

**BOSS : Toute la lumière sur l'énergie sombre**



---

**Nicolás Busca - LPC 2/3/2012**

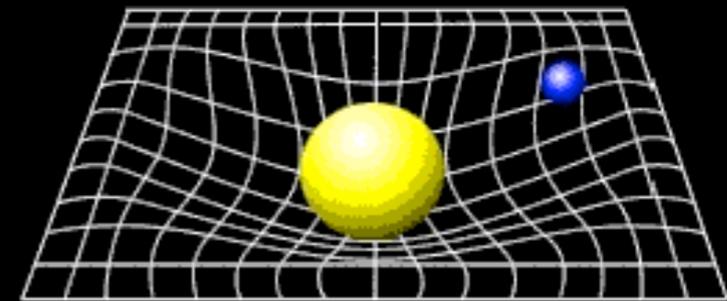
# Les piliers de la cosmologie moderne

- **Le principe cosmologique** (préjugé ?)

- l'Univers est isotrope et homogène

- **La théorie de la relativité générale** (théorie)

$$(\text{géométrie}) = 8\pi G \left( \begin{array}{c} \text{distribution} \\ \text{de} \\ \text{matière} \end{array} \right)$$



- **L'expansion de l'Univers** (observation)

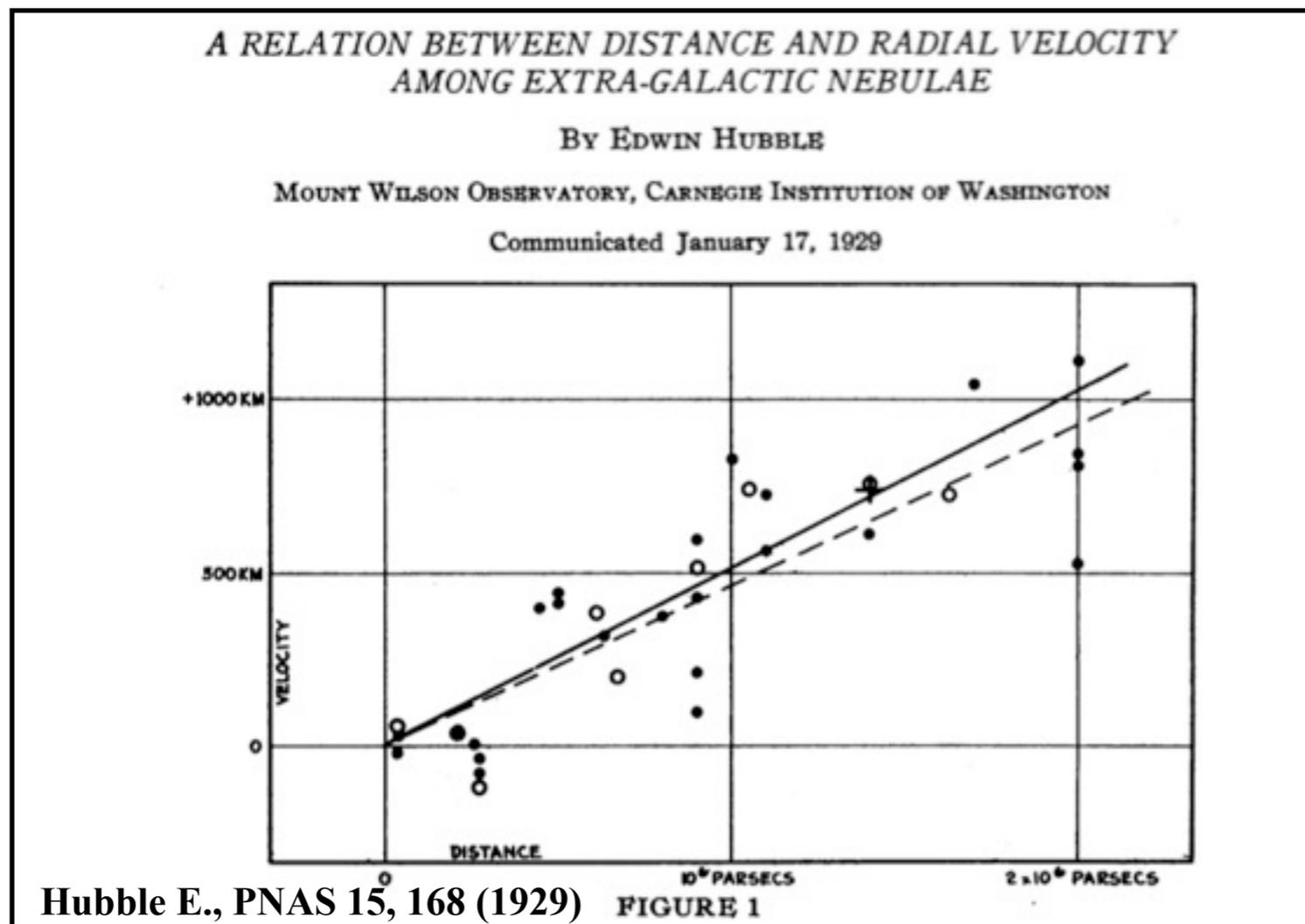


E. Hubble

Hubble E., PNAS 15, 168 (1929)

# Les piliers de la cosmologie moderne

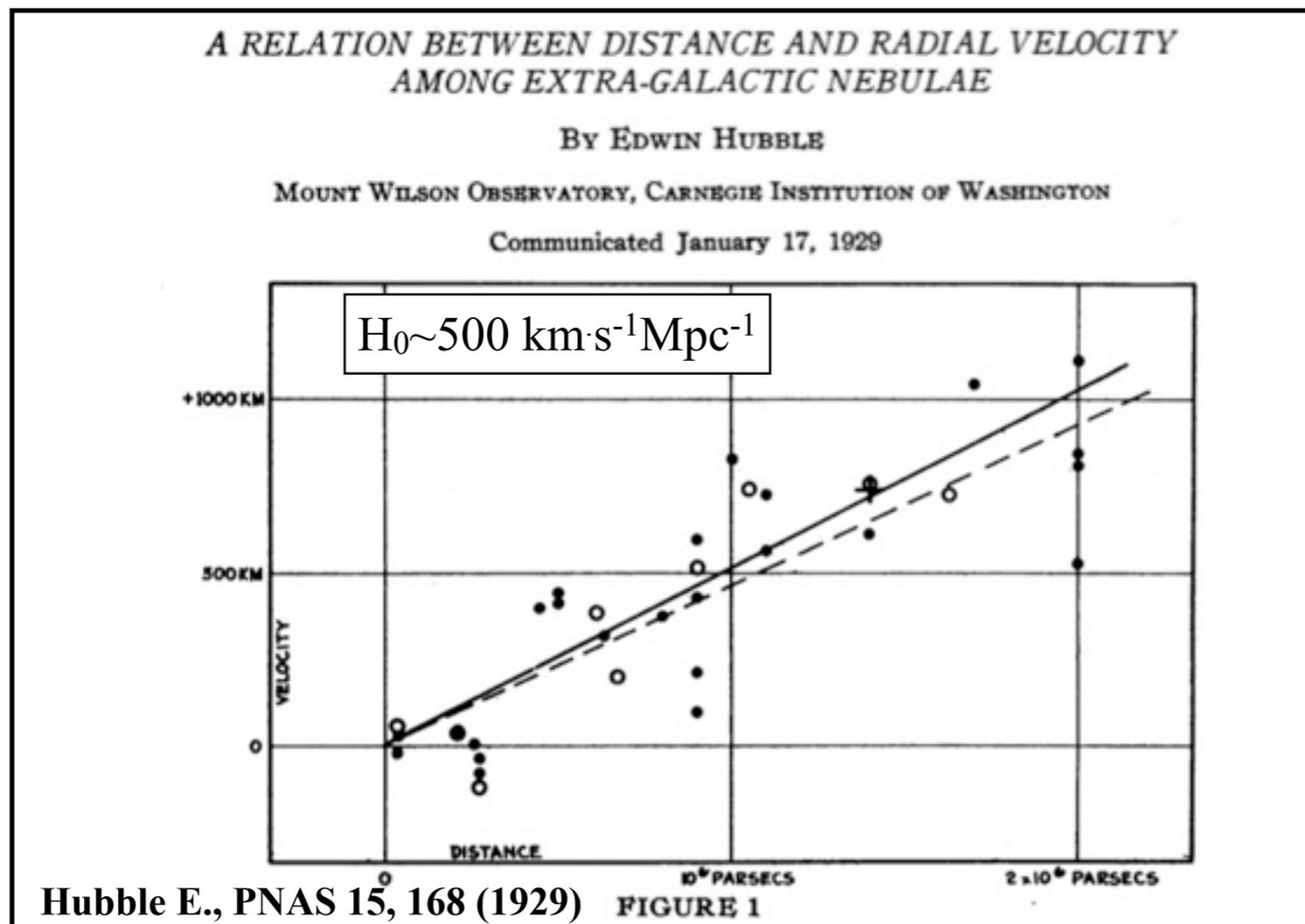
- L'expansion de l'Univers (observation)



E. Hubble

# Les piliars de la cosmologie moderne

- L'expansion de l'Univers (observation)

