures :**

- spectre de puissance des galaxies en fonction du redshift (grands relevé spectro.)
- distorsions de redshift

* **mesure de la densité de matière**

(apporte ~indirectement des contraintes sur l'énergie noire)

ex : fraction de gaz dans les amas, CMB, BBN et abondances ...

En se limitant ici aux mesures directes :

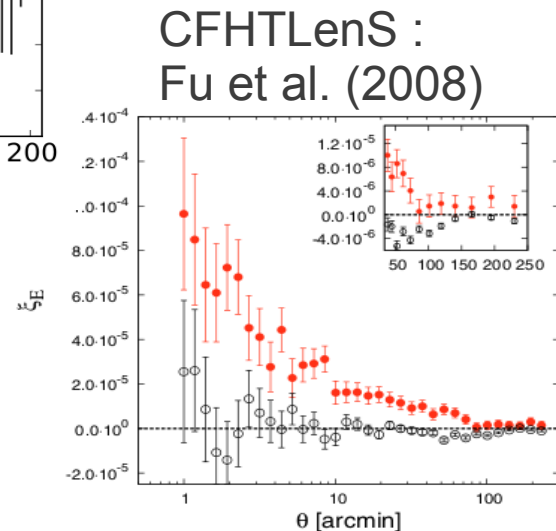
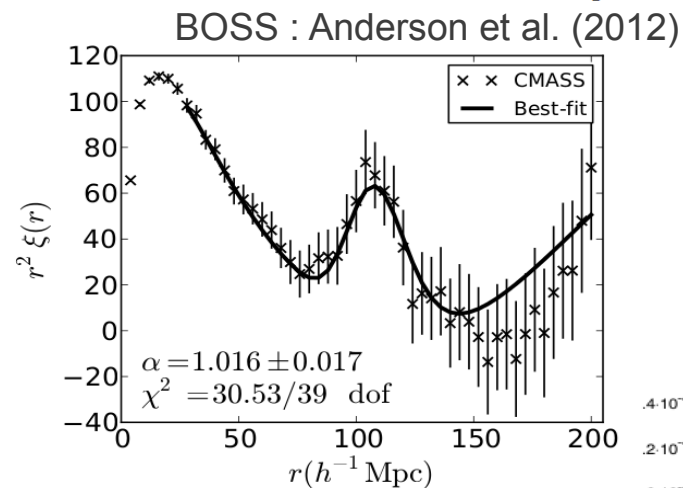
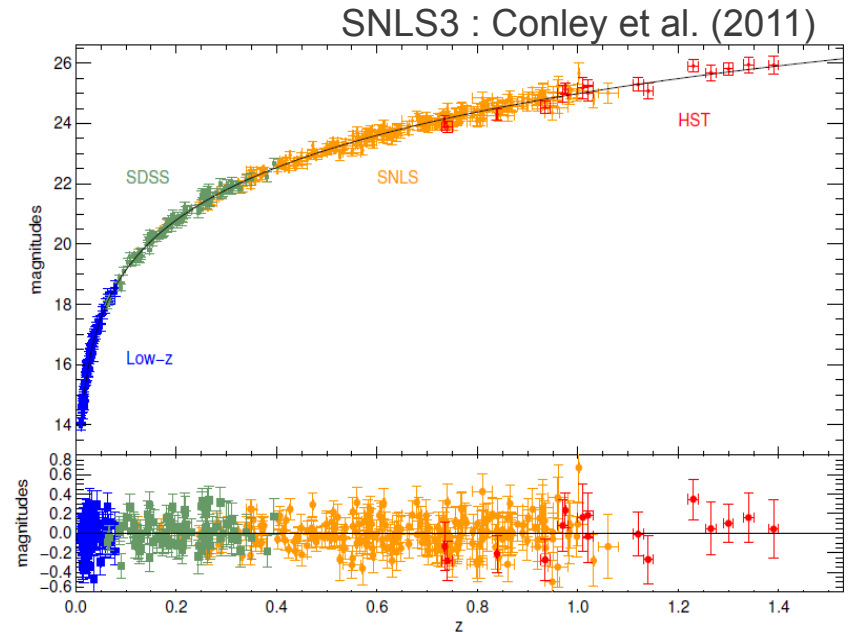
- mesure de distance de luminosité avec les SNe Ia

survey photométrique
multi-bandes profond/cadencé

- mesure de distance angulaire et radiale (BAO)

survey spectroscopique
sur très grand volume

- mesure directe du spectre de puissance de la matière (WL)
via la fonction de corrélation des ellipticités
- survey photométrique avec PSF très bien connue



Mais avec des surveys définis pour ces « mesures directes » viennent aussi, "gratuitement", des contraintes indirectes (plus beaucoup d'autre physique) :

