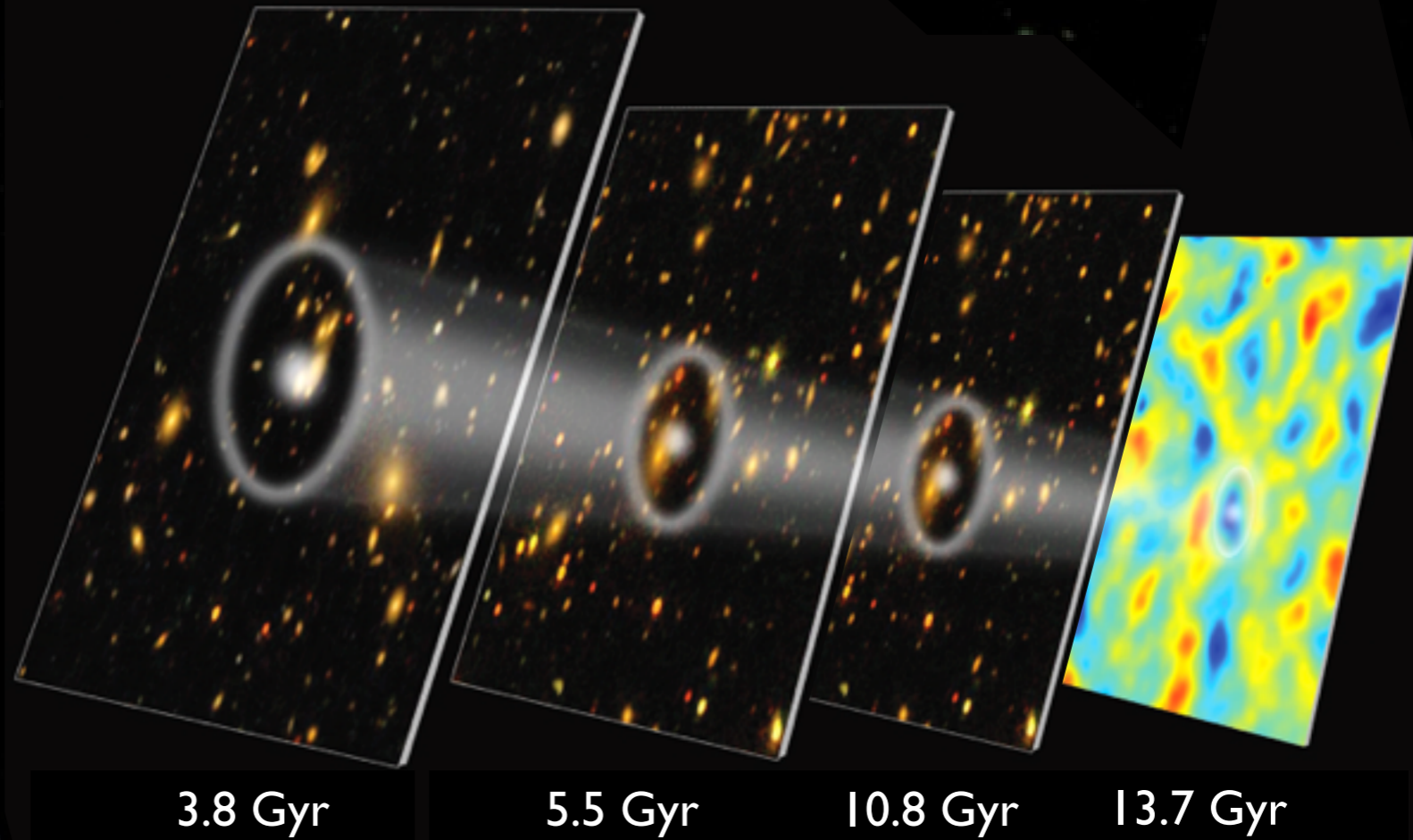


Résultats de SDSS3/BOSS CMASS DR9



3.8 Gyr

5.5 Gyr

10.8 Gyr

13.7 Gyr

J.-Ch. Hamilton
APC, Paris

Programme

- Rappels cosmologiques
 - ★ Histoire de l'expansion, distances et paramètres cosmologiques
 - ★ Résultats sur l'Énergie sombre
 - ★ Oscillations acoustiques de baryons
- BOSS : Baryon Oscillations Spectroscopic Survey
 - ★ L'héritage de SDSS I et II
 - ★ SDSSIII / BOSS
- La corrélation spatiale des LRG avec DR9
 - ★ Sélection de l'échantillon, complétude
 - ★ Fonction de corrélation à deux points, Spectre de puissance
 - ★ Contraintes cosmologiques
 - Principe des analyses
 - Résultats
- La corrélation spatiale dans la forêt Lyman- α
- Conclusions et perspectives

Modèle FLRW

- Relativité Générale

- ★ $f \left(\begin{array}{c} \text{Métrique de} \\ \text{l'espace - temps} \end{array} \right) = 8\pi G \left(\begin{array}{c} \text{Distribution} \\ \text{de matière} \end{array} \right)$

- Principe Cosmologique

- ★ L'univers est homogène et isotrope aux grandes échelles

➔ Métrique de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker

- ★ $ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$ $k = \begin{cases} 0 & \rightarrow \text{Plat} \\ 1 & \rightarrow \text{Fermé} \\ -1 & \rightarrow \text{Ouvert} \end{cases}$

➔ Équations de Friedman pour $a(t)$

- ➔ L'évolution de $a(t)$ dépend des densités des différentes espèces:
 - ➔ Matière relativiste
 - ➔ Matière non relativiste
 - ➔ Constante cosmologique (ou énergie sombre ...)

Caractéristiques de FLRW

- Univers en expansion

★ Taux d'expansion: Paramètre de Hubble. Aujourd'hui : $H_0 \sim 72 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$

$$\begin{aligned} H^2 &= \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = H_0^2 \left(\frac{\rho}{\rho_c} + \frac{k}{a^2 H_0^2} + \frac{\Lambda}{3H^2} \right), \\ &= H_0^2 (\Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda) \end{aligned}$$

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_k^0 \times (1+z)^2 + \Omega_m^0 \times (1+z)^3 + \Omega_X(z)}$$

- Redshift: boost entre référentiels locaux et distants

$$1+z = \frac{a_0}{a}$$

- Distances: non triviales

Caractéristiques de FLRW

- Univers en expansion

★ Taux d'expansion: Paramètre de Hubble. Aujourd'hui : $H_0 \sim 72 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$

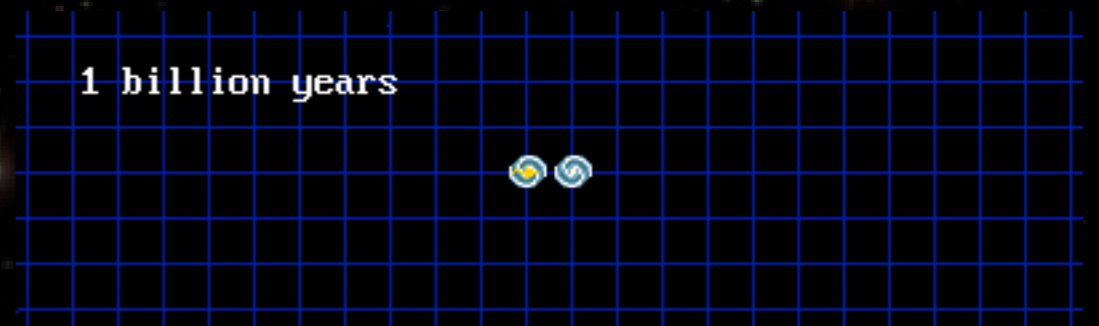
$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left(\frac{\rho}{\rho_c} + \frac{k}{a^2 H_0^2} + \frac{\Lambda}{3H^2} \right),$$
$$= H_0^2 (\Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda)$$

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_k^0 \times (1+z)^2 + \Omega_m^0 \times (1+z)^3 + \Omega_X(z)}$$

- Redshift: boost entre référentiels locaux et distants

$$1+z = \frac{a_0}{a}$$

- Distances: non triviales



Distances en cosmologie

- Différence de coordonnées:

$$r(z) = \int_0^r \frac{dr}{\sqrt{1 - kr'^2}} = \int_t^{t_0} \frac{dt'}{a(t')} = \frac{1}{a_0} \int \frac{dz'}{H(z')}$$

- Dépendent de:

- ★ Manière de les mesurer

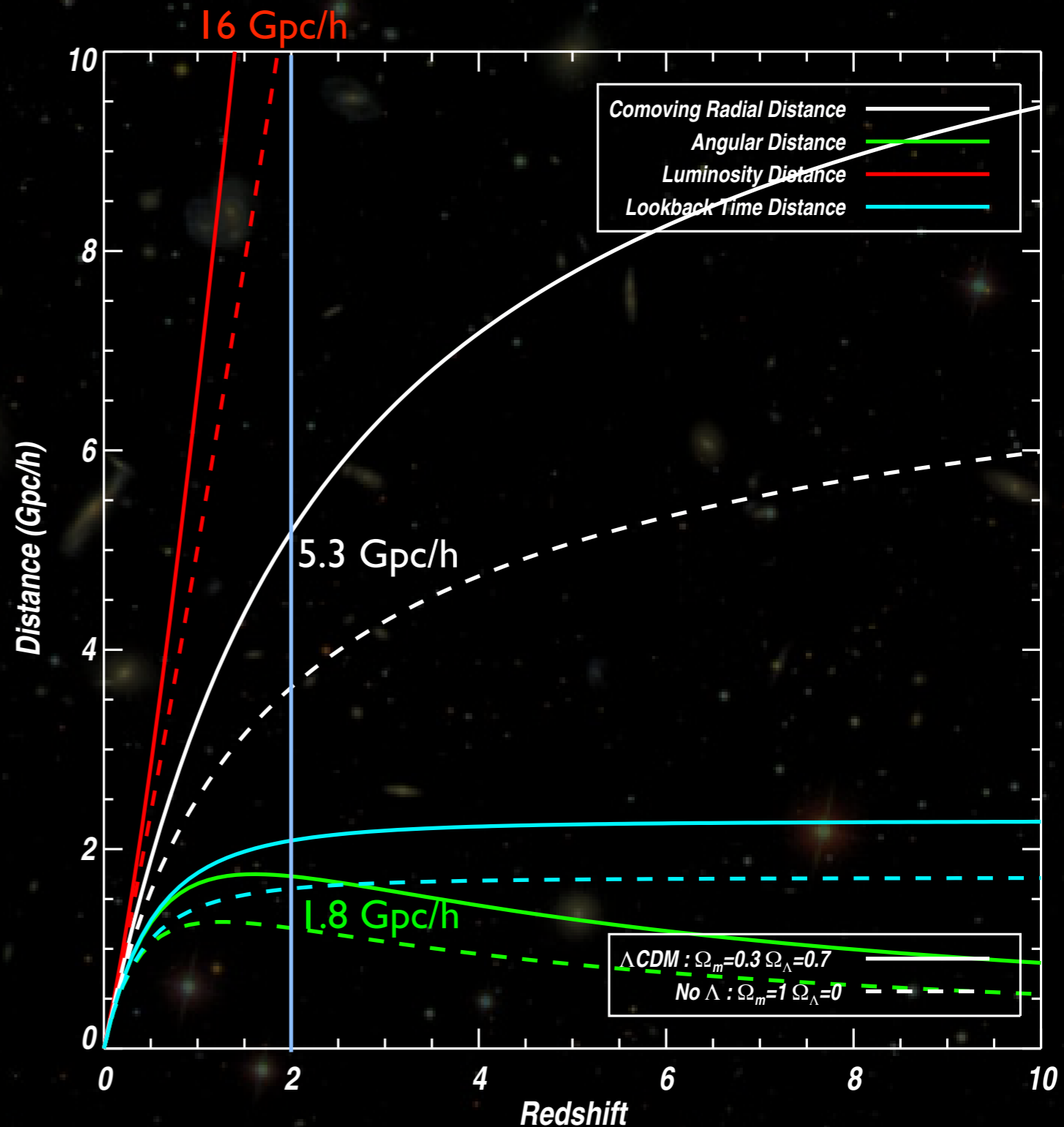
- différence de coordonnées x paramètre d'échelle (non mesurable):
 - **distance propre (comobile)** $D_p(z) = a_0 r(z) = \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$
- luminosité apparente sachant la luminosité absolue :
 - **distance de luminosité** $D_l(z) = D_p(z) \times (1 + z)$
- Taille angulaire apparente sachant la taille physique:
 - **distance angulaire** $D_a(z) = D_p(z) / (1 + z)$
- Profondeur en redshift sachant la taille physique:
 - **Distance radiale** $dz = a_0 \frac{da}{a^2} = \frac{a_0 \dot{a}}{a^2} dt = (1 + z) H(z) dx$

- ★ des paramètres cosmologiques via H(z)

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_k^0 \times (1 + z)^2 + \Omega_m^0 \times (1 + z)^3 + \Omega_X(z)}$$

Distance(s) : fct de la cosmologie

- En pratique:
 - ★ $D_a = D_p = D_l = D_t$ pour z petit
 - ★ $D_a < D_p < D_l$
- Une galaxie à $z=2$:
 - ★ est à une **distance comobile** de **5.3 Gpc/h**
 - ★ a le **diamètre angulaire** de la même galaxie située à **1.8 Gpc/h**
 - ★ a la **luminosité apparente** de la même galaxie située à **16 Gpc/h**
- Énergie noire:
 - ★ dans un Univers avec énergie noire, tout semble plus lointain à cause de l'accélération de l'expansion



Diagrammes de Hubble

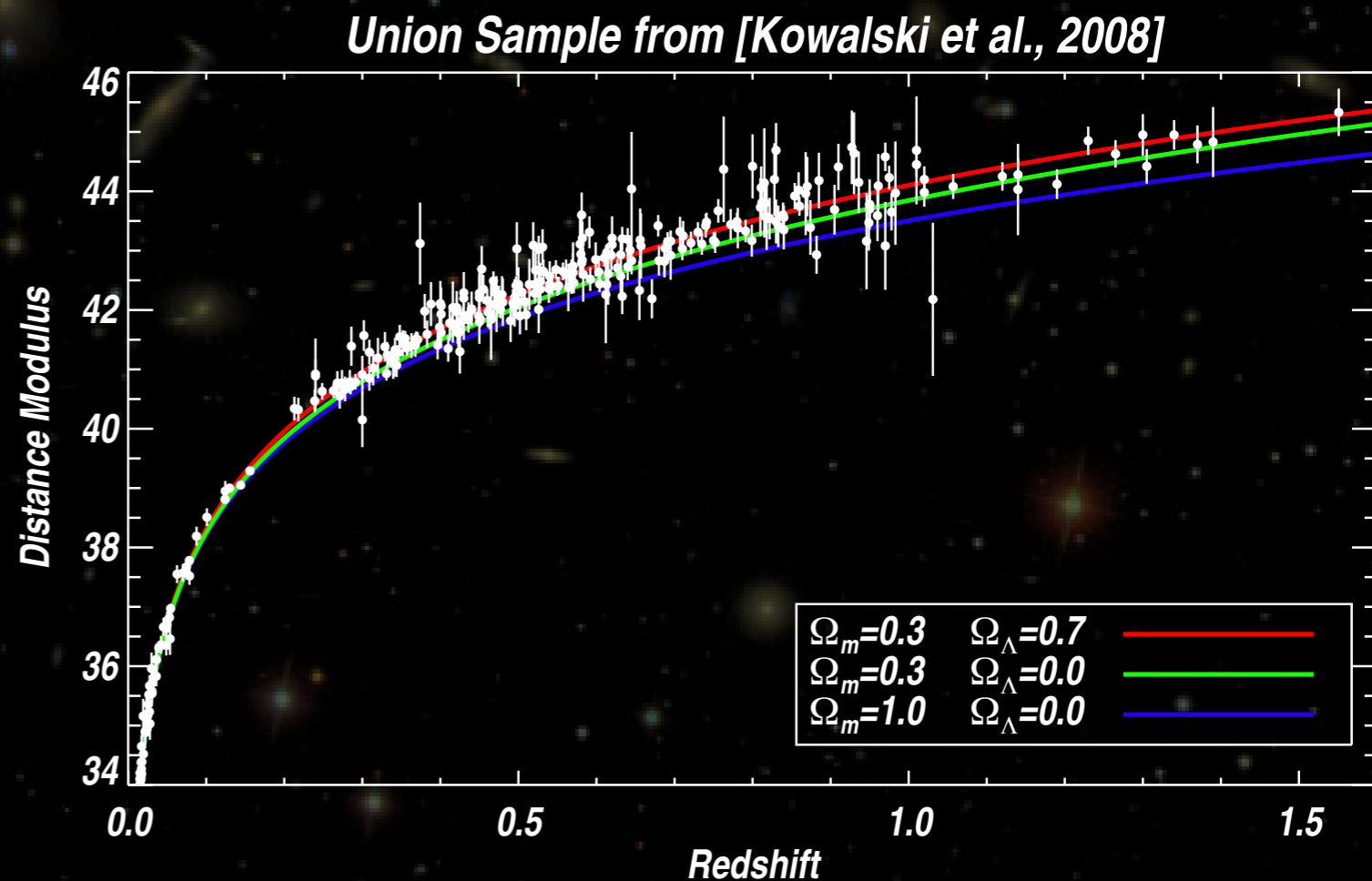
- Mesurer l'une des distances en fonction de z
 - ★ Chandelle standard (SNIa)
 - ★ Étalon de distance standard (BAO)
 - ★ Horloge standard (?)
 - ★ ...
- Mesure des paramètres cosmologiques

Diagrammes de Hubble

- Mesurer l'une des distances en fonction de z
 - ★ Chandelle standard (SNIa)
 - ★ Étalon de distance standard (BAO)
 - ★ Horloge standard (?)
 - ★ ...
- Mesure des paramètres cosmologiques

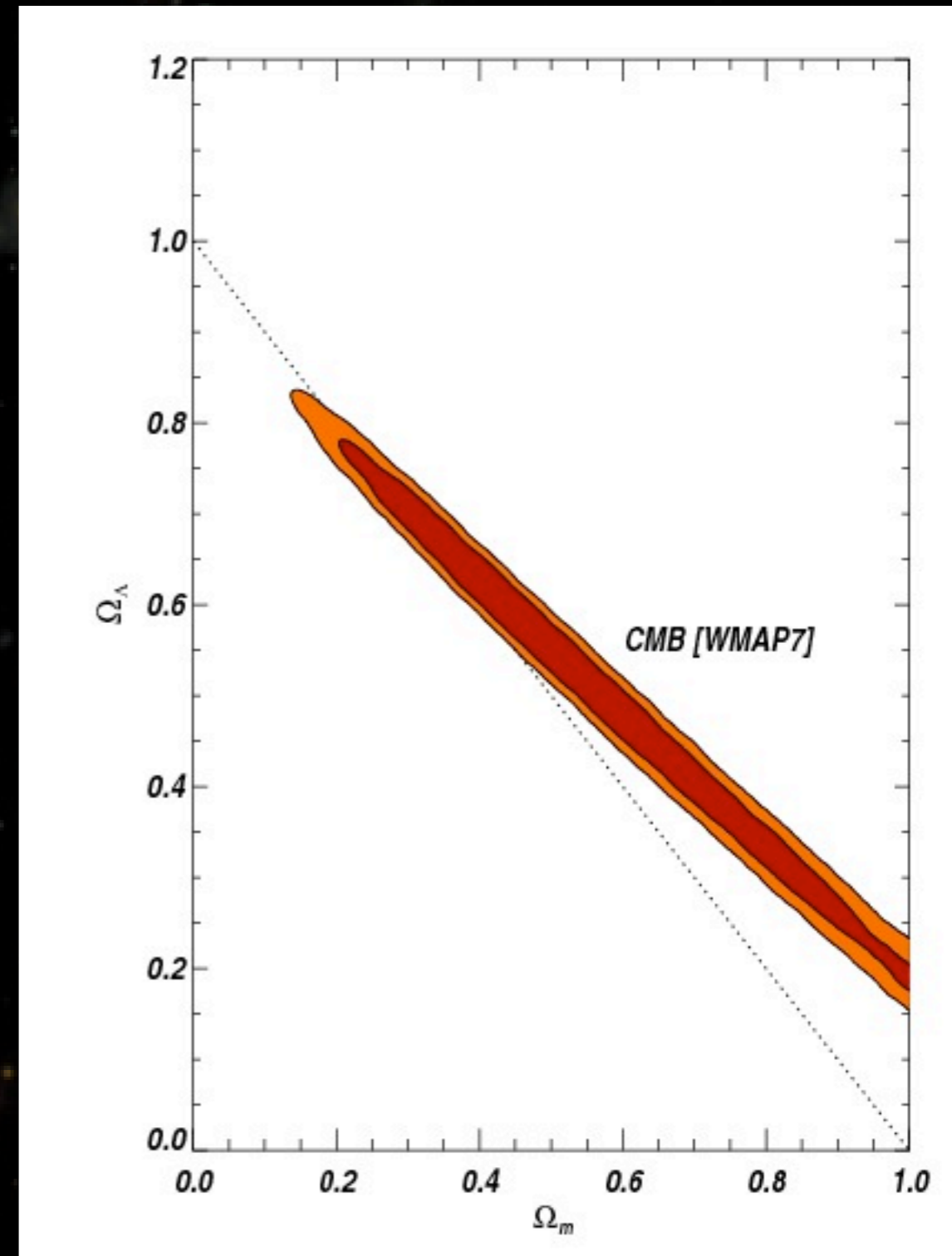
- Ex/ SNIa

- ★ Distance de luminosité
- ★ Découverte de l'accélération de l'expansion
- ★ Energie sombre ? Constante cosmologique ?



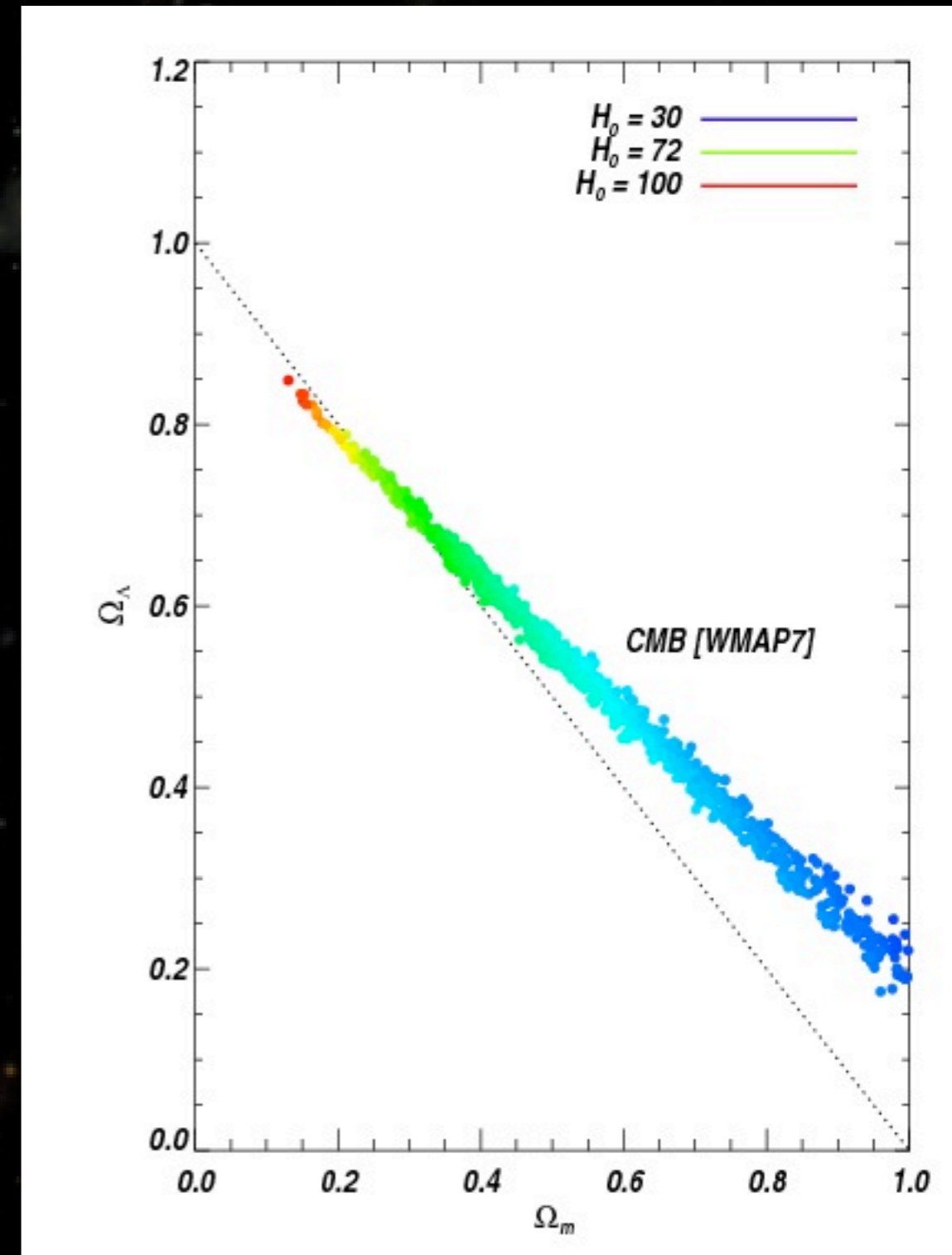
Contraintes sur Λ

- CMB:
 - ★ distance angulaire à $z=1100$
- Mesure de H_0
 - ★ (\sim locale)
- SNIa:
 - ★ distance de luminosité
- BAO SDSSII:
 - ★ \sim distance angulaire
- Questions:
 - ★ Nature de Λ
 - valeur de Ω_Λ
 - équation d'état de Λ :
 - -1 : \sim Constante cosmologique [gravité]
 - autre : Dark Energy [contenu matériel]



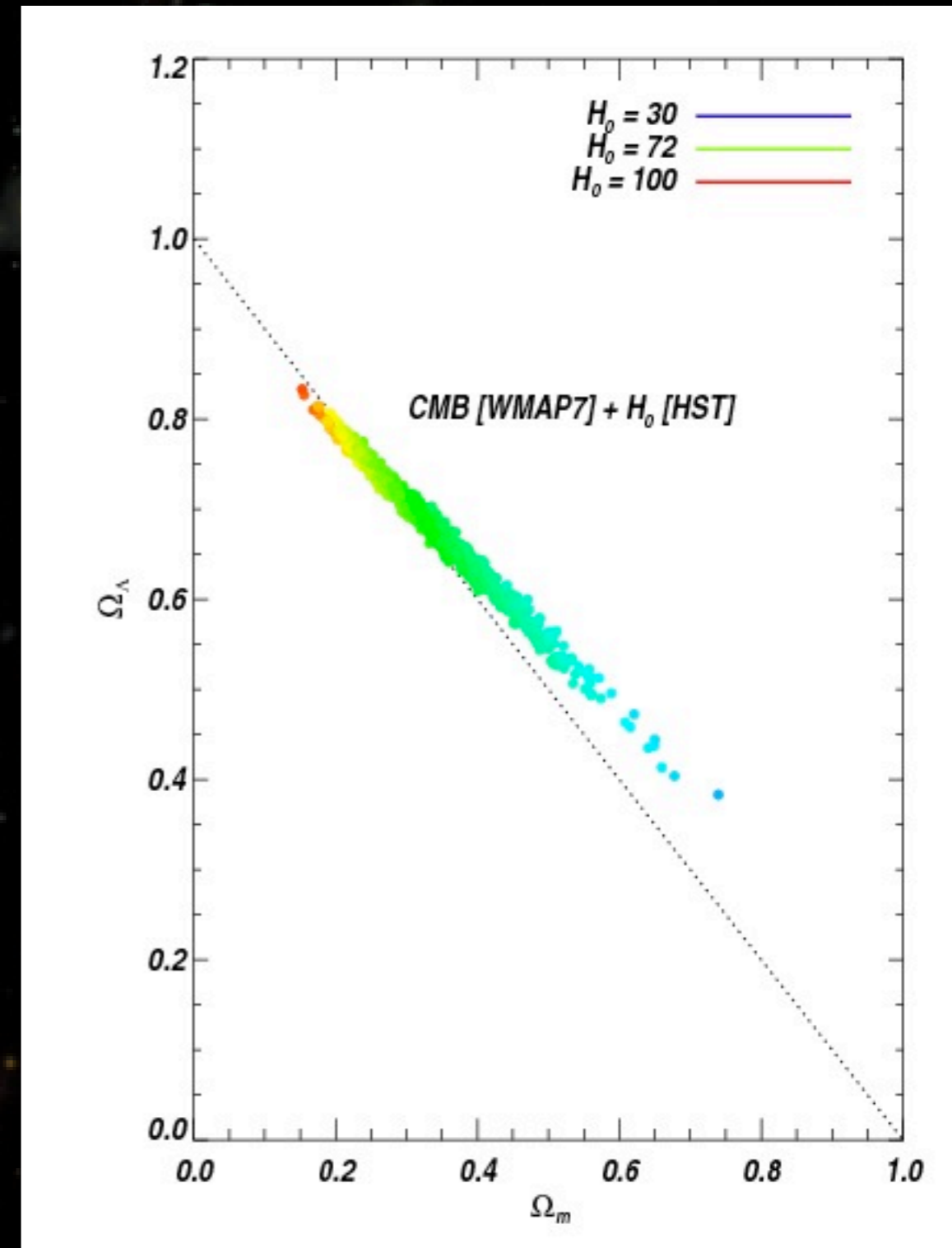
Contraintes sur Λ

- CMB:
 - ★ distance angulaire à $z=1100$
- Mesure de H_0
 - ★ (\sim locale)
- SNIa:
 - ★ distance de luminosité
- BAO SDSSII:
 - ★ \sim distance angulaire
- Questions:
 - ★ Nature de Λ
 - valeur de Ω_Λ
 - équation d'état de Λ :
 - -1 : \sim Constante cosmologique [gravité]
 - autre : Dark Energy [contenu matériel]



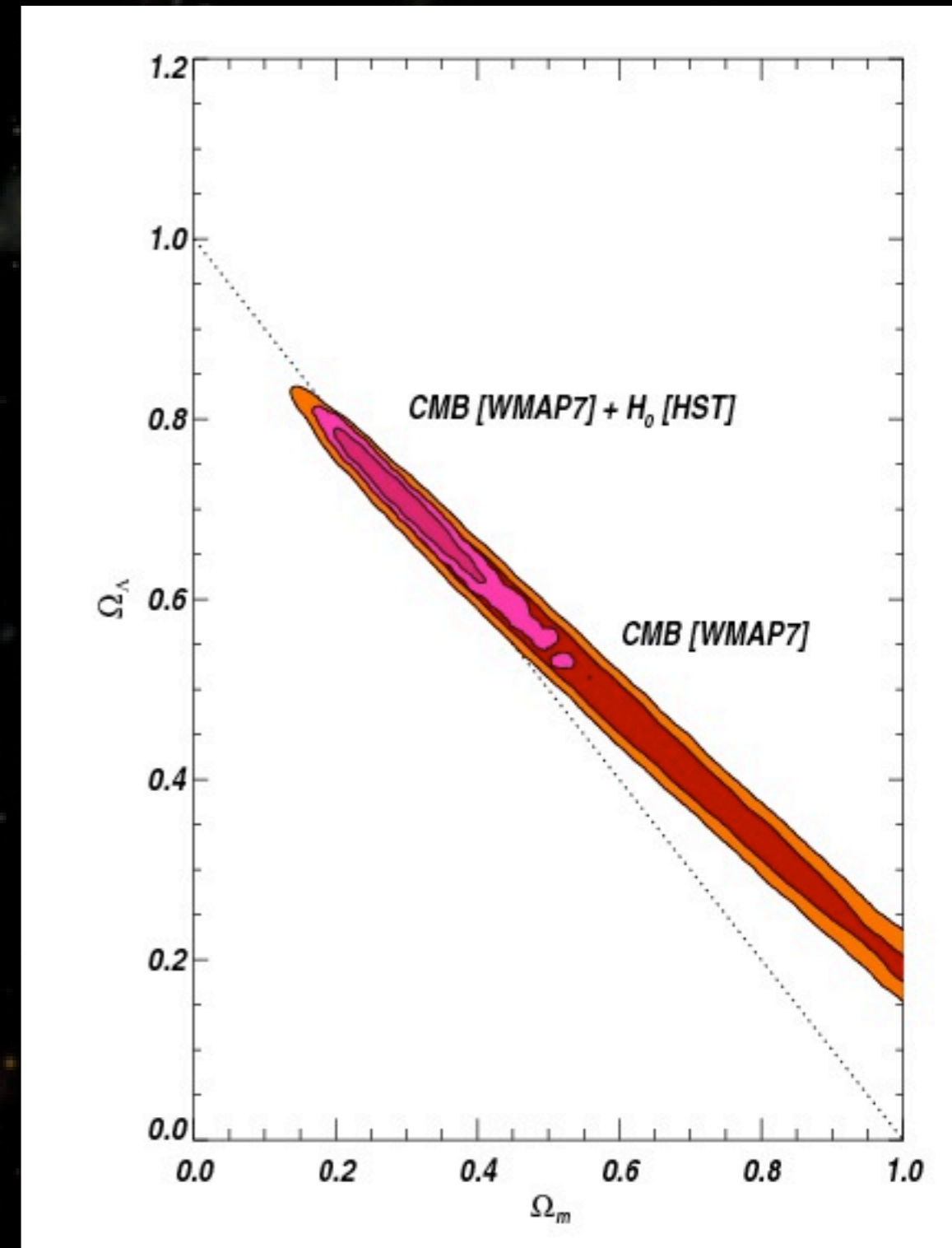
Contraintes sur Λ

- CMB:
 - ★ distance angulaire à $z=1100$
- Mesure de H_0
 - ★ (\sim locale)
- SNIa:
 - ★ distance de luminosité
- BAO SDSSII:
 - ★ \sim distance angulaire
- Questions:
 - ★ Nature de Λ
 - valeur de Ω_Λ
 - équation d'état de Λ :
 - -1 : \sim Constante cosmologique [gravité]
 - autre : Dark Energy [contenu matériel]



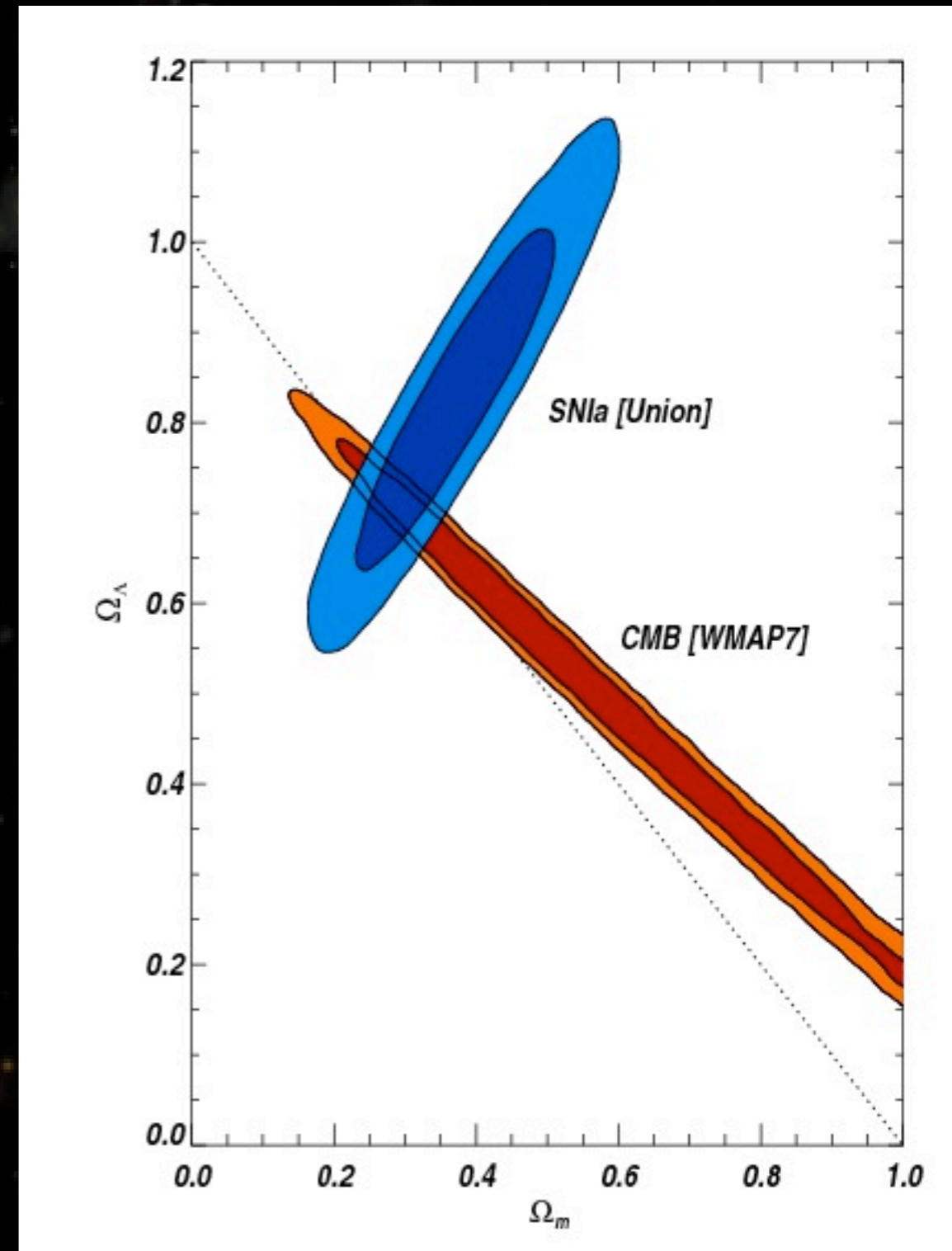
Contraintes sur Λ

- CMB:
 - ★ distance angulaire à $z=1100$
- Mesure de H_0
 - ★ (\sim locale)
- SNIa:
 - ★ distance de luminosité
- BAO SDSSII:
 - ★ \sim distance angulaire
- Questions:
 - ★ Nature de Λ
 - valeur de Ω_Λ
 - équation d'état de Λ :
 - -1 : \sim Constante cosmologique [gravité]
 - autre : Dark Energy [contenu matériel]