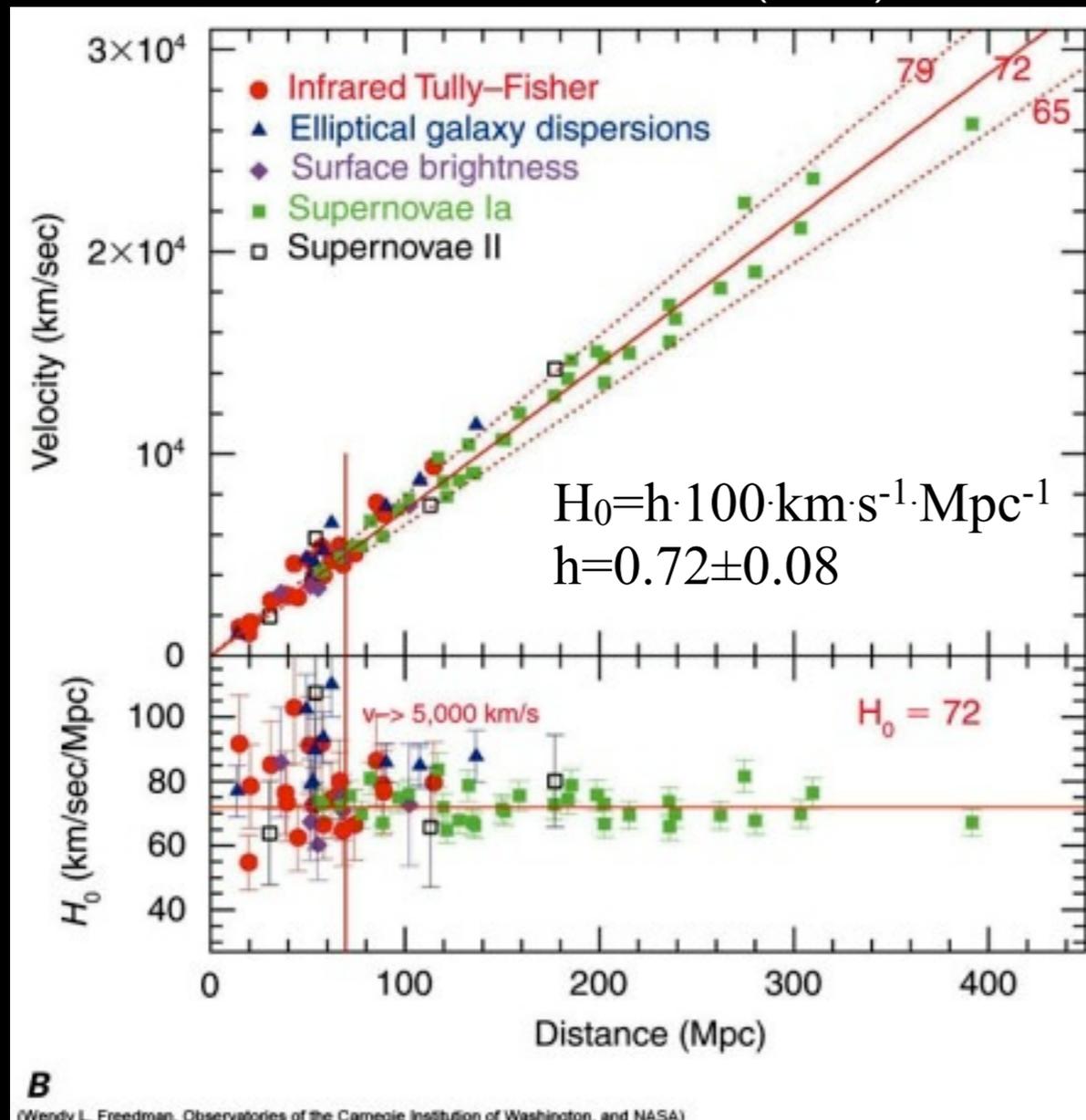


E. Hubble

# Les piliars de la cosmologie moderne

## • L'expansion de l'Univers (observation)

Freedman et al. (2001)



Hubble Space Telescope

# Les piliers de la cosmologie moderne

- Qu'est ce que c'est l'expansion ?

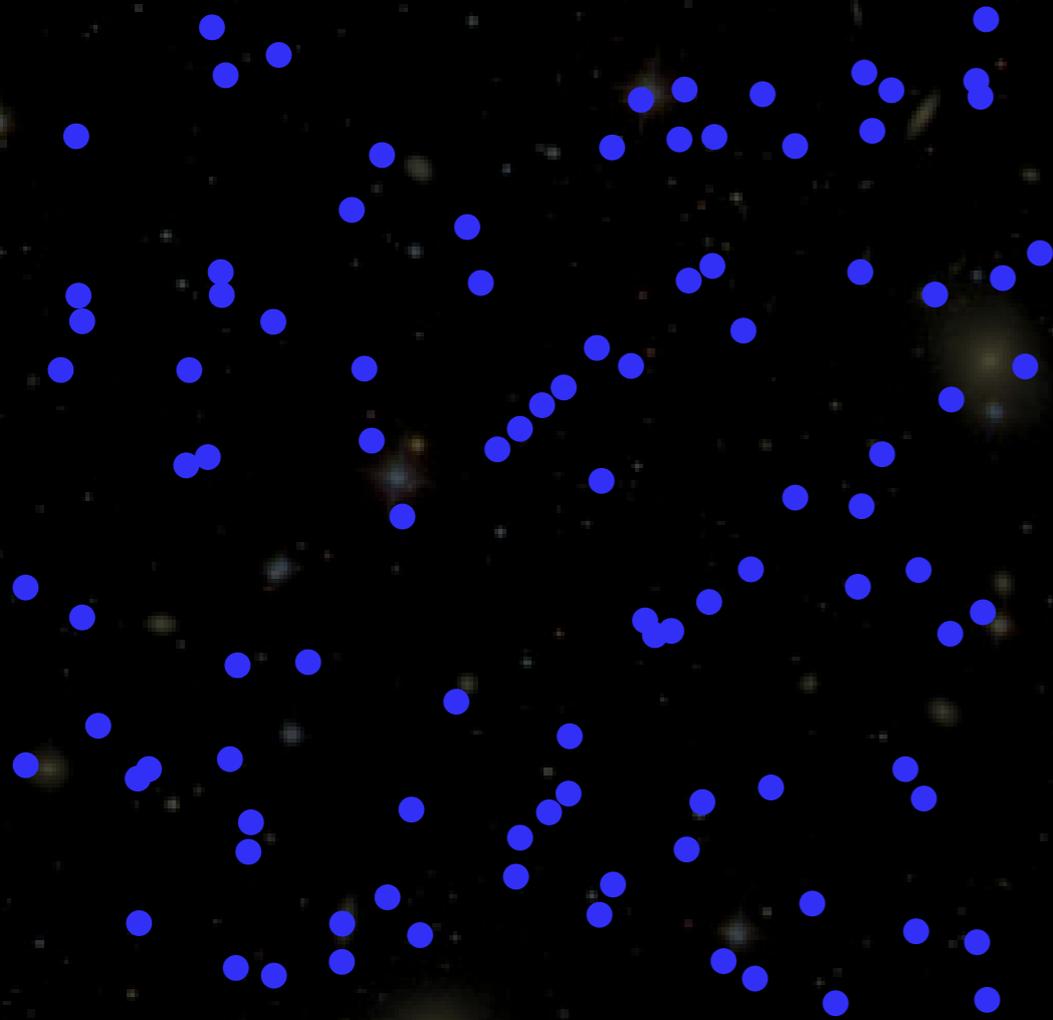
Observation :

Les galaxies lointaines s'éloignent de nous

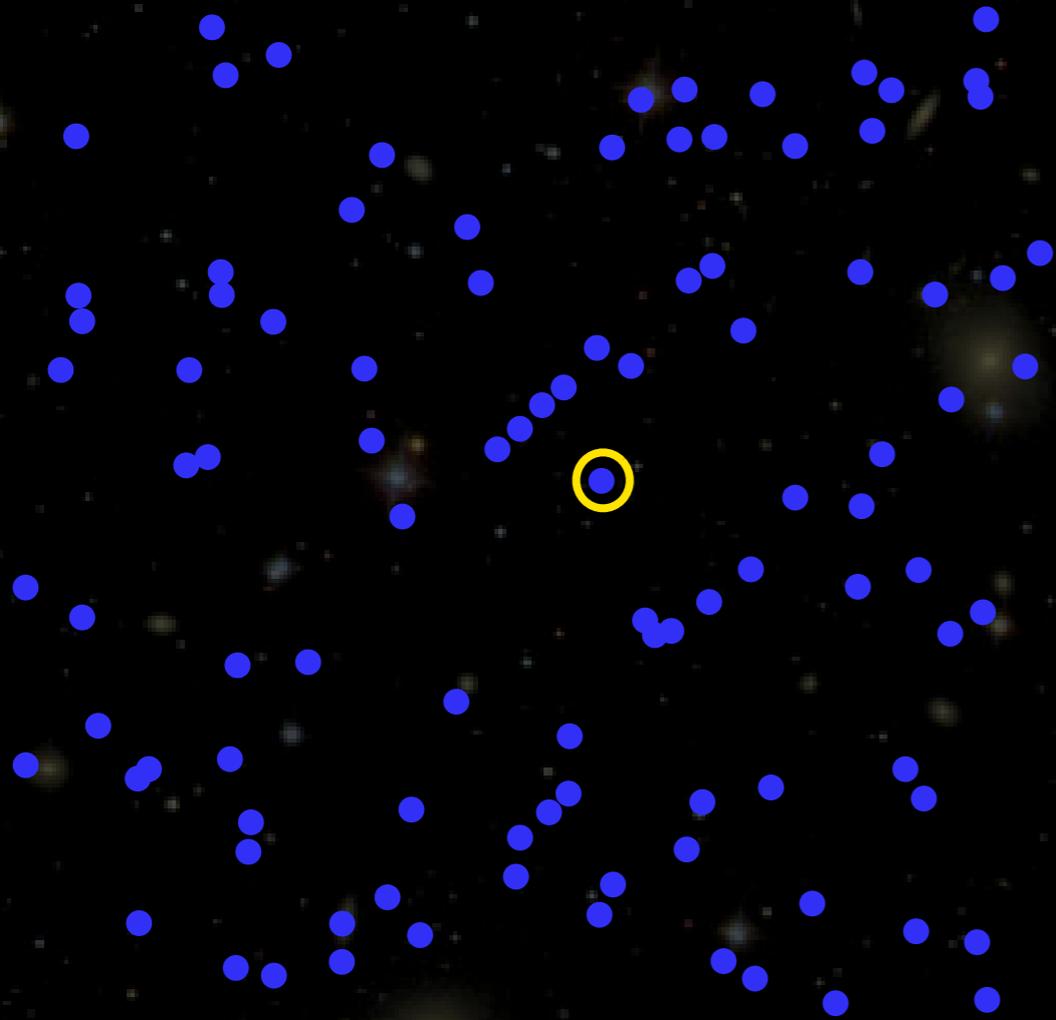
Théorie:

“condition initiale” : Les bouts de “matière” primordial avait une vitesse aléatoire (tel qu'on voit l'expansion aujourd'hui... comme on la voit aujourd'hui)