- **survey SNe Ia** :

- magnification gravitationnelle (anecdotique aujourd'hui mais pour LSST?)
- survey photométrique de galaxies profond
(avec photo-z : formation des structures, physique des galaxies, amas)

- **survey BAO** :

- spectre de puissance des galaxies
(échelle équivalence, contrainte sur les neutrinos ...)
- distorsions de redshift : mesure du taux de croissance des structures

- **survey WL** :

- survey photométrique de galaxies profond
- amas de galaxies (combinaisons avec d'autres sondes X, SZ)
- strong lensing

Interdépendance forte des différents types de survey :

- SNe Ia:

besoin de spectroscopie pour :

- obtenir un redshift des galaxies hôtes des SNe (sur MOS après le survey cadencé)
- étalonner la méthode d'identification photométrique (observations « temps réel »)

- Weak Lensing :

besoin vital de spectres

- pour étalonner les redshifts photométriques essentiels pour la mesure
- pour étalonner la relation : forme des galaxies et PSF en fonction de la couleur des objets
(les PSF sont chromatiques, et les galaxies ont des gradients de couleur)

- Baryon Acoustic Oscillations :

besoin d'un catalogue d'entrée photométrique pour définir les cibles de la spectroscopie pour les spectro multi-fibres,

ça n'est pas le cas pour les surveys "en aveugle" :
Euclid, HETDEX (BAO radio ...)

Plan

- Une définition de l'énergie noire pour l'expérimentateur
- Sondes cosmologiques de l'énergie noire
- Comparaison des techniques
- Conclusion orientée projets

Revue critique des techniques pour la mesure de l'énergie noire

* Pour la mesure directe du taux d'expansion

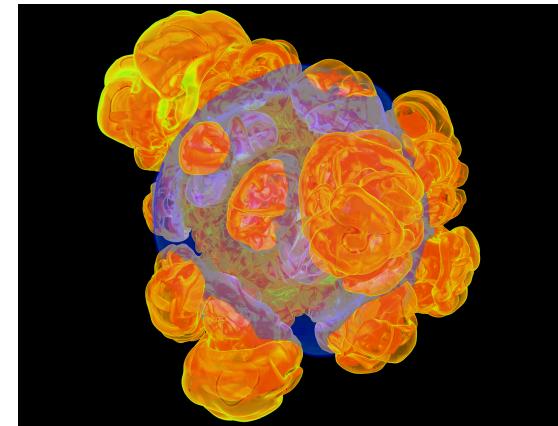
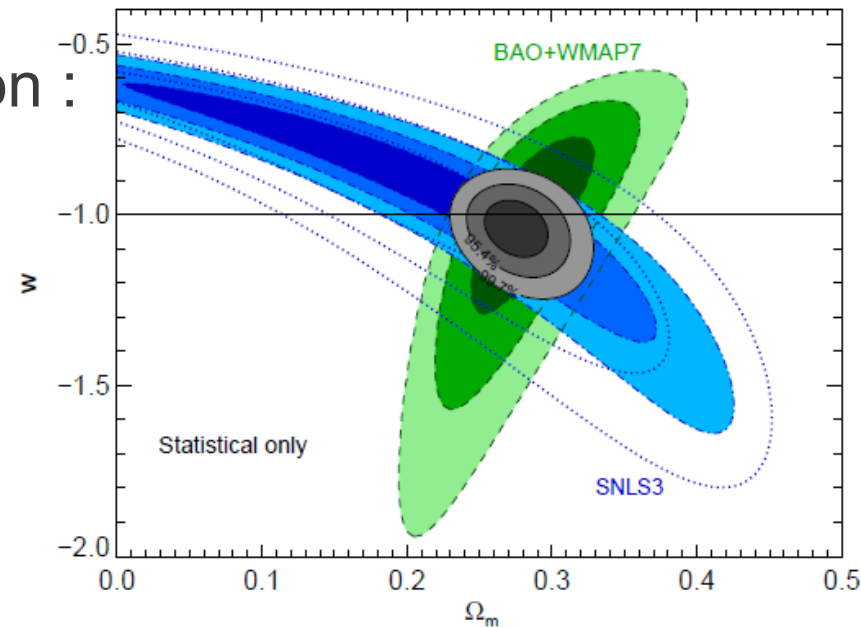
SNe Ia vs BAO

* Pour la mesure du taux de croissance des structures

Weak Lensing vs survey de galaxies (distorsions de redshift)
(je ne parlerai pas du lensing du CMB)