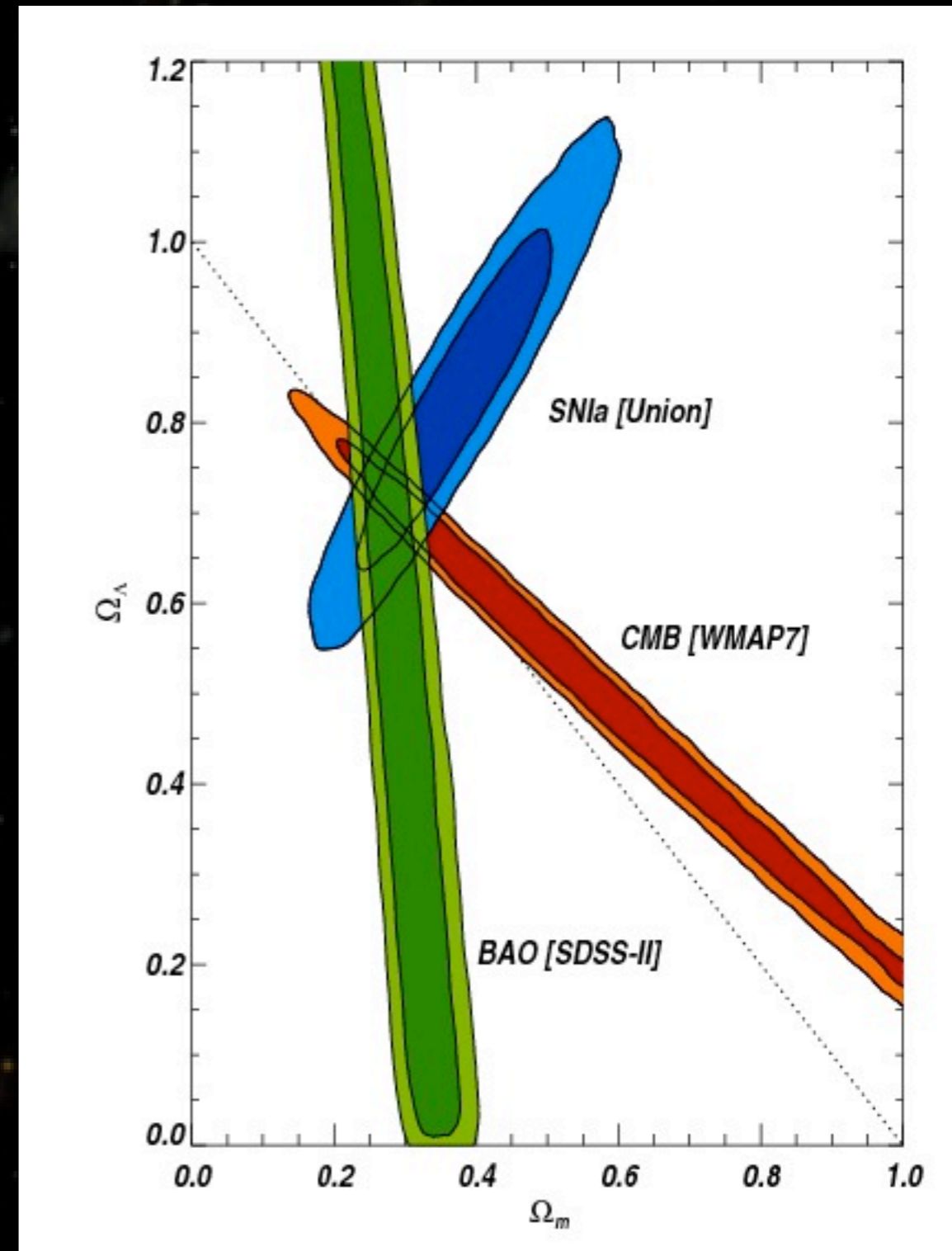
Contraintes sur Λ

- CMB:
 - ★ distance angulaire à $z=1100$
- Mesure de H_0
 - ★ (\sim locale)
- SNIa:
 - ★ distance de luminosité
- BAO SDSSII:
 - ★ \sim distance angulaire
- Questions:
 - ★ Nature de Λ
 - valeur de Ω_Λ
 - équation d'état de Λ :
 - -1 : \sim Constante cosmologique [gravité]
 - autre : Dark Energy [contenu matériel]



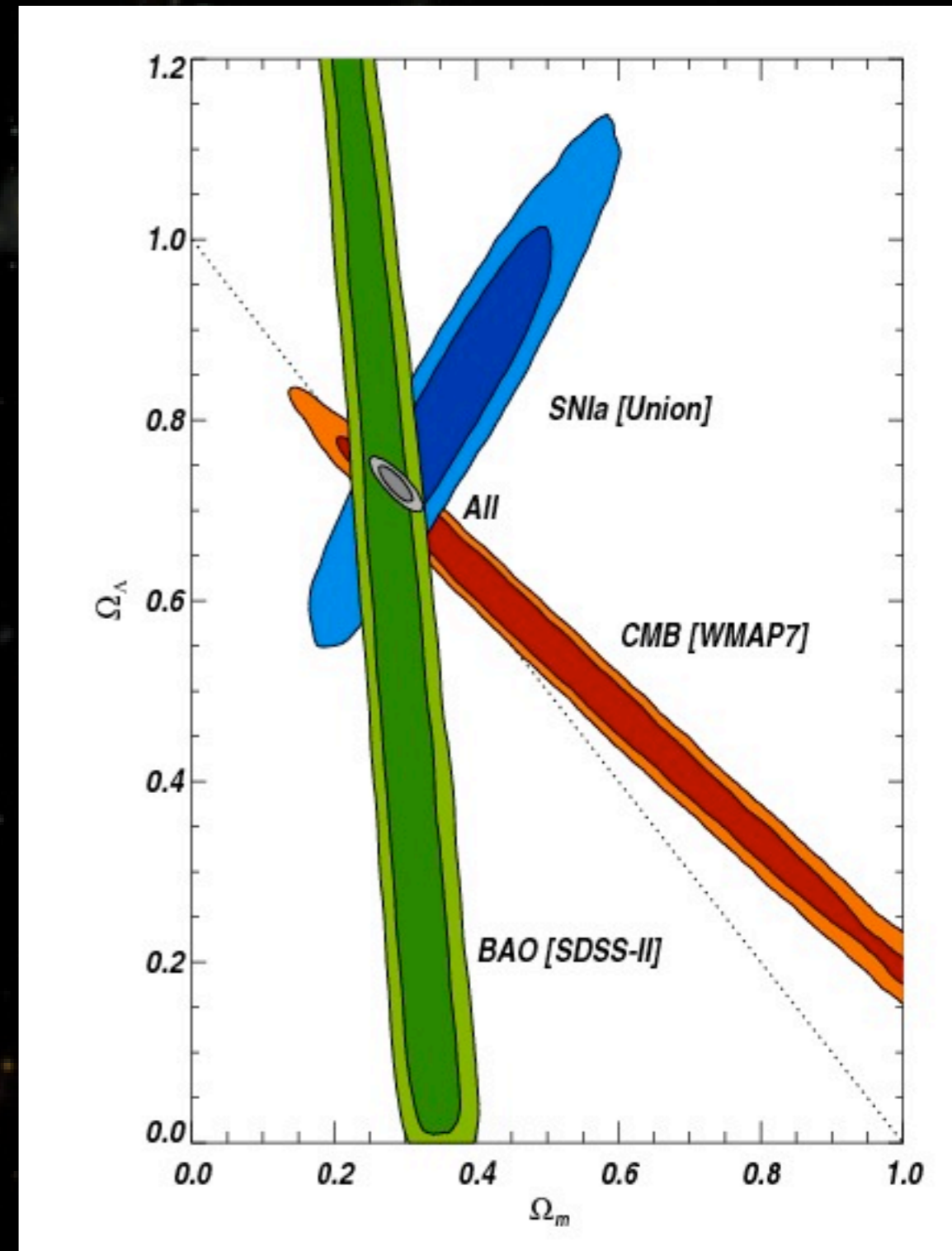
Contraintes sur Λ

- CMB:
 - ★ distance angulaire à $z=1100$
- Mesure de H_0
 - ★ (\sim locale)
- SNIa:
 - ★ distance de luminosité
- BAO SDSSII:
 - ★ \sim distance angulaire
- Questions:
 - ★ Nature de Λ
 - valeur de Ω_Λ
 - équation d'état de Λ :
 - -1 : \sim Constante cosmologique [gravité]
 - autre : Dark Energy [contenu matériel]



Contraintes sur Λ

- CMB:
 - ★ distance angulaire à $z=1100$
- Mesure de H_0
 - ★ (\sim locale)
- SNIa:
 - ★ distance de luminosité
- BAO SDSSII:
 - ★ \sim distance angulaire
- Questions:
 - ★ Nature de Λ
 - valeur de Ω_Λ
 - équation d'état de Λ :
 - -1 : \sim Constante cosmologique [gravité]
 - autre : Dark Energy [contenu matériel]

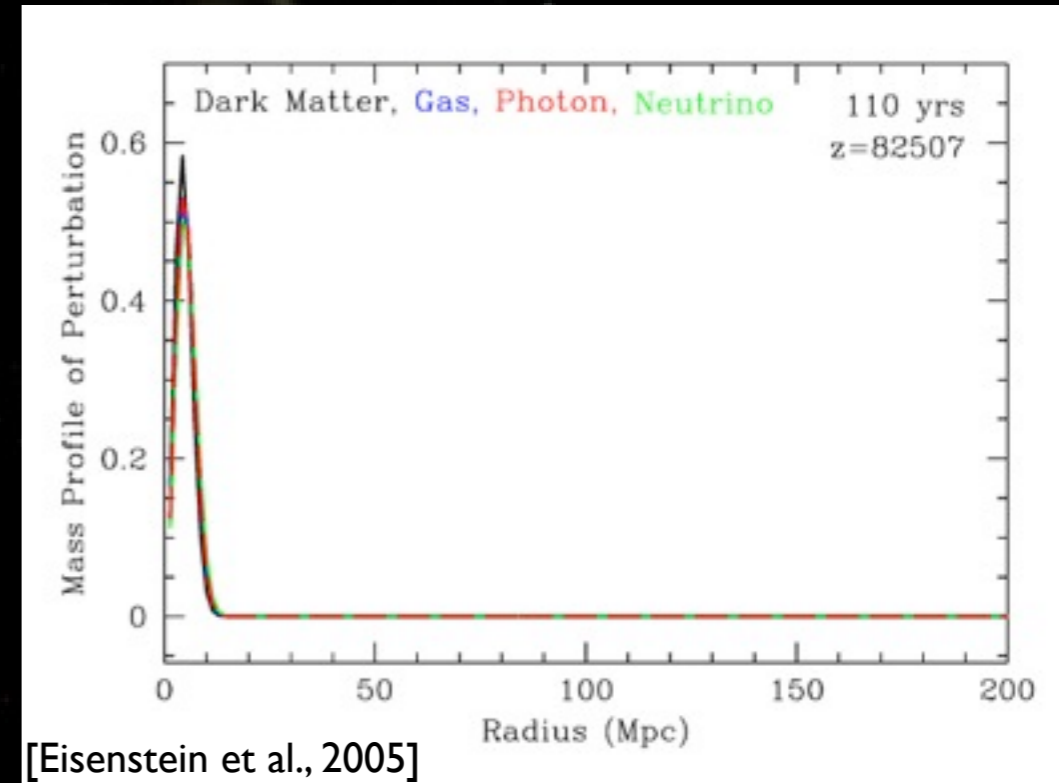


Oscillations acoustiques de baryons

- Univers jeune: ionisé
 - ★ Photons et baryons couplés
 - ★ Propagation d'ondes de pression
- Découplage matière-rayonnement:
Univers neutre
 - ★ Les photons s'échappent (CMB)
 - ★ Baryons: excès à l'horizon sonore (150 Mpc)
 - ★ Matière noire restée au centre
 - ★ Un excès demeure à 150 Mpc

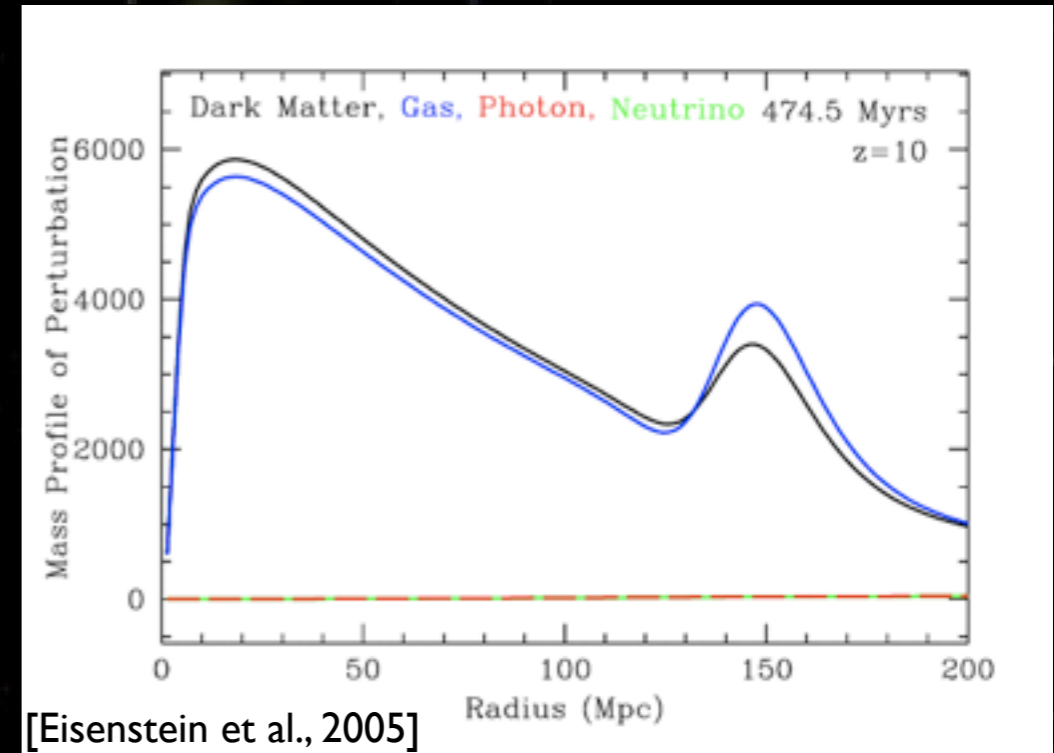
Oscillations acoustiques de baryons

- Univers jeune: ionisé
 - ★ Photons et baryons couplés
 - ★ Propagation d'ondes de pression
- Découplage matière-rayonnement:
Univers neutre
 - ★ Les photons s'échappent (CMB)
 - ★ Baryons: excès à l'horizon sonore (150 Mpc)
 - ★ Matière noire restée au centre
 - ★ Un excès demeure à 150 Mpc



Oscillations acoustiques de baryons

- Univers jeune: ionisé
 - ★ Photons et baryons couplés
 - ★ Propagation d'ondes de pression
- Découplage matière-rayonnement:
Univers neutre
 - ★ Les photons s'échappent (CMB)
 - ★ Baryons: excès à l'horizon sonore (150 Mpc)
 - ★ Matière noire restée au centre
 - ★ Un excès demeure à 150 Mpc

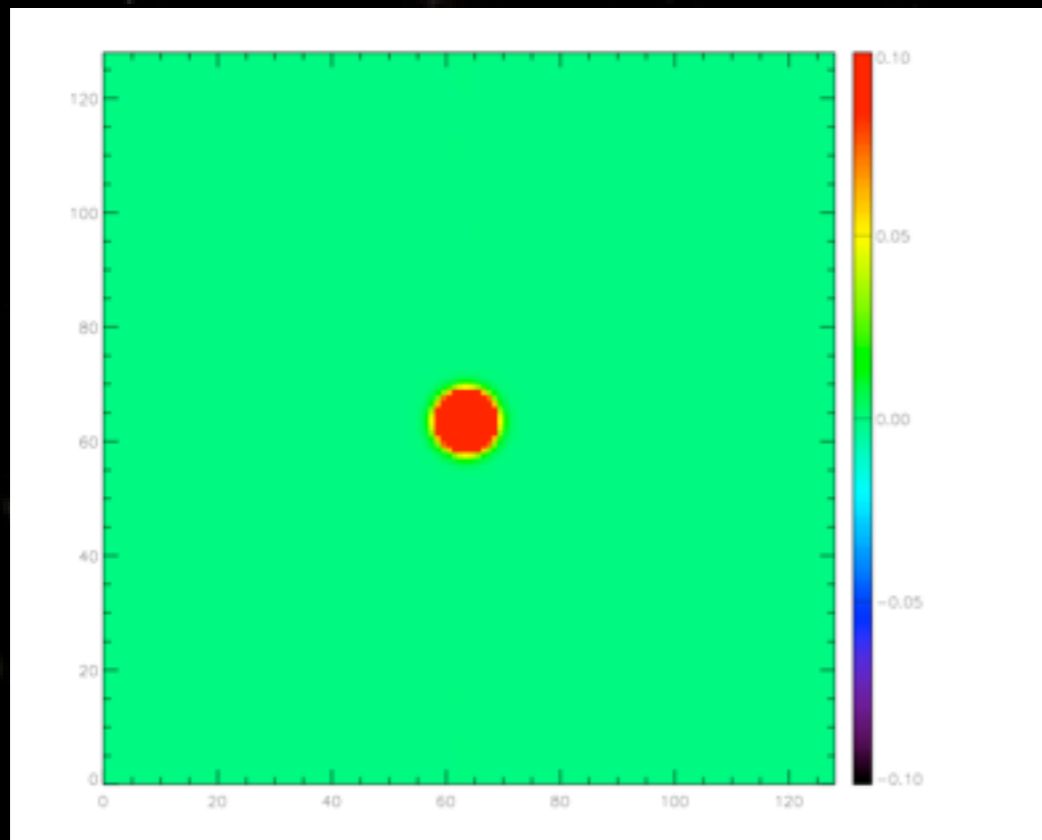
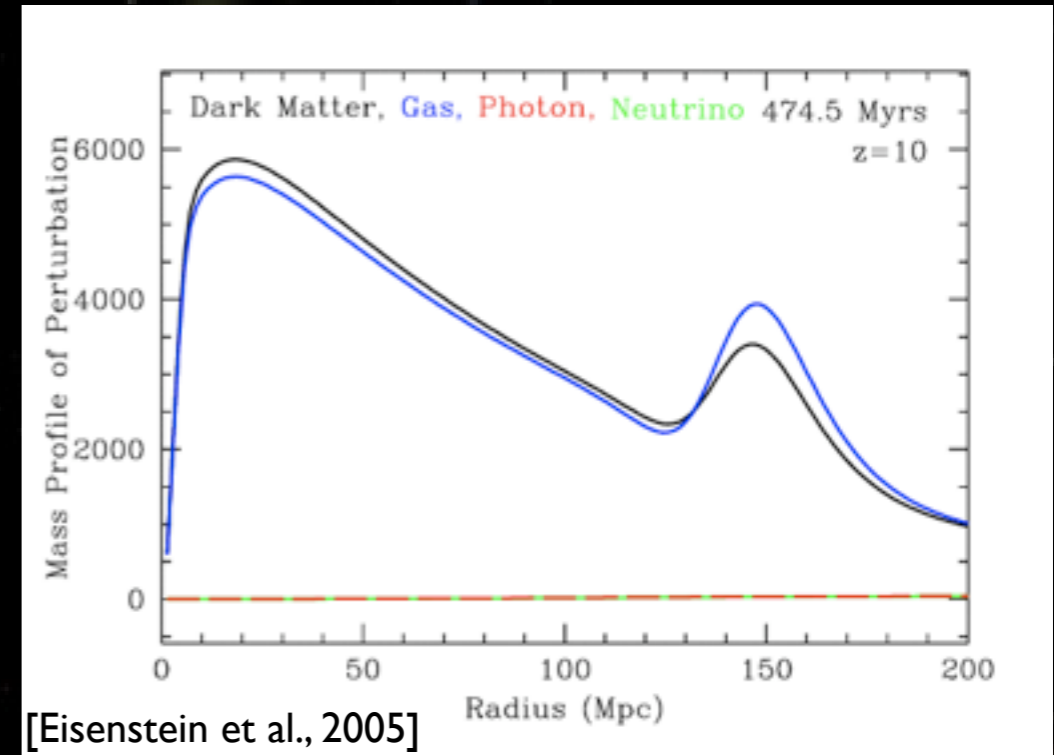


$\xi(r)$

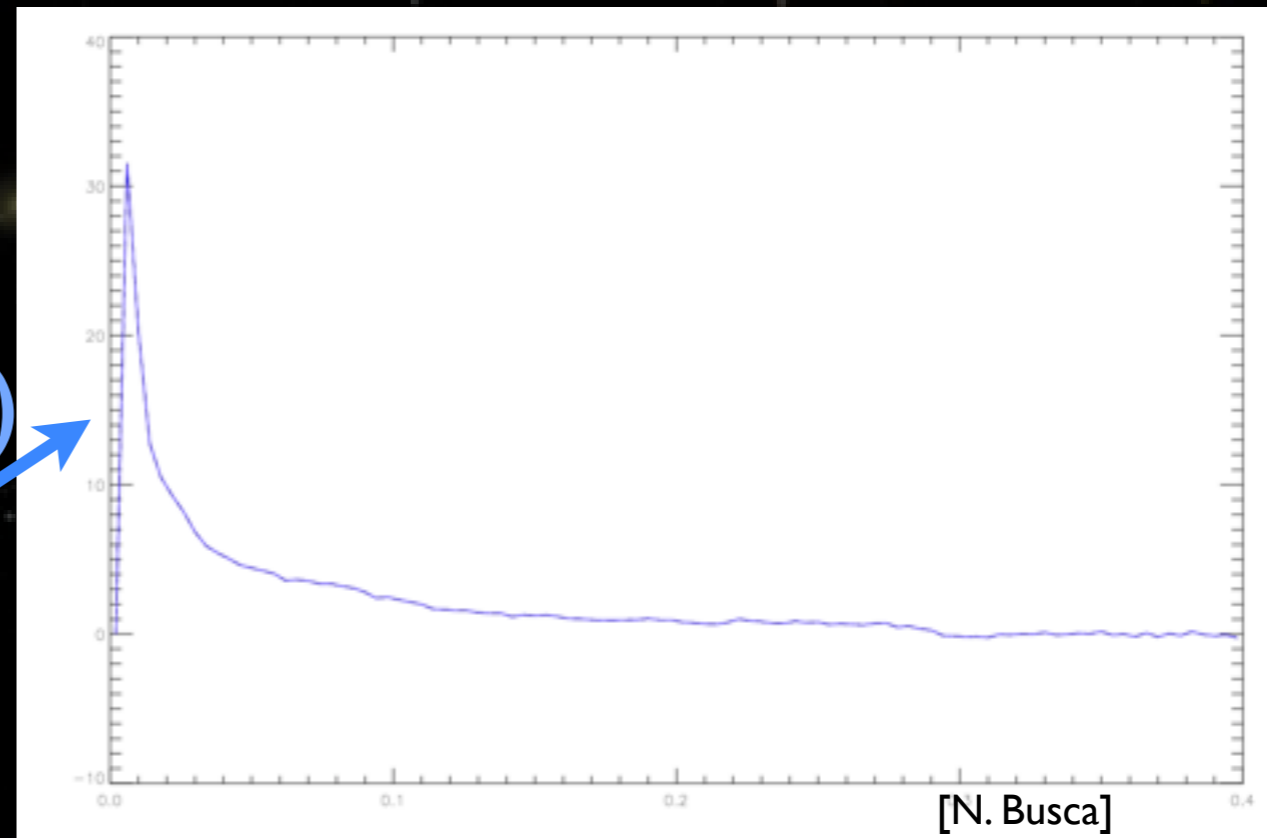
Gauss

Oscillations acoustiques de baryons

- Univers jeune: ionisé
 - ★ Photons et baryons couplés
 - ★ Propagation d'ondes de pression
- Découplage matière-rayonnement:
Univers neutre
 - ★ Les photons s'échappent (CMB)
 - ★ Baryons: excès à l'horizon sonore (150 Mpc)
 - ★ Matière noire restée au centre
 - ★ Un excès demeure à 150 Mpc

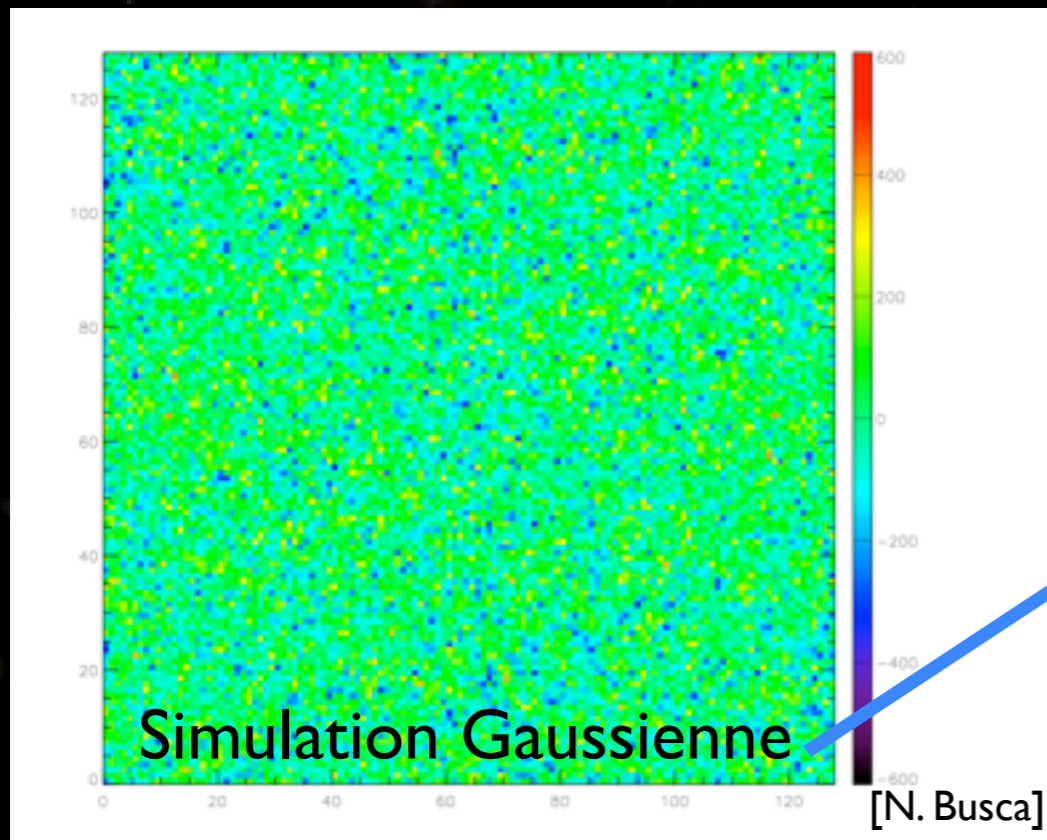
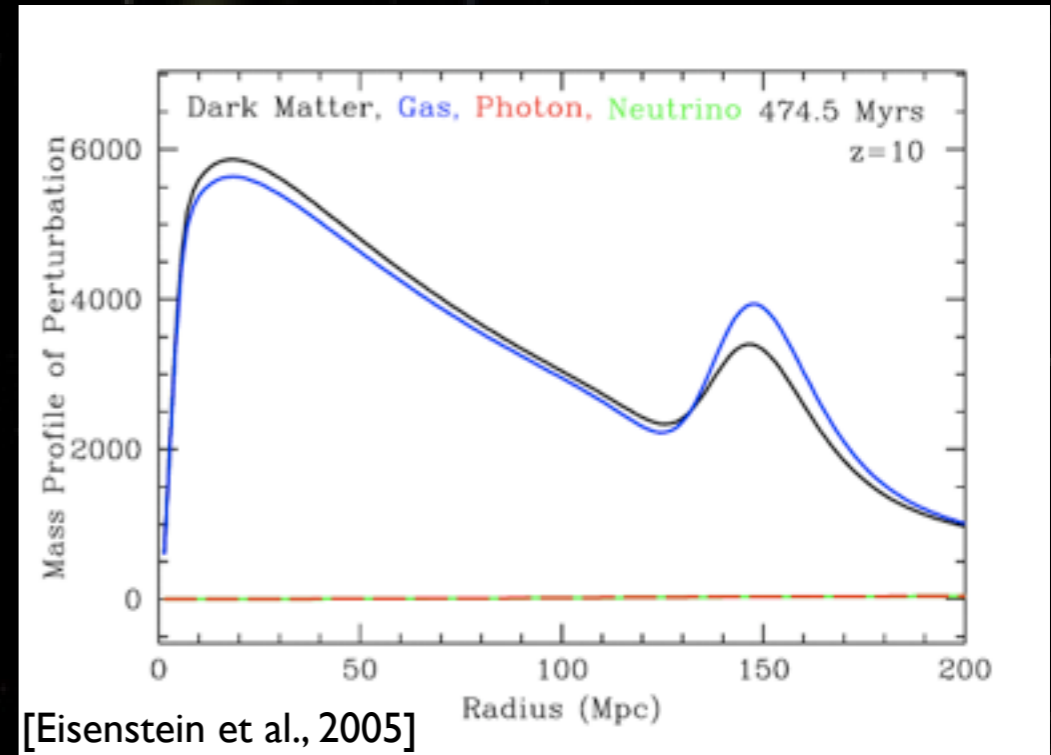


$\xi(r)$

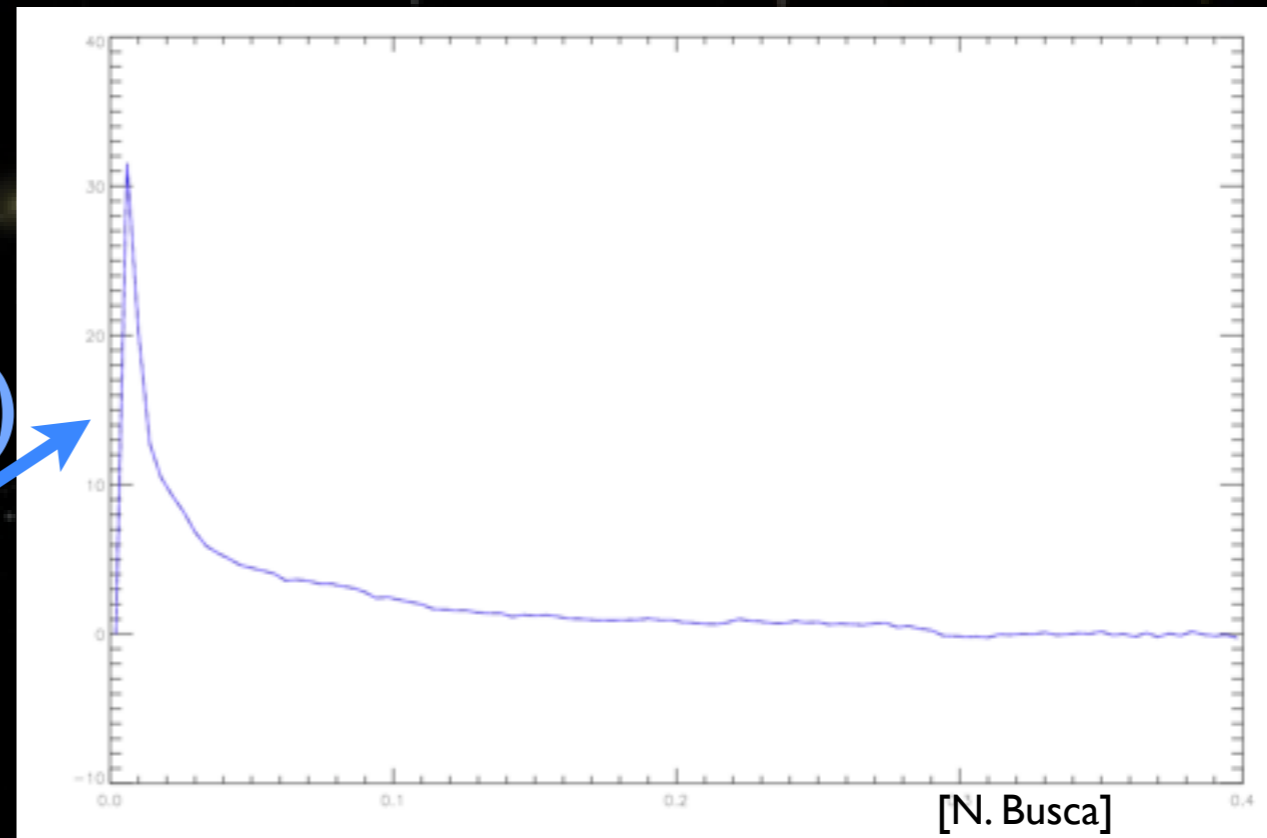


Oscillations acoustiques de baryons

- Univers jeune: ionisé
 - ★ Photons et baryons couplés
 - ★ Propagation d'ondes de pression
- Découplage matière-rayonnement:
Univers neutre
 - ★ Les photons s'échappent (CMB)
 - ★ Baryons: excès à l'horizon sonore (150 Mpc)
 - ★ Matière noire restée au centre
 - ★ Un excès demeure à 150 Mpc

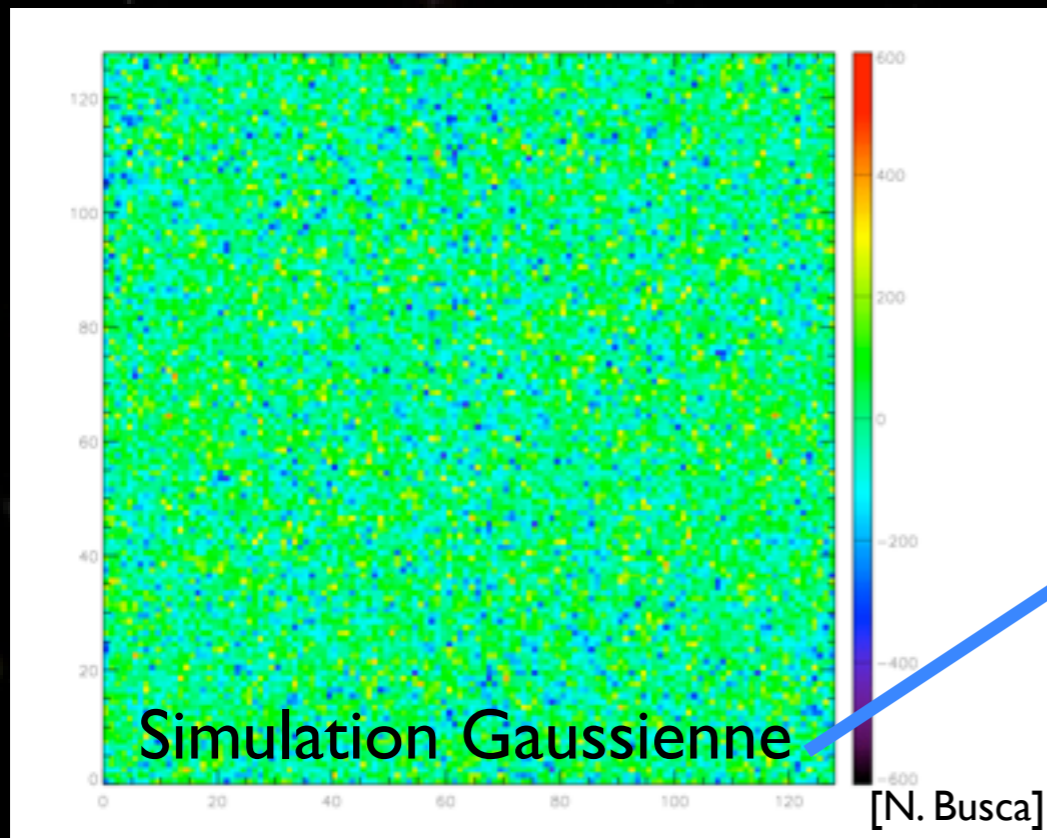
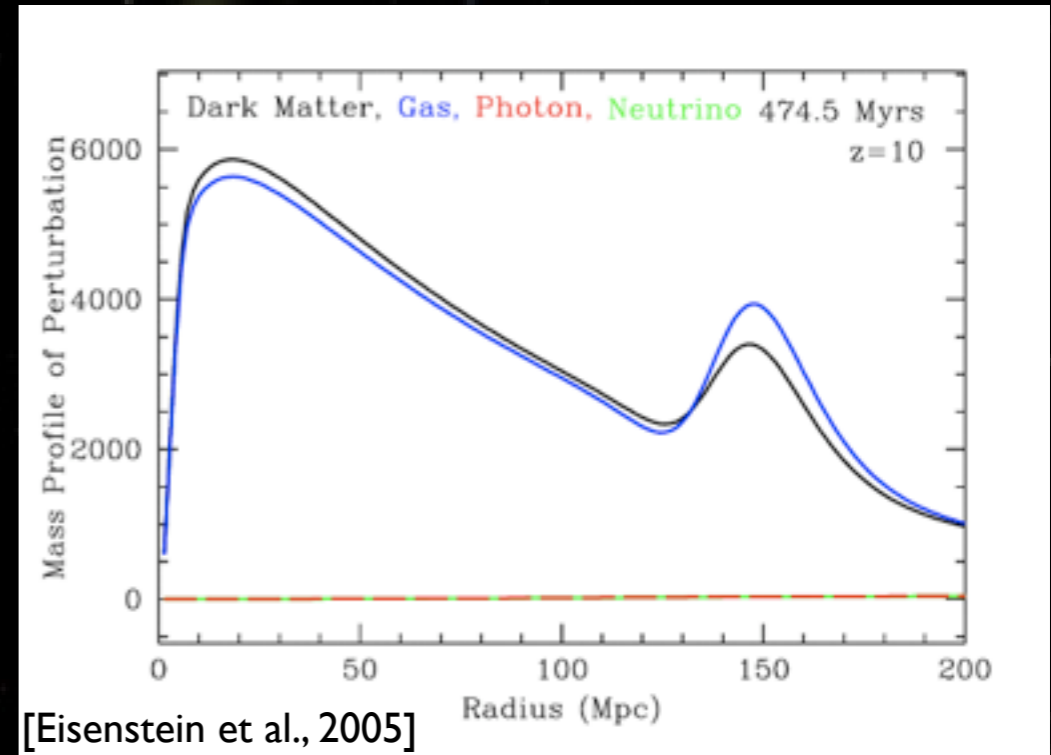