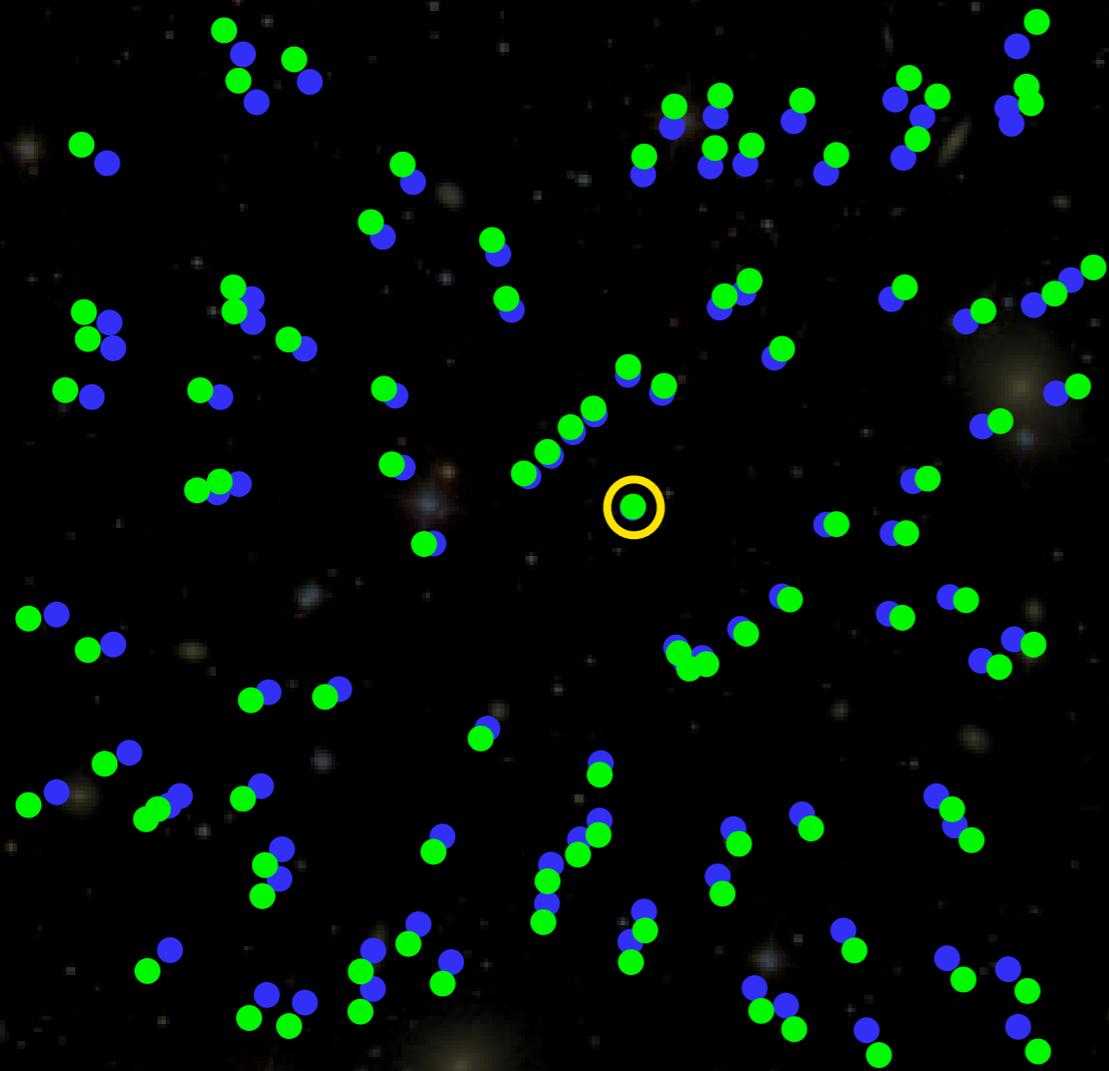
l'expansion est homogène et isotrope



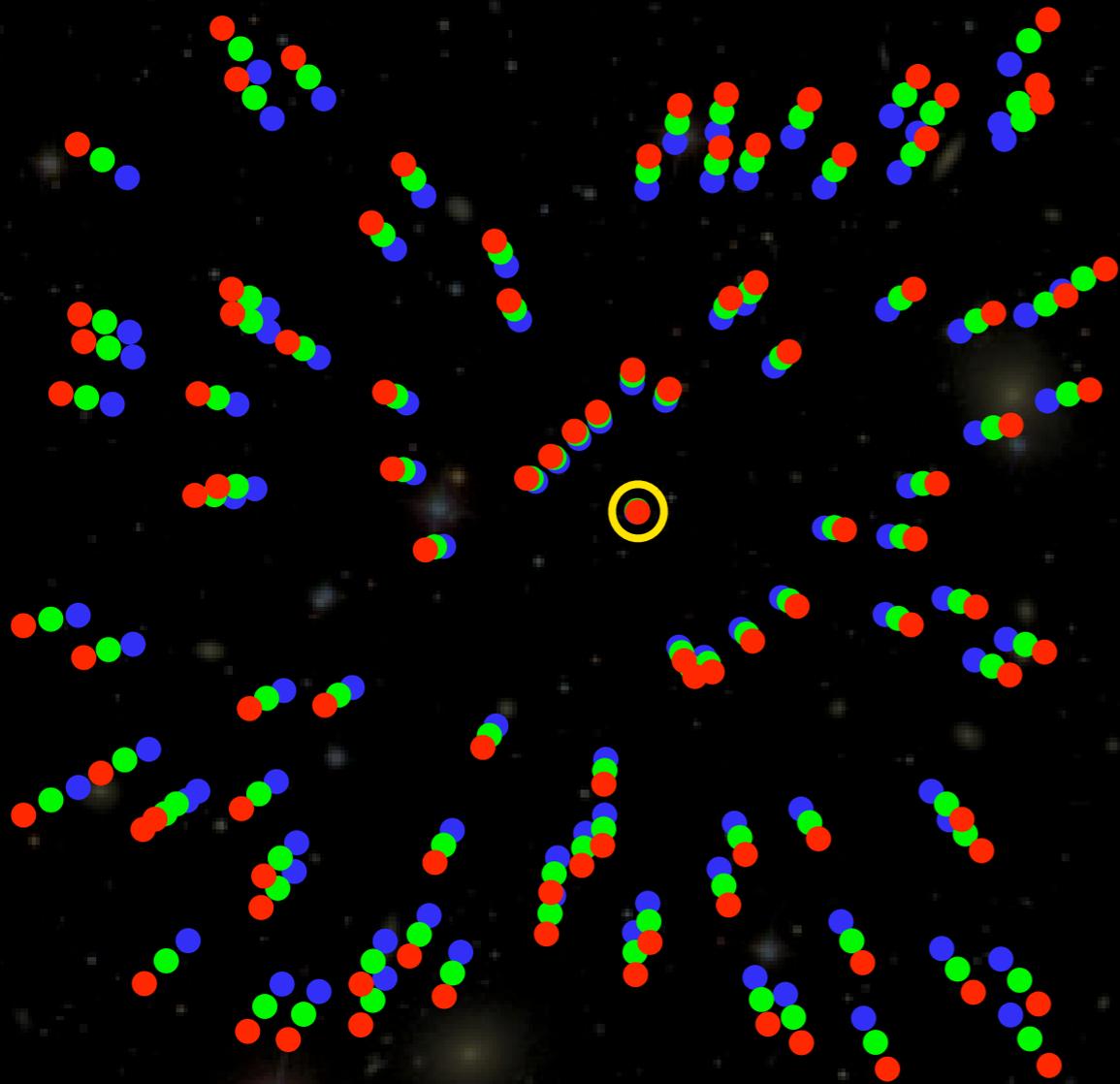
l'expansion est homogène et isotrope



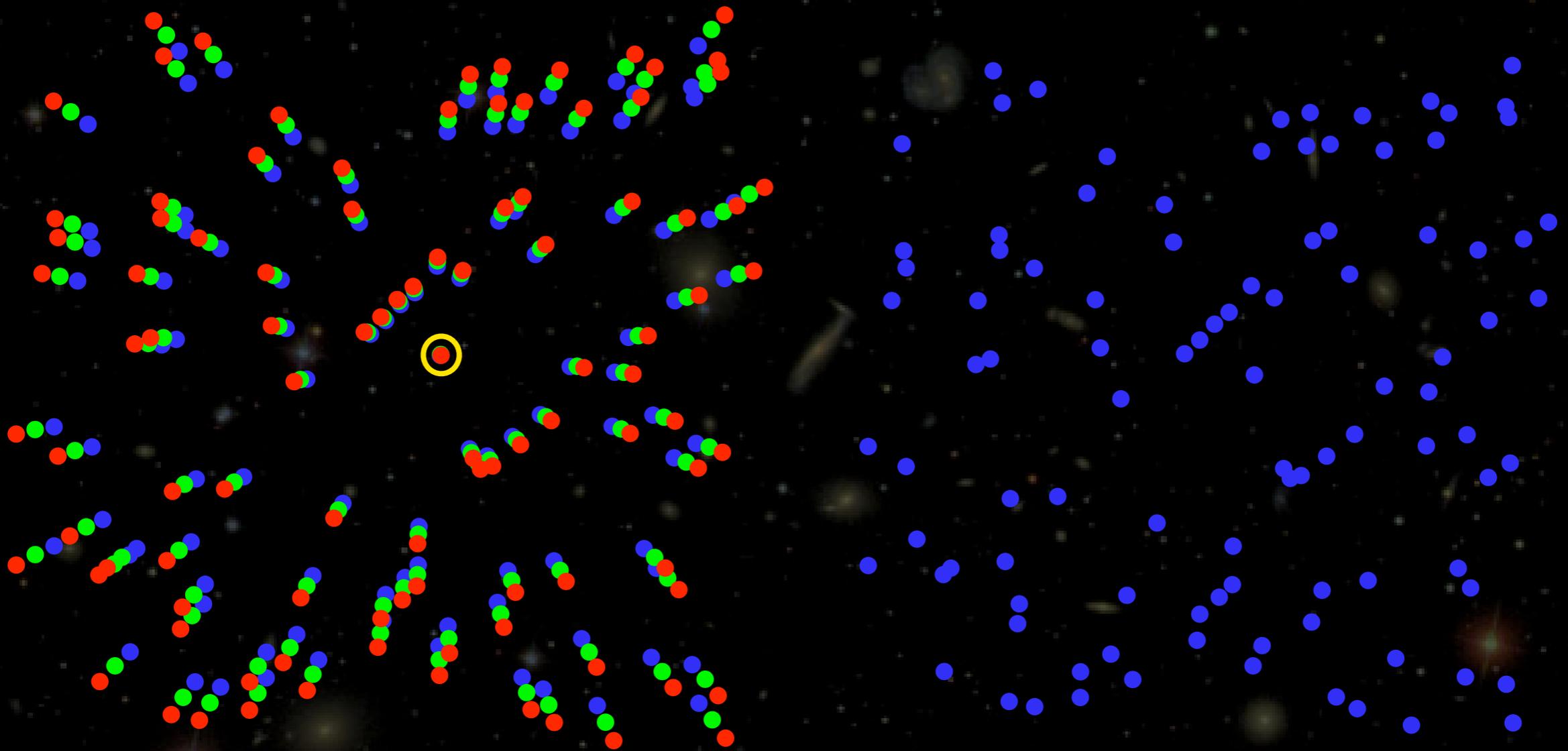
l'expansion est homogène et isotrope



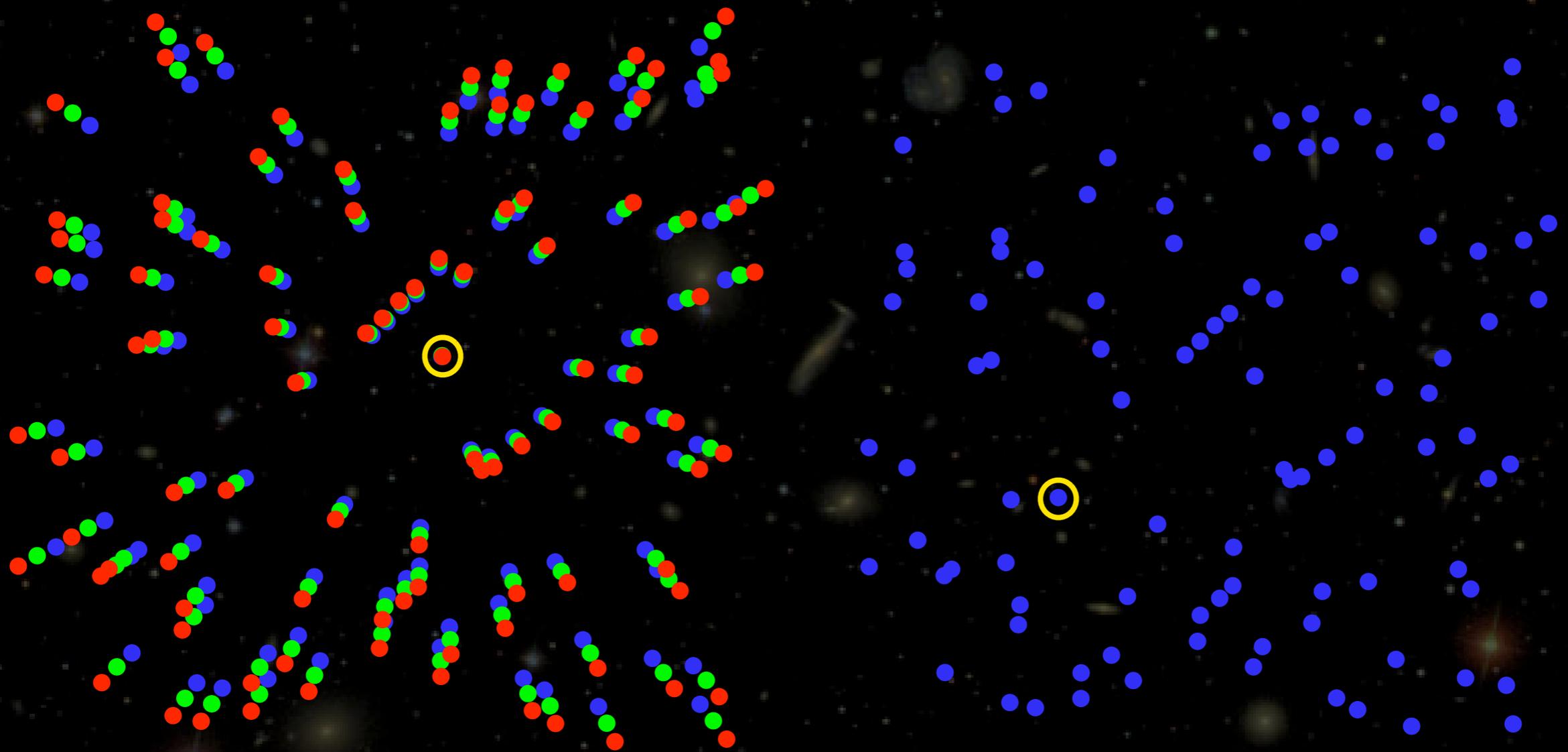
l'expansion est homogène et isotrope