Pour la mesure directe du taux d'expansion : **les supernovae de type Ia**

- point fort : avantage statistique
 - pouvoir statistique, jusqu'à $z < 1$
 - sonde mature (?)
- difficultés observationnelles :
 - identification spectroscopique impossible avec une stat. > 1000
 - à $z > 1$, besoin d'un relevé infra-rouge (Euclid!!)
- incertitudes systématiques expérimentales :
 - **calibration photométrique** (systématique dominante aujourd'hui)
 - connaissance de la **fonction de sélection** (pour corriger le biais de sélection)
- incertitudes systématiques d'interprétation physique :
 - contrairement, par ex. au signal BAO, une explosion de SN Ia est un phénomène complexe
 - qui ne peut être parfaitement simulé
 - qui n'est pas complètement caractérisé expérimentalement (quel progéniteur ? asymétrie, milieu circum-stellaire, absorption sur la ligne de visée)
- **évolution de la population avec z** (contrôlé, mais dans certaines limites)



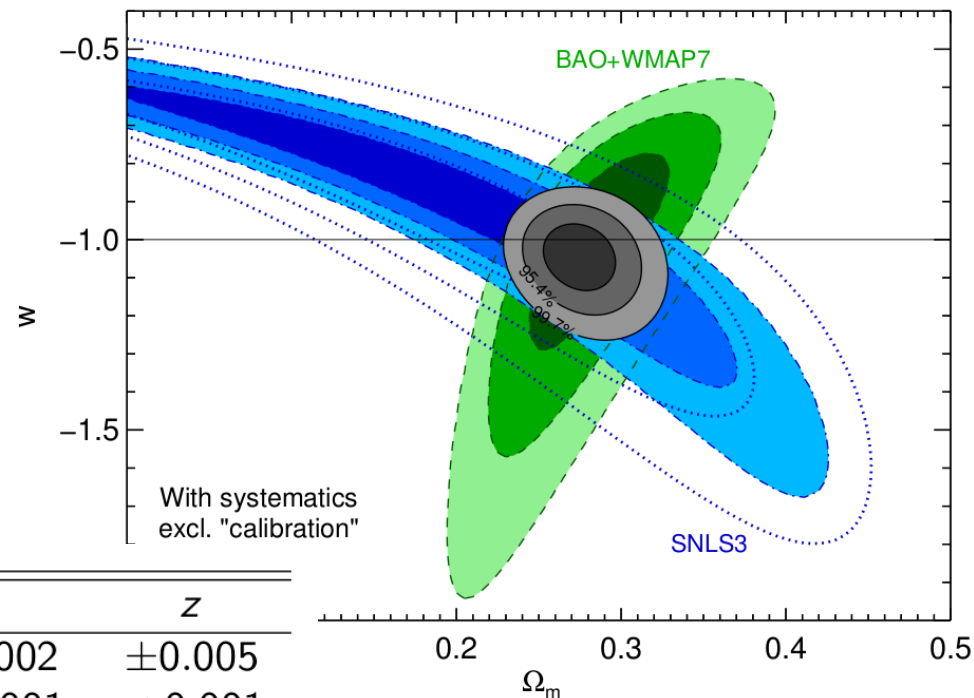
Impact de la calibration photométrique pour les SNe Ia

Exemple : SNLS3

$$\rho = w\rho, \rho(z) \propto (1+z)^{3(1+w)}$$

$$w = -1.06 \pm 0.05(\text{stat.}) \pm 0.06(\text{sys.})$$

SNe (low-z+SDSS+SNLS+HST)
 + CMB(WMAP7)
 + BAO(SDSS-DR7)