$\xi(r)$

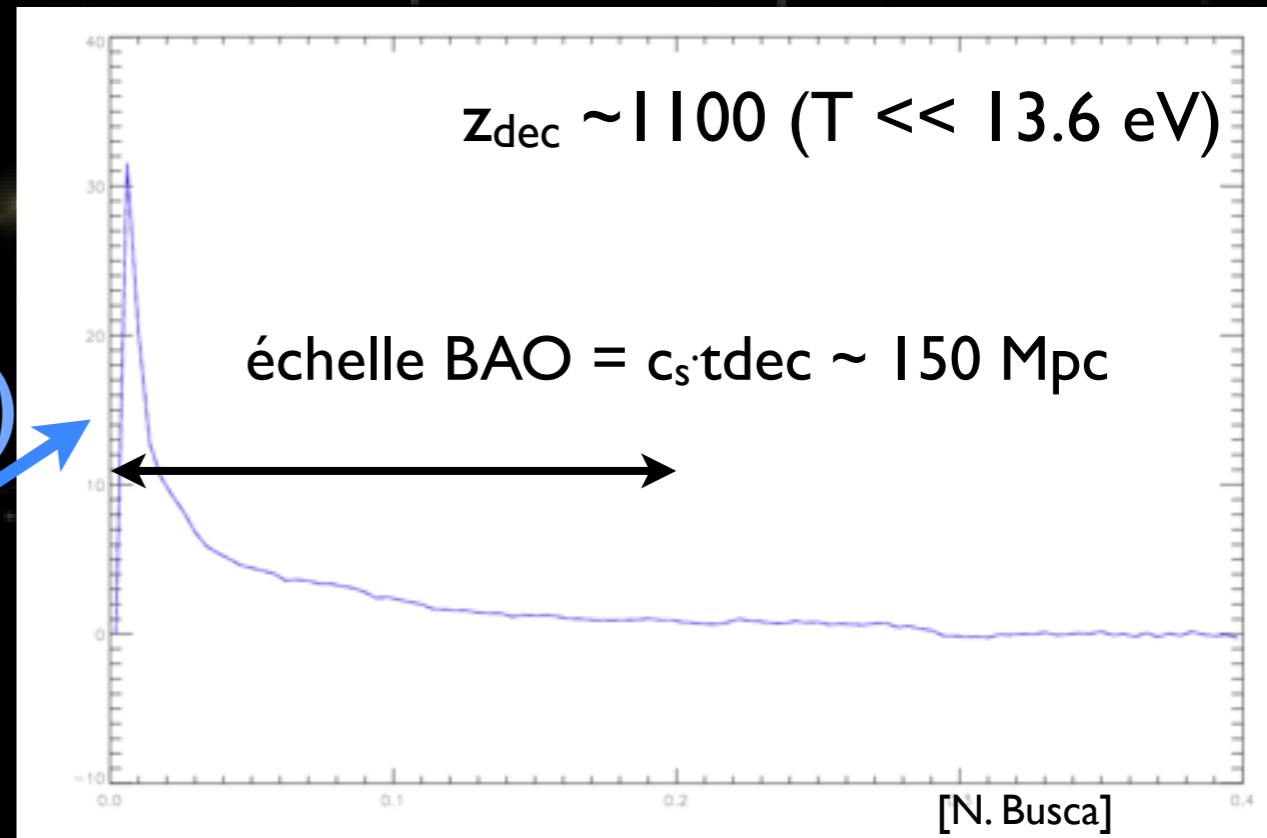


Oscillations acoustiques de baryons

- Univers jeune: ionisé
 - ★ Photons et baryons couplés
 - ★ Propagation d'ondes de pression
- Découplage matière-rayonnement: Univers neutre
 - ★ Les photons s'échappent (CMB)
 - ★ Baryons: excès à l'horizon sonore (150 Mpc)
 - ★ Matière noire restée au centre
 - ★ Un excès demeure à 150 Mpc

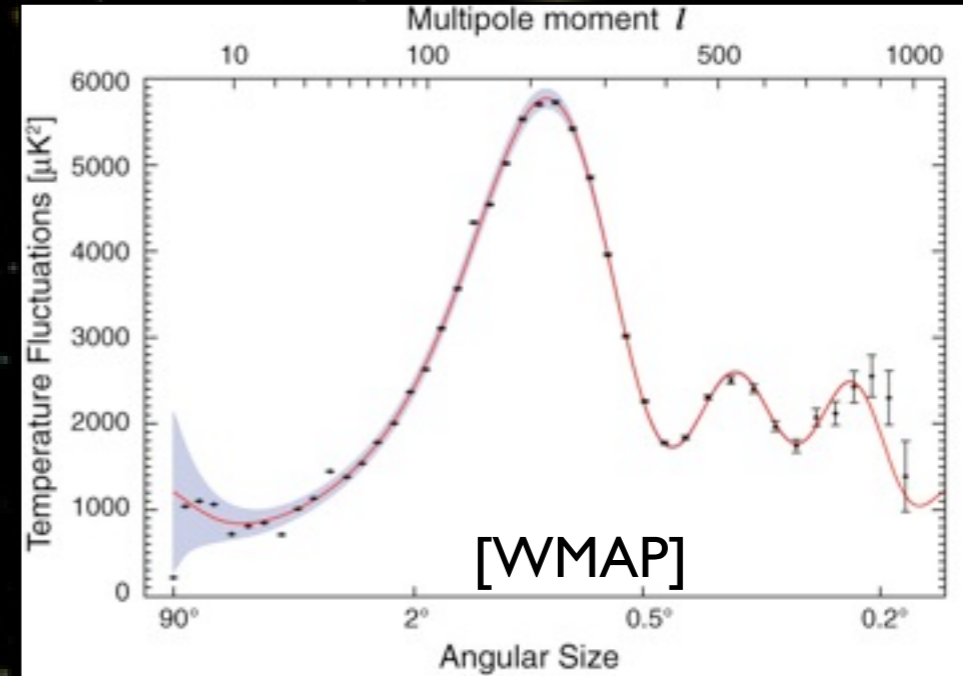
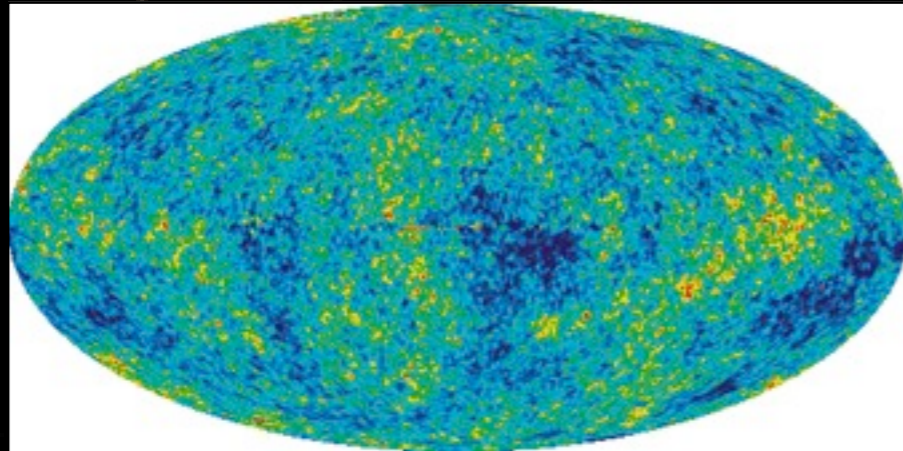


$\xi(r)$

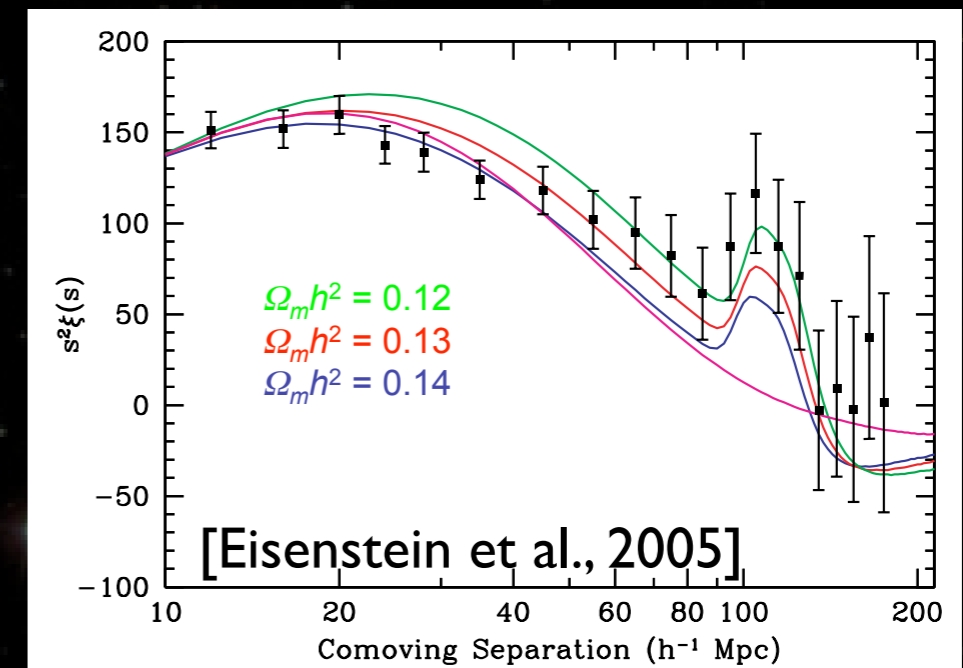
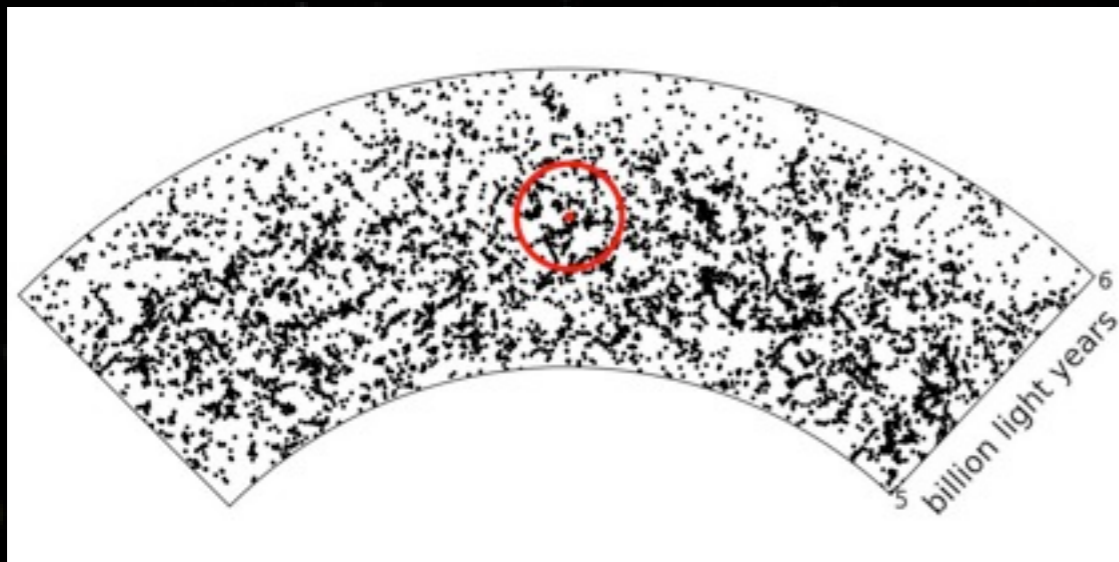


Observations des BAO

- CMB

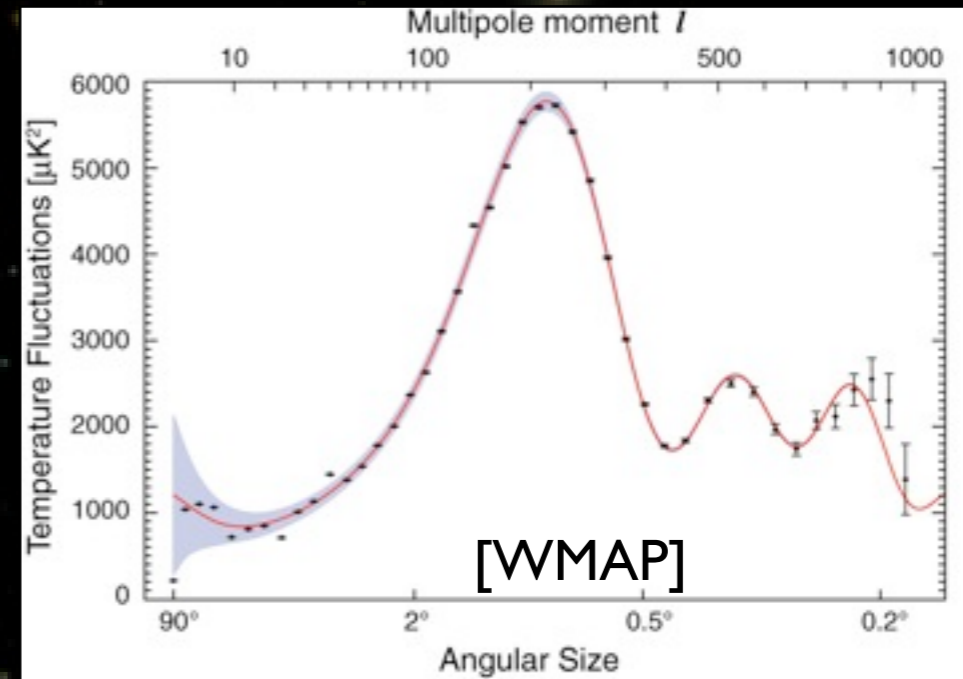
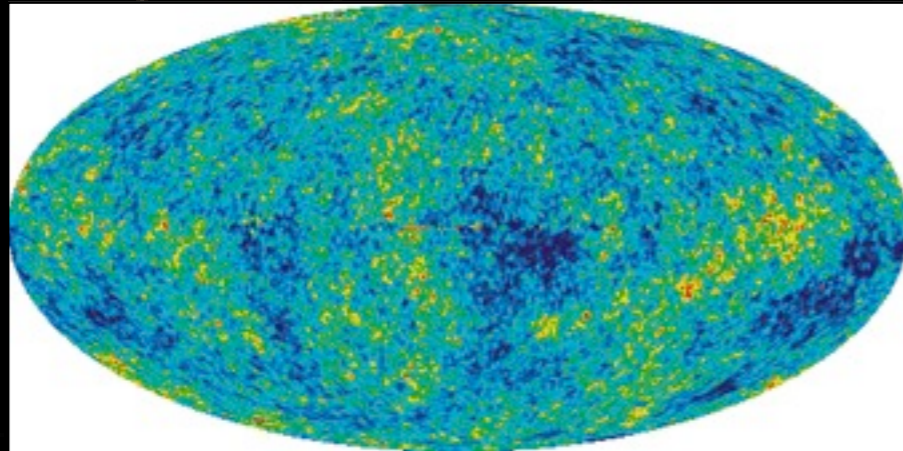


- Galaxies

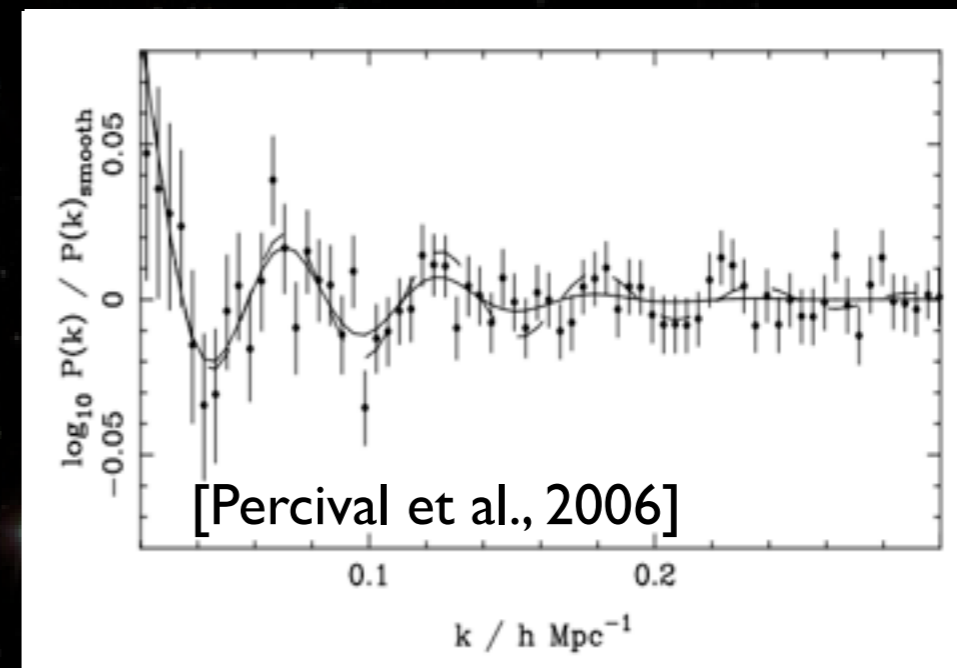
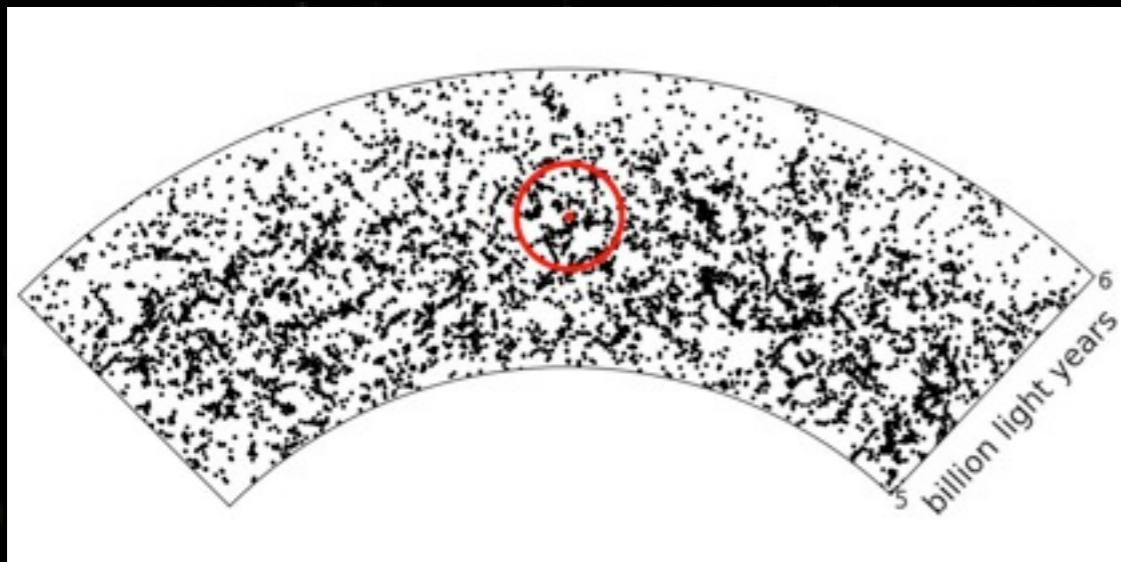


Observations des BAO

- CMB

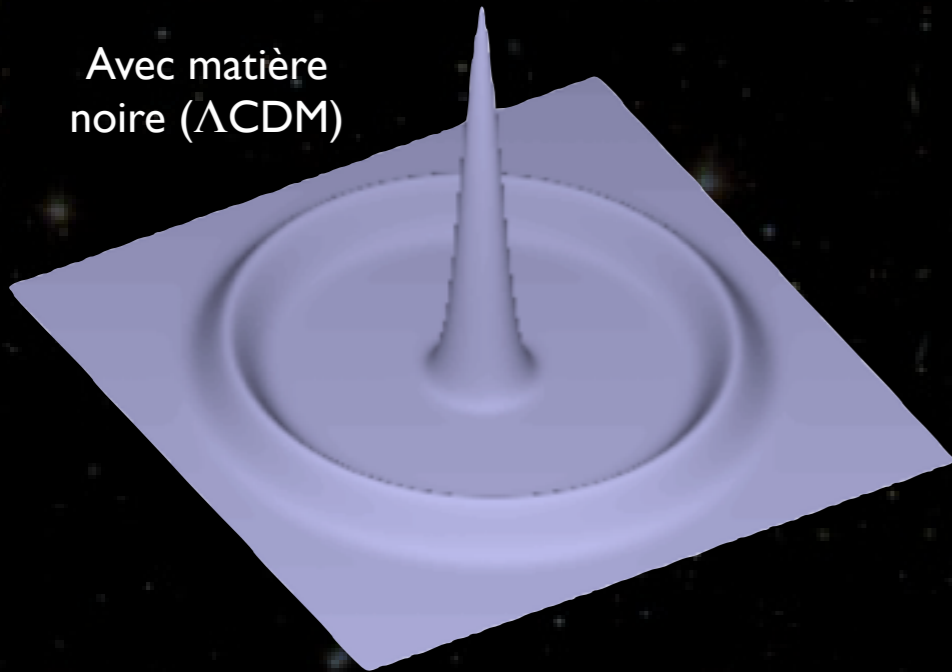


- Galaxies

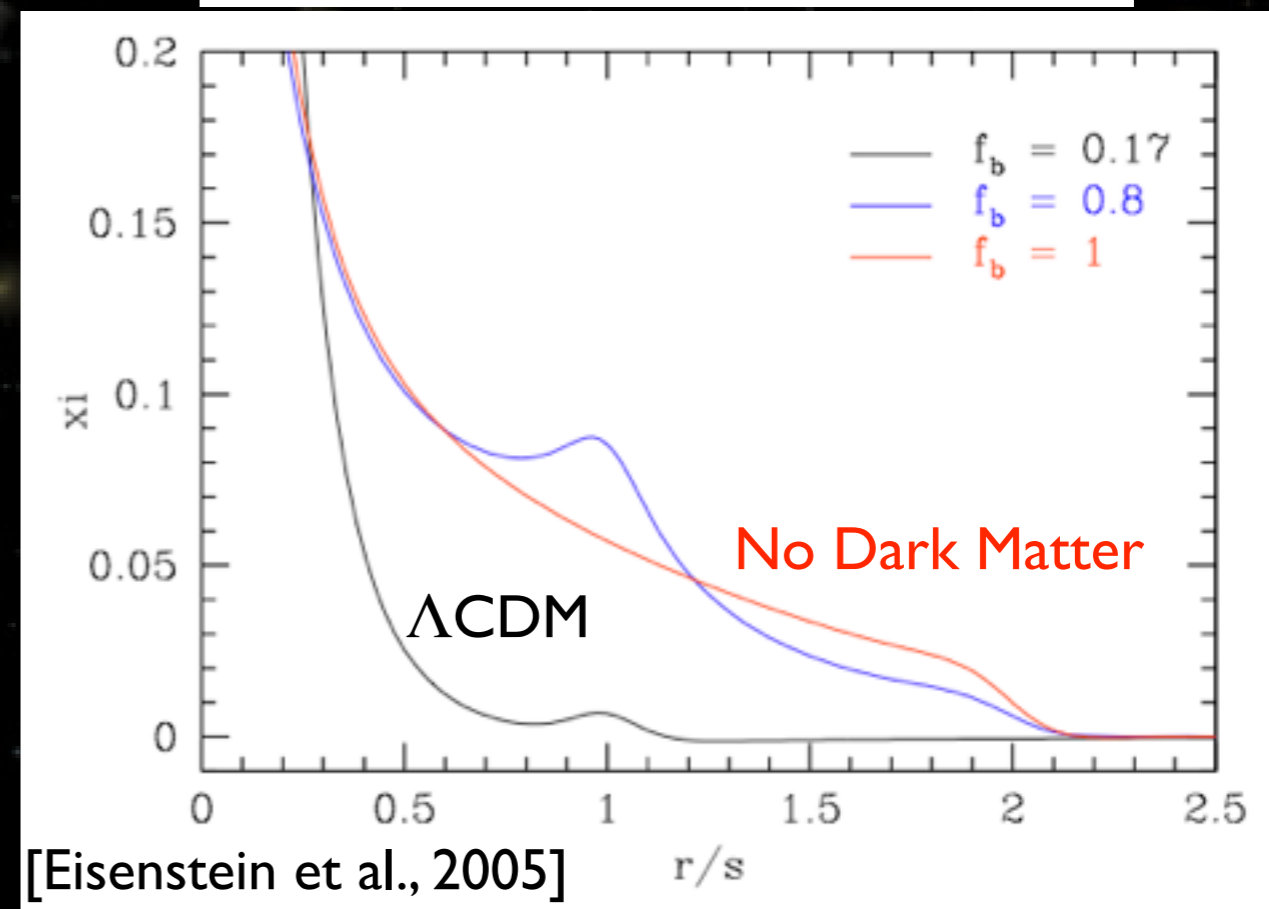
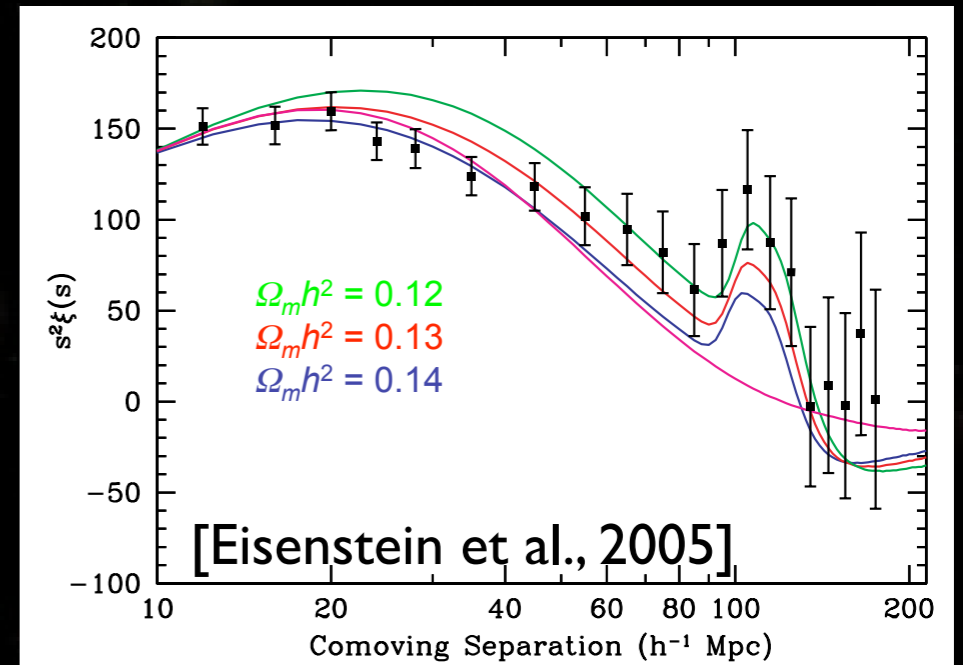
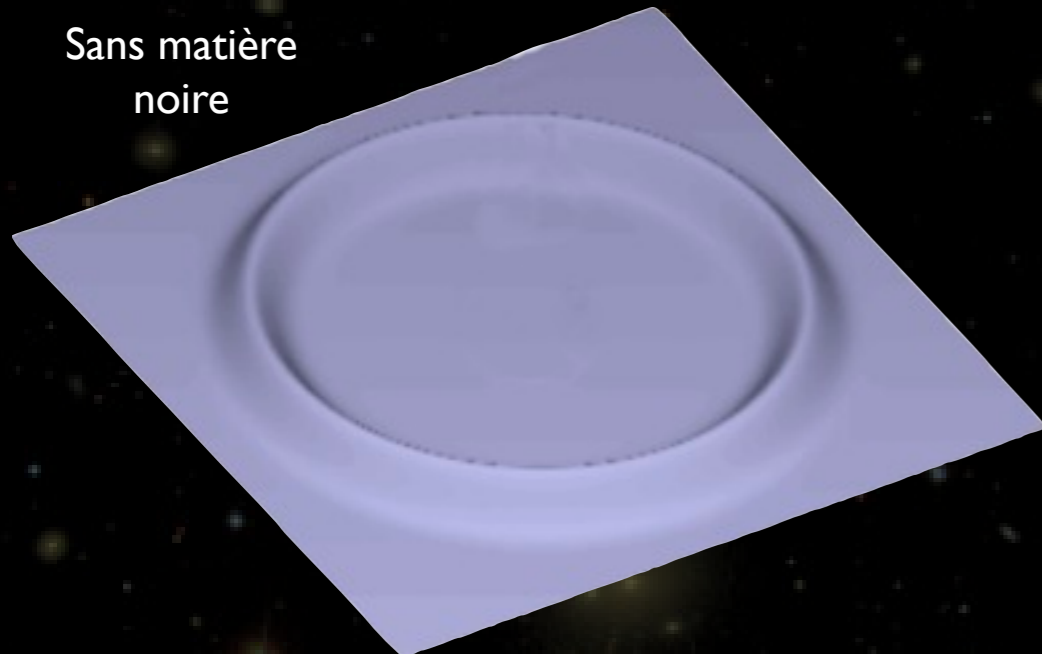


BAO et matière noire

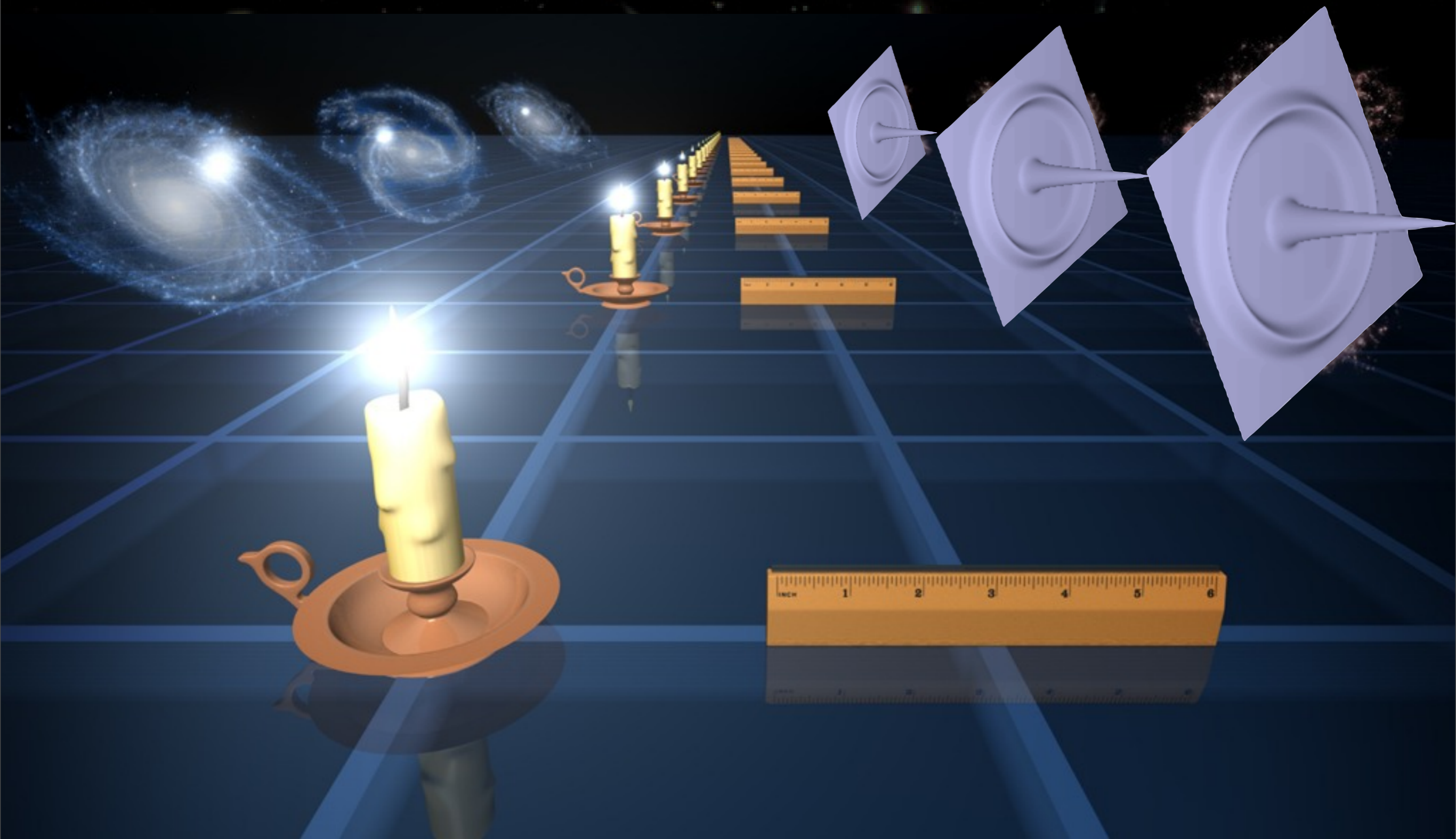
Avec matière
noire (Λ CDM)



Sans matière
noire



BAO: Règle standard



BAO 3D ou isotropisées ?

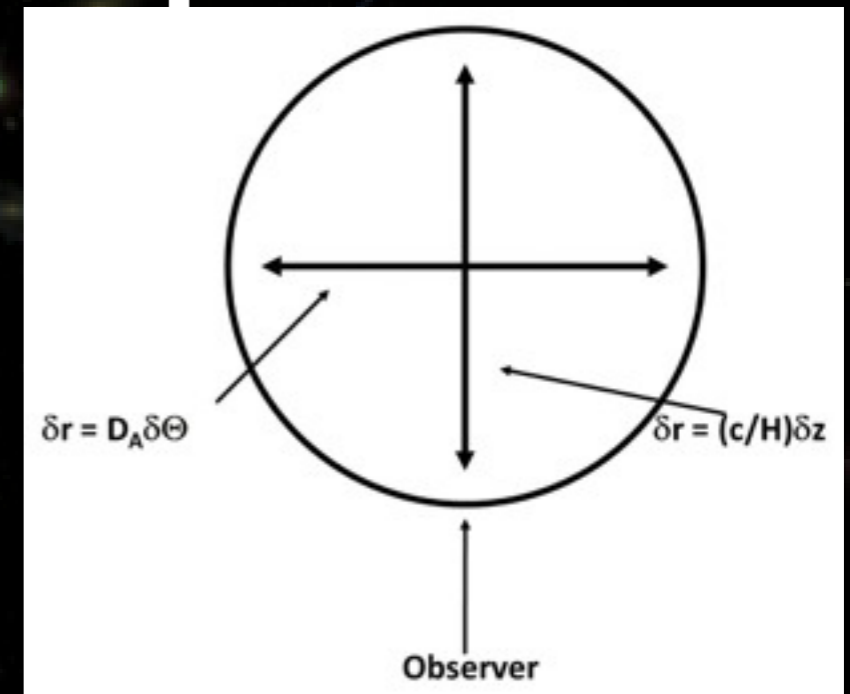
- Rappel:

- ★ Direction transverse:

- Distance angulaire : $D_a(z) \propto \int \frac{dz}{H(z)}$

- ★ Direction radiale:

- épaisseur en z : $\Delta z \propto \frac{1}{H(z)}$



- Mesures 3D:

- ★ r_{\perp} (2D) et r_{\parallel} (1D)

- ★ Informations cosmo complémentaires

- ★ Symétrique dans la bonne cosmo

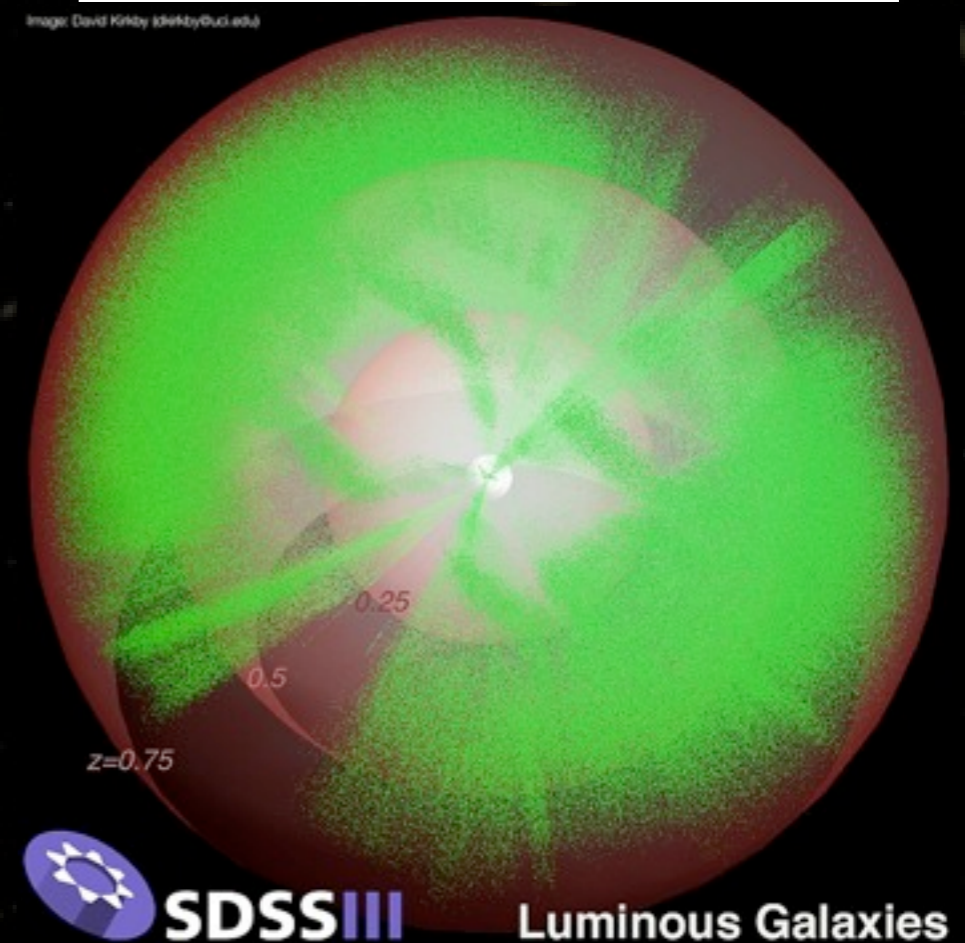
- ★ Test de Alcock-Paczynski (1979)

- Mesures isotropisées

- ★ $\xi(r) = \xi(\sqrt{r_{\parallel}^2 + r_{\perp}^2})$

- ★ sensible à $D_v(z)$

$$D_v(z) = \left[D_a^2(z) c z / H(z) \right]^{1/3}$$



BAO 3D ou isotropisées ?