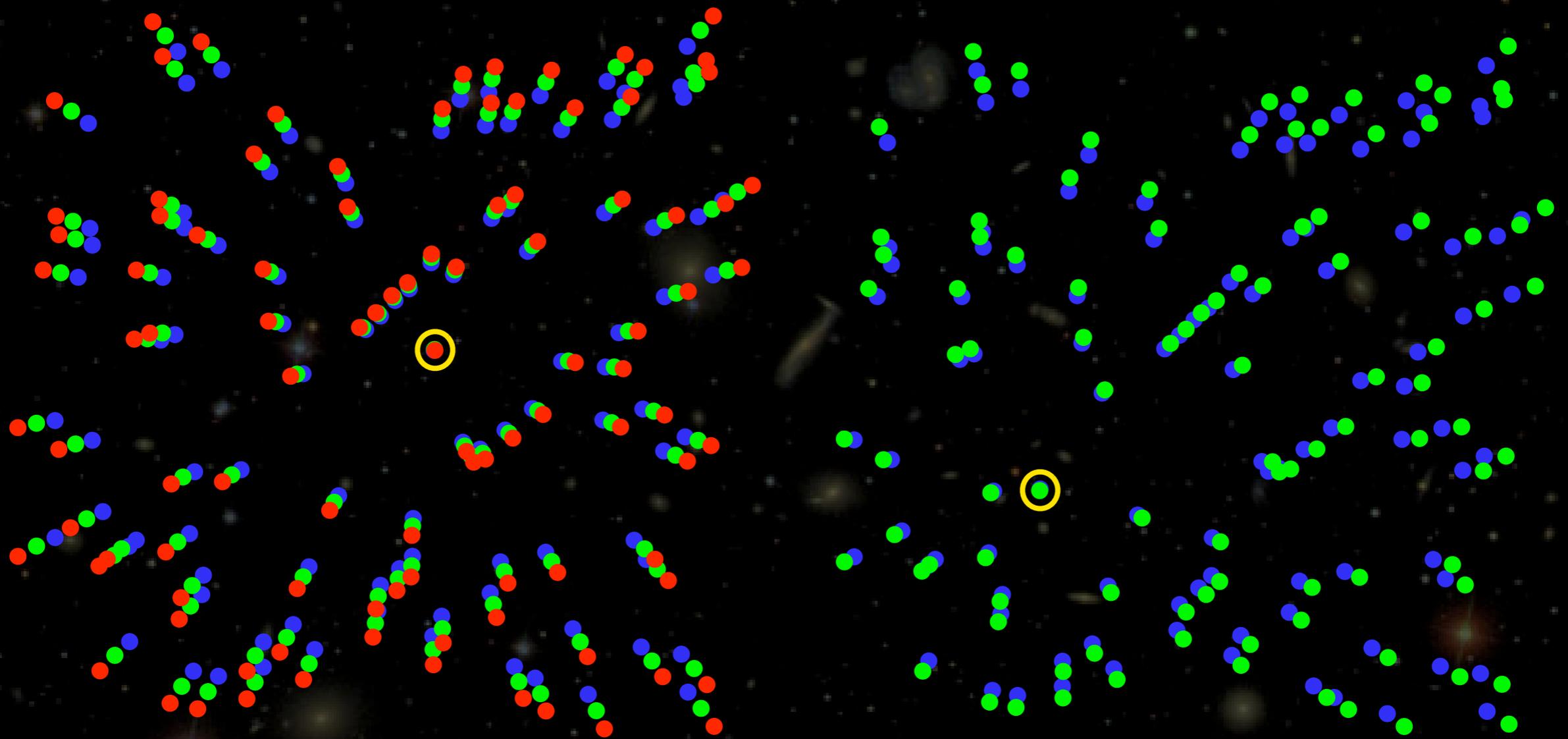
l'expansion est homogène et isotrope



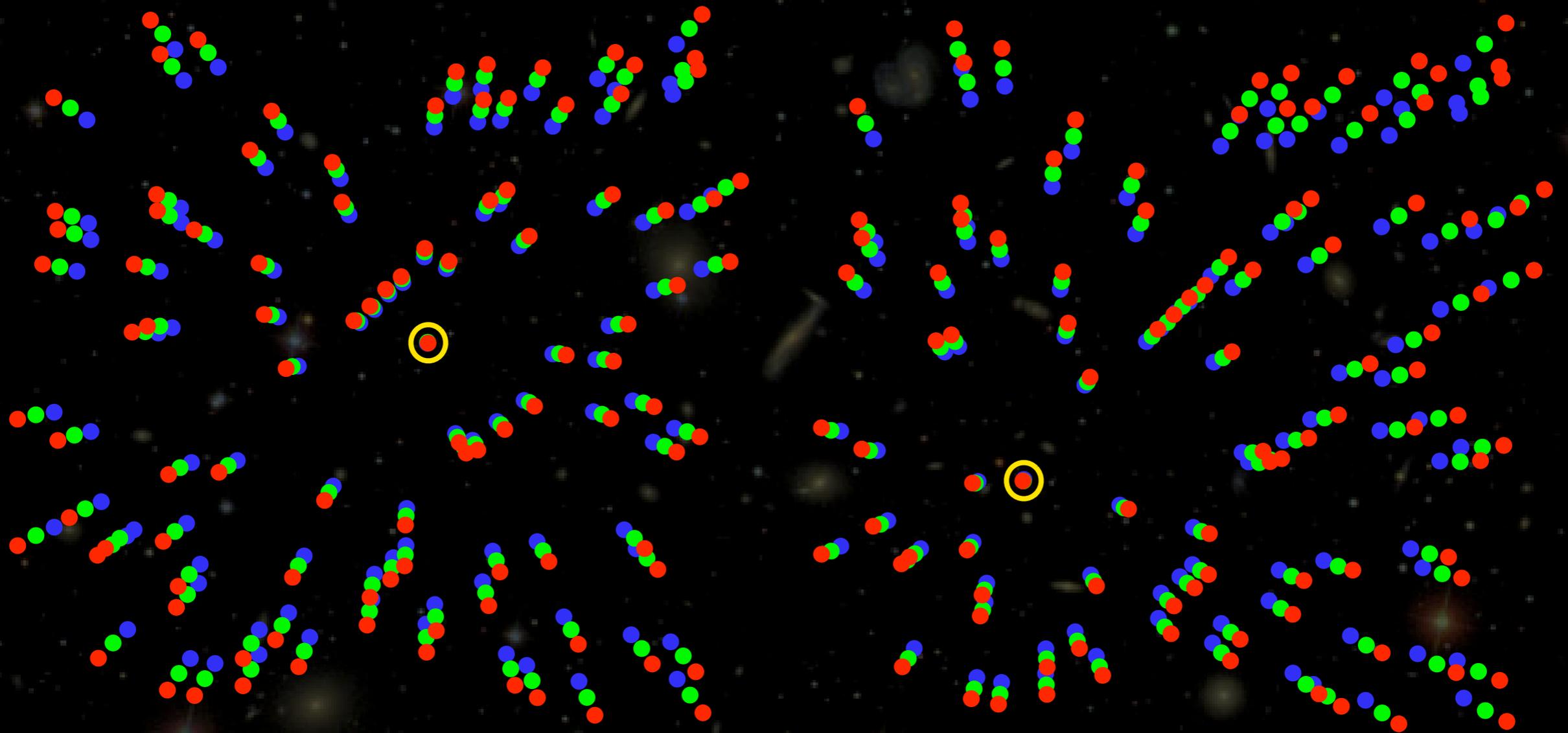
l'expansion est homogène et isotrope



l'expansion est homogène et isotrope



l'expansion est homogène et isotrope



# “Features” d’un Univers en expansion

•Effet Doppler :