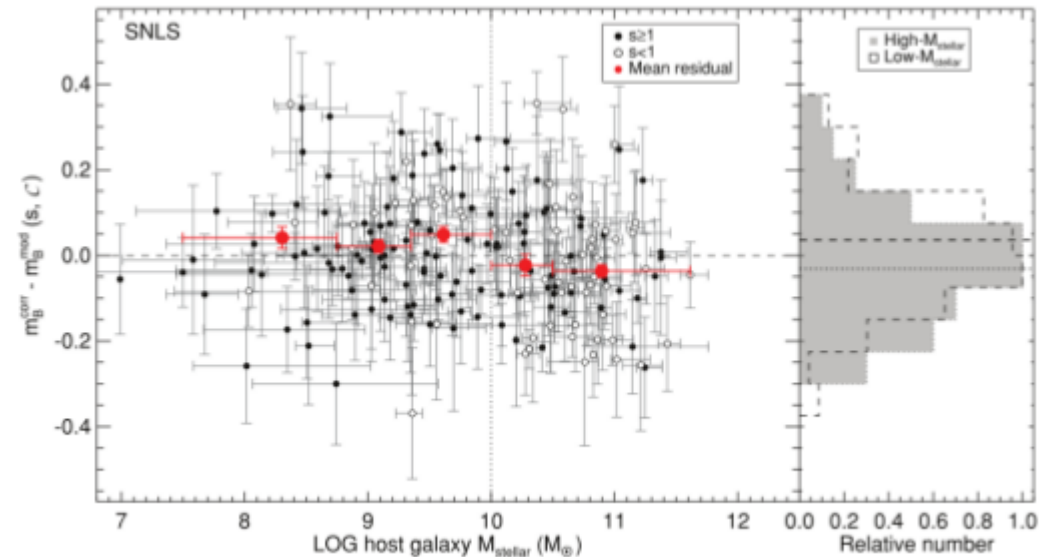
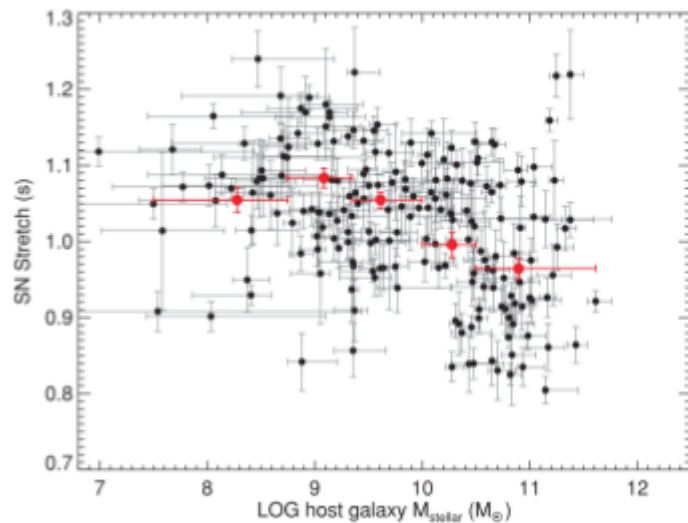
| | <i>g</i> | <i>r</i> | <i>i</i> | <i>z</i> |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Zero Points (stat) | ± 0.002 | ± 0.002 | ± 0.002 | ± 0.005 |
| Aperture corr. | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| Background sub | < 0.001 | < 0.001 | ± 0.005 | < 0.001 |
| Shutter | ± 0.002 | ± 0.002 | ± 0.002 | ± 0.002 |
| Linearity | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| 2nd order airmass corr. | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| Grid reference colors | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| Grid color corrs | < 0.001 | < 0.001 | ± 0.002 | < 0.001 |
| Landolt catalogs | ± 0.001 | ± 0.001 | ± 0.001 | ± 0.002 |
| Magnitudes of BD +17 | ± 0.002 | ± 0.004 | ± 0.003 | ± 0.018 |
| Transfer to SNe | ± 0.002 | ± 0.002 | ± 0.002 | ± 0.002 |
| Total | ± 0.005 | ± 0.006 | ± 0.007 | ± 0.019 |

Implique une incertitude systématique sur les rapport de distances de 2% (z=0 vs z=0.8) (0.04 mag)

-> On fait mieux aujourd'hui (Betoule et al., submitted)

Evolution des propriétés des SNe Ia avec z

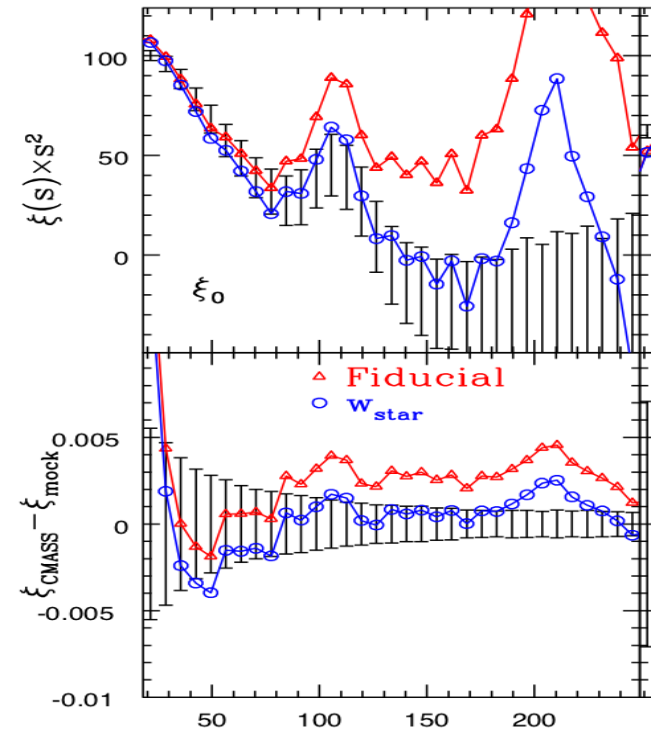
- Corrélation entre largeur des courbes de lumières des SNIa et taille de la galaxie Hôte Sullivan et al . (2010)