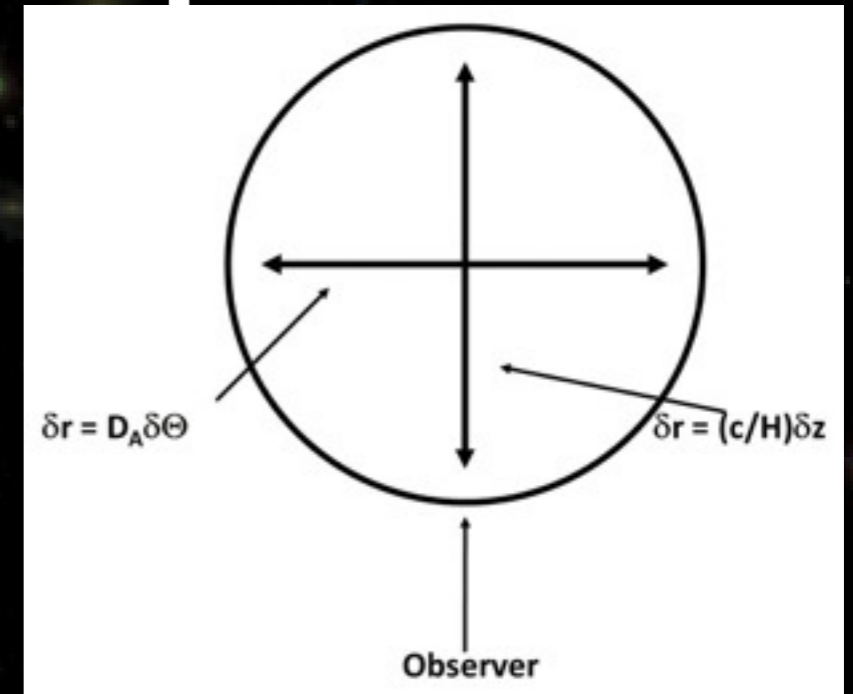
- Rappel:

- ★ Direction transverse:

- Distance angulaire : $D_a(z) \propto \int \frac{dz}{H(z)}$

- ★ Direction radiale:

- épaisseur en z : $\Delta z \propto \frac{1}{H(z)}$



- Mesures 3D:

- ★ r_{\perp} (2D) et r_{\parallel} (1D)

- ★ Informations cosmo complémentaires

- ★ Symétrique dans la bonne cosmo

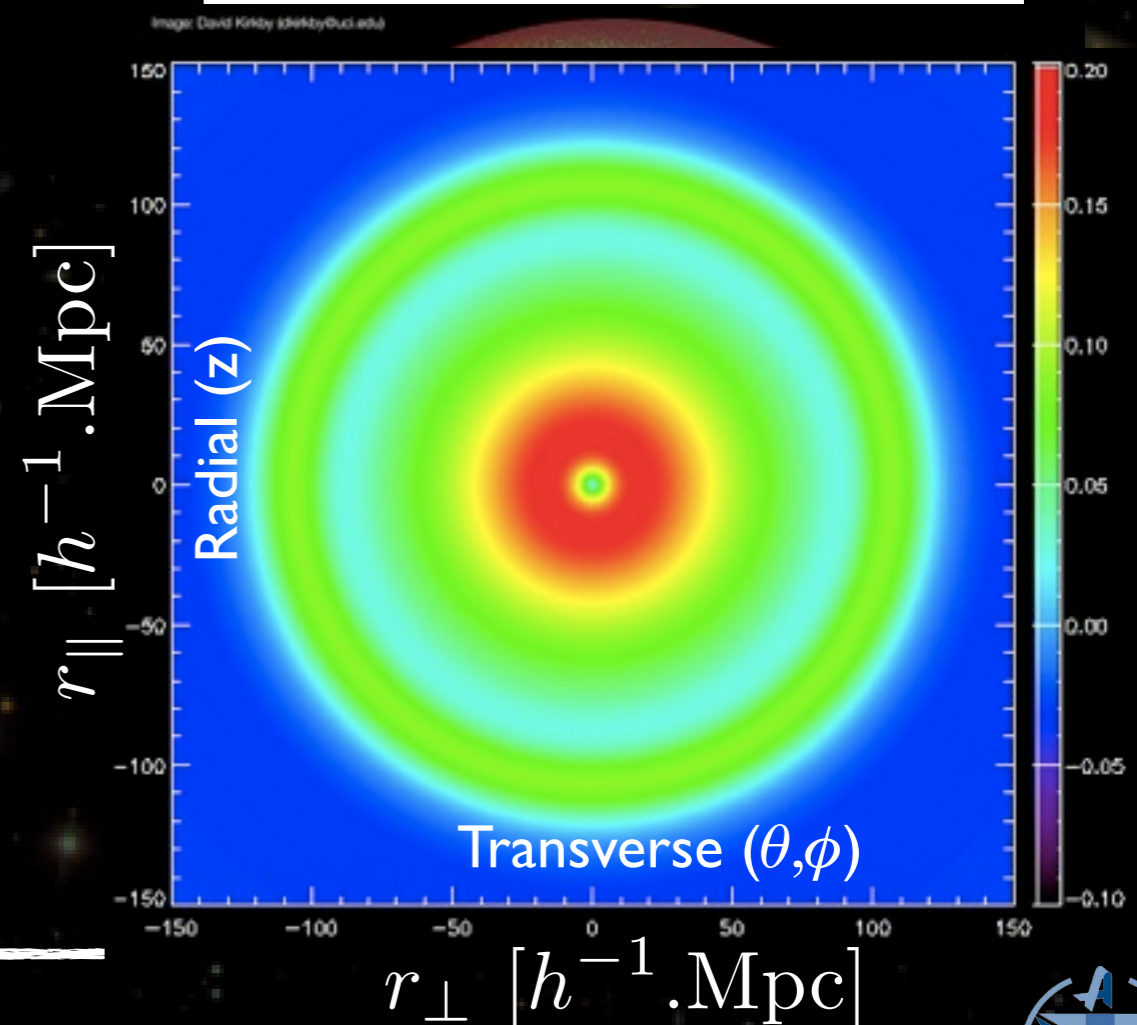
- ★ Test de Alcock-Paczynski (1979)

- Mesures isotropisées

- ★ $\xi(r) = \xi(\sqrt{r_{\parallel}^2 + r_{\perp}^2})$

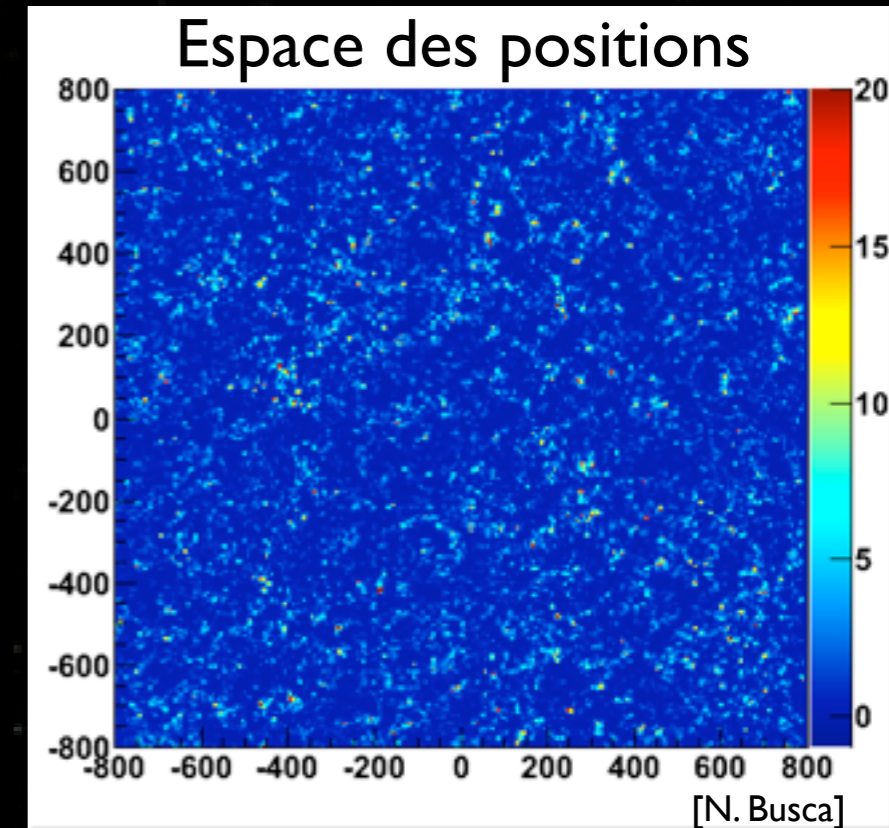
- ★ sensible à $D_v(z)$

$$D_v(z) = \left[D_a^2(z) c z / H(z) \right]^{1/3}$$



BAO dans le «vrai monde»

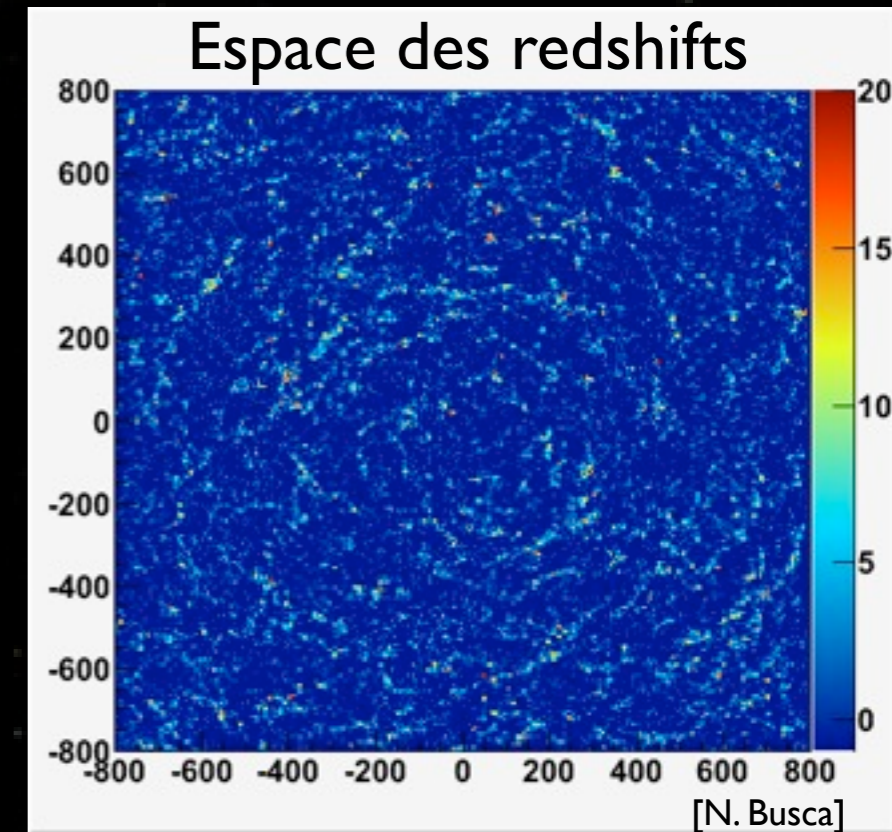
- Redshift space distortions
 - ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
 - ★ On mesure (θ, ϕ, z)
 - ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
- ★ On mesure (θ, ϕ, z)
- ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies



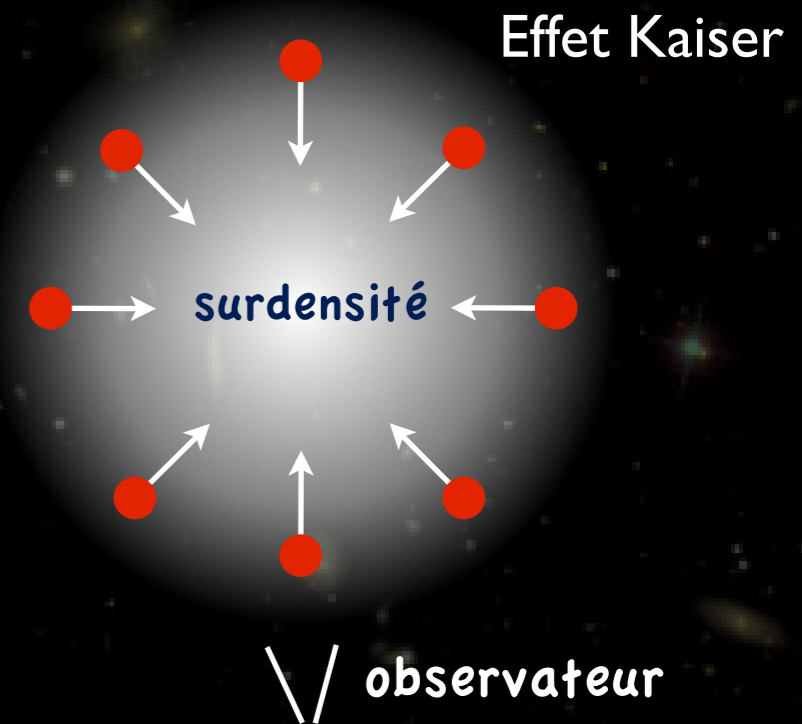
BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions
 - ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
 - ★ On mesure (θ, ϕ, z)
 - ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies

BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

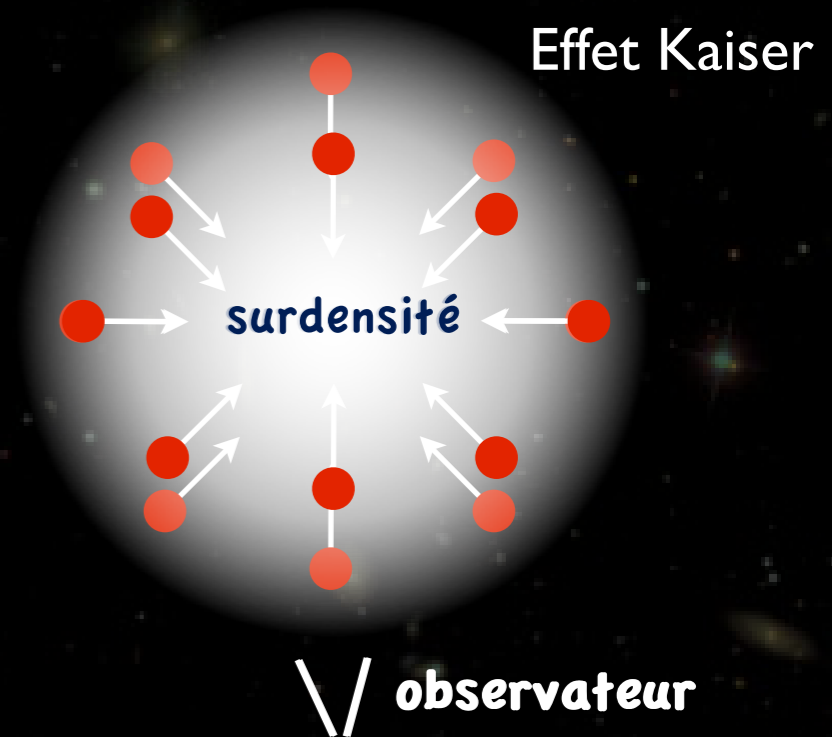
- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
- ★ On mesure (θ, ϕ, z)
- ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

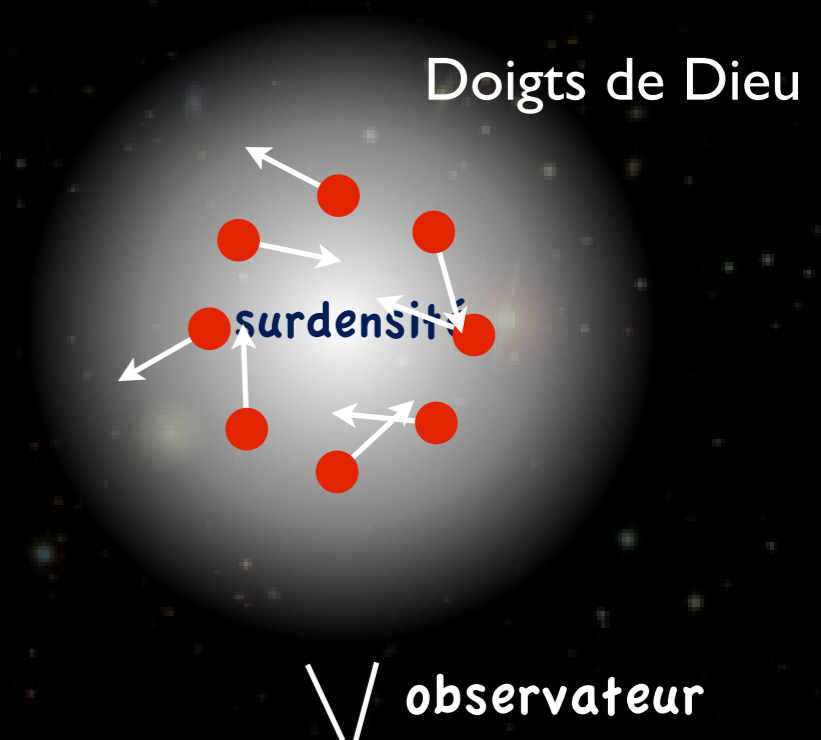
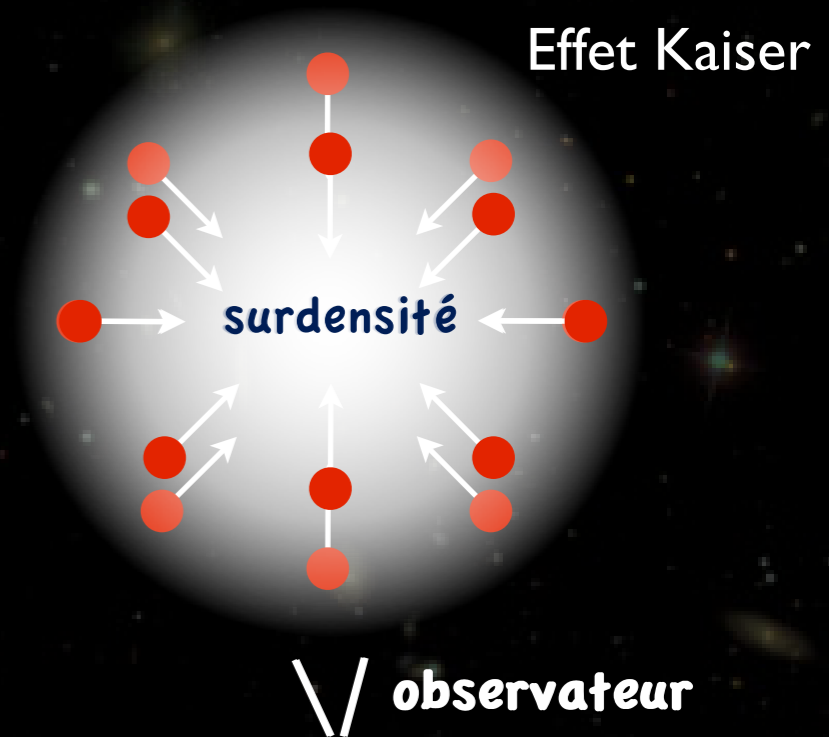
- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
- ★ On mesure (θ, ϕ, z)
- ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

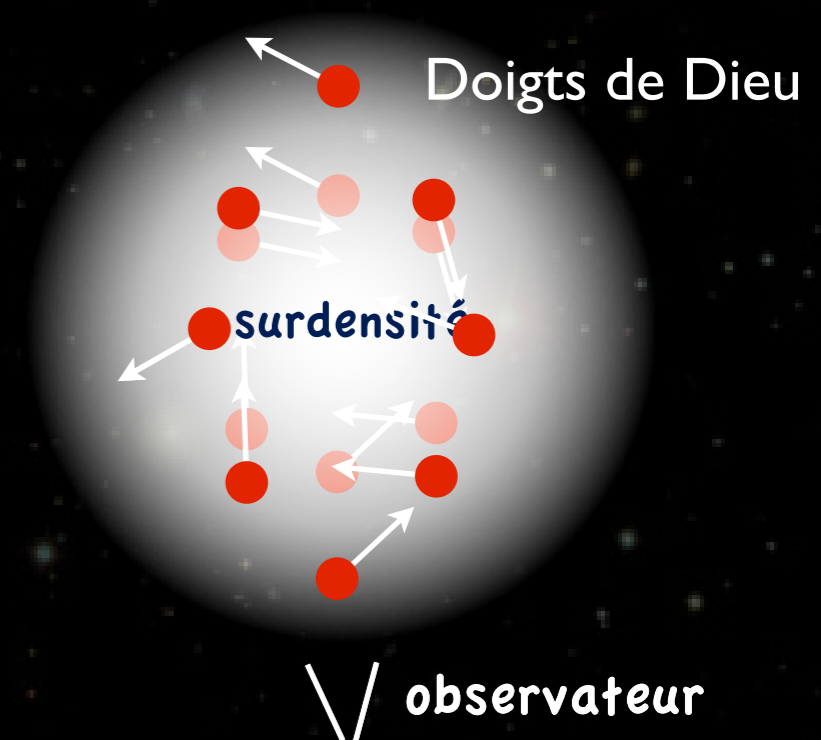
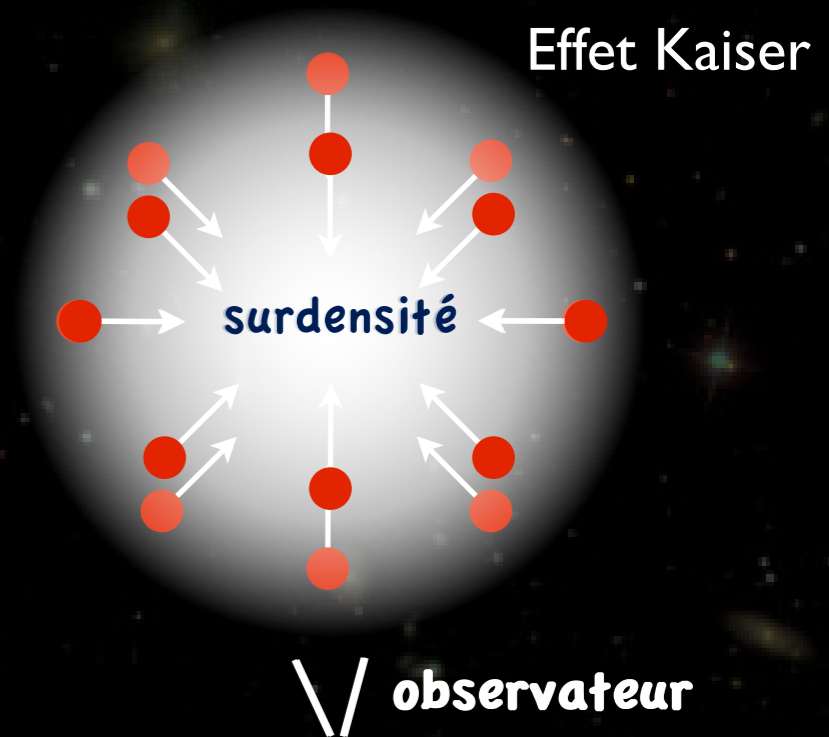
- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
- ★ On mesure (θ, ϕ, z)
- ★ z est affecté de distorsions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

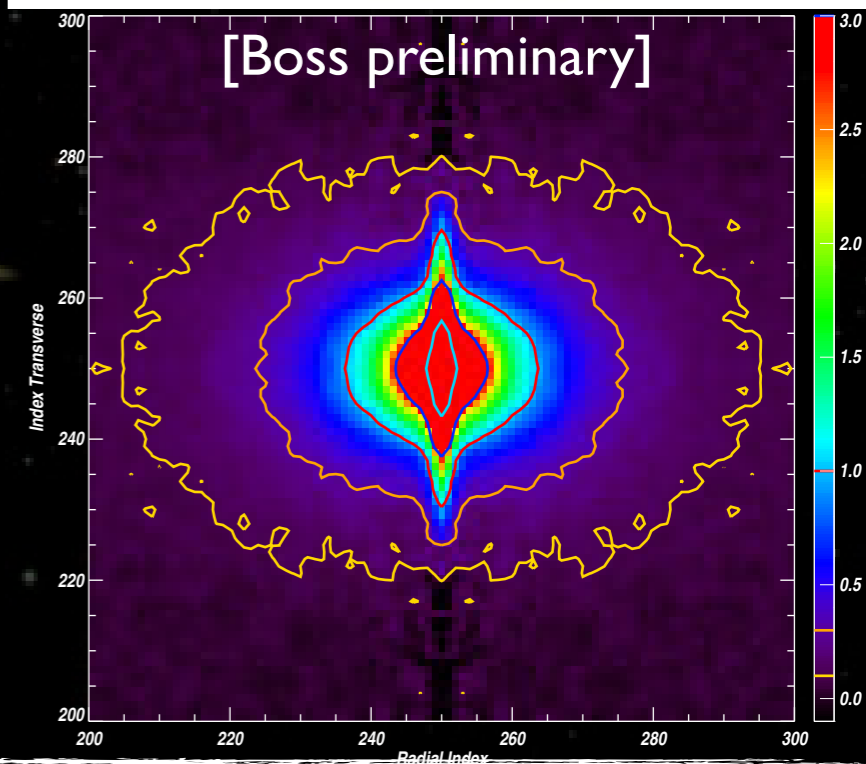
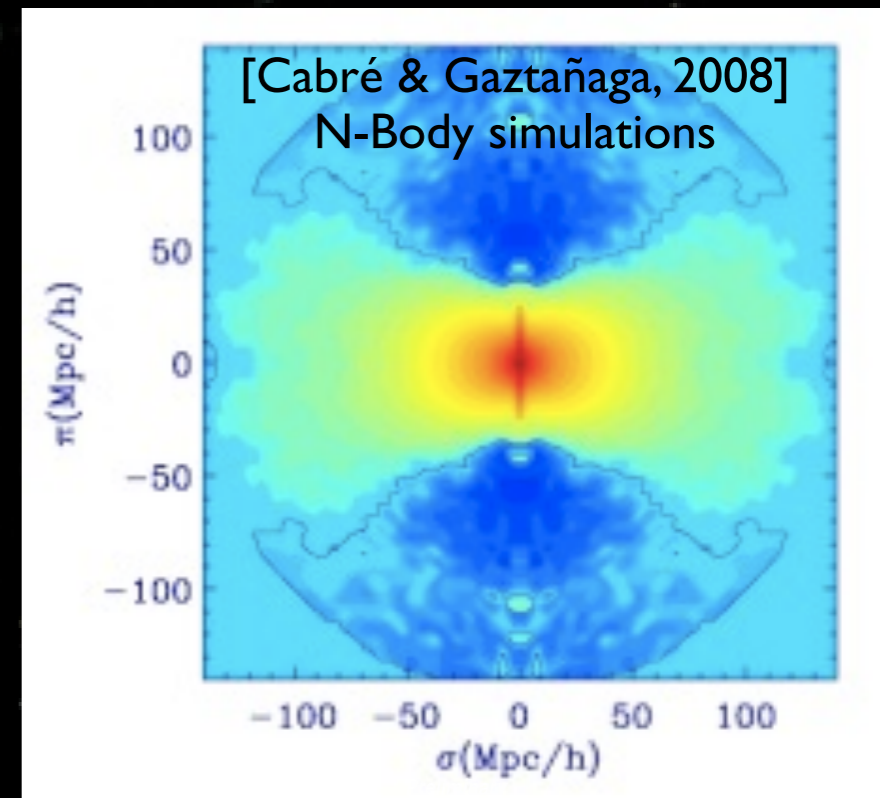
- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
- ★ On mesure (θ, ϕ, z)
- ★ z est affecté de distorsions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies
- ★ On mesure (θ, ϕ, z)
- ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$
 - Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
 - Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies

- ★ On mesure (θ, ϕ, z)

- ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$

- Effet Kaiser (grandes échelles):

- chute des galaxies dans les potentiels de DM

- Augmente le rapport S/N du clustering

- Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):

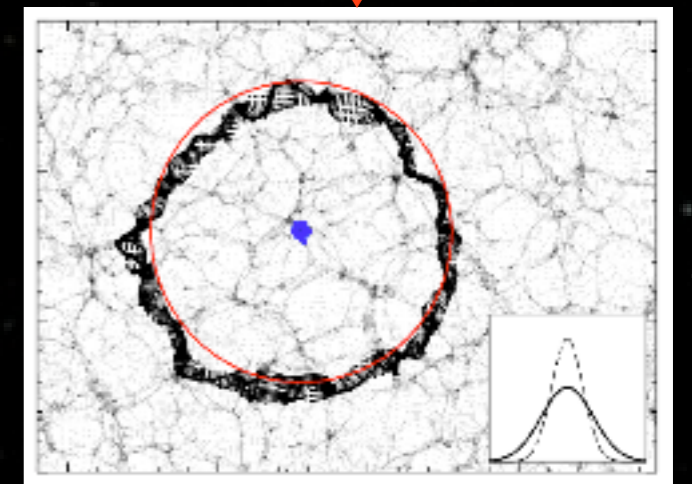
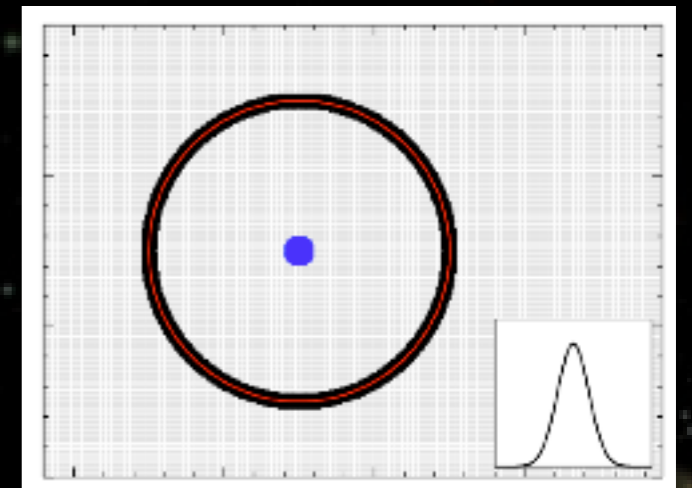
- Vitesses aléatoires des galaxies

- ★ Non linéarités:

- effondrement gravitationnel non linéaire: lisse les structures aux petites échelles et à bas z

- ★ Tout cela complique l'analyse...

Non linéarités:
[Padmanabhan et al., 2012]



BAO dans le «vrai monde»

- Redshift space distortions

- ★ On ne mesure pas les positions des galaxies

- ★ On mesure (θ, ϕ, z)

- ★ z est affecté de distortions: $z_{\text{mes}} = z_{\text{vrai}} + z_{\text{pec}}$

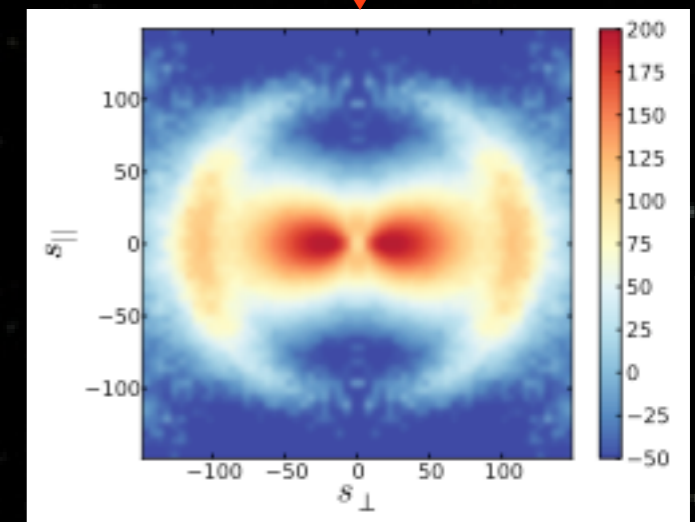
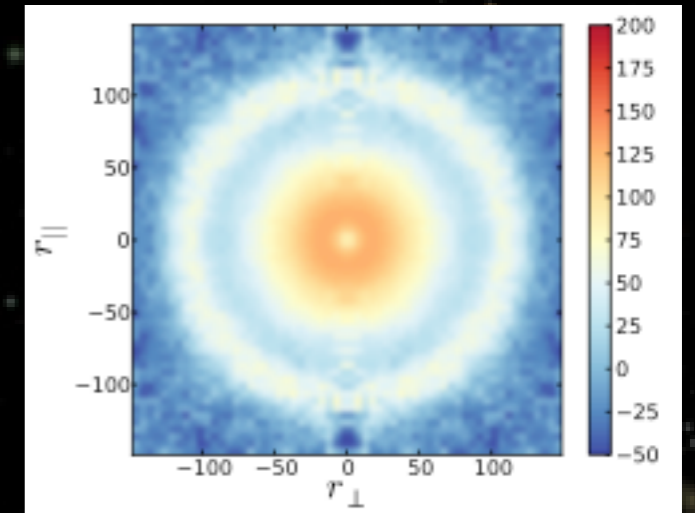
- Effet Kaiser (grandes échelles):
 - chute des galaxies dans les potentiels de DM
 - Augmente le rapport S/N du clustering
- Doigts de Dieu (amas virialisés: petites échelles):
 - Vitesses aléatoires des galaxies

- ★ Non linéarités:

- effondrement gravitationnel non linéaire: lisse les structures aux petites échelles et à bas z

- ★ Tout cela complique l'analyse...

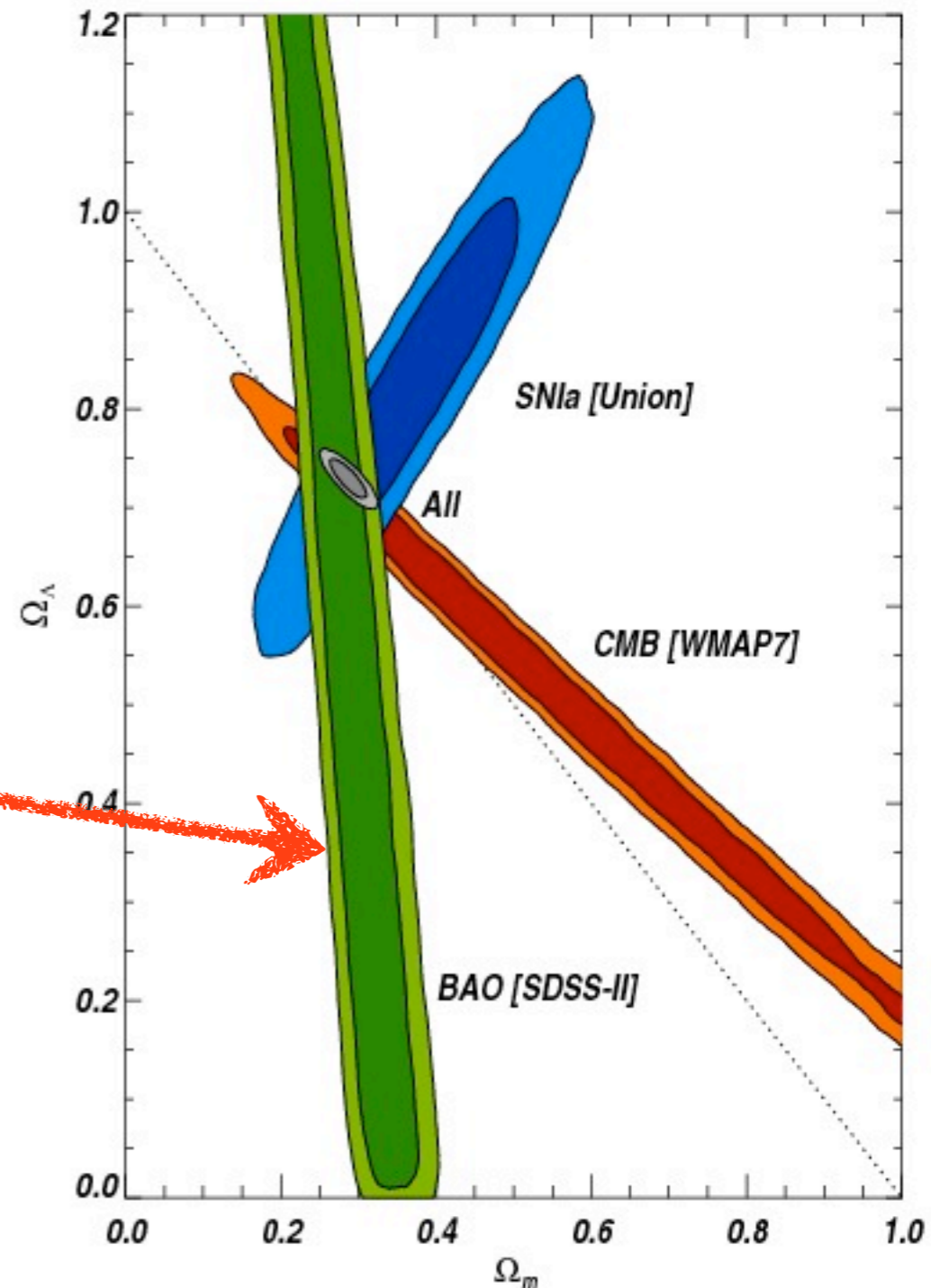
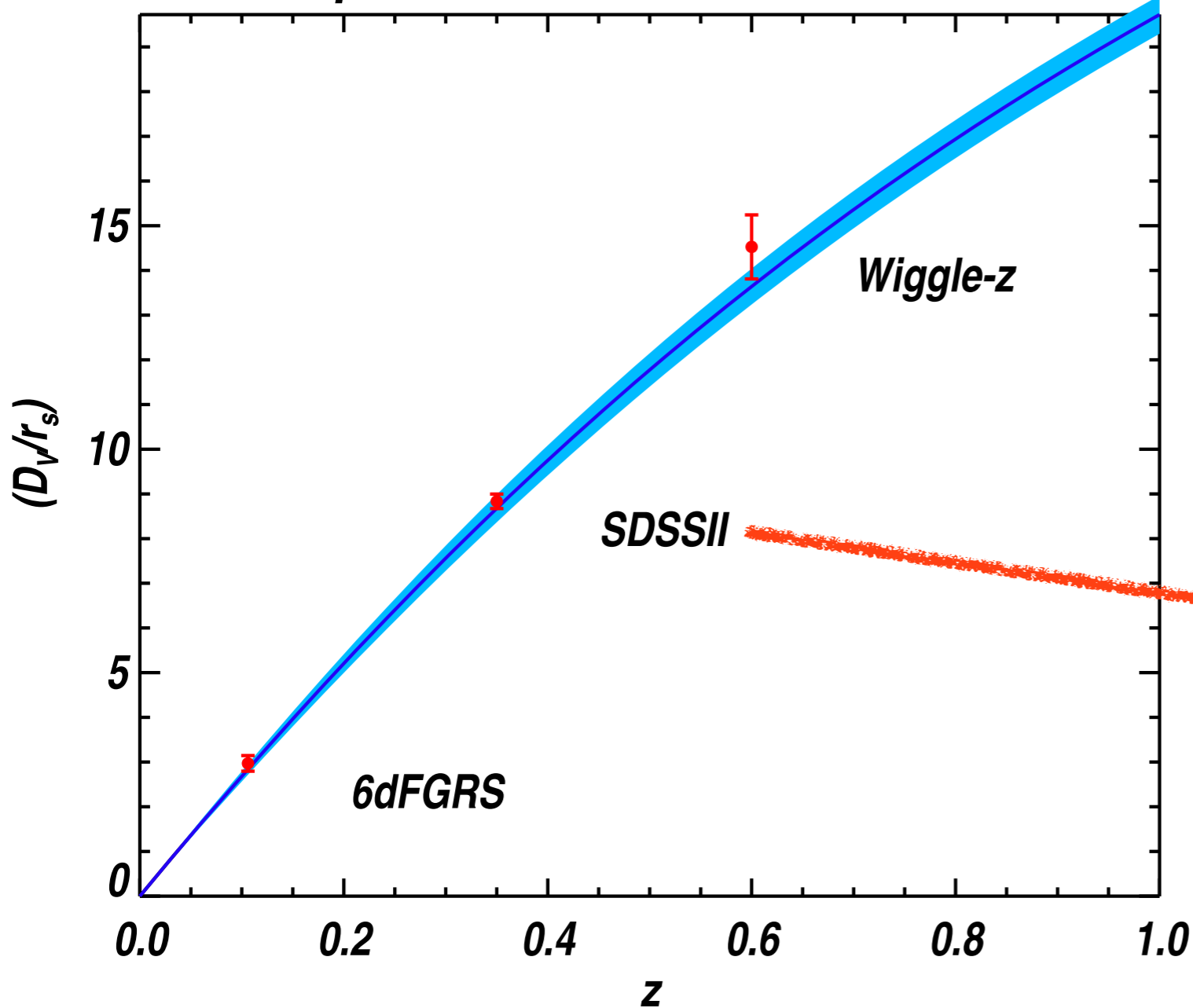
Non linéarités:
[Padmanabhan et al., 2012]