la lumière émise par des galaxies lointaines est décalée vers le rouge

$$\frac{\lambda_{\text{observée}}}{\lambda_{\text{émise}}} = 1+z$$

# “Features” d’un Univers en expansion

• Effet Doppler :

la lumière émise par des galaxies lointaines est décalée vers le rouge

$$\frac{\lambda_{\text{observée}}}{\lambda_{\text{émise}}} = 1 + z$$

# “Features” d’un Univers en expansion

- Effet Doppler :

la lumière émise par des galaxies lointaines est décalée vers le rouge

$$\frac{\lambda_{\text{observée}}}{\lambda_{\text{émise}}} = 1 + z$$

- Expansion décrite par un “paramètre d’échelle”  $a(z) \equiv 1 + z$

- Dynamique décrite par le taux de Hubble :  $H(t) \equiv \frac{\dot{a}}{a}$

# “Features” d’un Univers en expansion

- Effet Doppler :

la lumière émise par des galaxies lointaines est décalée vers le rouge

$$\frac{\lambda_{\text{observée}}}{\lambda_{\text{émise}}} = 1 + z$$

- Expansion décrite par un “paramètre d’échelle”  $a(z) \equiv 1 + z$

- Dynamique décrite par le taux de Hubble :  $H(t) \equiv \frac{\dot{a}}{a}$

- Distances :  
“tricky”



distances = fonctions de H

# Distances en Cosmologie

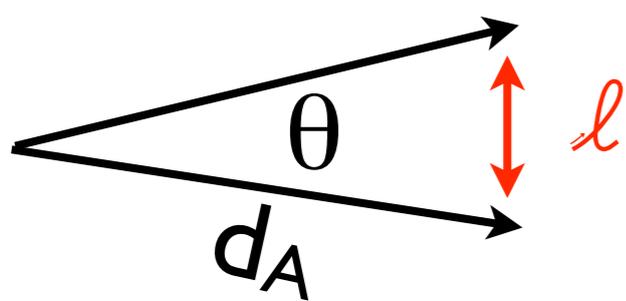
idée : utiliser des étalons standards



*distance de luminosité  $d_L$  (SNe):*

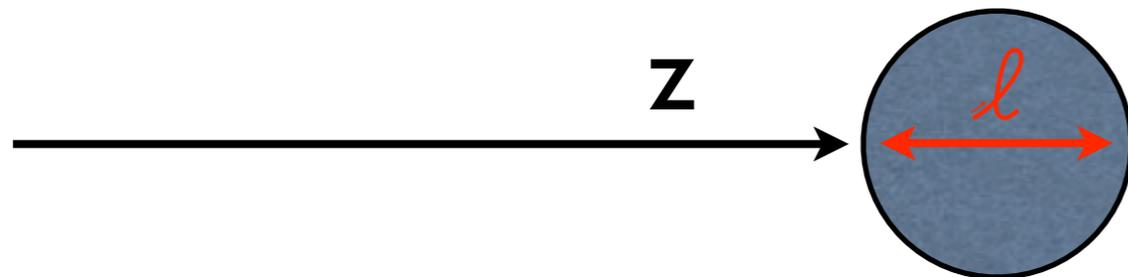
$$F = \frac{L}{4\pi d_L^2}$$

*distance de diamètre angulaire  $d_A$ :*



$$d_A = \frac{l}{\theta}$$

*épaisseur en  $z$ :*



$$d_{||} = \frac{l}{dz}$$

# Distances en Cosmologie

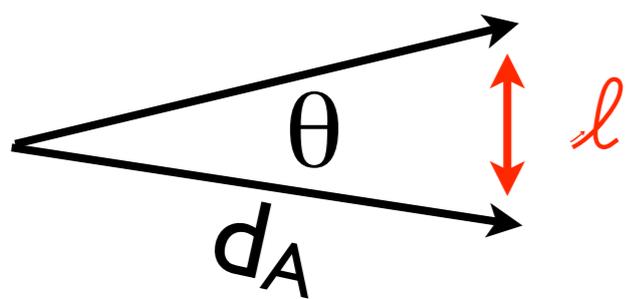
*coordonnée comobile radiale*

$$r(z) = c \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

*distance de luminosité  $d_L$  (SNe):*

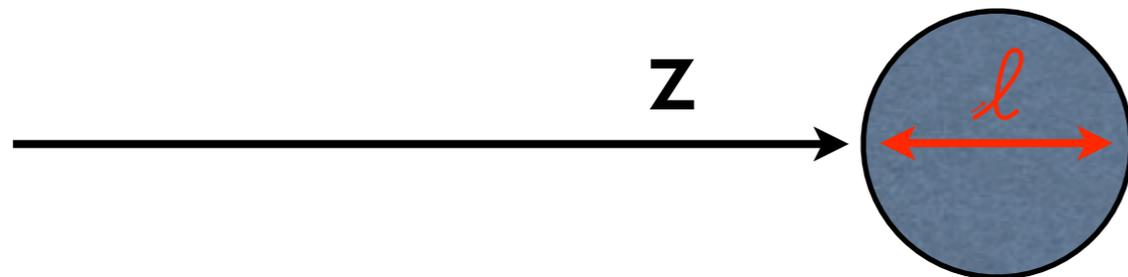
$$F = \frac{L}{4\pi d_L^2} \quad d_L = (1+z)r(z) = c(1+z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

*distance de diamètre angulaire  $d_A$ :*



$$d_A = \frac{l}{\theta} = \frac{r(z)}{1+z}$$

*épaisseur en  $z$ :*

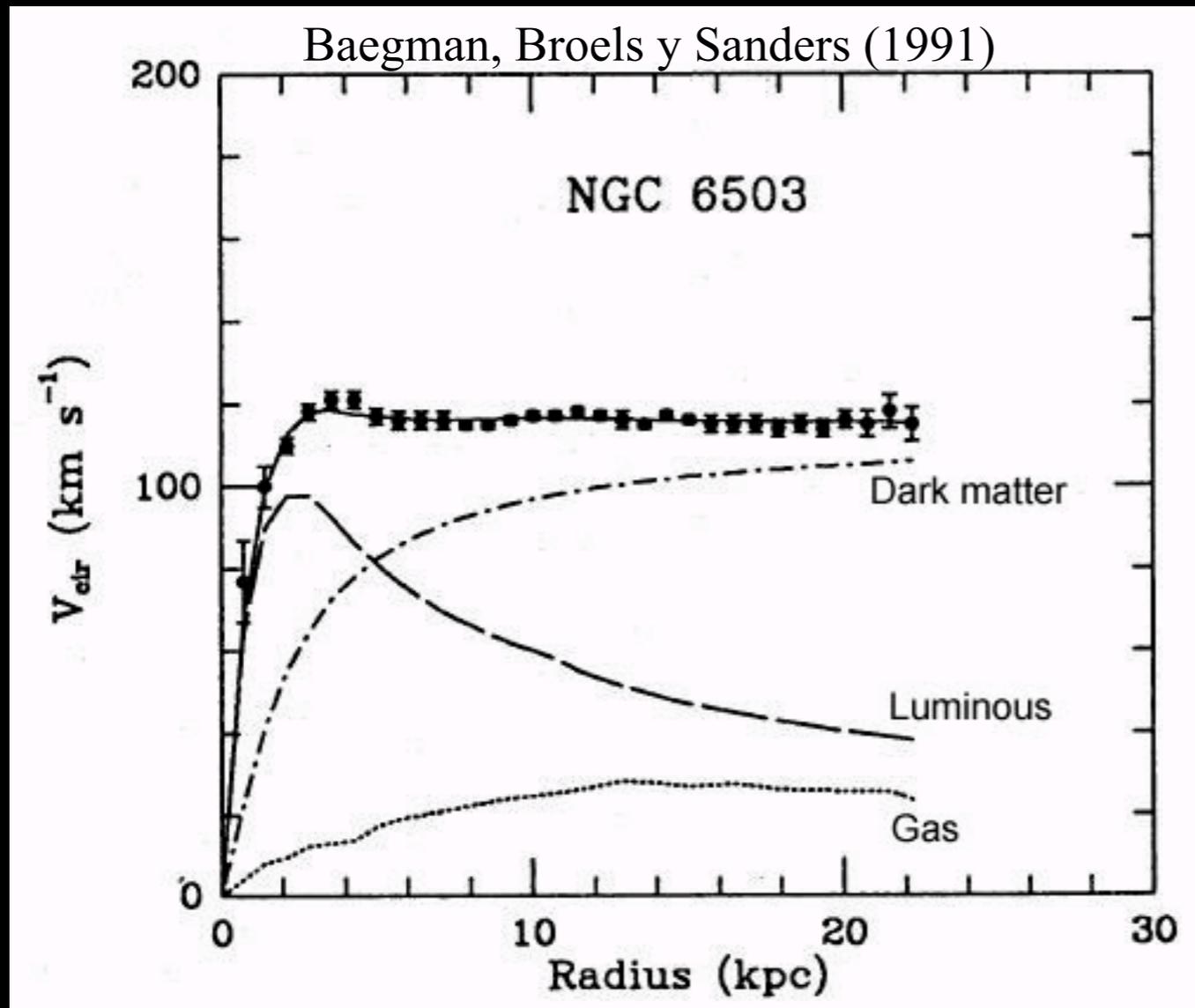


$$d_{\parallel} = \frac{l}{dz} = \frac{1}{(1+z)H(z)}$$



# Le côté obscure du Big Bang

## ● matière sombre



Fritz Zwicky (1933)

matière "sombre" ~ 5x matière ordinaire

# Le côté obscure...

Image visible (Galaxies)