- **L'estimateur de distance doit être corrigé de ~4%** (0.08 mag pour le module de distance) suivant que la SN est dans une galaxie active ou passive
(Les propriétés des galaxies évoluent avec z : âge de la population stellaire)

Pour la mesure directe du taux d'expansion : **les oscillations de baryons**

- point fort : faibles incertitudes systématiques
- difficultés observationnelles : obtenir la statistique grand nombre d'éléments de volume de 150Mpc^3 (co-mobile)
 - faible pouvoir statistique à bas z : variance cosmique
 - contraintes sur la densité de galaxies, et taille du relevé
 - efficacité de la chaîne de détection (catalogue photométrique, sélection, efficacité spectrale d'identification et mesure de z)



BOSS : Ross et al. (2012)

- incertitudes systématiques expérimentales :
 - caractérisation de la fonction de sélection (ex: perte d'efficacité avec les étoiles dans BOSS)
difficile pour la corrélation à très grande échelle, mais faible impact sur la mesure du pic BAO
- incertitudes systématiques d'interprétation physique :
 - faibles : peu d'effets non-linéaires, peu d'effets astrophysiques attendus à une échelle de 150Mpc .
 - incertitudes systématiques sur la paramétrisation de la fonction de corrélation sous le pic BAO (systématique $\leq 0.5\%$ sur l'échelle de distance, erreur stat=1.7%, Anderson et al. 2012)

BAO : nouvelle sonde cosmologique

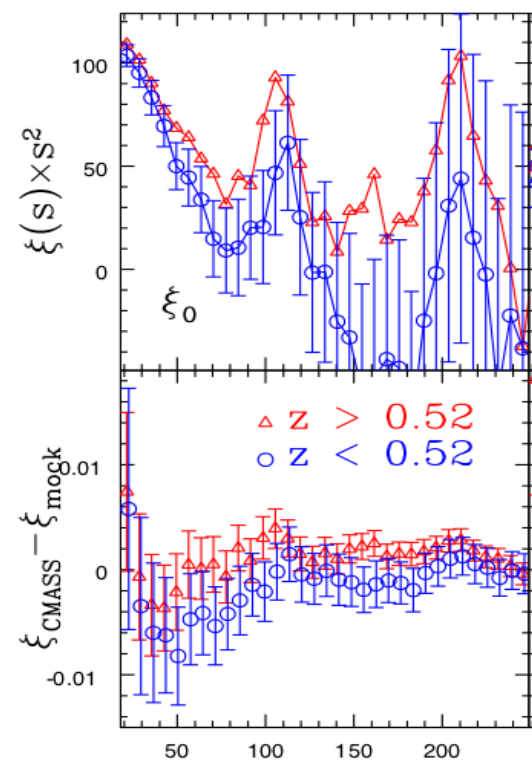
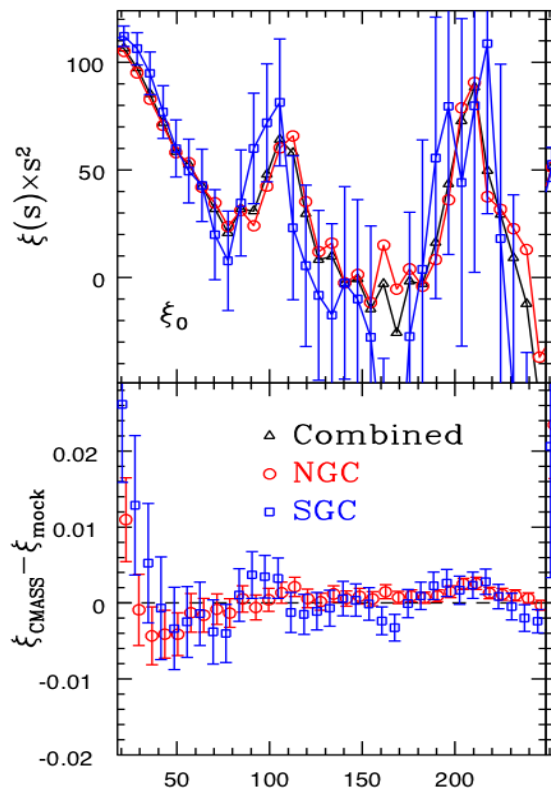
Certaines systématiques ne sont pas encore connues

Ex : BOSS : Ross et al. (2012)

Second pic à 200 Mpc/h ??? (exclu dans le modèle LCDM standard !)

Fluctuation statistique ?