Non linéarités + RSD

Diagramme de Hubble BAO

Comparison with WMAP Flat Λ CDM

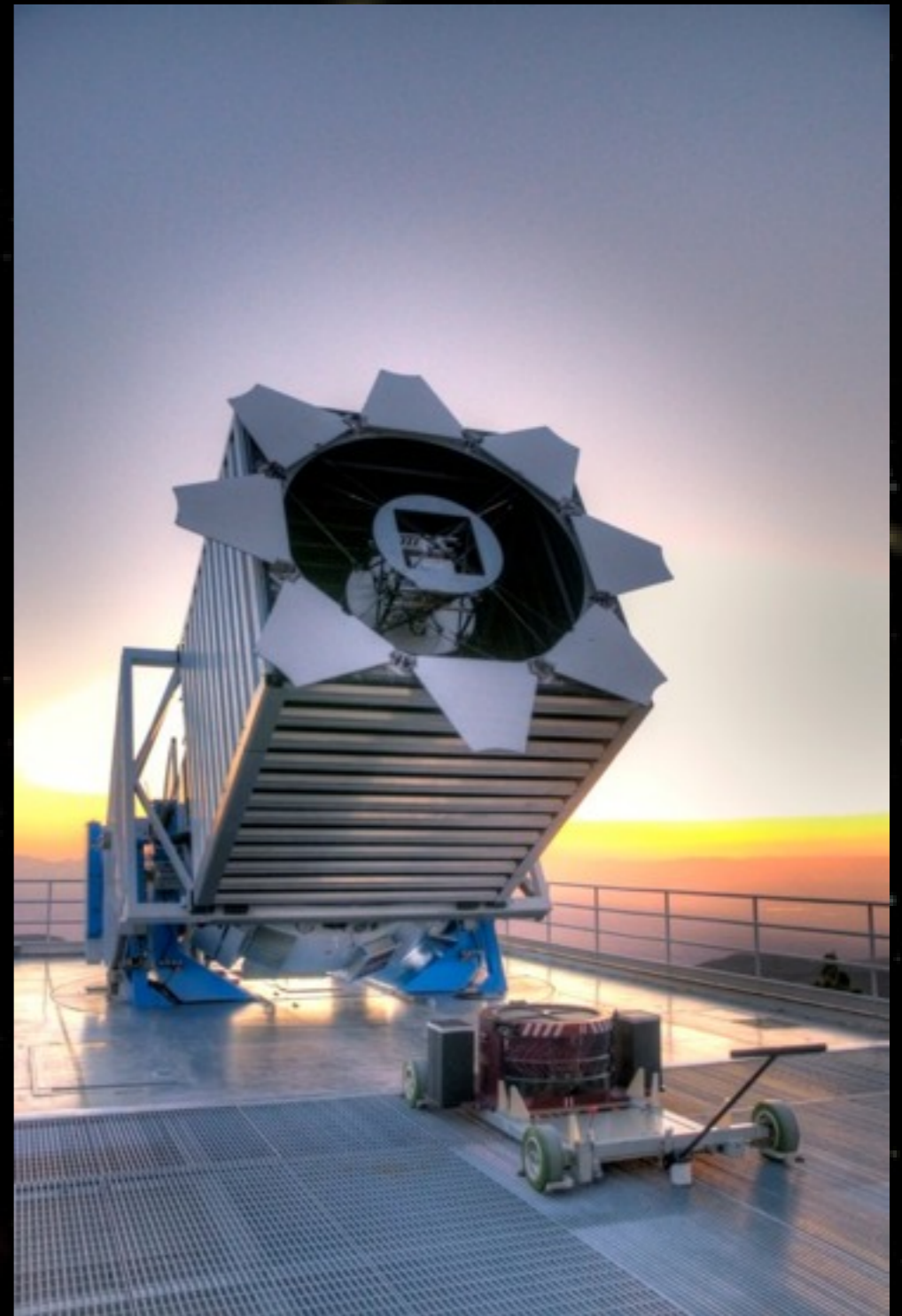


Programme

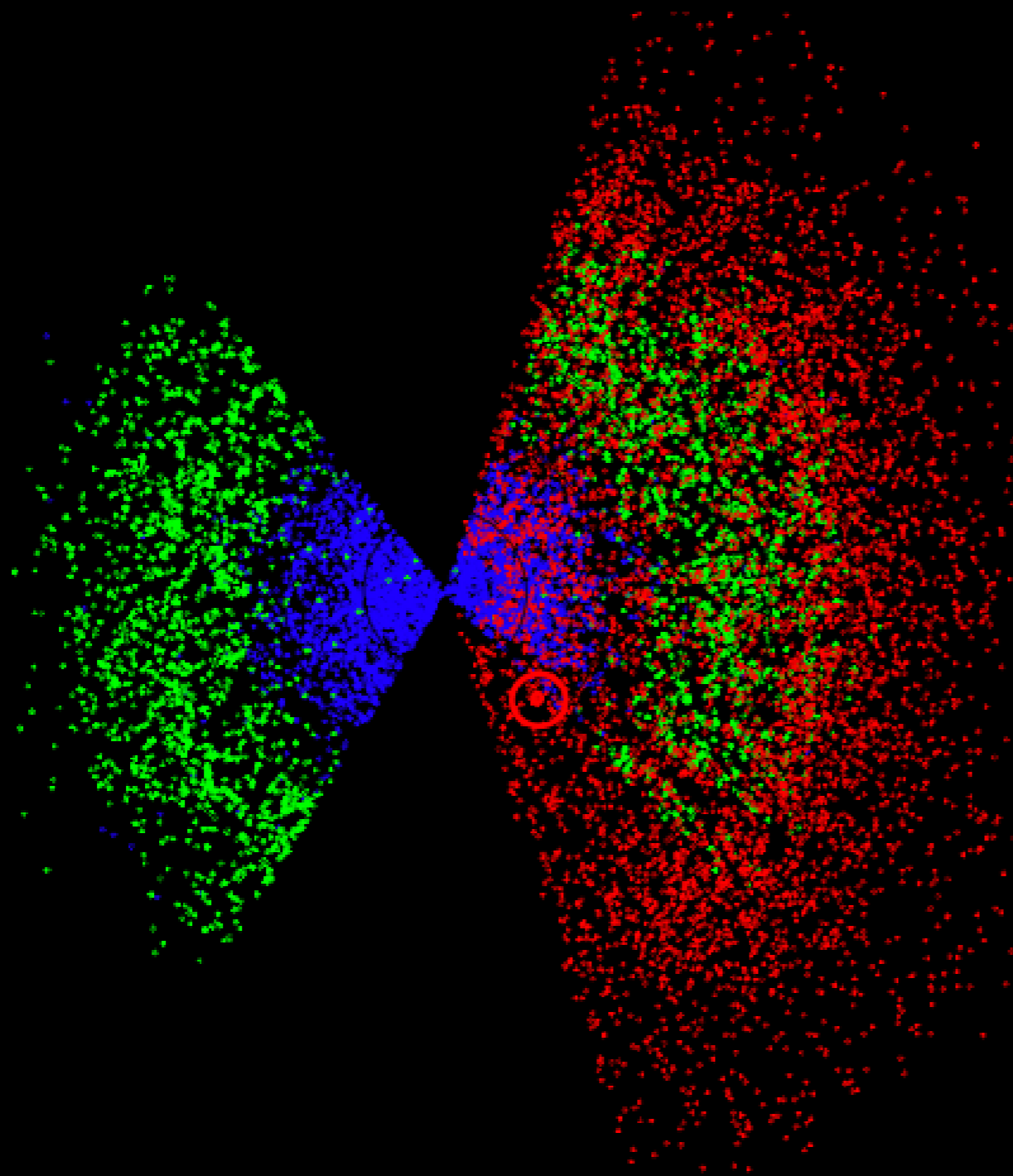
- Rappels cosmologiques
 - ★ Histoire de l'expansion, distances et paramètres cosmologiques
 - ★ Résultats sur l'Énergie sombre
 - ★ Oscillations acoustiques de baryons
- **BOSS : Baryon Oscillations Spectroscopic Survey**
 - ★ L'héritage de SDSS I et II
 - ★ SDSSIII / BOSS
- La corrélation spatiale des LRG avec DR9
 - ★ Sélection de l'échantillon, complétude
 - ★ Fonction de corrélation à deux points, Spectre de puissance
 - ★ Contraintes cosmologiques
 - Principe des analyses
 - Résultats
- La corrélation spatiale dans la forêt Lyman- α
- Conclusions et perspectives

SDSS-III / BOSS

- **Projet principal de SDSS-III**
 - ★ Telescope APO (Nouveau-Mexique)
 - ★ 2.5 m
- **Relevé spectroscopique**
 - ★ Photométrie de SDSS-II (targets)
 - ★ 2 spectros à deux bras: 1000 fibres
 - $3600 \text{ \AA} < \lambda < 10000 \text{ \AA}$
 - $\lambda/\Delta\lambda \sim 3000$
 - ★ 10000 degrés carrés :
 - 1.5 Millions de galaxies LRG ($z \sim 0.7$)
 - 150 000 Quasars avec forêt Ly- α à $z \sim 2.5$
- **Objectifs:**
 - ★ Position du pic BAO à
 - 1% à $z=0.6$
 - 1.5% à $z=2.5$
 - ★ Meilleures contraintes sur l'énergie sombre avant la prochaine génération



BOSS LRG Vs. SDSS-II

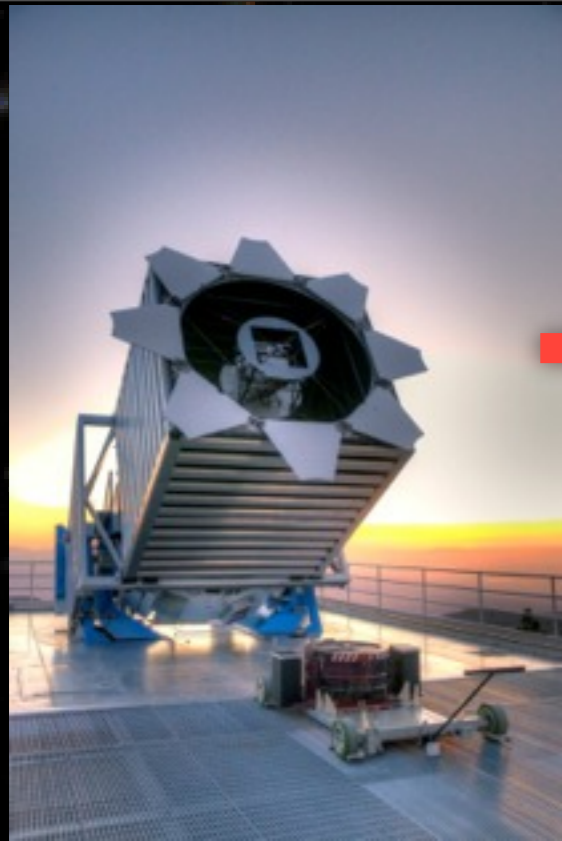


- 2x volume
- 5x density
- 10x statistics
- 1,600,000 LRGs

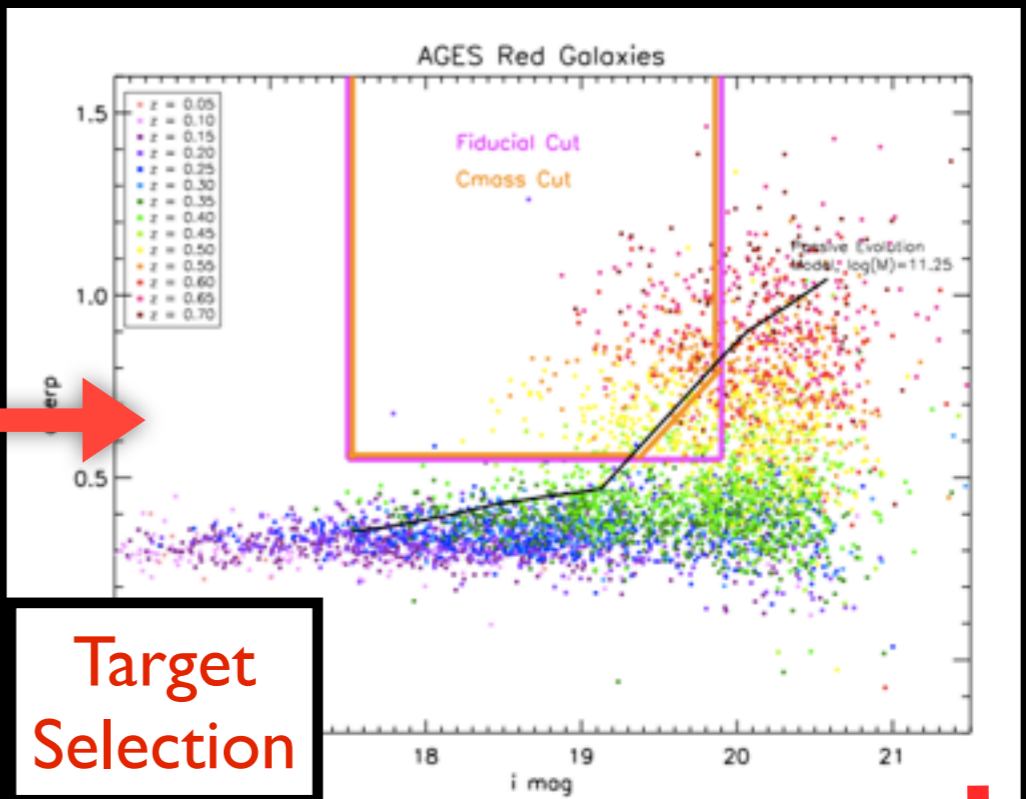
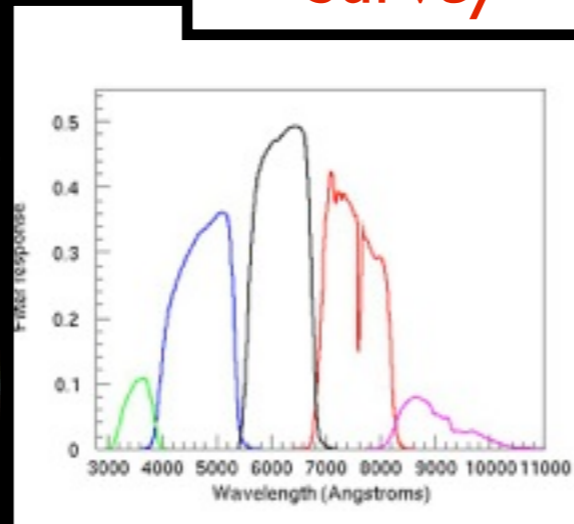
SDSS main sample

SDSS I+II

BOSS (SDSS III)

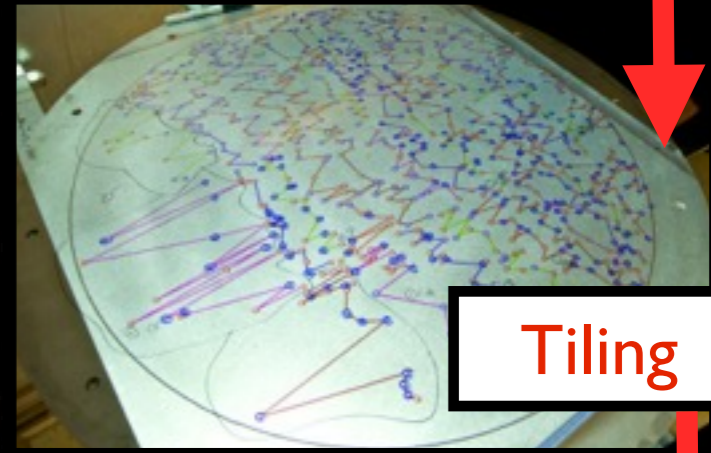


Photometric Survey



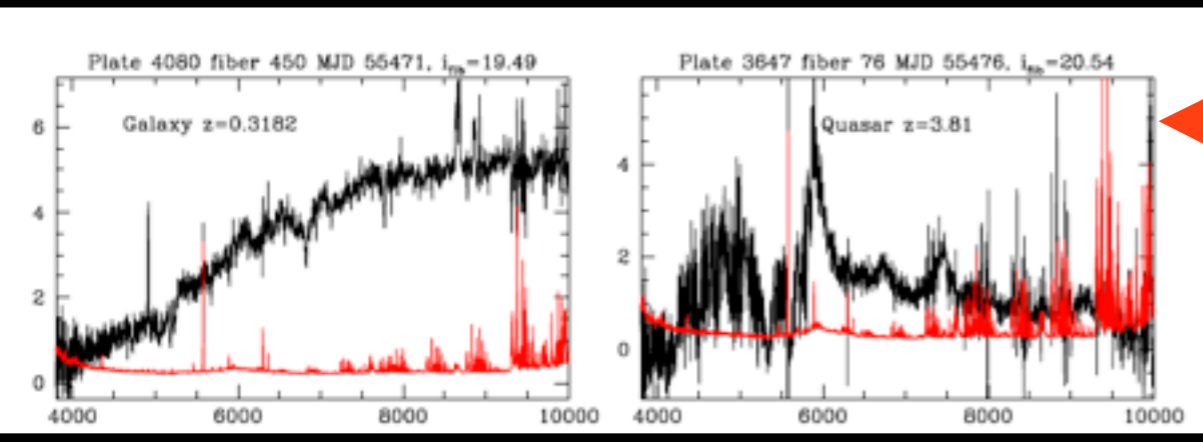
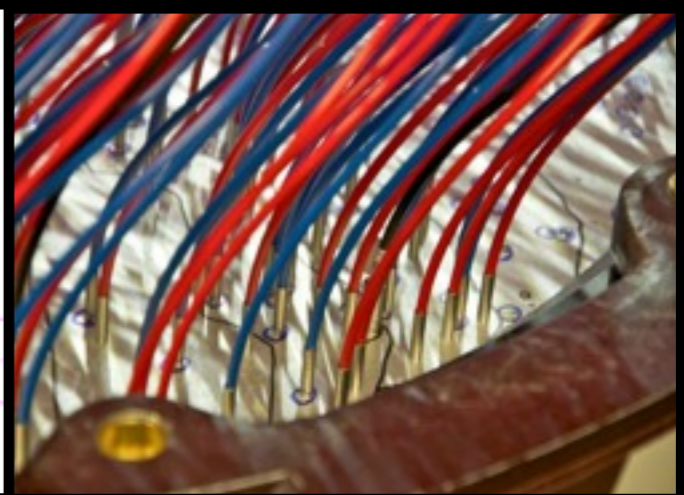
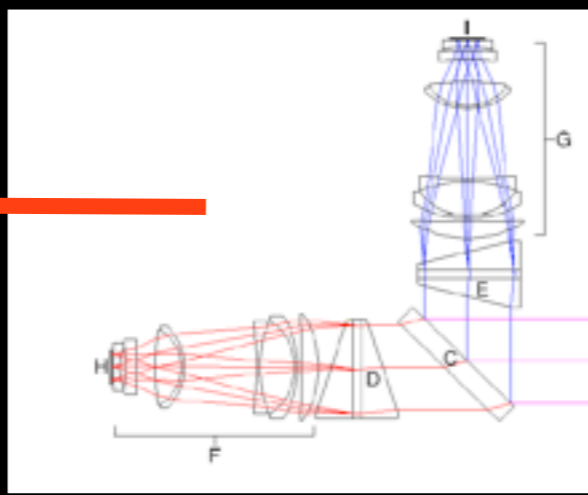
Target Selection

Principe de BOSS



Tiling

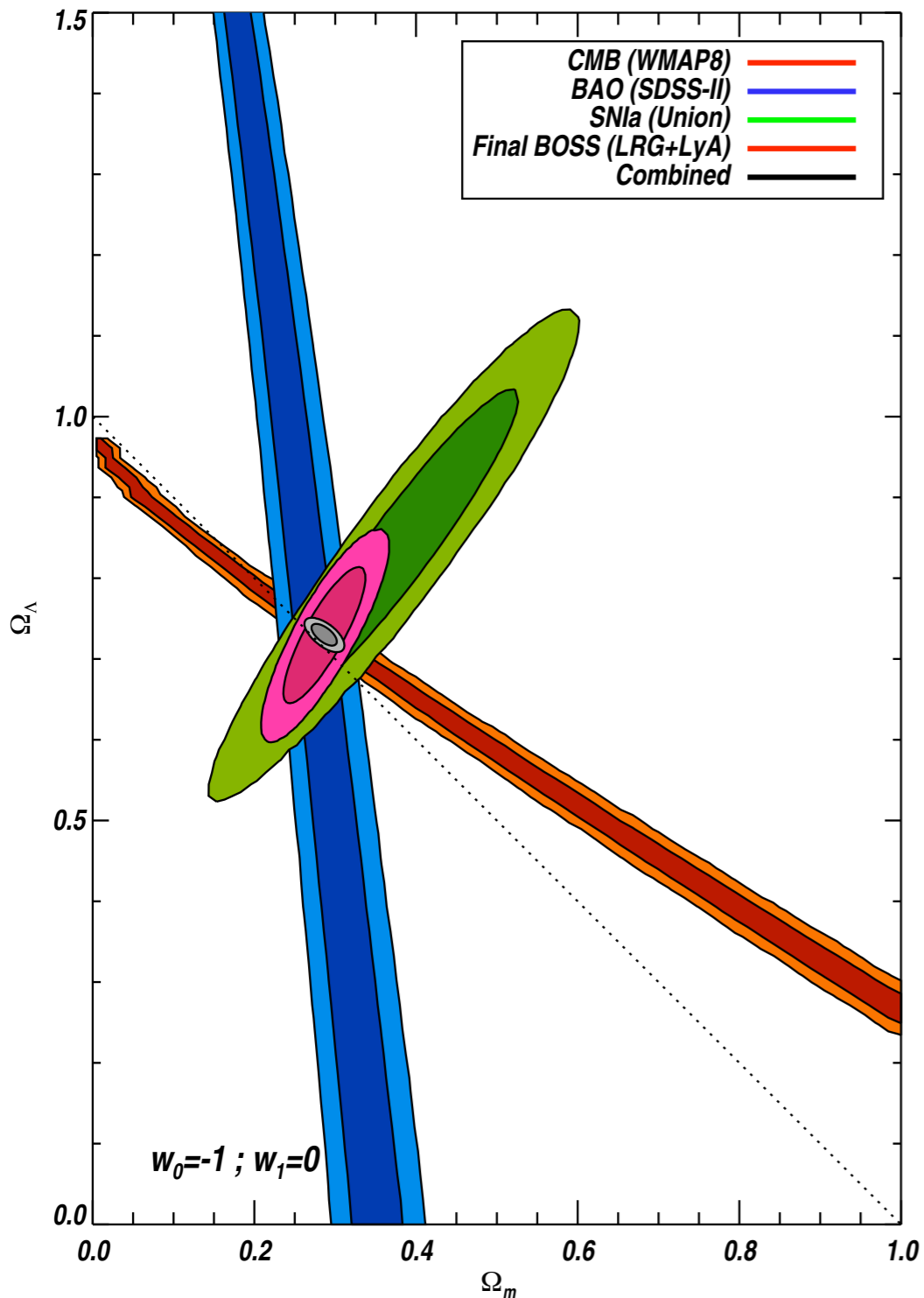
Spectroscopic Survey



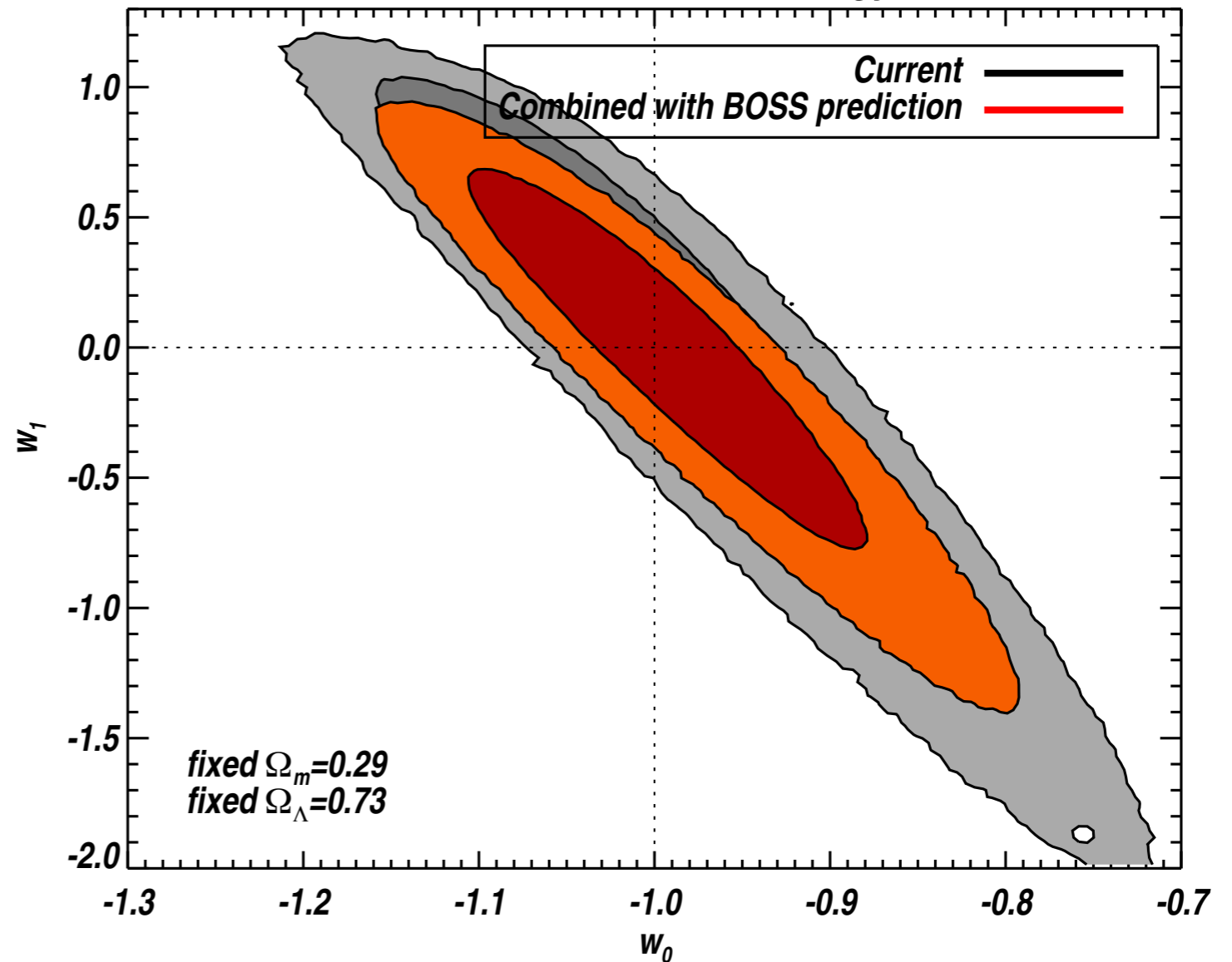
Perspectives sur D.E.

[Tiré de M.Vargas]

Constraints with BOSS final



Predicted Constraints on Dark Energy with BOSS



Programme

- Rappels cosmologiques
 - ★ Histoire de l'expansion, distances et paramètres cosmologiques
 - ★ Résultats sur l'Énergie sombre
 - ★ Oscillations acoustiques de baryons
- BOSS : Baryon Oscillations Spectroscopic Survey
 - ★ L'héritage de SDSS I et II
 - ★ SDSSIII / BOSS
- La corrélation spatiale des LRG avec DR9
 - ★ Sélection de l'échantillon, complétude
 - ★ Fonction de corrélation à deux points, Spectre de puissance
 - ★ Contraintes cosmologiques
 - Principe des analyses
 - Résultats
- La corrélation spatiale dans la forêt Lyman- α
- Conclusions et perspectives

Recent articles

Overview: galaxy distance measurements, analysis, and interpretations

Anderson, L. M. et al. 2012, [The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Baryon Acoustic Oscillations in the Data Release 9 Spectroscopic Galaxy Sample](#), submitted to *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* and available on the [arXiv preprint server \(1203.6594\)](#).

Implications for cosmology

Sánchez, A. G. et al. 2012, [The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: cosmological implications of the large-scale two-point correlation function](#), submitted to *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* and available on the [arXiv preprint server \(1203.6616\)](#).

Testing General Relativity with galaxy velocities

Reid, B. A. et al. 2012, [The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: measurements of the growth of structure and expansion rate at \$z=0.57\$ from anisotropic clustering](#), submitted to *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* and available on the [arXiv preprint server \(1203.6641\)](#).

Testing General Relativity with passive galaxies

Tojeiro, R. et al. 2012, [The Clustering of Galaxies in the SDSS-III DR9 Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Measuring structure growth using Passive galaxies](#), submitted to *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* and available on the [arXiv preprint server \(1203.6565\)](#).

Controlling for errors

Ross, A. J. et al. 2012, [The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Analysis of potential systematics](#), submitted to XXXXX and available on the [arXiv preprint server \(1203.6499\)](#).

Comparisons to synthetic data

Manera, M. et al. 2012, [The Clustering of Galaxies in the SDSS-III DR9 Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: A Large Sample of Mock Galaxy Catalogues](#), submitted to XXXXX and available on the [arXiv preprint server \(1203.6609\)](#).

Recent articles

Overview: galaxy distance measurements, analysis, and interpretations

Anderson, L. M. et al. 2012, [The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Baryon Acoustic Oscillations in the Data Release 9 Spectroscopic Galaxy Sample](#), submitted to *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* and available on the [arXiv preprint server \(1203.6594\)](#).

Implications for cosmology

Sánchez, A. G. et al. 2012, [The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: cosmological implications of the large-scale two-point correlation function](#), submitted to *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* and available on the [arXiv preprint server \(1203.6616\)](#).

Testing General Relativity with galaxy velocities

Reid, B. A. et al. 2012, [The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: measurements of the growth of structure and expansion rate at \$z=0.57\$ from anisotropic clustering](#), submitted to *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* and available on the [arXiv preprint server \(1203.6641\)](#).

Testing General Relativity with passive galaxies

Tojeiro, R. et al. 2012, [The Clustering of Galaxies in the SDSS-III DR9 Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Measuring structure growth using Passive galaxies](#), submitted to *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* and available on the [arXiv preprint server \(1203.6565\)](#).

Controlling for errors

Ross, A. J. et al. 2012, [The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Analysis of potential systematics](#), submitted to XXXXX and available on the [arXiv preprint server \(1203.6499\)](#).

Comparisons to synthetic data

Manera, M. et al. 2012, [The Clustering of Galaxies in the SDSS-III DR9 Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: A Large Sample of Mock Galaxy Catalogues](#), submitted to XXXXX and available on the [arXiv preprint server \(1203.6609\)](#).

Sélection des cibles spectro

- **Photométrie SDSS-II**

- ★ 5 bandes (u, g, r, i, z)

- **Objectif: CMASS**

- ★ échantillon complet, uniforme en masse (LRG) et limité en volume entre $z \sim 0.4$ et $z \sim 0.8$

- **Coupures:**

- ★ d_{perp} :

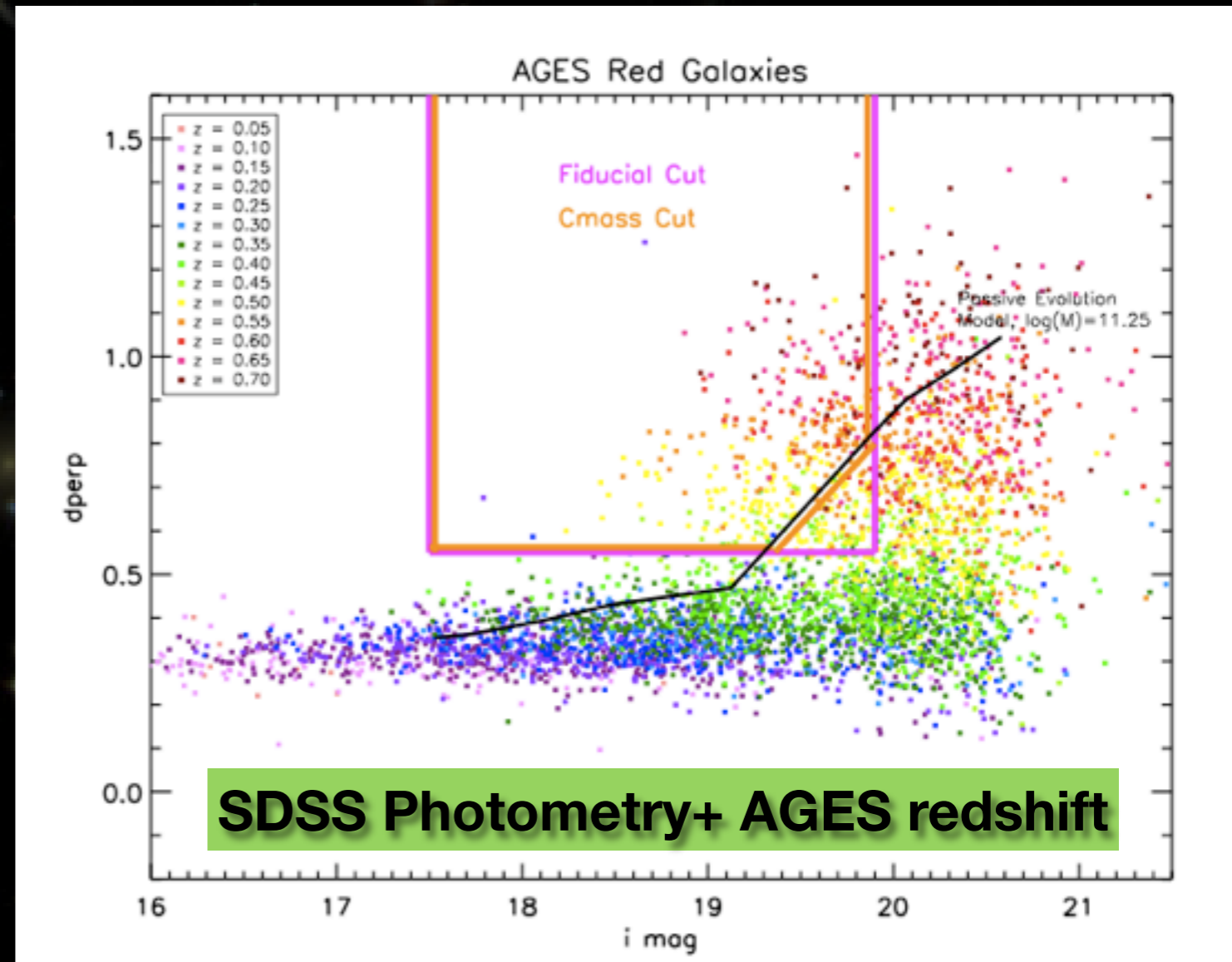
- \sim proportionnel à z

- ★ Coupure en masse:

- LRG

- ★ Coupure en magnitude i :

- limité en volume



[Tiré de M.Vargas]

Contamination stellaire < 1%
Efficacité 99%

Sélection des cibles spectro

- Photométrie SDSS-II

- ★ 5 bandes (u, g, r, i, z)

- Objectif: CMASS

- ★ échantillon complet, uniforme en masse (LRG) et limité en volume entre $z \sim 0.4$ et $z \sim 0.8$

- Coupures:

- ★ d_{perp} :

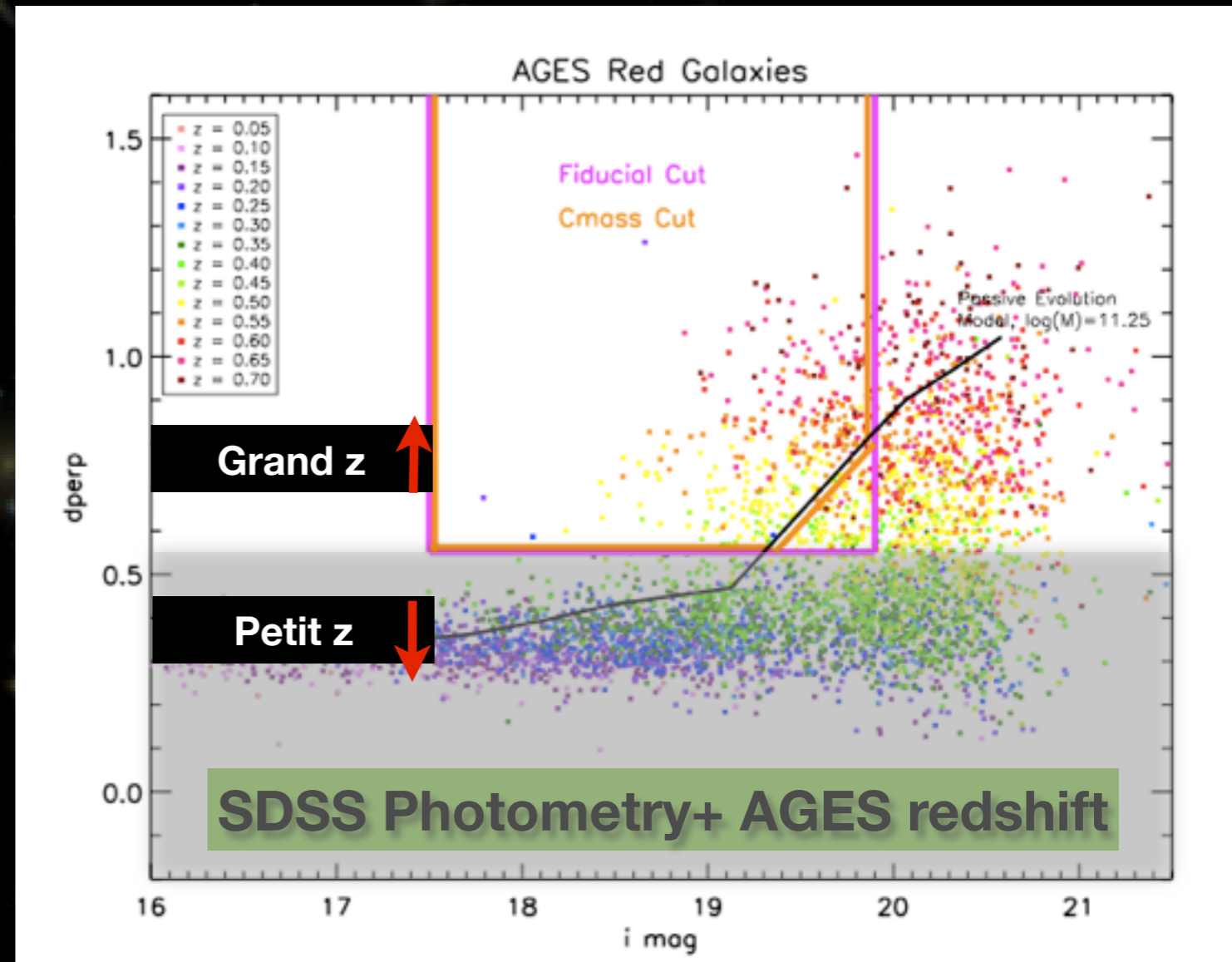
- \sim proportionnel à z

- ★ Coupure en masse:

- LRG

- ★ Coupure en magnitude i :

- limité en volume



[Tiré de M.Vargas]

Contamination stellaire < 1%
Efficacité 99%

Sélection des cibles spectro

- Photométrie SDSS-II

- ★ 5 bandes (u, g, r, i, z)

- Objectif: CMASS

- ★ échantillon complet, uniforme en masse (LRG) et limité en volume entre $z \sim 0.4$ et $z \sim 0.8$

- Coupures:

- ★ d_{perp} :

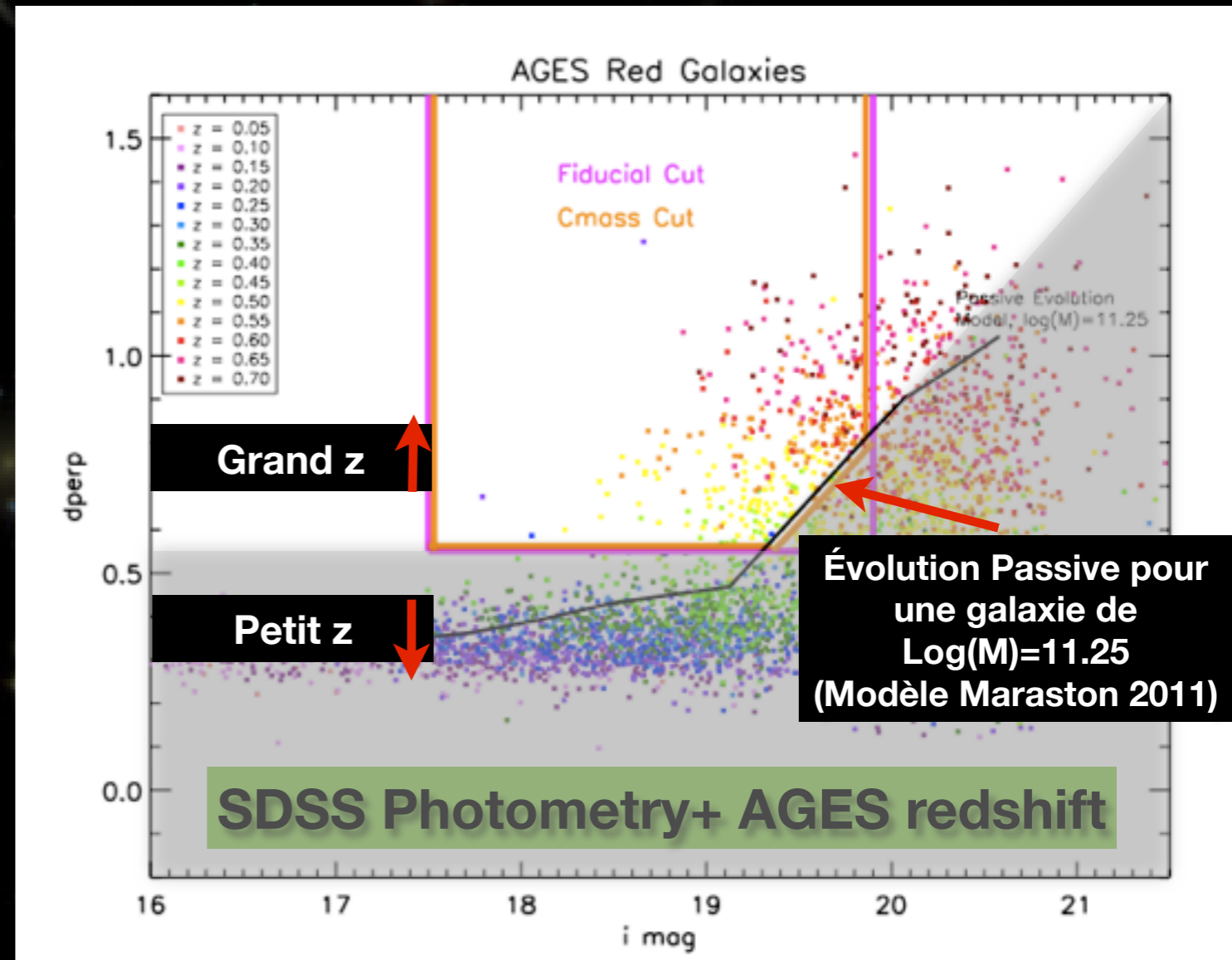
- \sim proportionnel à z

- ★ Coupure en masse:

- LRG

- ★ Coupure en magnitude i :

- limité en volume



[Tiré de M.Vargas]

Contamination stellaire < 1%
Efficacité 99%

Sélection des cibles spectro

- **Photométrie SDSS-II**

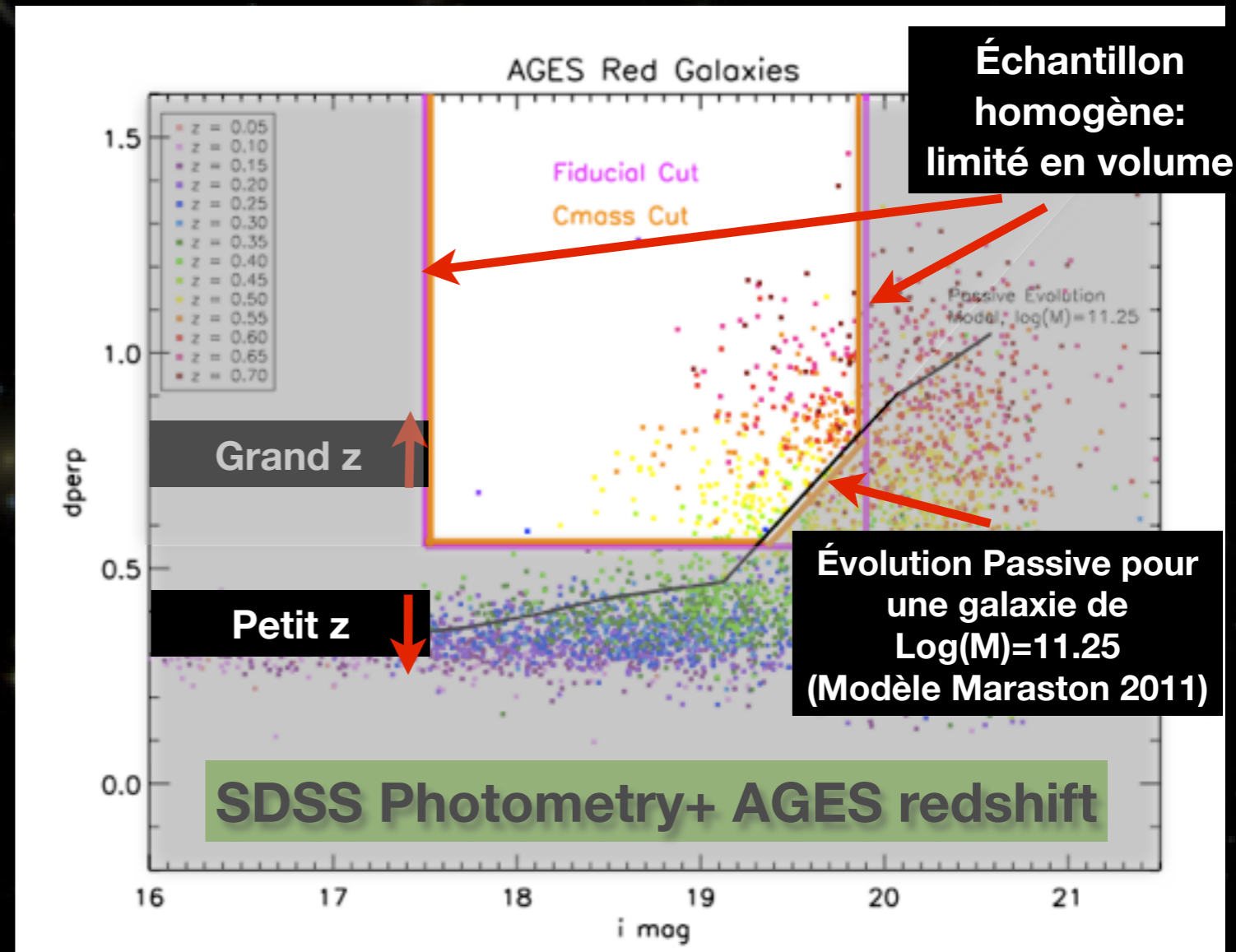
- ★ 5 bandes (u, g, r, i, z)

- **Objectif: CMASS**

- ★ échantillon complet, uniforme en masse (LRG) et limité en volume entre $z \sim 0.4$ et $z \sim 0.8$

- **Coupures:**

- ★ d_{perp} :
 - \sim proportionnel à z
- ★ Coupure en masse:
 - LRG
- ★ Coupure en magnitude i :
 - limité en volume



Échantillon homogène: limité en volume

Évolution Passive pour une galaxie de $\log(M)=11.25$ (Modèle Maraston 2011)

[Tiré de M.Vargas]

Contamination stellaire < 1%
Efficacité 99%

Liste des objets pour $\xi(r)$

- On veut:
 - ★ Des objets spectrés et spectroscopiquement CMASS
 - ★ qui ait été des targets CMASS
 - (des erreurs peuvent se glisser...)
 - ★ Ou bien des objets déjà connus
 - (attention au double comptage...)
 - ★ Gérer les collisions de fibres
 - impossible de placer deux fibres plus proches que 62 arcsec

Spectra
No CMASS

Spectra
CMASS

- **Completeness**

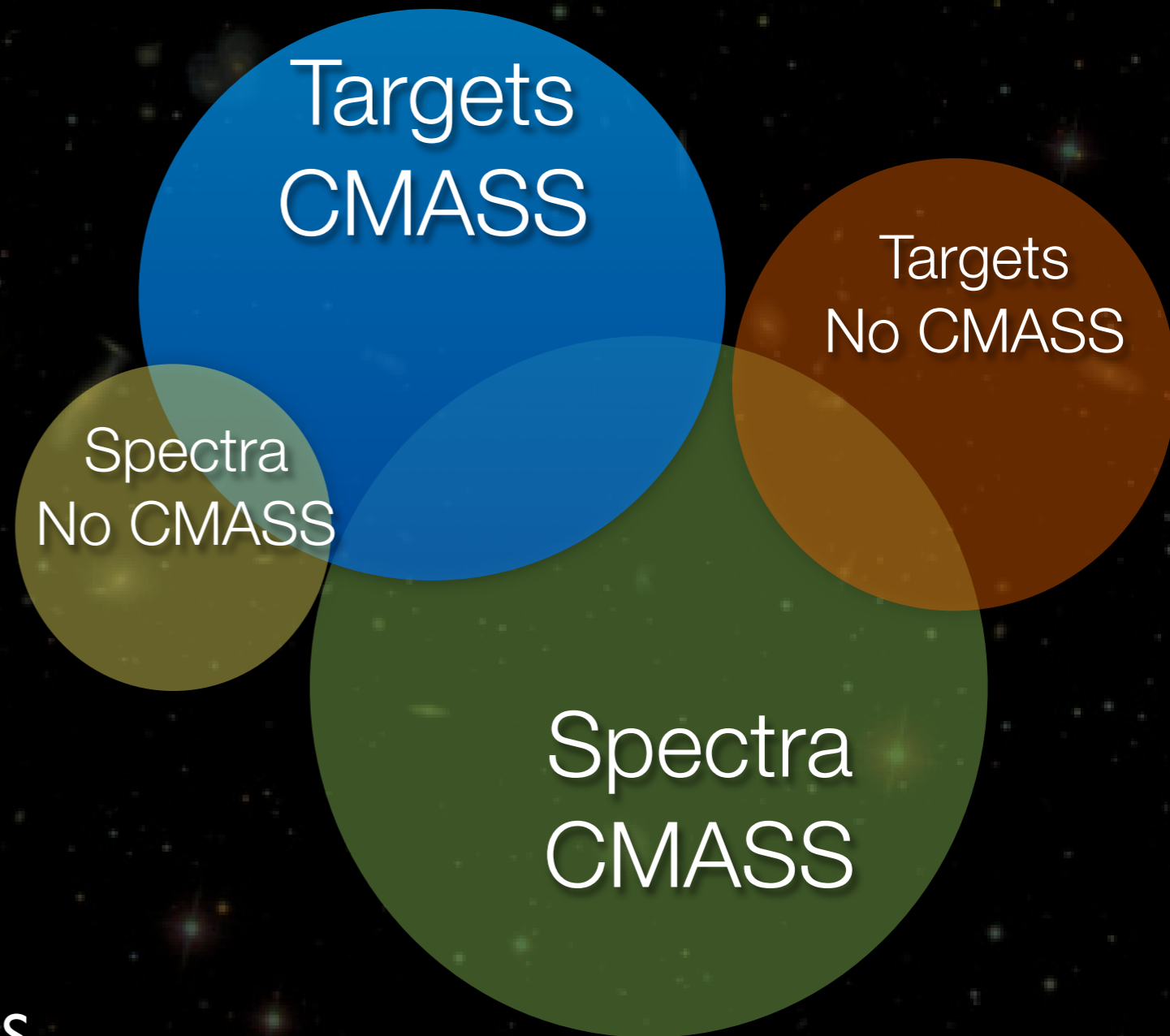
$$Completeness = \frac{Spectra}{Targets}$$

- ★ Retirer des cibles les objets spectroscopiquement non CMASS

Liste des objets pour $\xi(r)$

- On veut:

- ★ Des objets spectrés et spectroscopiquement CMASS
- ★ qui ait été des targets CMASS
 - (des erreurs peuvent se glisser...)
- ★ Ou bien des objets déjà connus
 - (attention au double comptage...)
- ★ Gérer les collisions de fibres
 - impossible de placer deux fibres plus proches que 62 arcsec



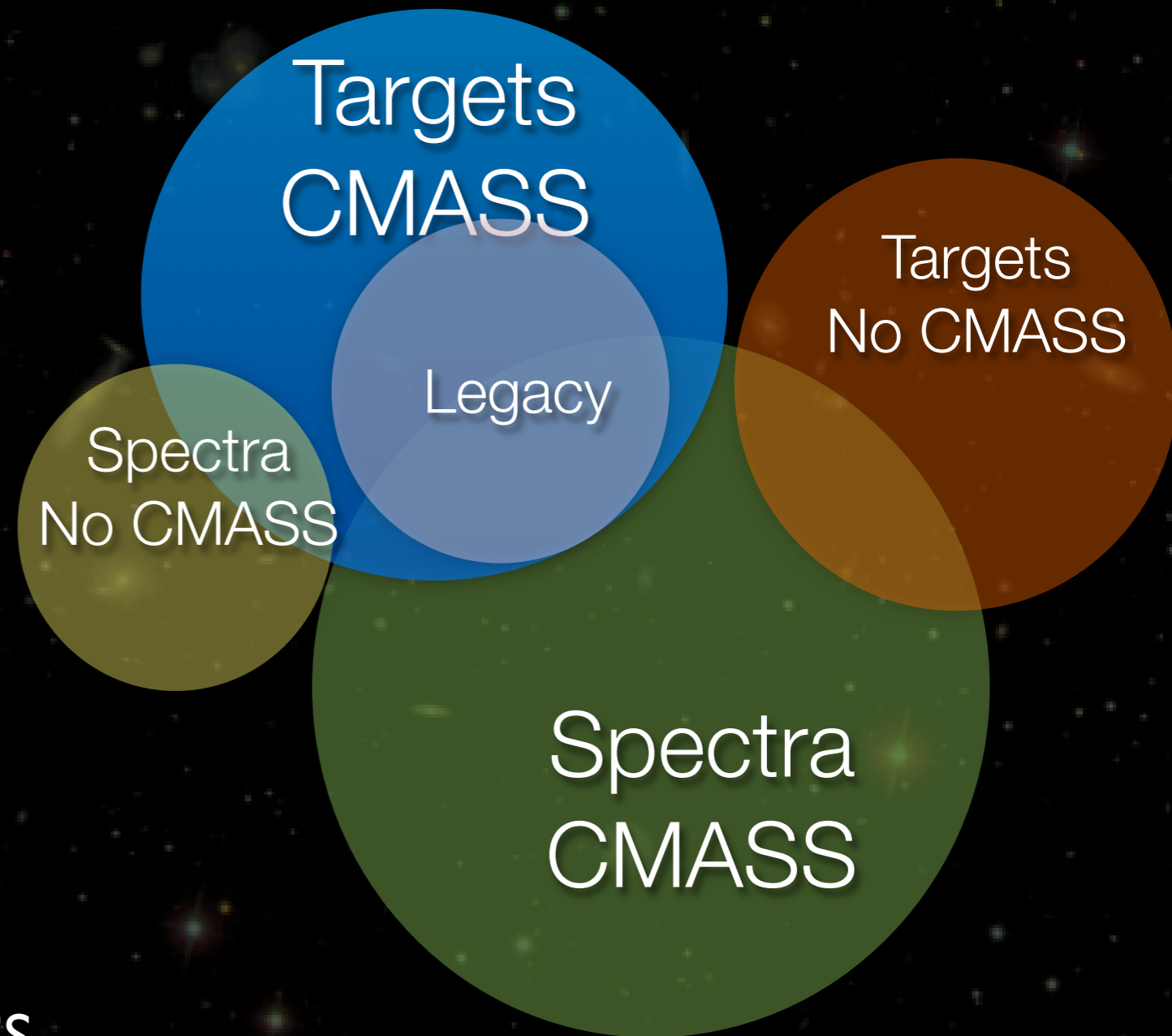
- Completeness

$$Completeness = \frac{Spectra}{Targets}$$

- ★ Retirer des cibles les objets spectroscopiquement non CMASS

Liste des objets pour $\xi(r)$

- On veut:
 - ★ Des objets spectrés et spectroscopiquement CMASS
 - ★ qui ait été des targets CMASS
 - (des erreurs peuvent se glisser...)
 - ★ Ou bien des objets déjà connus
 - (attention au double comptage...)
 - ★ Gérer les collisions de fibres
 - impossible de placer deux fibres plus proches que 62 arcsec



- **Completeness**

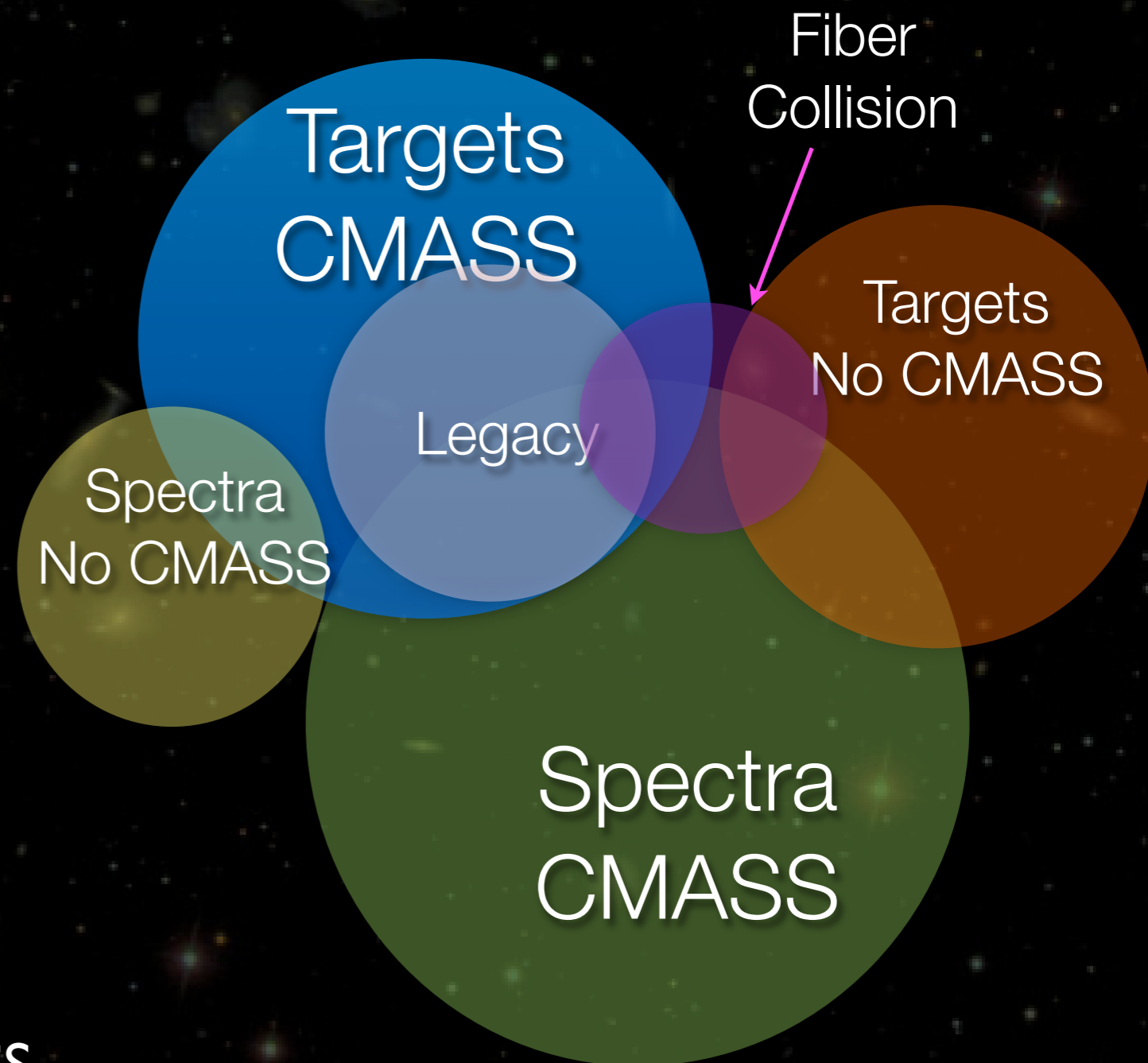
$$Completeness = \frac{Spectra}{Targets}$$

- ★ Retirer des cibles les objets spectroscopiquement non CMASS

Liste des objets pour $\xi(r)$

- On veut:

- ★ Des objets spectrés et spectroscopiquement CMASS
- ★ qui ait été des targets CMASS
 - (des erreurs peuvent se glisser...)
- ★ Ou bien des objets déjà connus
 - (attention au double comptage...)
- ★ Gérer les collisions de fibres
 - impossible de placer deux fibres plus proches que 62 arcsec



- Completeness

$$Completeness = \frac{Spectra}{Targets}$$

- ★ Retirer des cibles les objets spectroscopiquement non CMASS

Completeness

[Anderson et al, 2012]

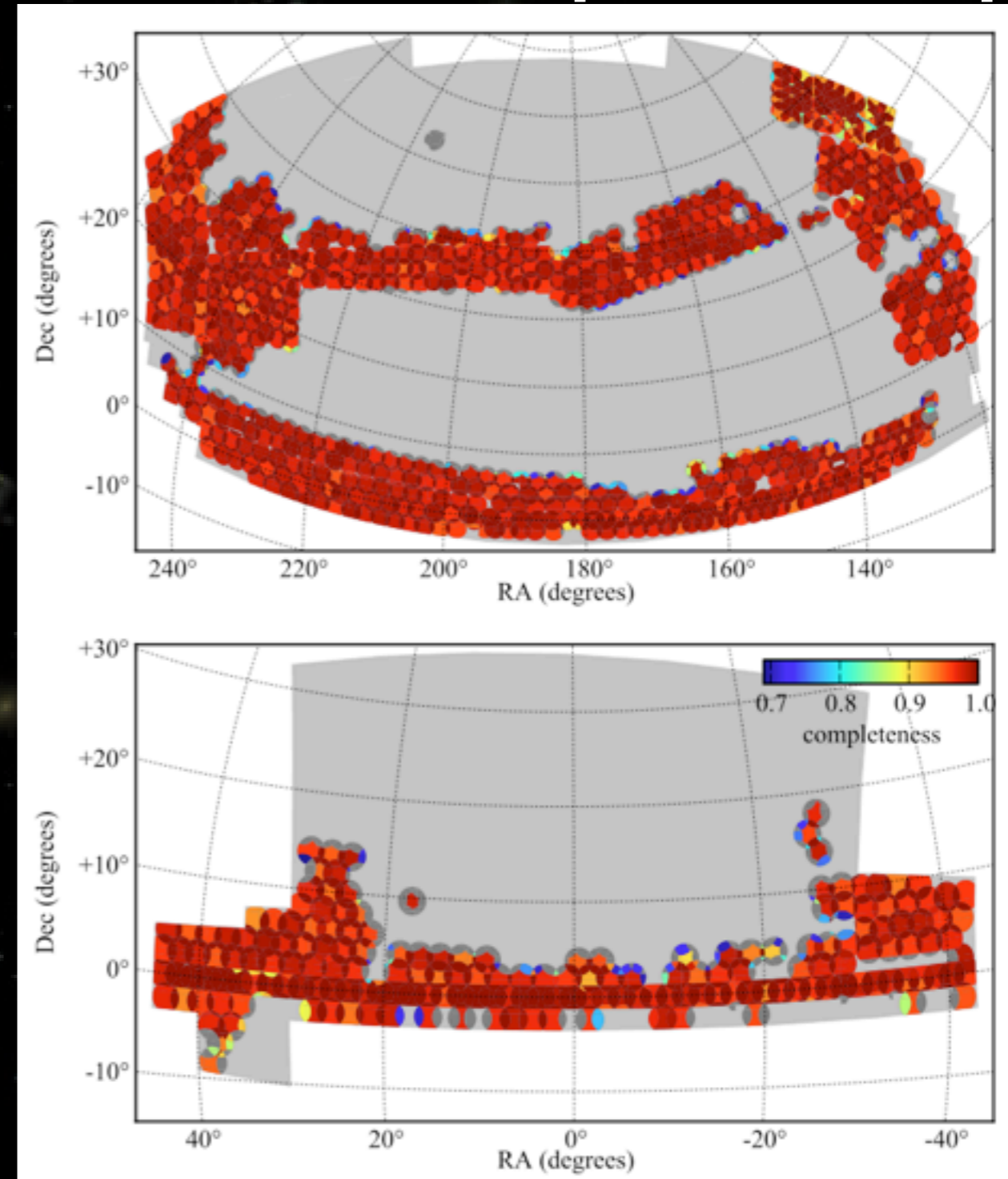
- Définition:

$$Completeness = \frac{Spectra}{Targets}$$

- rarement = 1 :

- ★ Survey en cours

- ★ Taux de succès non uniforme
 - essentiellement du à la météo



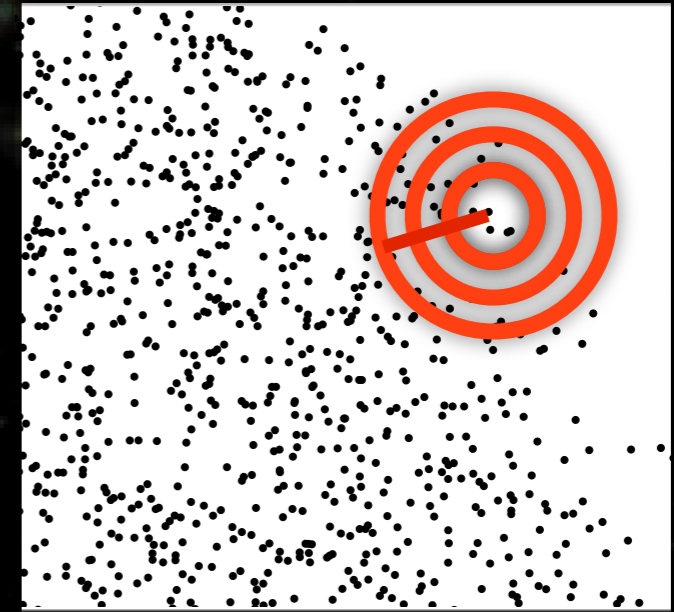
Completeness

- Définition:

$$Completeness = \frac{Spectra}{Targets}$$

- rarement = 1 :

- ★ Survey en cours
- ★ Taux de succès non uniforme
 - essentiellement du à la météo



- Importance:

- ★ Corriger $\xi(r)$ des effets de non uniformité du sampling
 - Utilisation d'un échantillon «random» dans l'estimateur de $\xi(r)$
 - $\hat{\xi}_{PH} = \frac{DD}{RR}$ [version simple]
- ★ pondérer en fonction de la densité de galaxies [Feldman, Kaiser, Peacock, 1993]

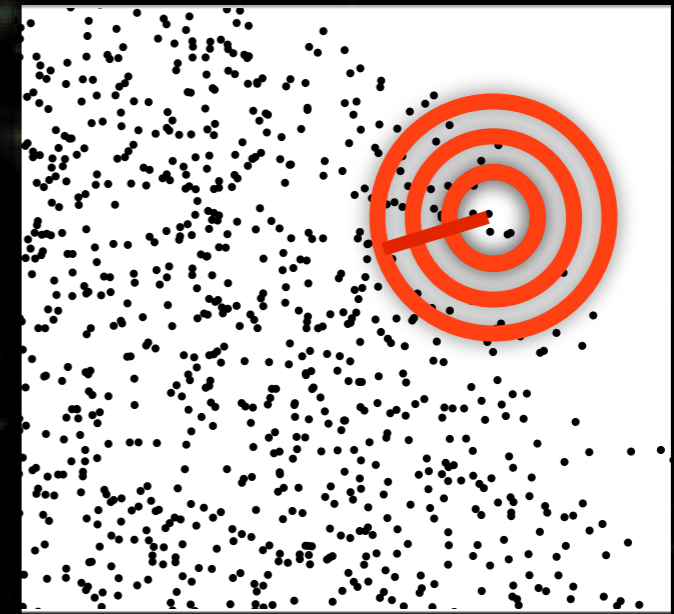
Completeness

- Définition:

$$Completeness = \frac{Spectra}{Targets}$$

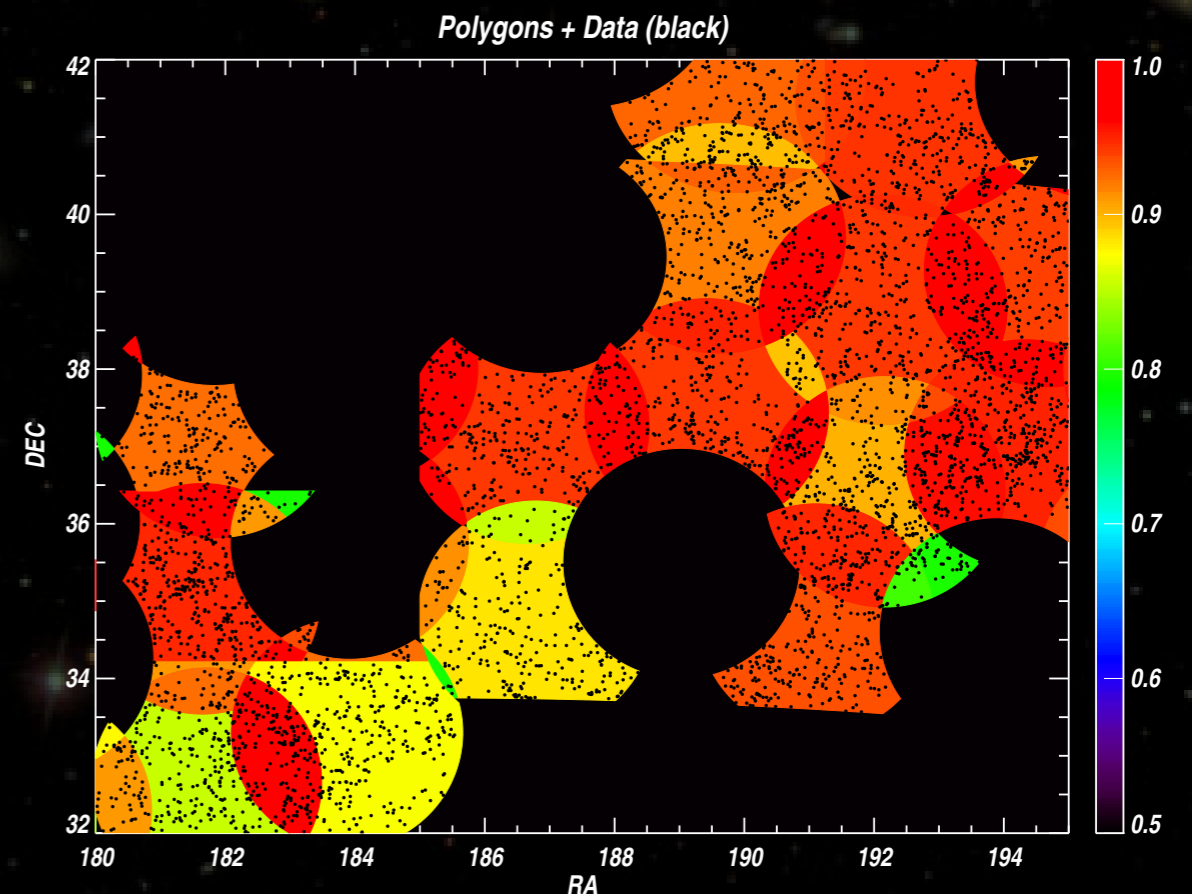
- rarement = 1 :

- ★ Survey en cours
- ★ Taux de succès non uniforme
 - essentiellement du à la météo



- Importance:

- ★ Corriger $\xi(r)$ des effets de non uniformité du sampling
 - Utilisation d'un échantillon «random» dans l'estimateur de $\xi(r)$
 - $\hat{\xi}_{PH} = \frac{DD}{RR}$ [version simple]
- ★ pondérer en fonction de la densité de galaxies [Feldman, Kaiser, Peacock, 1993]



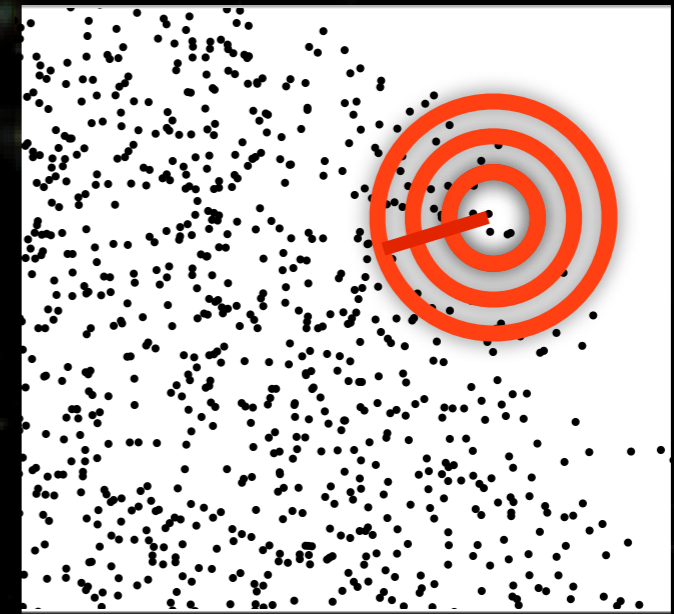
Completeness

- Définition:

$$Completeness = \frac{Spectra}{Targets}$$

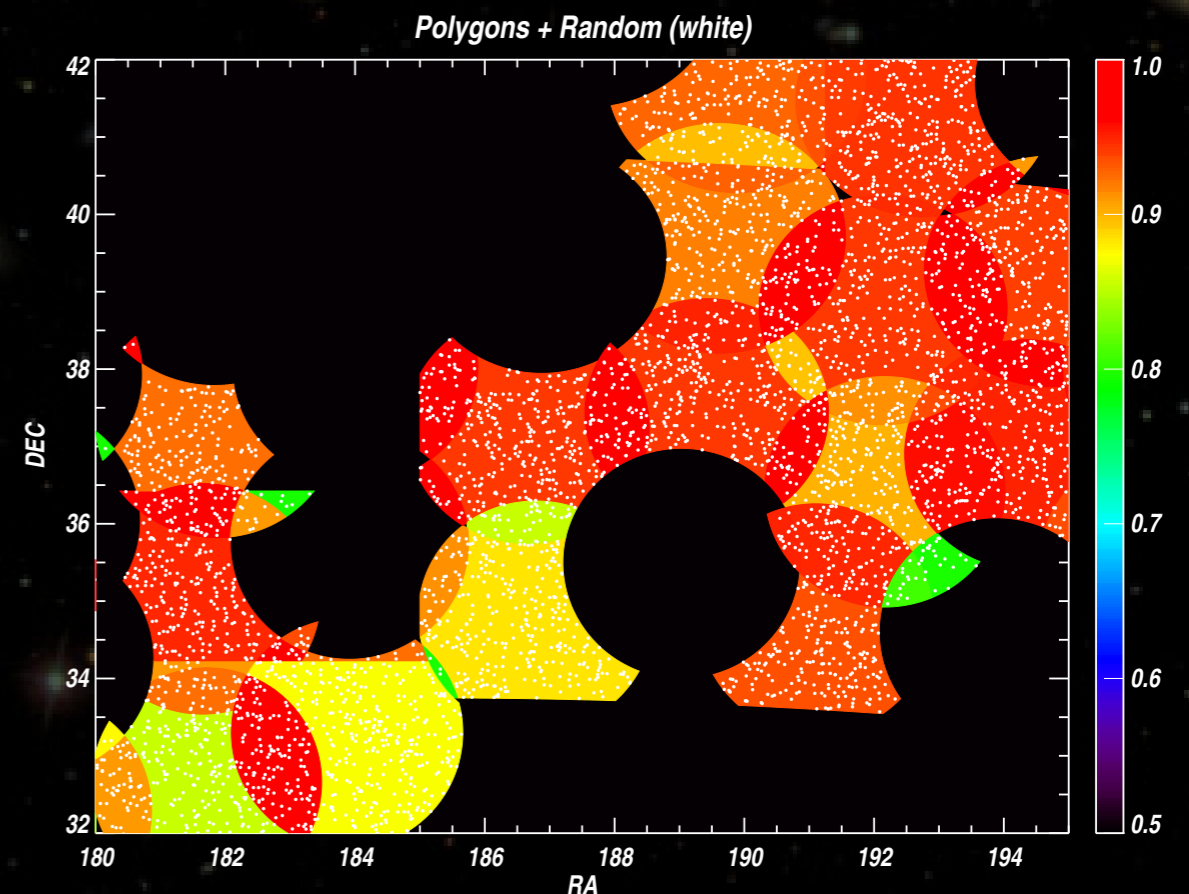
- rarement = 1 :