Visible : Galaxies

X : Gaz

Lensing : mass

deux amas en collision



# Le côté obscure...

Visible : Galaxies

X : Gaz

Lensing : mass

deux amas en collision

Image X (gaz) - Chandra

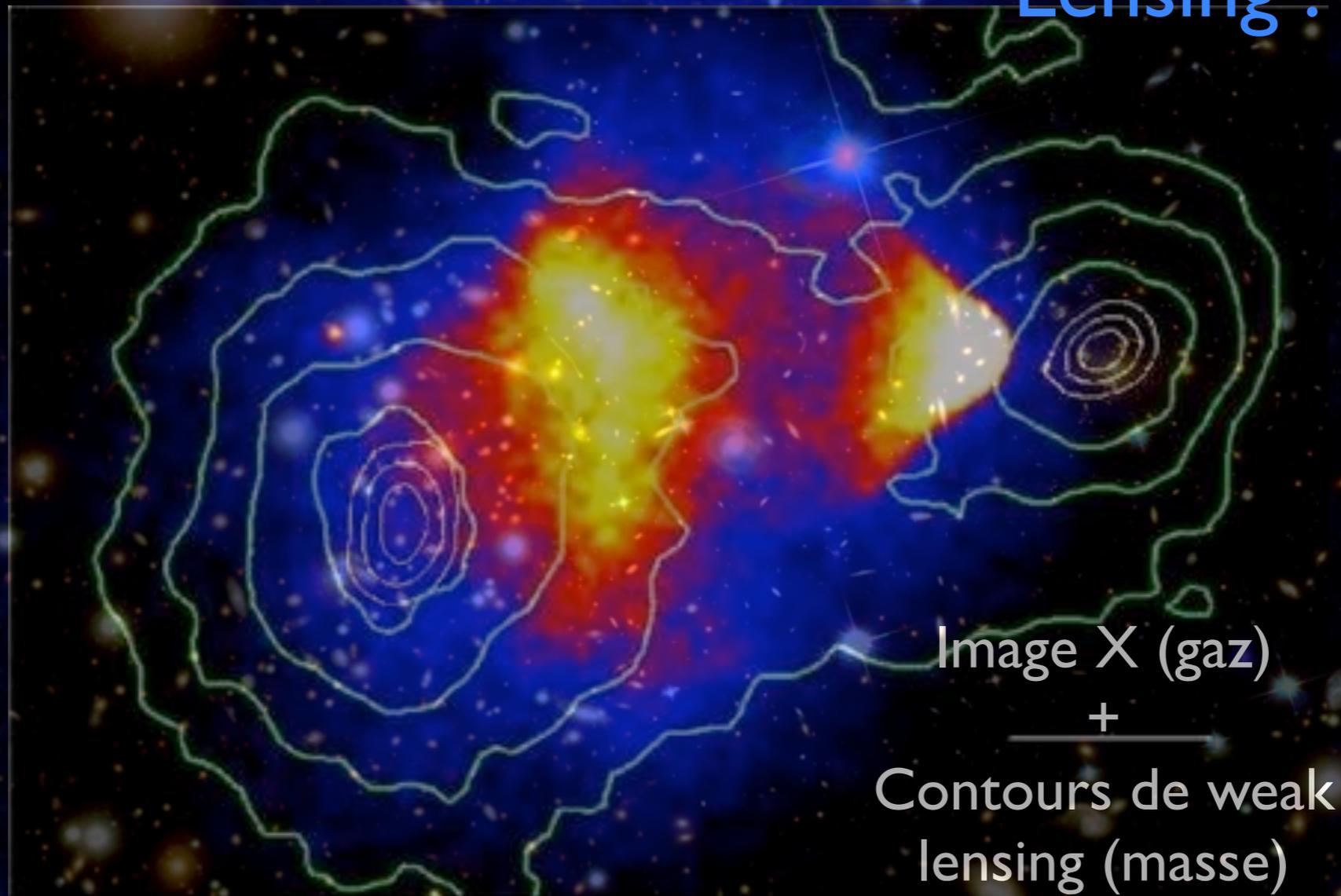


# Le côté obscure...

Visible : Galaxies

X : Gaz

Lensing : masse

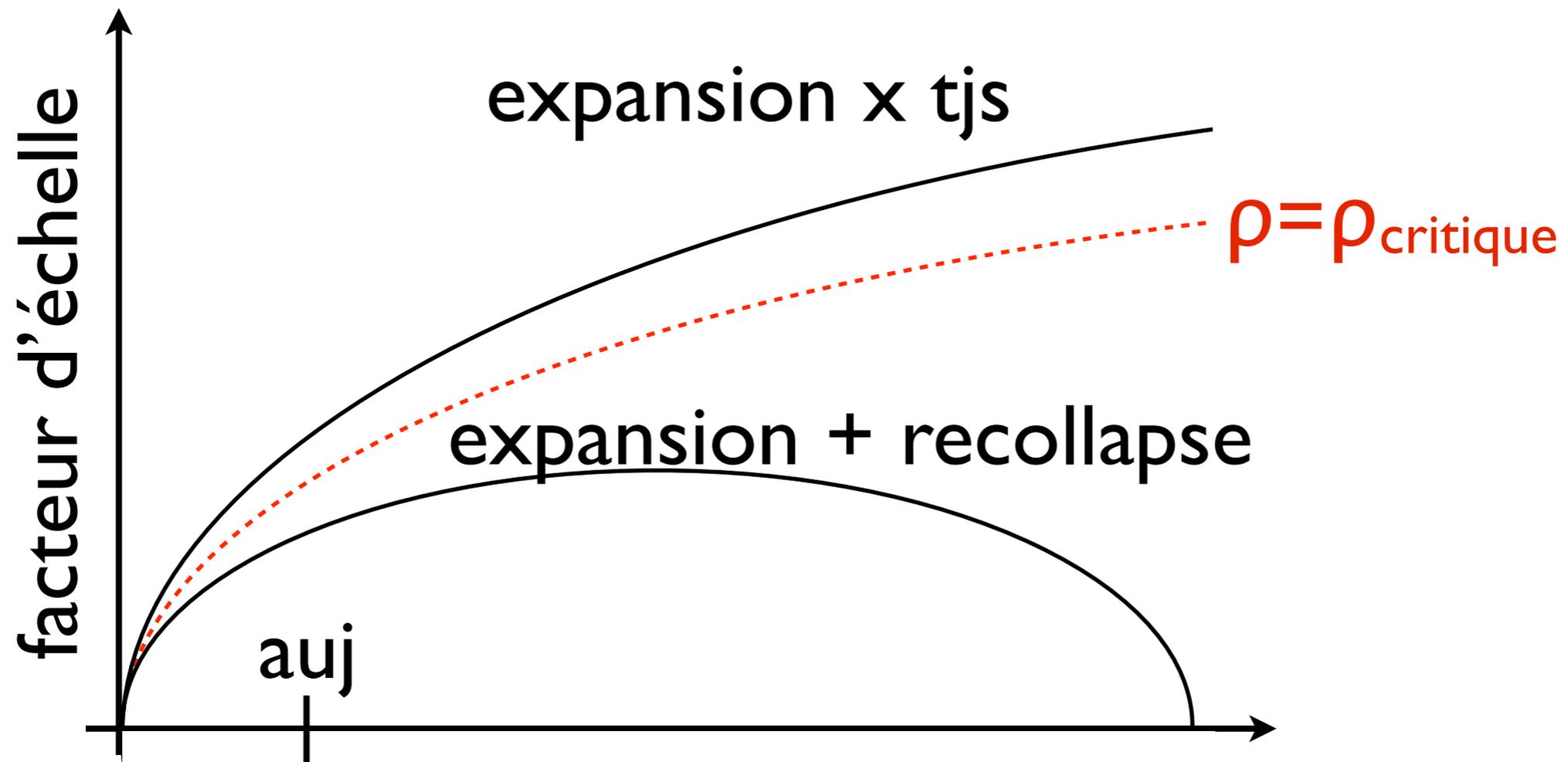


deux amas en collision