- Vue au nord et au sud du plan Galactique
- Vue à $z < 0.52$ et à $z > 0.52$
- Significance stat. $\sim 97.5\%$ (à partir de simulations)



Revue critique des techniques pour la mesure de l'énergie noire

* Pour la mesure directe du taux d'expansion

SNe Ia vs BAO

* Pour la mesure du taux de croissance des structures

Weak Lensing vs survey de galaxies (distorsions de redshift)
(je ne parlerais pas du lensing du CMB)

Pour la mesure du taux de croissance des structures :

le Weak Lensing

- **point fort** : seule sonde directement/uniquement sensible aux puits de potentiel gravitationnel (avec ISW et lensing du CMB)

- difficultés observationnelles :
 - statistique, caractérisation de la PSF, redshifts photométriques

- incertitudes systématiques expérimentales : $\epsilon^{\text{obs}} = (1 + m)[\gamma + \epsilon^{\text{int}}] + c$

- **mesure du shear** : à PSF parfaitement connue, reste un biais dépendant du S/N et de la forme des galaxies, à étalonner avec des simulations

- ~5% de correction pour CFHTLenS (Heymans 2012)

- <1% attendu avec de nouvelles méthodes (simulations GREAT10, Kitching 2012)

- **connaissance de la PSF** : 25% des données CFHTLS écartées (effets atmosphériques? Heymans 2012)

- **distribution en redshift**, incertitude d'étalonnage des photo-z (CFHTLenS : Hildbrandt et al. 2012)

- incertitudes systématiques d'interprétation physique :

- alignement intrinsèque des galaxies

- interprétation du spectre de puissance du shear à petite échelle

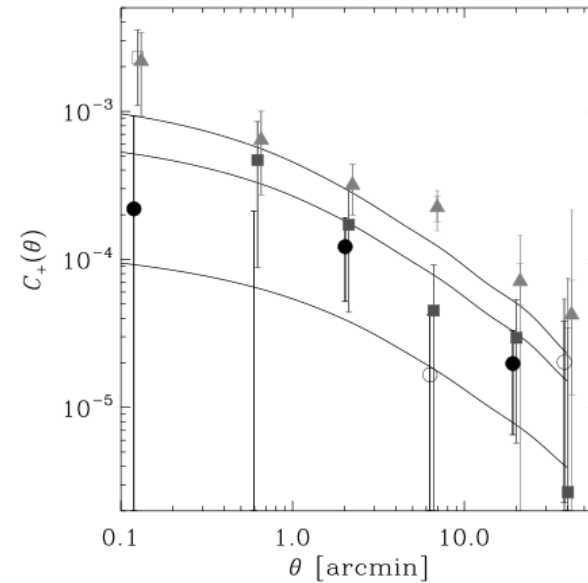
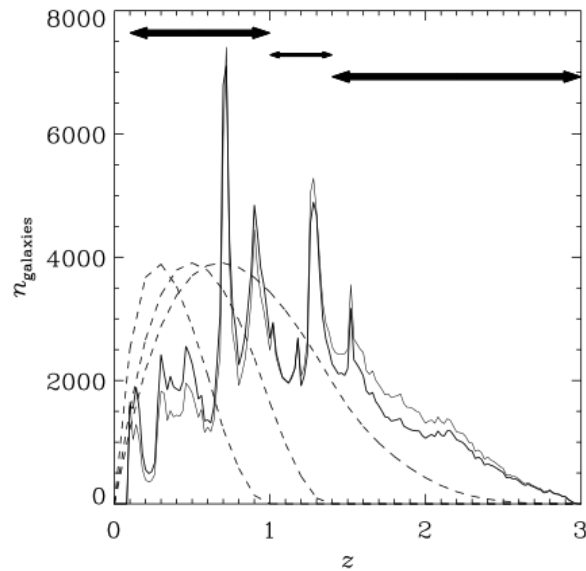
- dépend de la physique « baryonique »** (Semboloni et al. 2011)

Exemple : Massey 2007

COSMOS field, observations spatiales sur télescope Hubble

1.6deg², 40 gal/arcmin² (sélectionnées)

Corrélation du shear dans trois bins de redshifts



$$\sigma_8 \left(\frac{\Omega_m}{0.3} \right)^{0.44} = 0.866 \pm 0.033 \pm 0.026 \pm 0.009^{+0.017}_{-0.000}$$

+ - 0.03 : erreur statistique

+ - 0.026 + - 0.009 : calibration de la mesure du shear (6%)