- ★ Survey en cours
- ★ Taux de succès non uniforme
 - essentiellement du à la météo



- Importance:

- ★ Corriger $\xi(r)$ des effets de non uniformité du sampling
 - Utilisation d'un échantillon «random» dans l'estimateur de $\xi(r)$
$$\hat{\xi}_{PH} = \frac{DD}{RR} \text{ [version simple]}$$
- ★ pondérer en fonction de la densité de galaxies [Feldman, Kaiser, Peacock, 1993]



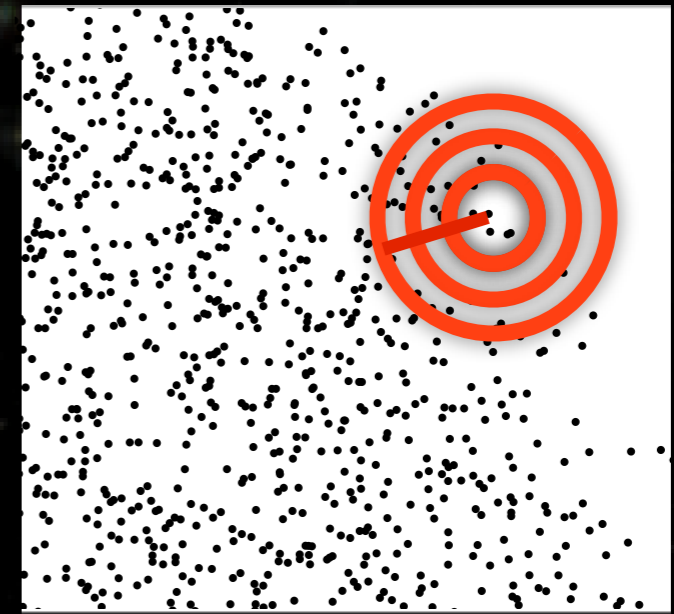
Completeness

- Définition:

$$Completeness = \frac{Spectra}{Targets}$$

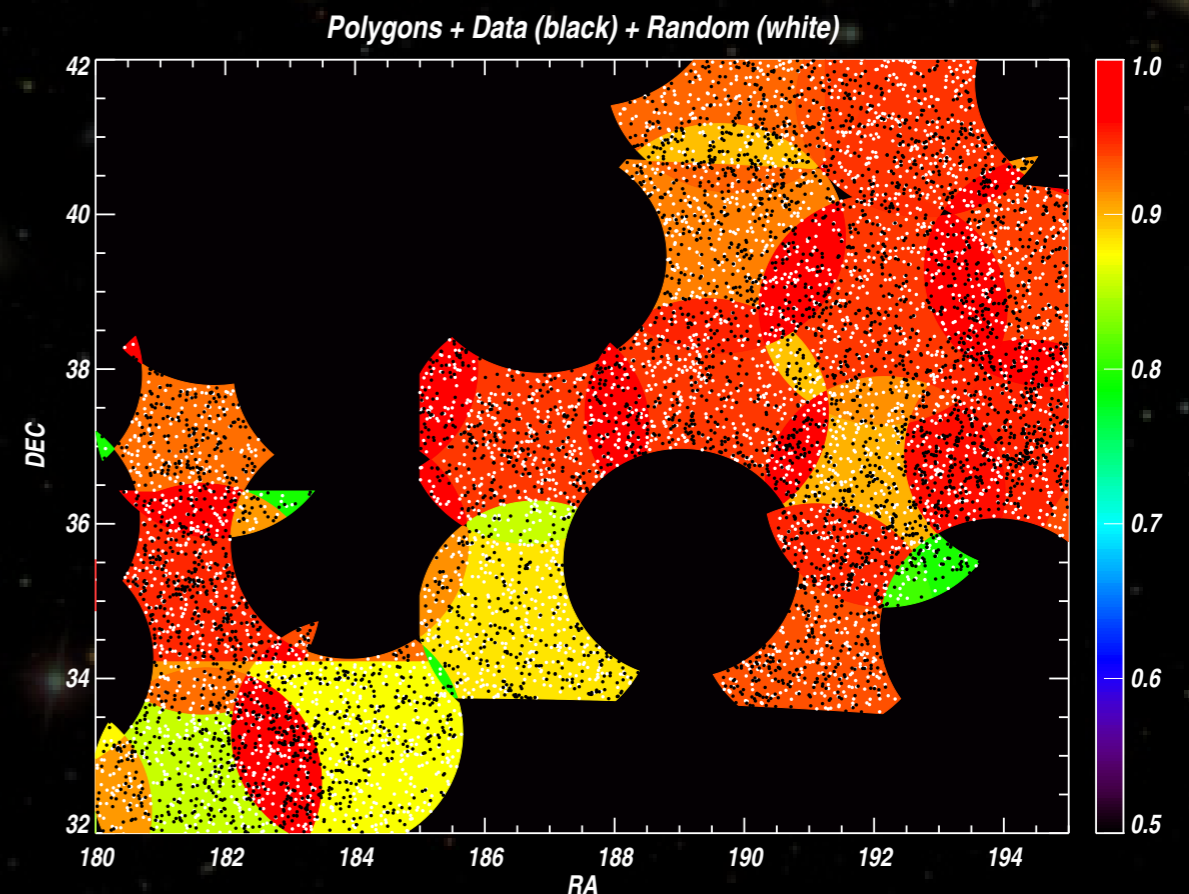
- rarement = 1 :

- ★ Survey en cours
- ★ Taux de succès non uniforme
 - essentiellement du à la météo

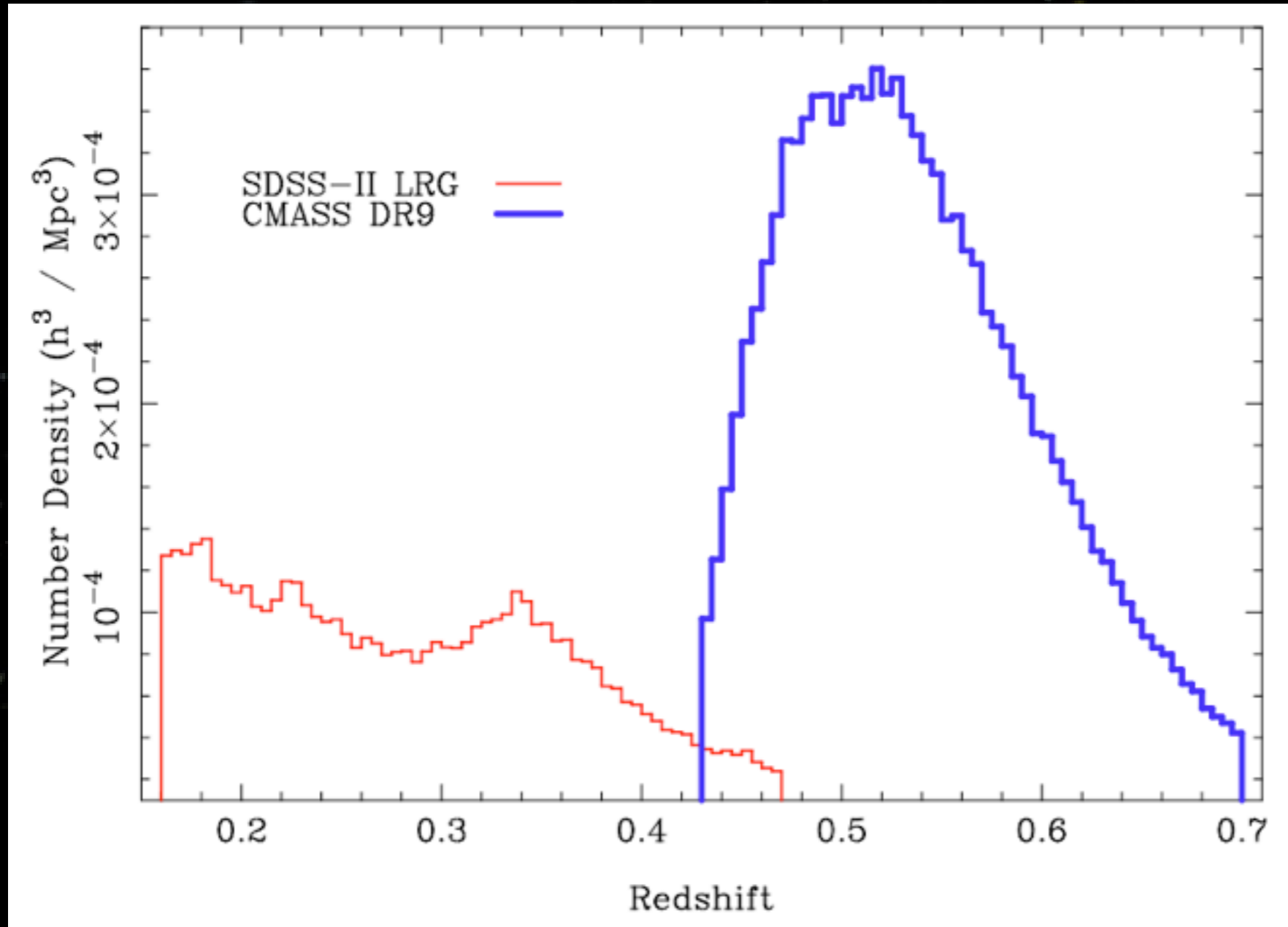


- Importance:

- ★ Corriger $\xi(r)$ des effets de non uniformité du sampling
 - Utilisation d'un échantillon «random» dans l'estimateur de $\xi(r)$
$$\hat{\xi}_{PH} = \frac{DD}{RR} \text{ [version simple]}$$
- ★ pondérer en fonction de la densité de galaxies [Feldman, Kaiser, Peacock, 1993]



Distribution en redshift



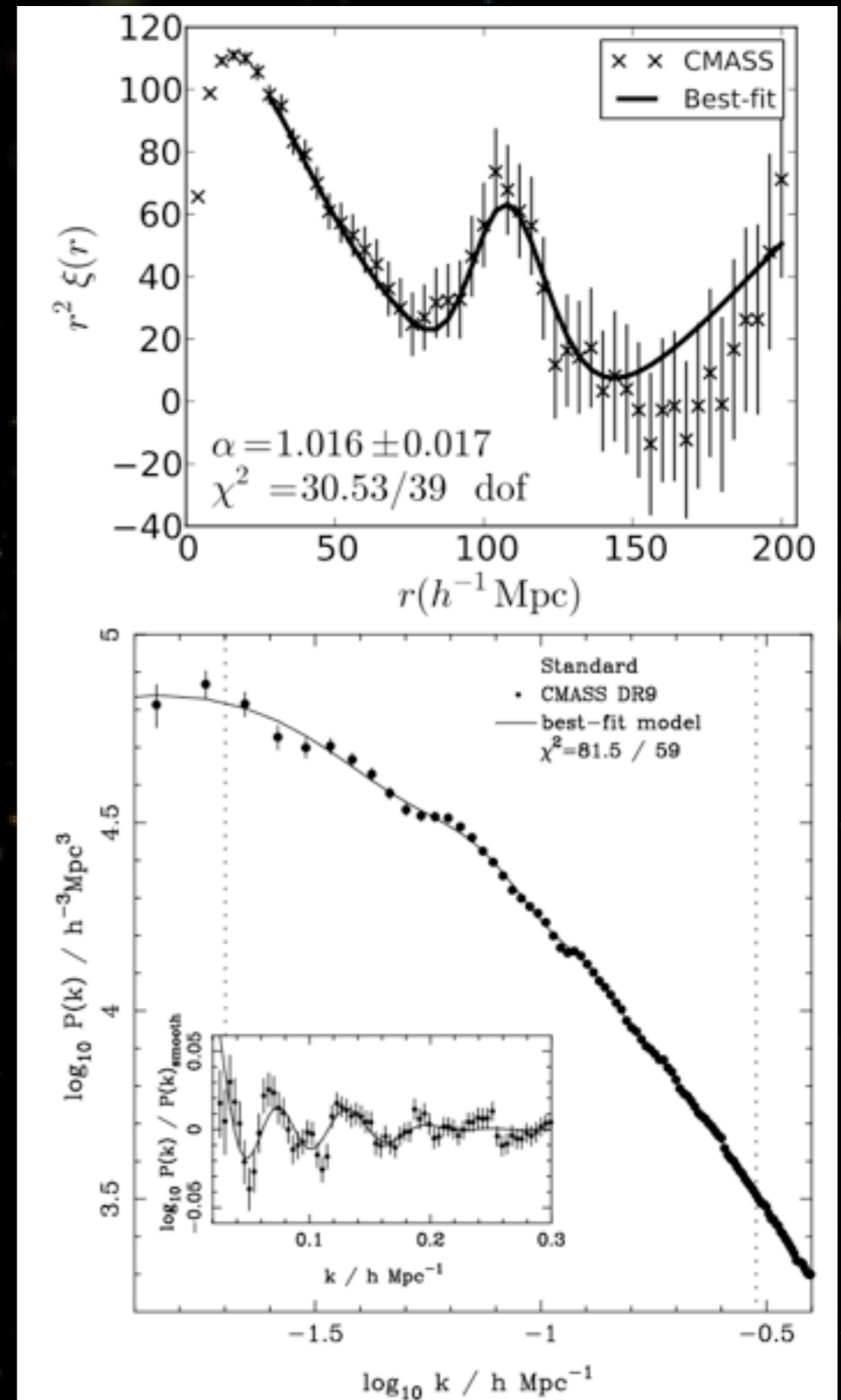
Property	NGC	SGC	total
\bar{N}_{gal}	222 538	60 792	283 330
\bar{N}_{known}	3766	1810	5576
\bar{N}_{star}	7201	1771	8972
\bar{N}_{fail}	3751	1122	4873
\bar{N}_{cp}	14 116	3640	17 756
\bar{N}_{missed}	4931	1911	6842
\bar{N}_{used}	207 246	57 037	264 283
\bar{N}_{obs}	233 490	63 685	297 175
\bar{N}_{targ}	256 303	71 046	327 349
Total area / deg^2	2635	709	3344
Effective area / deg^2	2584	690	3275

Volume: 2.2 Gpc^3

[Anderson et al, 2012]

$\xi(r)$ et $P(k)$ isotropisés

- Les deux sont en principe équivalents
 - ★ mais implémentation très différente en pratique
 - ★ Erreurs différentes
- $\xi(r)$: Landy-Szalay
- $P(k)$: basé sur des FFT
- Barres d'erreurs:
 - ★ Simulations N-body LasDamas [McBride et al. 2011]
- NB: Choix d'une cosmologie fiducielle (pour avoir des «r»)

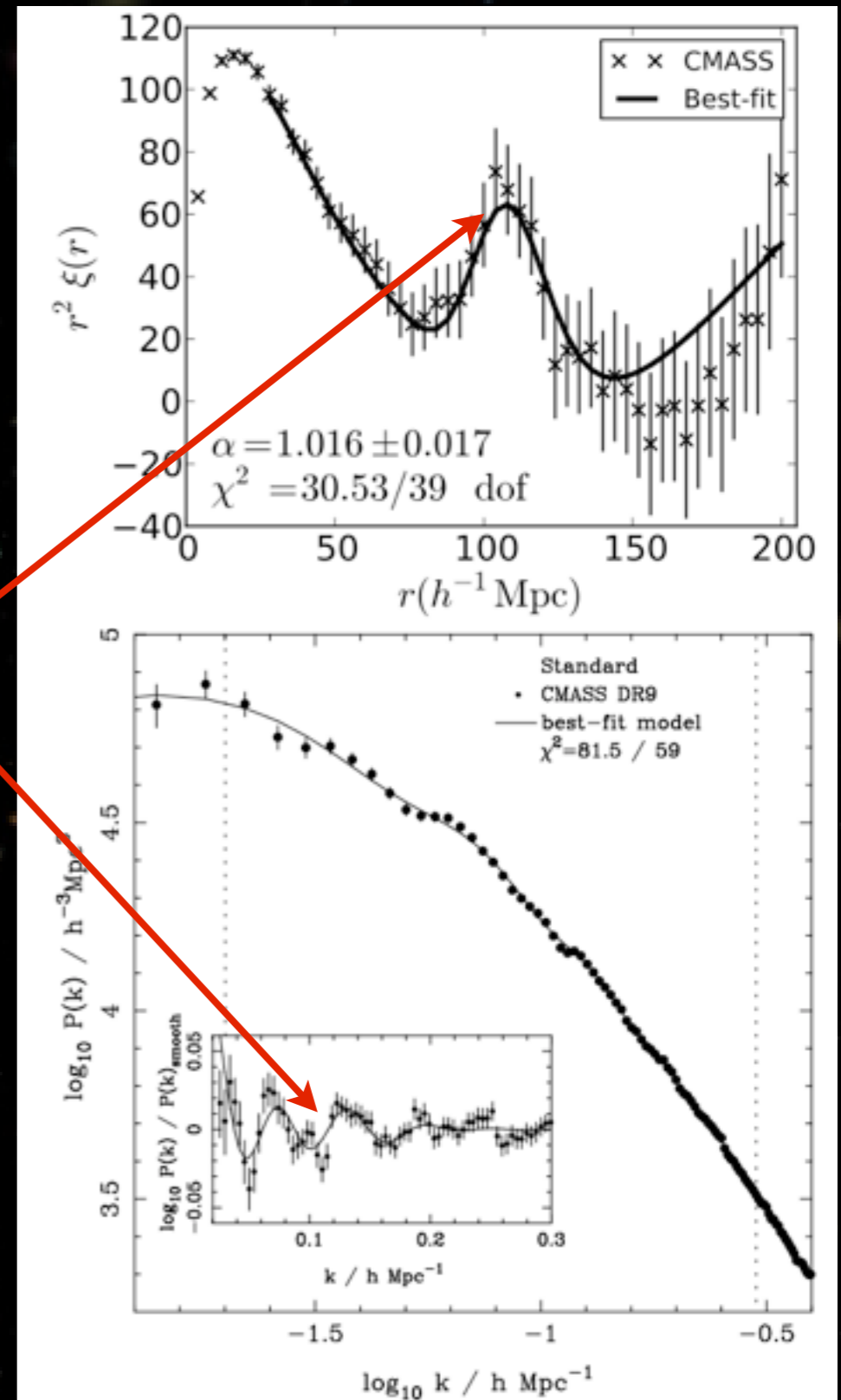


[Anderson et al, 2012]

$\xi(r)$ et $P(k)$ isotropisés

- Les deux sont en principe équivalents
 - ★ mais implémentation très différente en pratique
 - ★ Erreurs différentes
- $\xi(r)$: Landy-Szalay
- $P(k)$: basé sur des FFT
- Barres d'erreurs:
 - ★ Simulations N-body LasDamas [McBride et al. 2011]
- NB: Choix d'une cosmologie fiducielle (pour avoir des «r»)

BAO
à 5σ



[Anderson et al, 2012]

Cosmologie fiducielle et α

- Raisons

- ★ On doit choisir une cosmologie pour calculer les distances
- ★ Difficile d'imaginer un processus itératif (CPU - data + mocks)

- Paramètre de dilatation α :

- ★ pour $\xi(r)$ ajustement de :

$$\xi^{\text{fit}}(r) = B^2 \xi_{\text{fidu}}(\alpha r) + A(r)$$

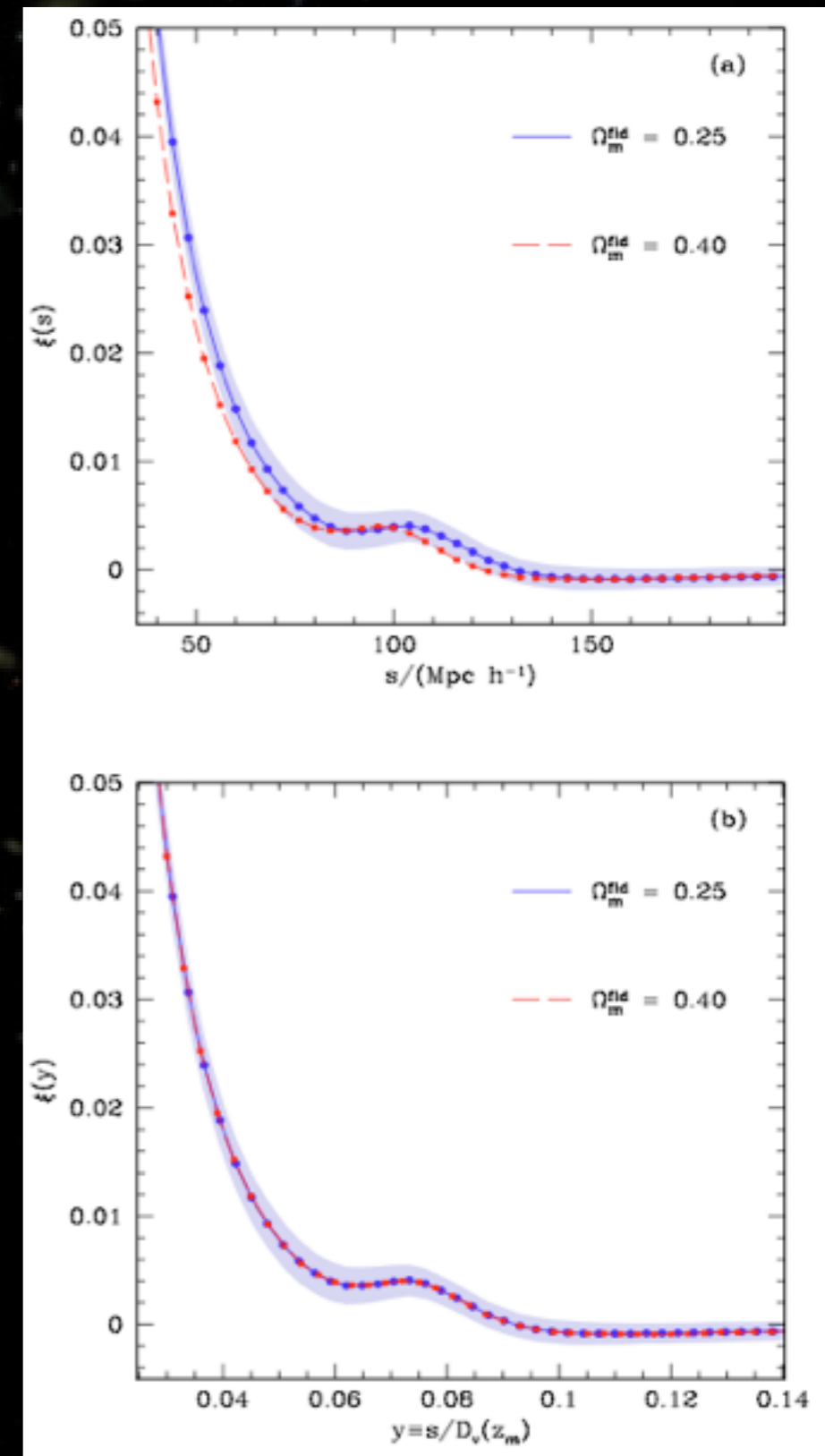
avec
$$A(r) = \frac{a_1}{r^2} + \frac{a_2}{r} + a_3$$

- ★ pour $P(k)$:

$$P^{\text{fit}}(r) = P^{\text{smooth}}(k) \times P_{\text{fidu}}^{\text{wiggles}}(k/\alpha)$$

$$P_{\text{fidu}}^{\text{wiggles}}(k) = \frac{P_{\text{fidu}}(k)}{P_{\text{fidu}}^{\text{smooth}}(k)}$$

- Toute la cosmologie est dans α



[Sanchez et al, 2012]

Programme

- Rappels cosmologiques
 - ★ Histoire de l'expansion, distances et paramètres cosmologiques
 - ★ Résultats sur l'Énergie sombre
 - ★ Oscillations acoustiques de baryons
- BOSS : Baryon Oscillations Spectroscopic Survey
 - ★ L'héritage de SDSS I et II
 - ★ SDSSIII / BOSS
- La corrélation spatiale des LRG avec DR9
 - ★ Sélection de l'échantillon, complétude
 - ★ Fonction de corrélation à deux points, Spectre de puissance
 - ★ Contraintes cosmologiques
 - Principe des analyses
 - Résultats
- La corrélation spatiale dans la forêt Lyman- α
- Conclusions et perspectives

α et l'horizon sonore

- α : cosmologie erronée dans le calcul des distances
 - ★ contient le Jacobien de la transformation $r \rightarrow r'$

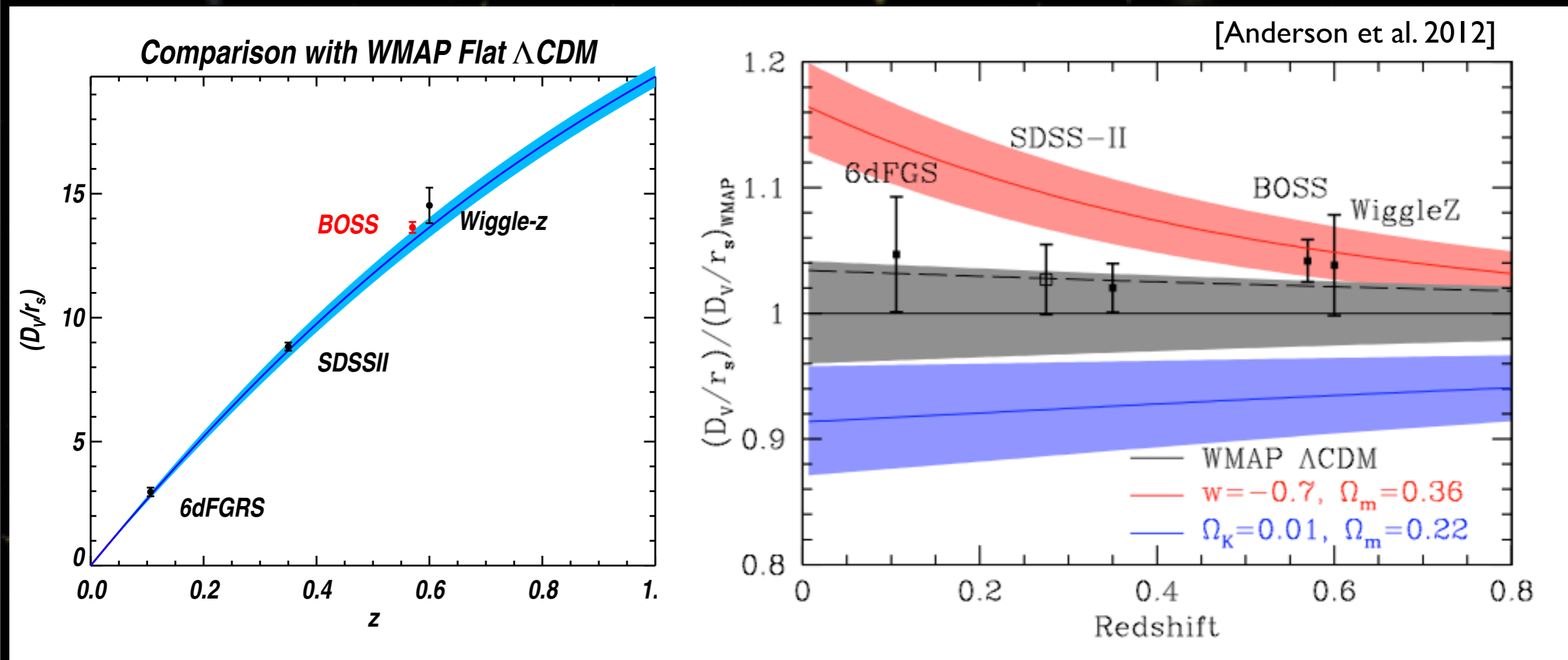
$$d^3 r' = \left(\frac{D'_V(z)}{D_V(z)} \right)^3 d^3 r \quad D_v(z) = \left[D_a^2(z) c z / H(z) \right]^{1/3}$$

- α dépendance de l'horizon sonore w.r.t. la cosmologie
 - ★ Contient le Jacobien de la transformation $r_s \rightarrow r'_s$

- **Finalemment :**
$$\alpha = \frac{D_V}{D_{V,\text{fidu}}} \times \frac{r_{s,\text{fidu}}}{r_s} = \frac{D_V / r_s}{(D_V / r_s)_{\text{fidu}}}$$

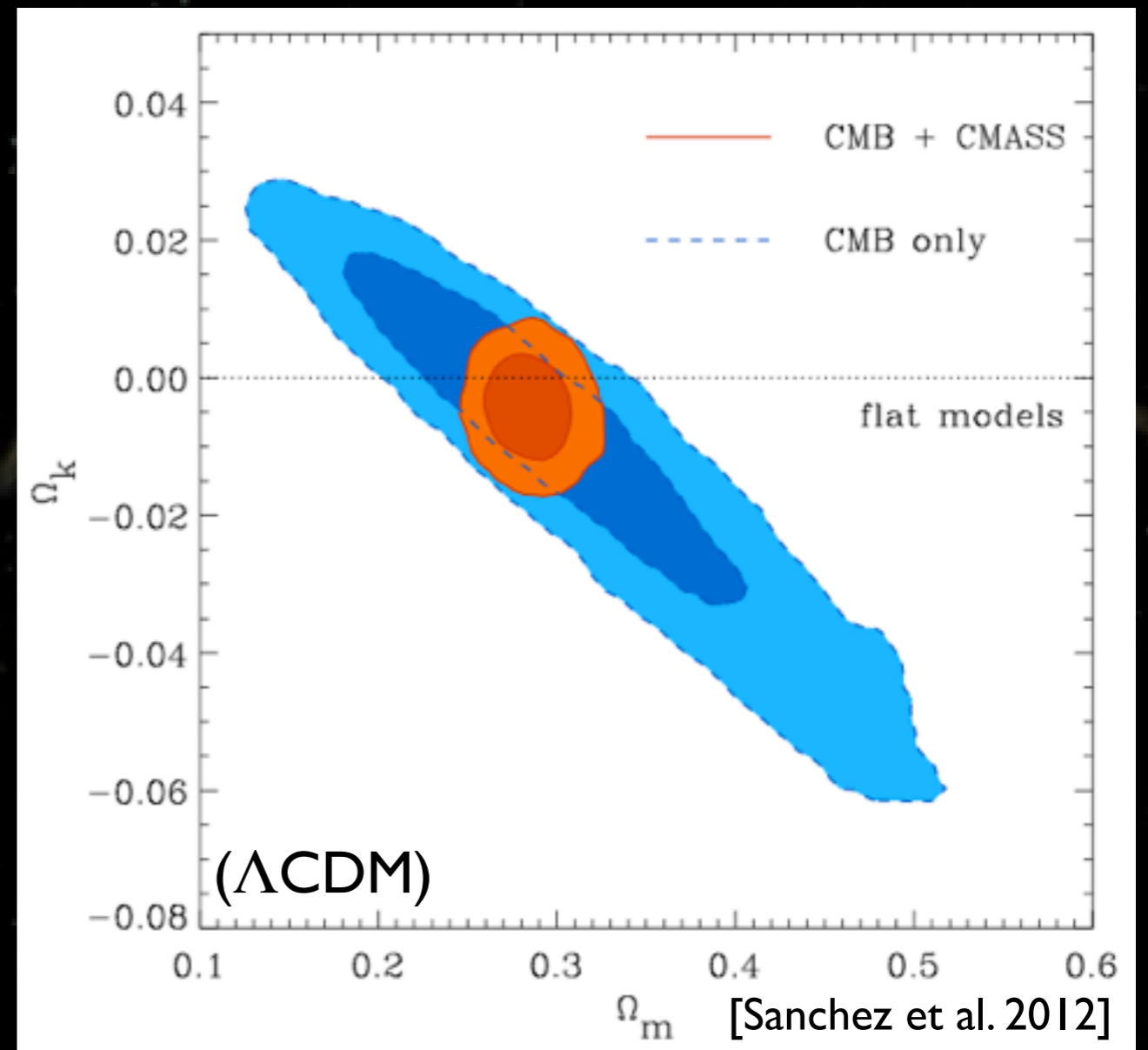
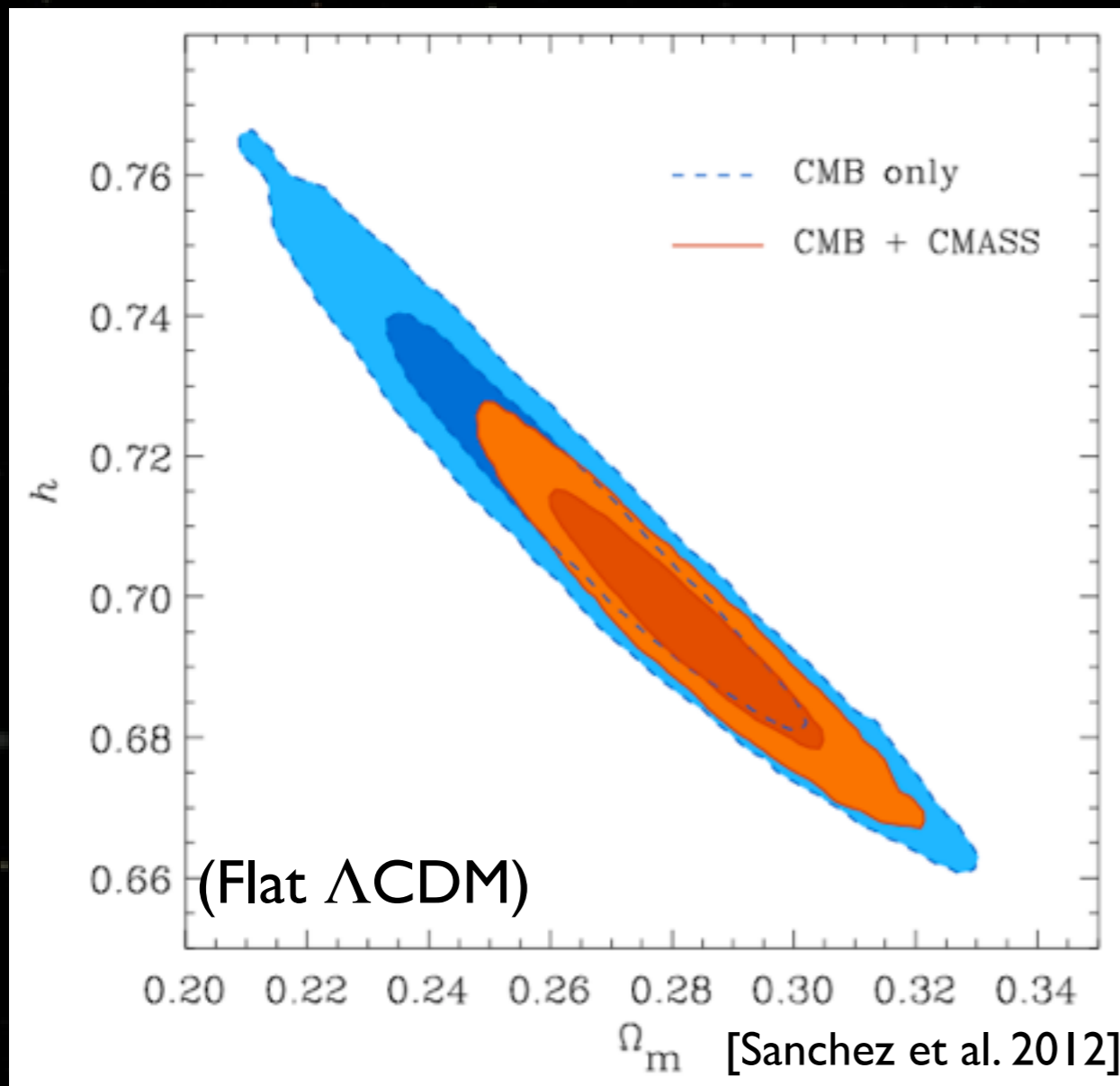
- Notre observable est donc: $D_V / r_s = \alpha \times (D_V / r_s)_{\text{fidu}}$

Diagramme de Hubble

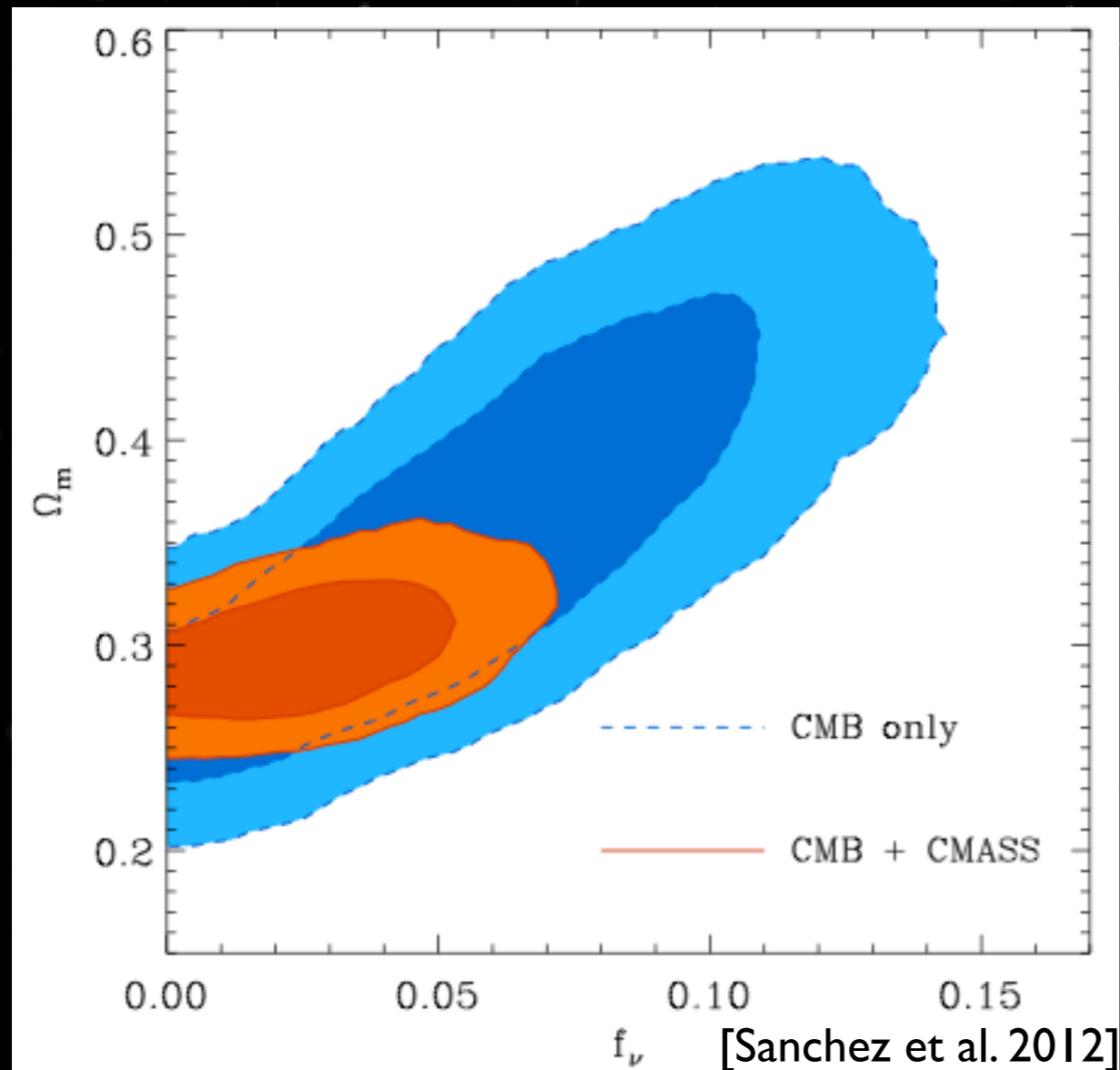


Les BAO de BOSS-CMASS sont équivalentes une SNIa à $z=0.57$ avec 1.6% de précision au lieu de $\sim 14\%$