Image X (gaz) - Chandra

# L'avenir de l'Univers ?

jusqu'aux années ~ '98

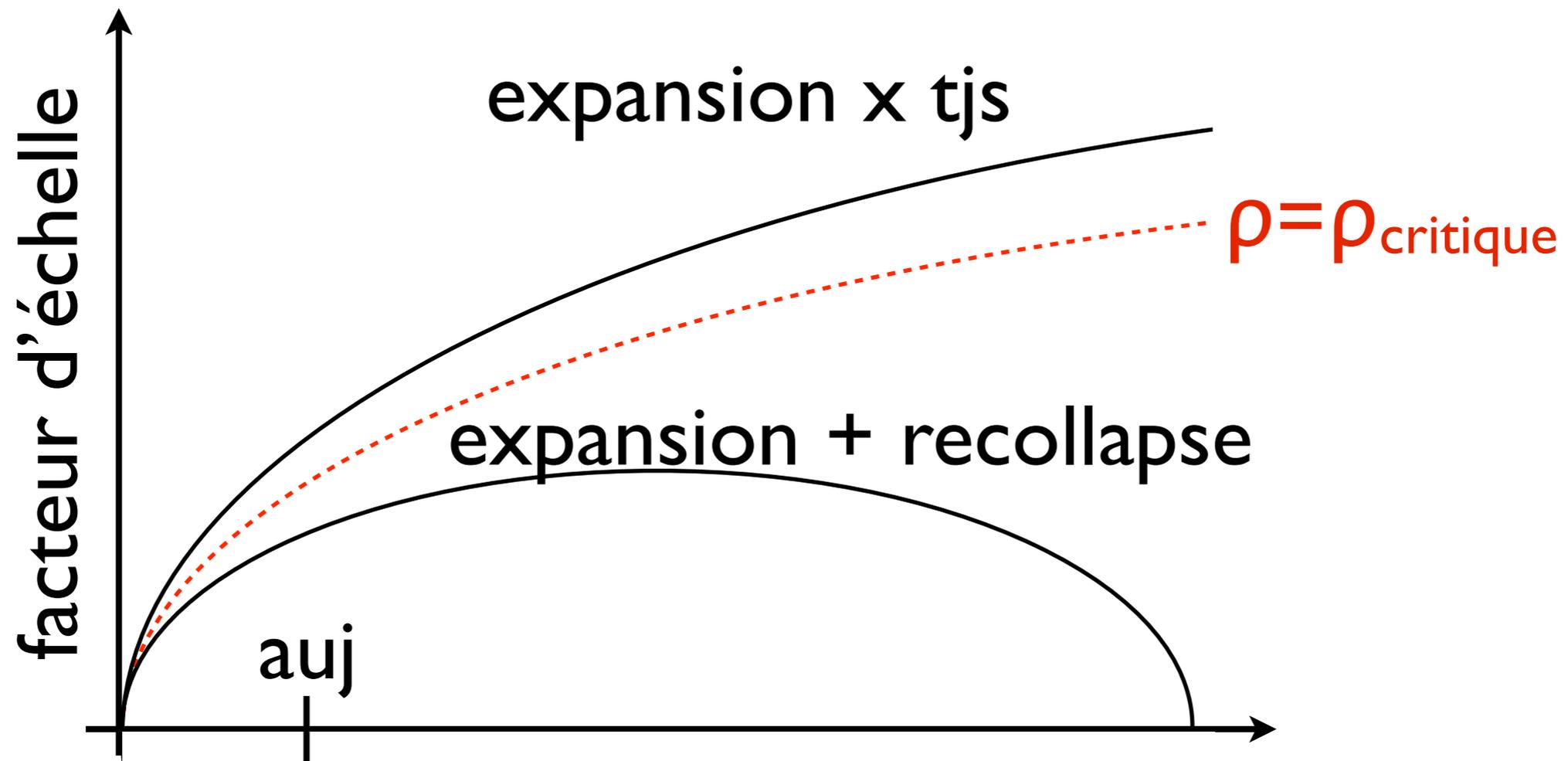


$$\frac{\dot{a}}{a} \equiv H(z) = \sqrt{\Omega_M (1+z)^3}$$

$$\Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_c}$$

# L'avenir de l'Univers ?

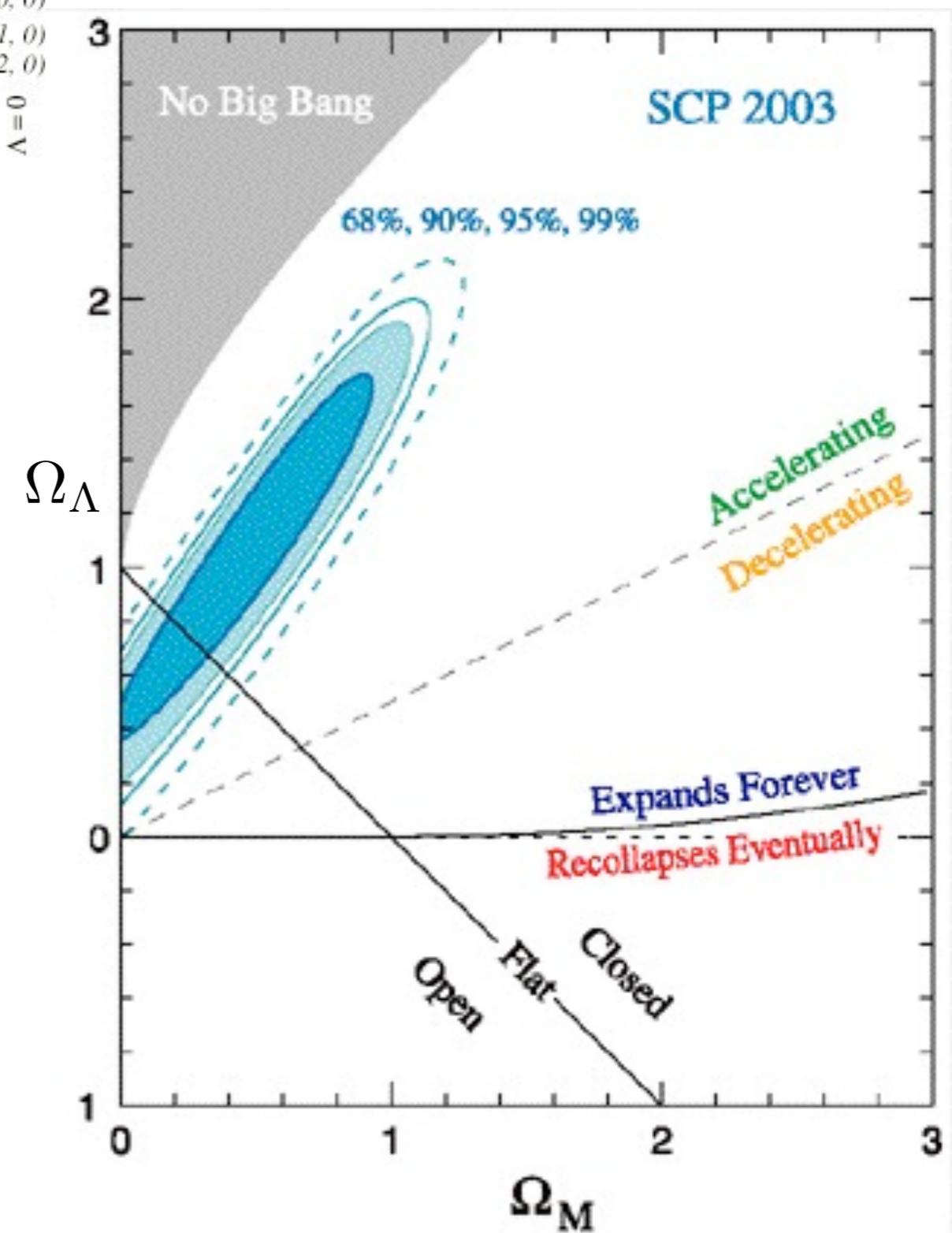
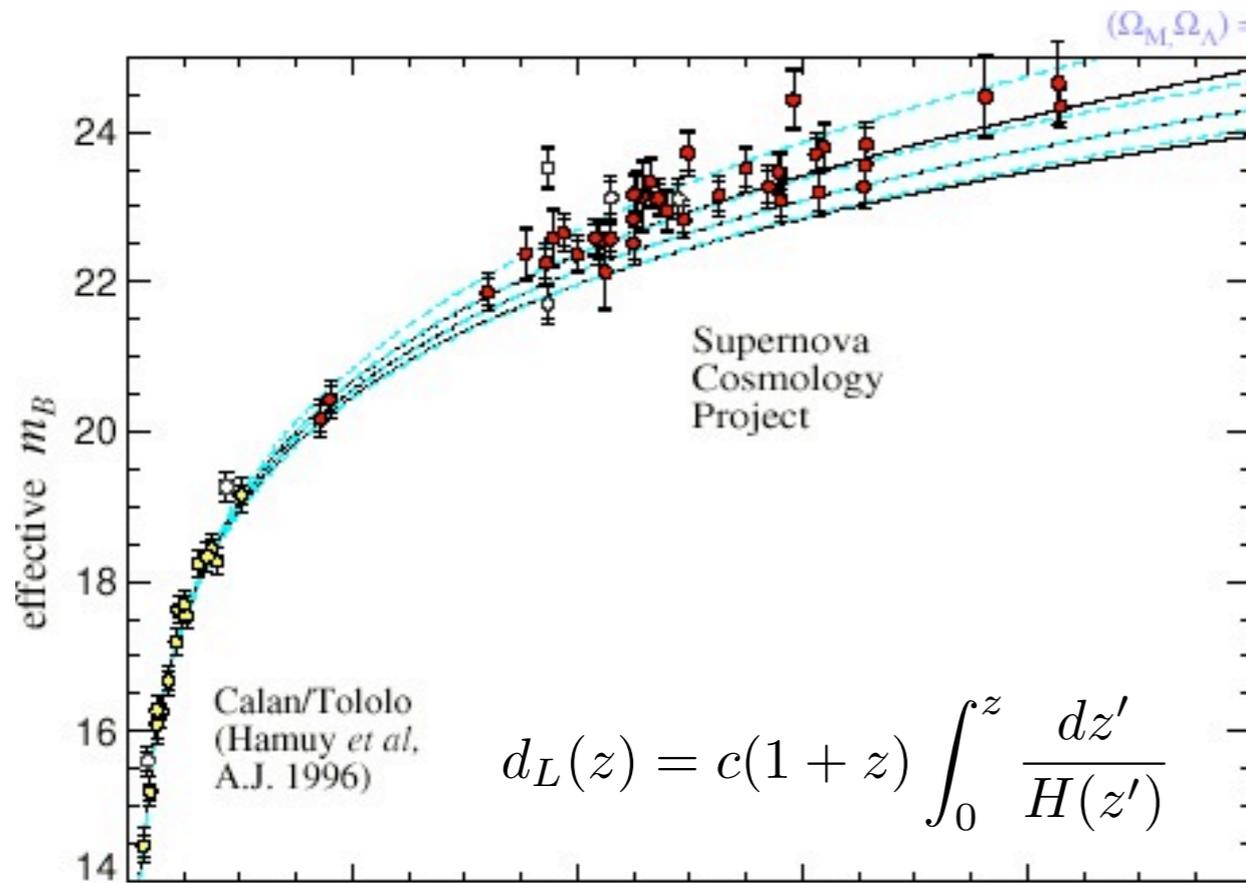
jusqu'aux années ~ '98