+ 0.017 : erreurs de redshifts photométriques

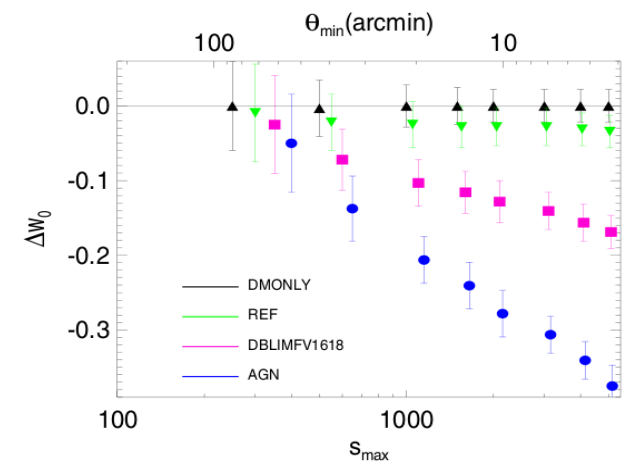
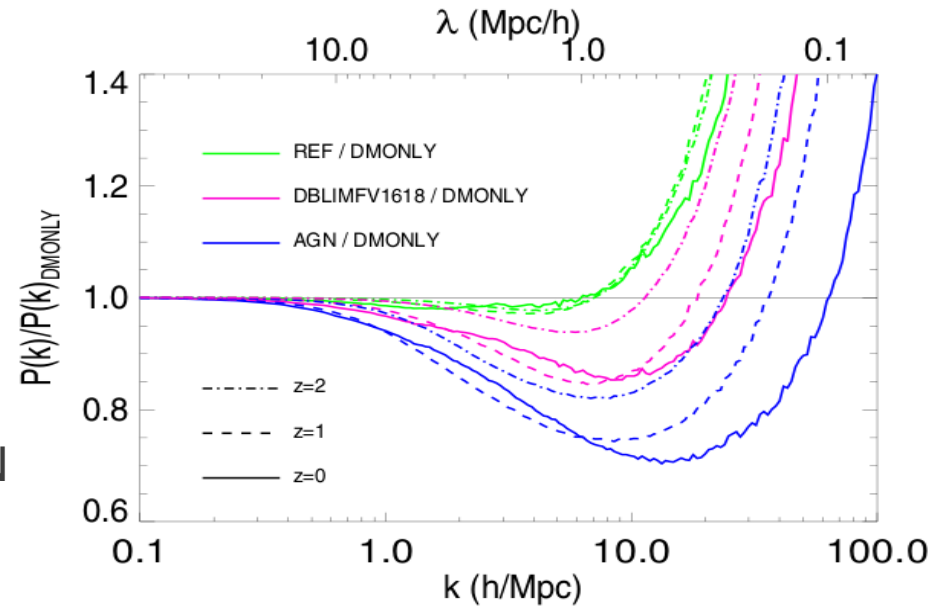
Pour Euclid, avec 15000deg², >30 gal/arcmin²,
et LSST,

- une réduction drastique des incertitudes systématiques de calibration du shear est nécessaire
- les challenges avec simulations montrent qu'on s'approche de cet objectif
(GREAT10, Kitching 2012)

Influence de la physique « baryonique » sur le spectre de puissance de la matière

(Semboloni et al., 2011)

- Principaux effets à considérer :
 - refroidissement radiatif
 - formation stellaire
 - explosions de supernovae
 - « feedback » noyaux actifs de galaxies
- DMONLY : uniquement matière noire
- REF : incluant les effets ci-dessus sans AGN
- AGN : REF + AGN feedback
- DBLIMF... : autre Initial Mass Function
- Impact important sur les paramètres cosmologiques si non pris en compte $w \pm 0.1$ pour $\theta < 10$ arcmin
- Emulé en modélisant la distribution stellaire et de gaz dans les halos (paramètres contraints par des simulations, observations X des amas ...)



Pour la mesure du taux de croissance des structures :

Distorsions de redshift

$$f \equiv d \ln D(a) / d \ln a$$

$$P_{\sigma}^s(k, \mu) = P_{gg}(k) - 2\mu^2 P_{g\theta}(k) + \mu^4 P_{\theta\theta}(k)$$