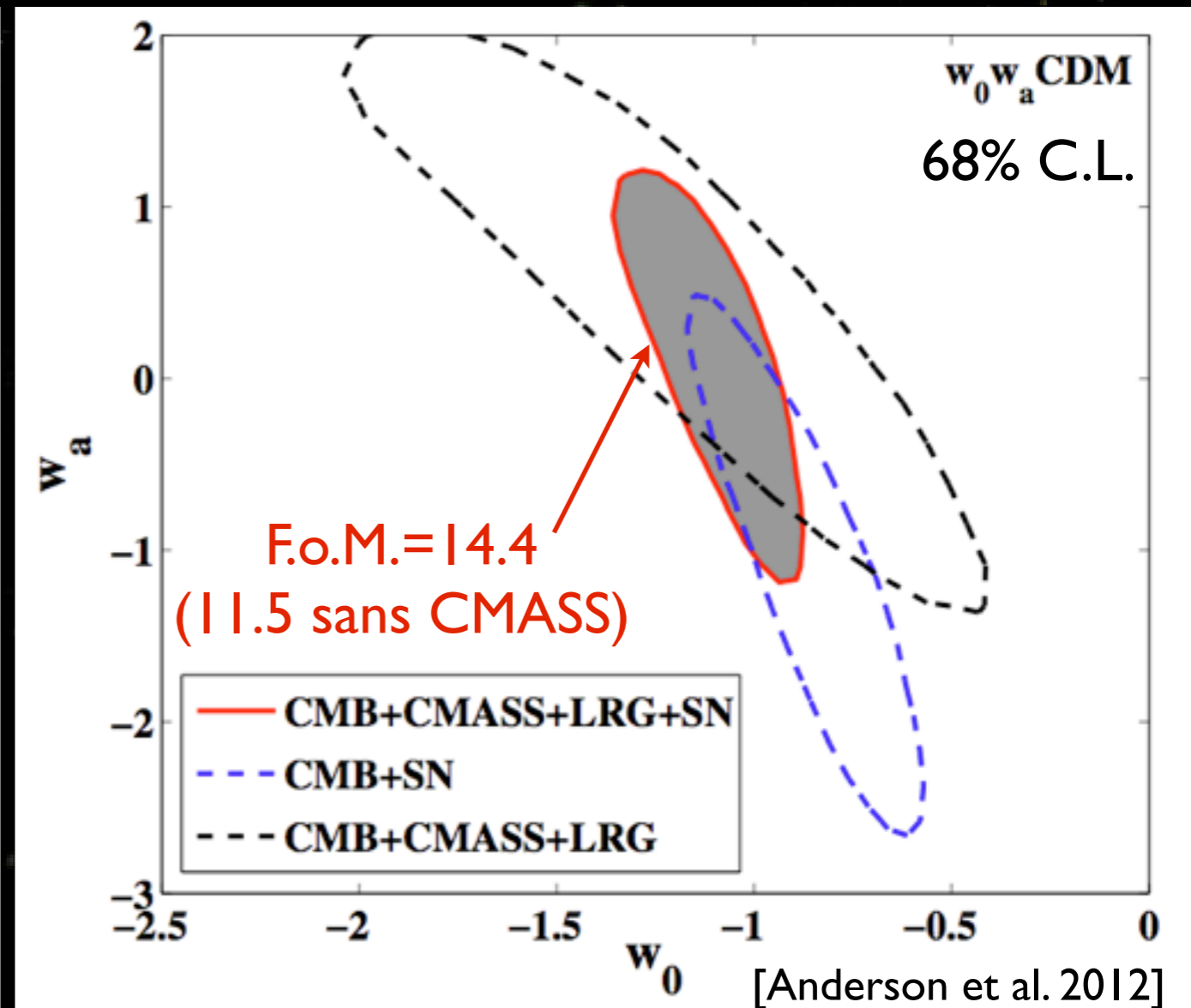
Paramètres cosmologiques



Paramètres cosmologiques

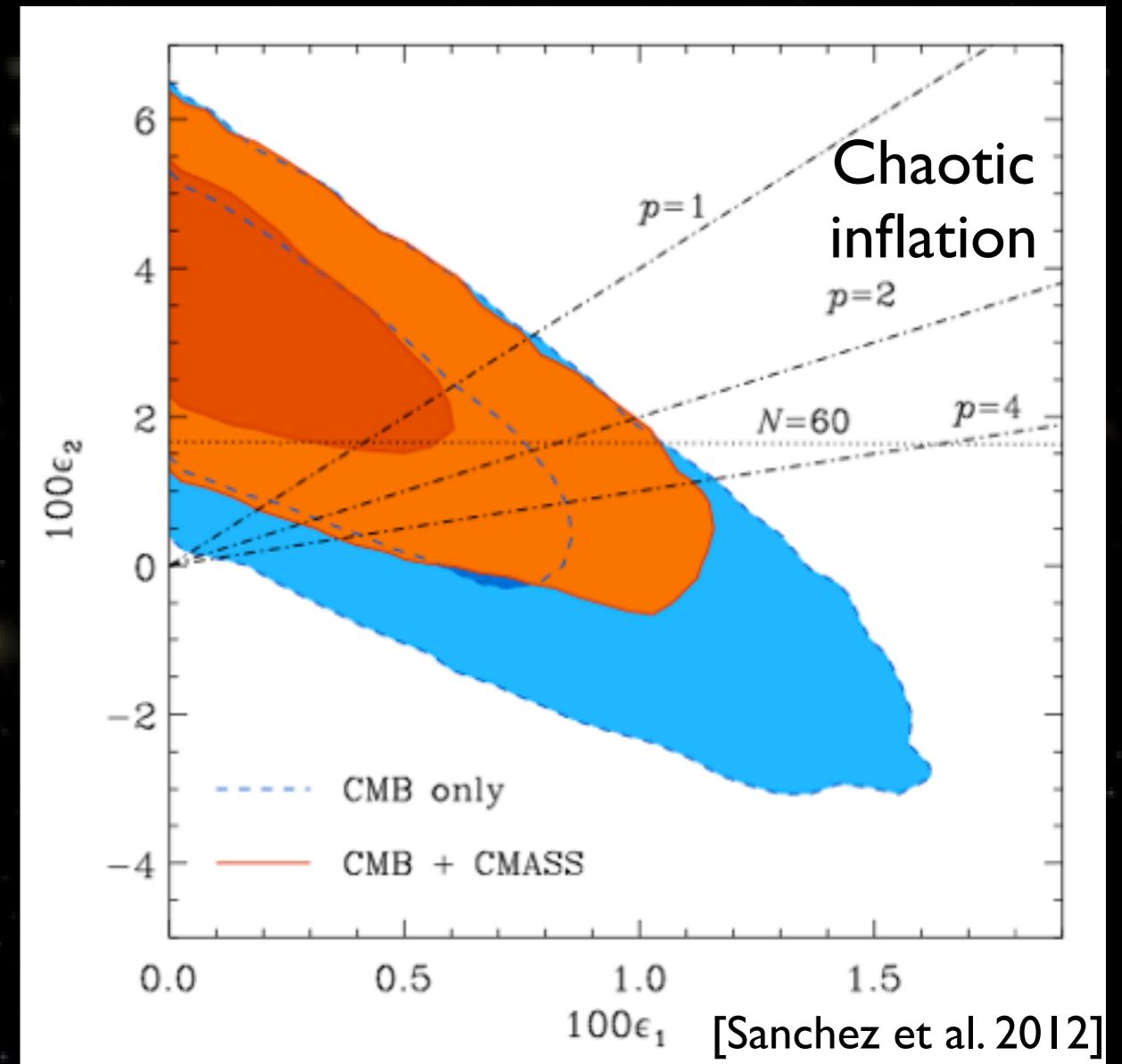
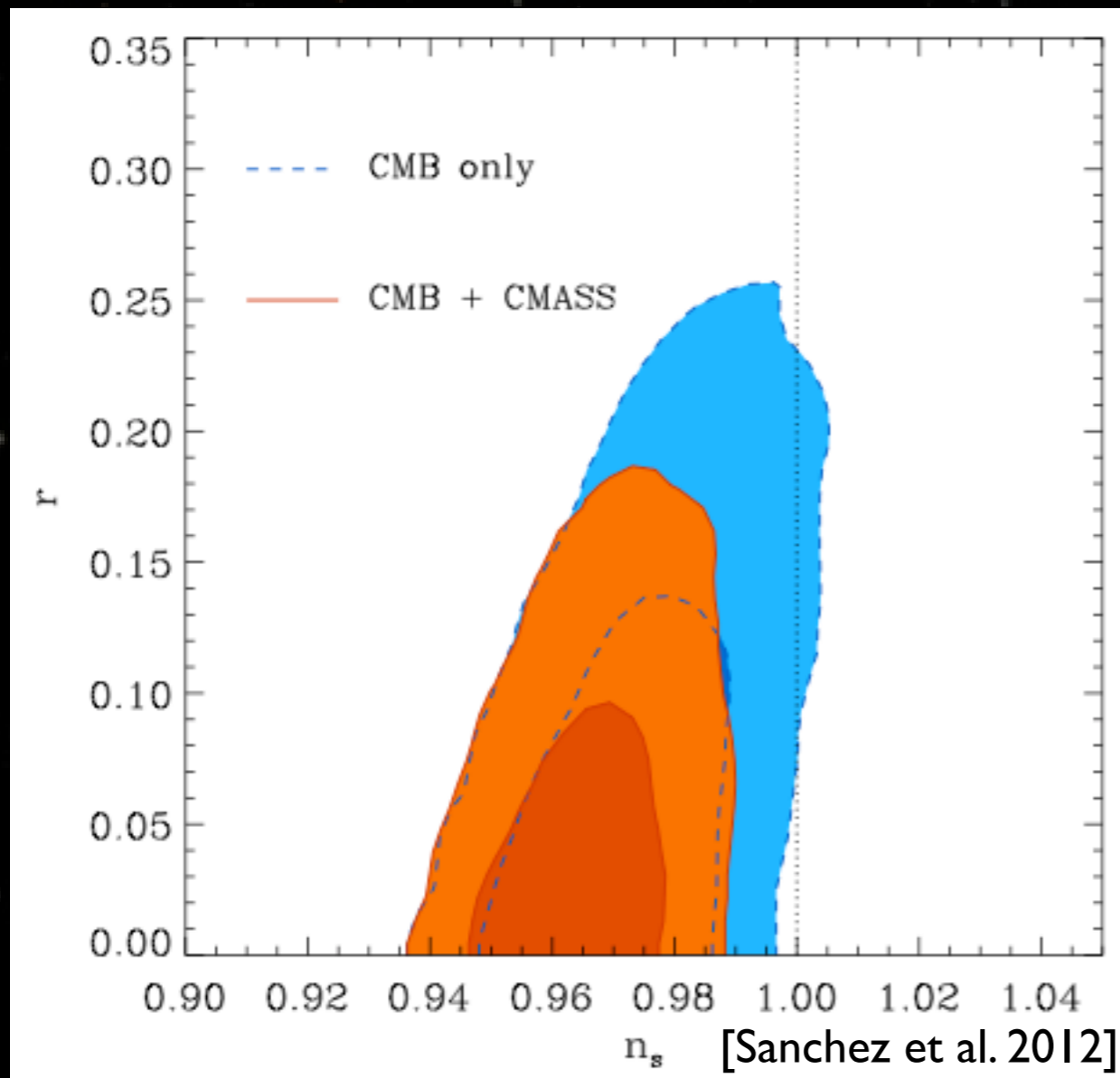


Fraction de neutrinos $f_\nu = \frac{\Omega_\nu}{\Omega_{\text{dm}}}$



Équation d'état de l'énergie sombre

Univers primordial



Paramètres de slow-roll de l'inflation

Programme

- Rappels cosmologiques
 - ★ Histoire de l'expansion, distances et paramètres cosmologiques
 - ★ Résultats sur l'Énergie sombre
 - ★ Oscillations acoustiques de baryons
- BOSS : Baryon Oscillations Spectroscopic Survey
 - ★ L'héritage de SDSS I et II
 - ★ SDSSIII / BOSS
- La corrélation spatiale des LRG avec DR9
 - ★ Sélection de l'échantillon, complétude
 - ★ Fonction de corrélation à deux points, Spectre de puissance
 - ★ Contraintes cosmologiques
 - Principe des analyses
 - Résultats
- La corrélation spatiale dans la forêt Lyman- α
- Conclusions et perspectives

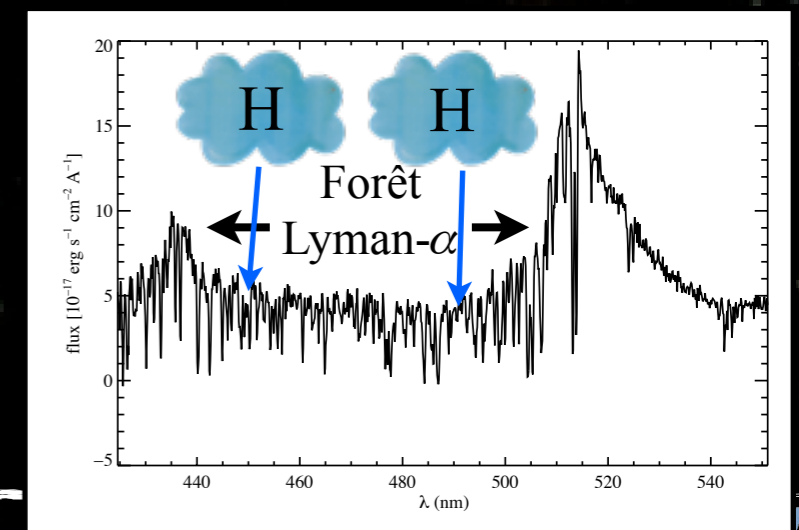
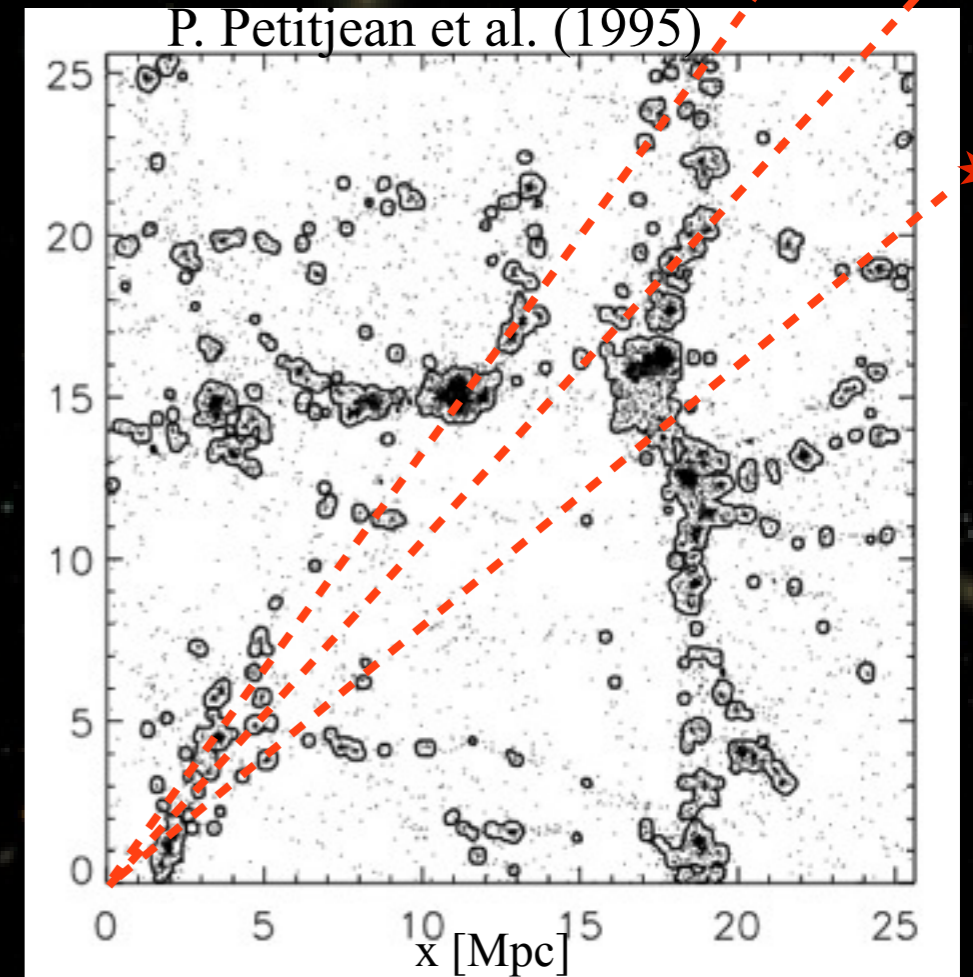
BAO dans la forêt Lyman- α

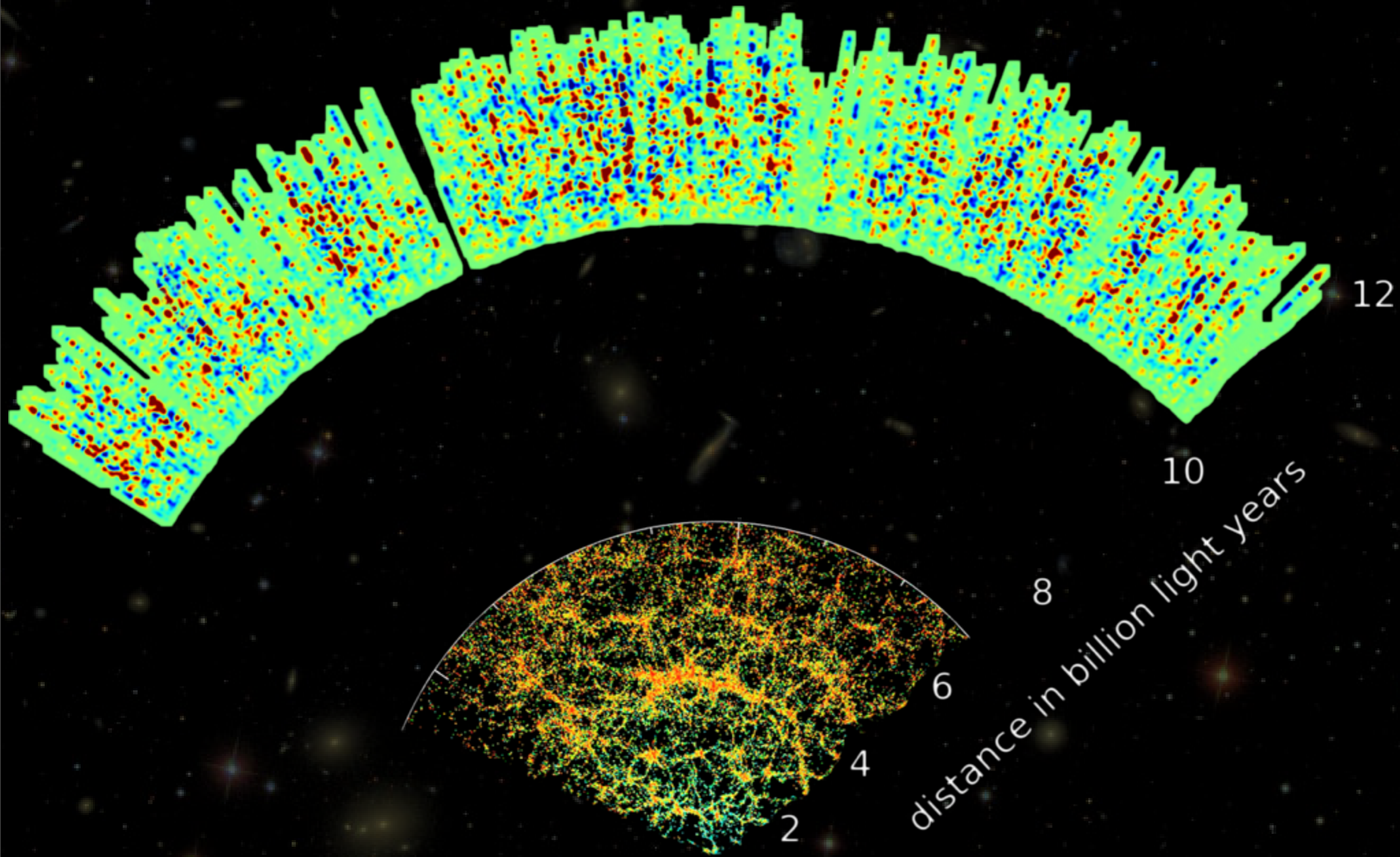
- Quasars:

- ★ Trous noir hypermassif accrétant de la matière
- ★ ~Premiers objets effondrés de l'Univers
- ★ Très lumineux : visible jusqu'à $z > 6$
- ★ Spectre connu comportant un continuum

- Forêt Lyman- α

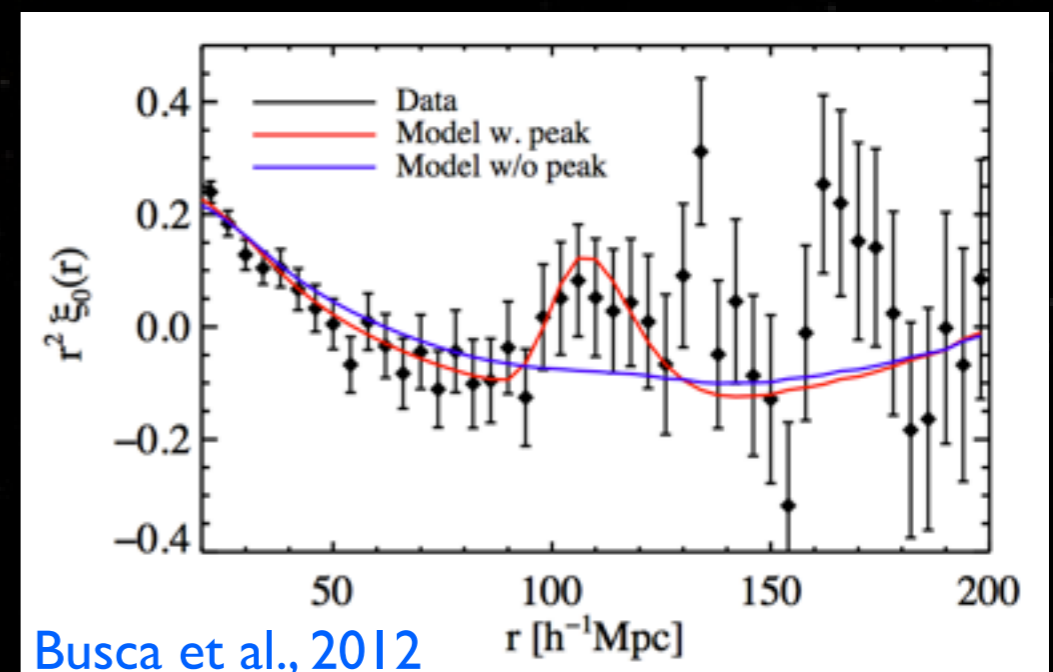
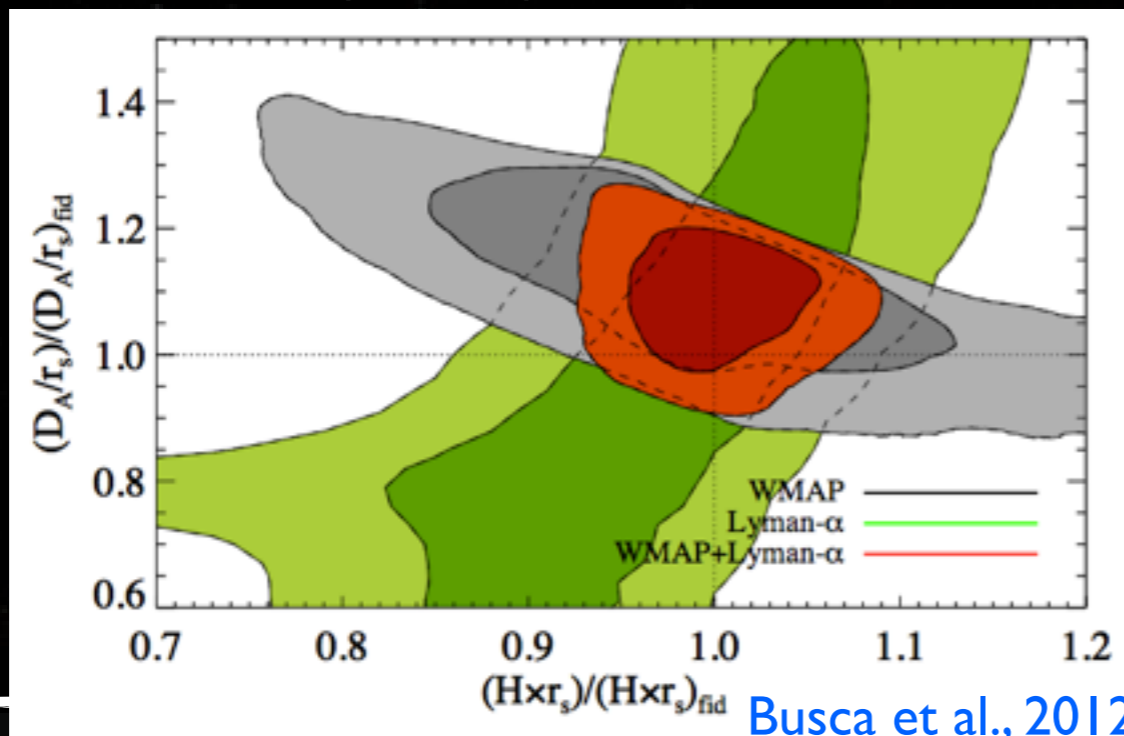
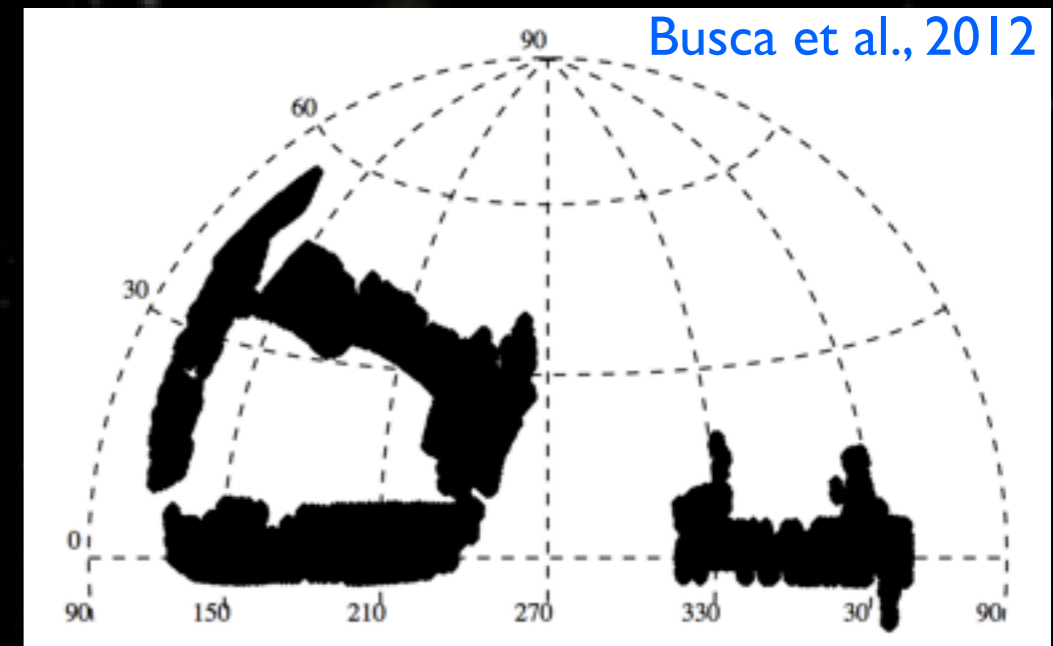
- ★ Raies d'absorptions par l'hydrogène neutre le long du trajet:
 - Lumière du Quasar redshiftée progressivement
 - Absorption par la transition Lyman- α à λ fixe dans le référentiel du nuage d'Hydrogène
 - Série de raies d'absorption dans le continu du Quasar : \rightarrow Forêt Lyman- α
 - absorption \sim densité d'H (liée à la matière noire)
- \rightarrow **Mesure de la densité de matière noire le long de la ligne de visée !!**





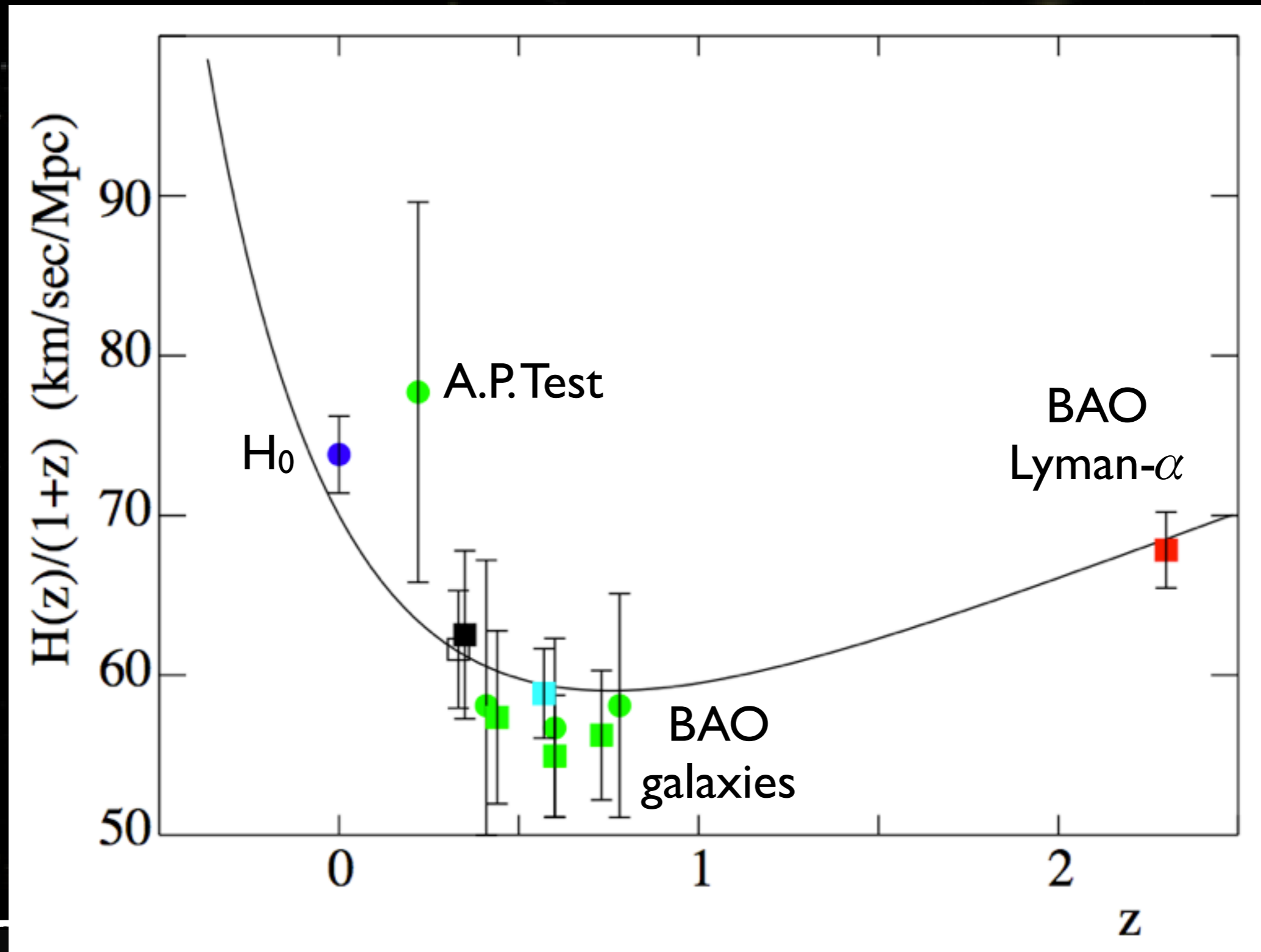
BAO avec les Quasars !

- Première détection avec BOSS
 - ★ 48 640 Quasars à $2.1 < z < 2.5$ (1/3 du lot)
 - ★ 3000 deg^2 (1/3 de la surface totale)
 - ★ Busca et al. arXiv:1211.2616v1
 - ★ Fonction de corrélation (3D) de l'absorption Lyman- α à $\langle z \rangle = 2.31$!!
 - ★ $\alpha = 1.01 \pm 0.03$
 - ★ Plus de sensibilité radiale que transverse
 - ➔ Mesure de $H(z=2.3)$!

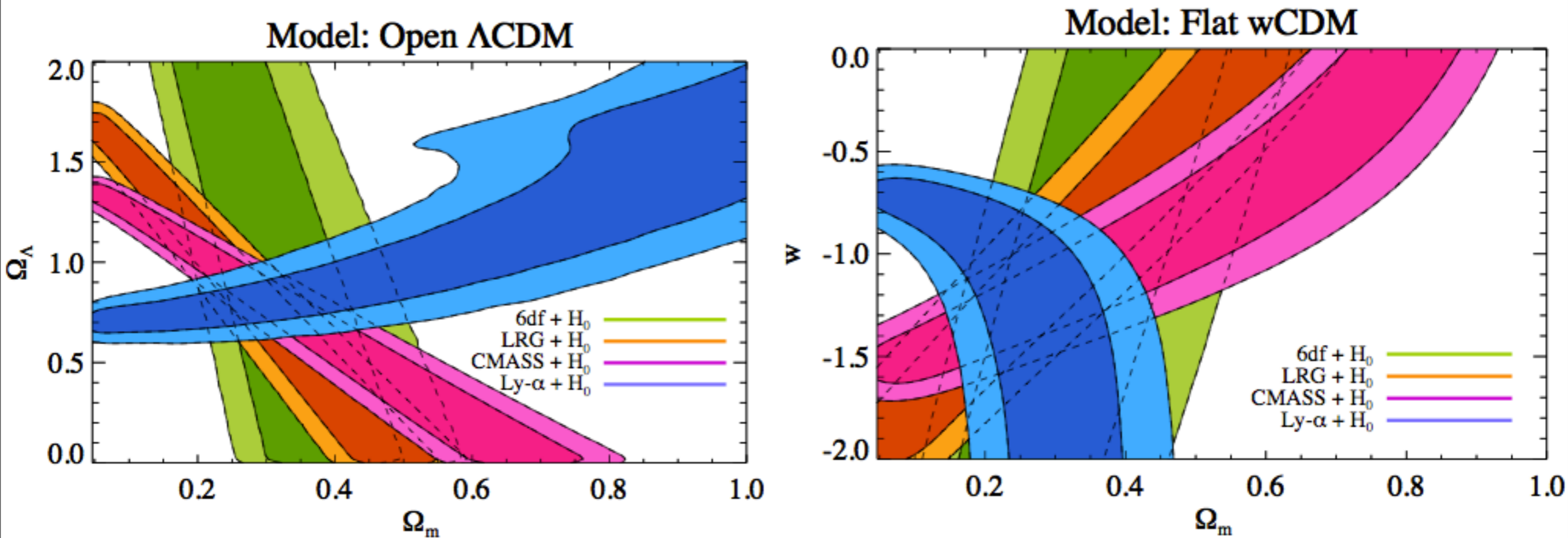


Détection à 4.2σ

Première mesure de H dans la phase de ralentissement !



Paramètres cosmologiques



Les BAO Lyman- α nécessitent la présence d'énergie sombre à elles seules (presque: il faut quand même avoir r_s qui est bien mesuré avec le CMB)

Programme

- Rappels cosmologiques
 - ★ Histoire de l'expansion, distances et paramètres cosmologiques
 - ★ Résultats sur l'Énergie sombre
 - ★ Oscillations acoustiques de baryons
- BOSS : Baryon Oscillations Spectroscopic Survey
 - ★ L'héritage de SDSS I et II
 - ★ SDSSIII / BOSS
- La corrélation spatiale des LRG avec DR9
 - ★ Sélection de l'échantillon, complétude
 - ★ Fonction de corrélation à deux points, Spectre de puissance
 - ★ Contraintes cosmologiques
 - Principe des analyses
 - Résultats
- La corrélation spatiale dans la forêt Lyman- α
- Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

- BOSS est à 30% de sa prise de données
- En parfait accord avec le planning du survey
- Analyses BAO (18%) et Lyman- α (30%) :
 - ★ BAO LRG détectées à $z=0.57$ à 5σ : mesure de D_V à $z=0.57$ à 1.6%
 - ★ BAO Lyman- α détectées à $z=2.31$ à 4σ : mesure de $H(z=2.31)$ à 3.5%
 - ★ Première mesure de la phase décélérée !
 - ★ premières contraintes cosmologiques confortent un Univers plat dominé par une constante cosmologique
 - ★ Meilleures mesures à ce jour sur (w_0, w_a)
- Le meilleur reste à venir !
 - ★ Prise de données jusqu'à mi-2014
 - ★ D_V et $H(z)$ à 1% avec les LRG à $z=0.6$
 - ★ D_V et $H(z)$ à 1.5% avec la forêt Lyman- α des Quasars à $z=2.5$