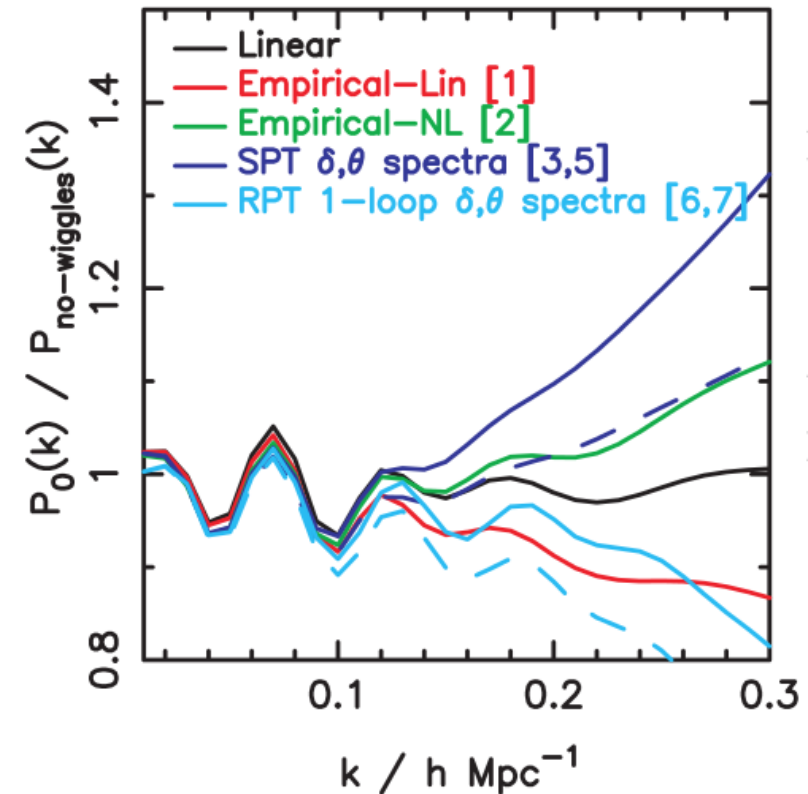
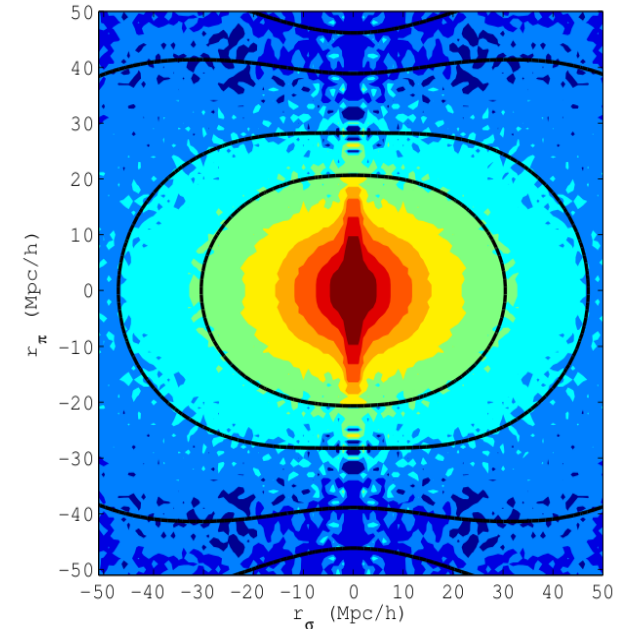
$$P_g^s(k, \mu) = b^2 P_{\delta\delta}(k) \left(1 + \frac{f\mu^2}{b} \right)^2$$

- importantes incertitudes systématiques
d'interprétation physique

- les galaxies sont un traceur biaisé
des puits de potentiel gravitationnels 'b'
(biais en fonction de l'échelle, brillance, couleur)

- importants effets non-linéaires
à prendre en compte

exemple : Wigglez, Blake et al. (2011)



Conclusion 1/2

La caractérisation de l'énergie noire nécessite une mesure fine

- du taux d'expansion vs z
- du taux de croissance des structures

- Les sondes « directes » de l'expansion sont « aujourd'hui » les SNe Ia et BAO.

- les SNe Ia garderont un avantage à bas z (variance cosmique des BAO)
- les BAO ont/auront « probablement » des incertitudes systématiques plus

faibles

- Le weak lensing est une sonde incontournable pour tester la relativité générale aux grandes échelles, mais c'est une mesure très difficile, voire un défi (compte tenu des incertitudes systématiques des mesures actuelles).

- On ne connaît pas encore la méthode qui sera la plus performante dans 10 ans.

- Les projets doivent avoir des objectifs précis mais aussi préserver un éventail de science important.

Conclusion 2/2

LSST : weak lensing (shear et magnification),
SNe Ia, amas de galaxie, BAO en photo-z, ...

Euclid : weak lensing, BAO spectro ($z > 1$), amas, SNe Ia ?

Surtout, très importante synergie entre les deux projets Euclid/LSST : visible + infrarouge avec une partie du ciel en commun

- pour les redshifts photométriques
- pour les couleurs des galaxies (WL)
- pour construire un relevé combiné de SNe Ia
(gamme en longueur d'onde et z)

Manque à l'appel : grand relevé spectroscopique visible

- pour les BAO à $z < 1$
- pour la calibration des redshifts photométriques.
- pour les redshifts des galaxies hôtes des SNe Ia.