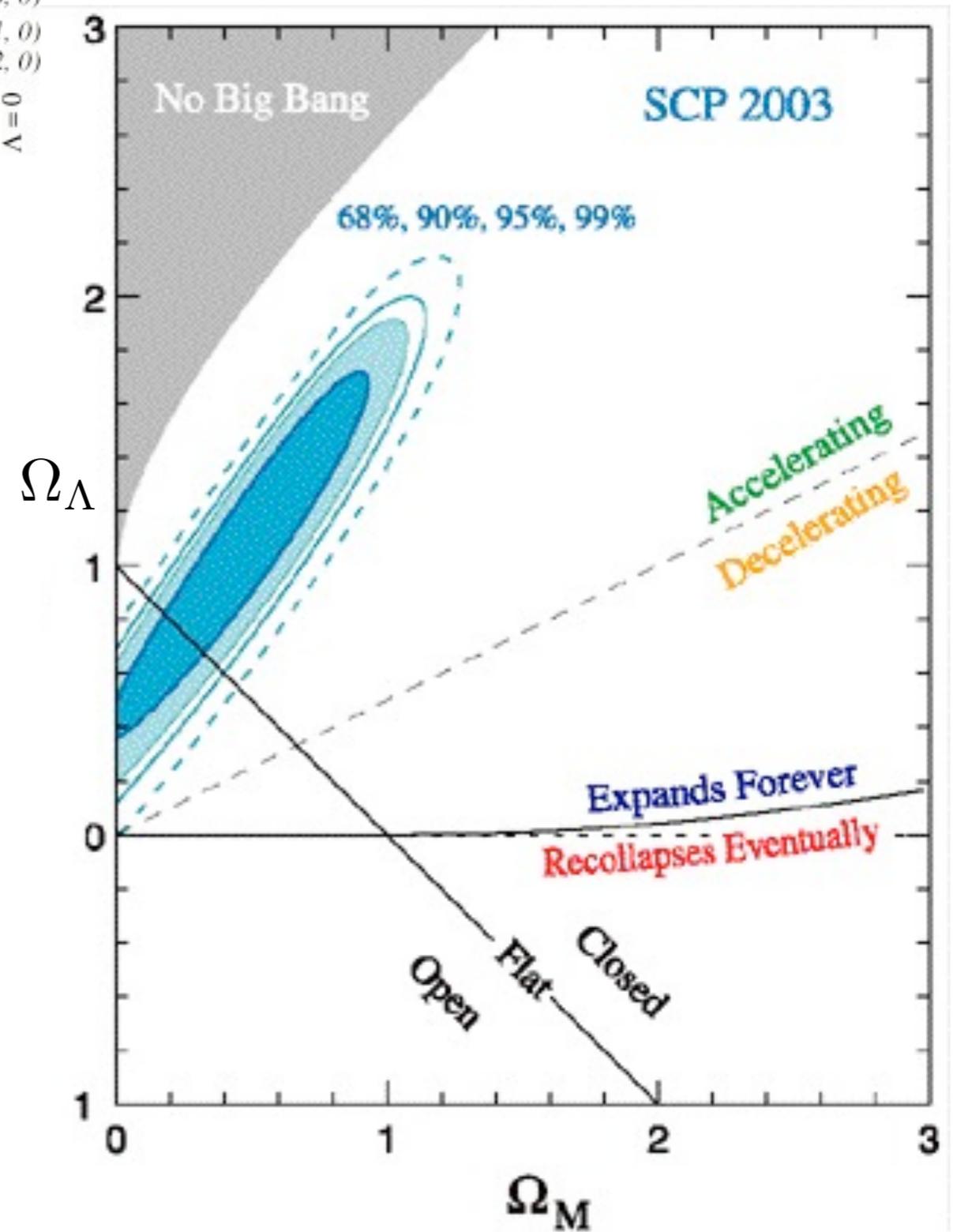
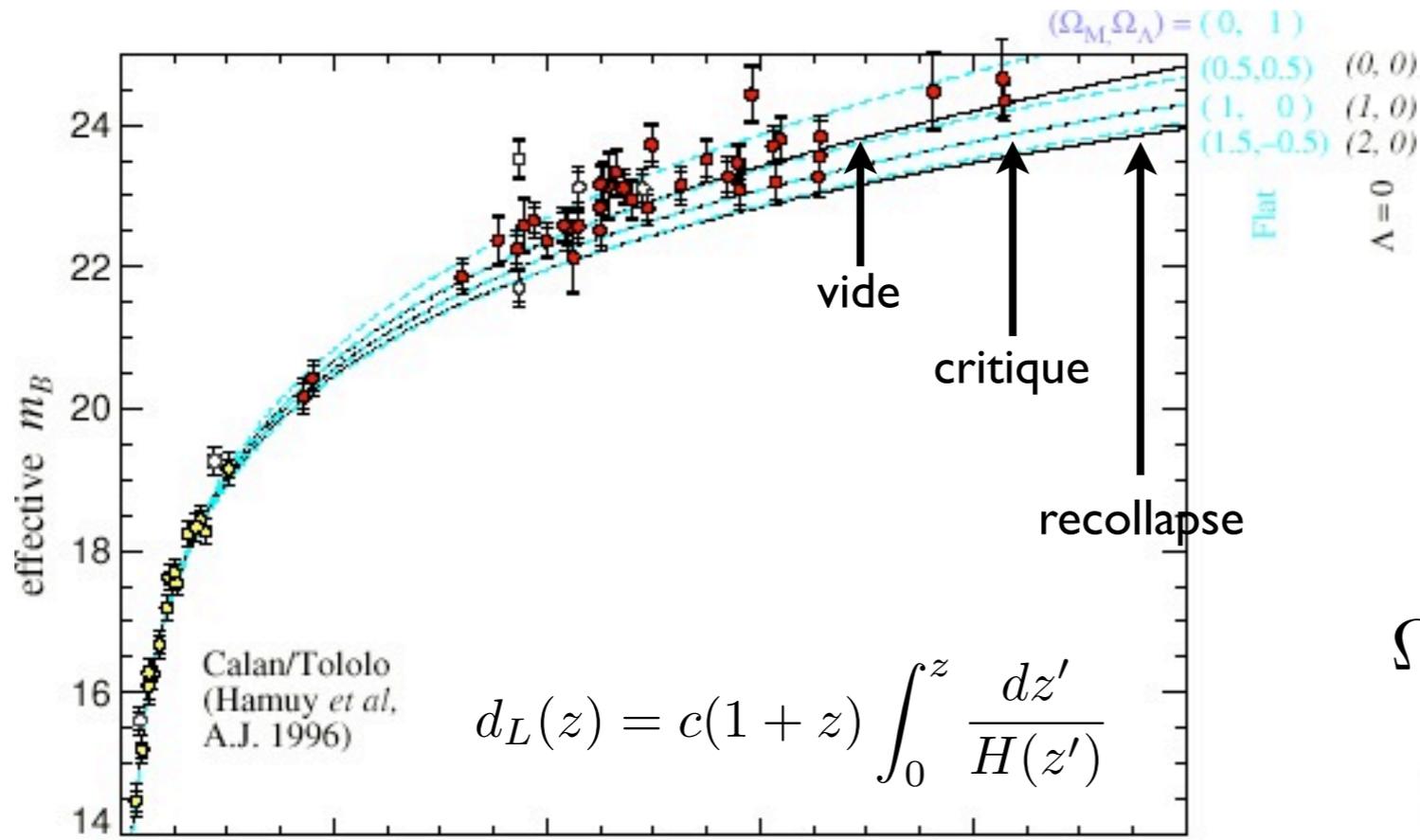
$$\frac{\dot{a}}{a} \equiv H(z) = \sqrt{\Omega_M (1+z)^3} \quad \Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_c}$$

Pour trancher : mesurer  $H(z)$  (donc  $\Omega_M$ ) e.g. avec de SNe

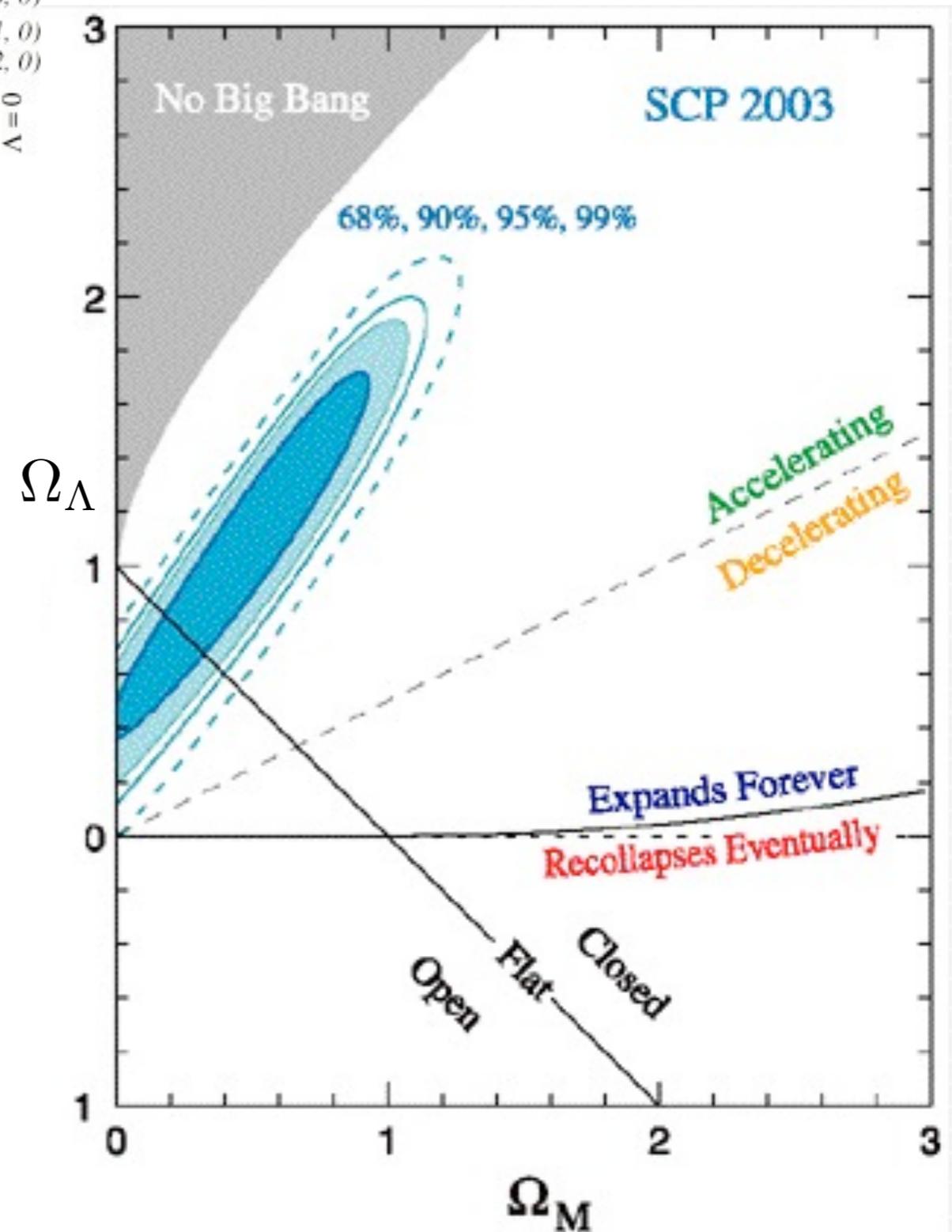
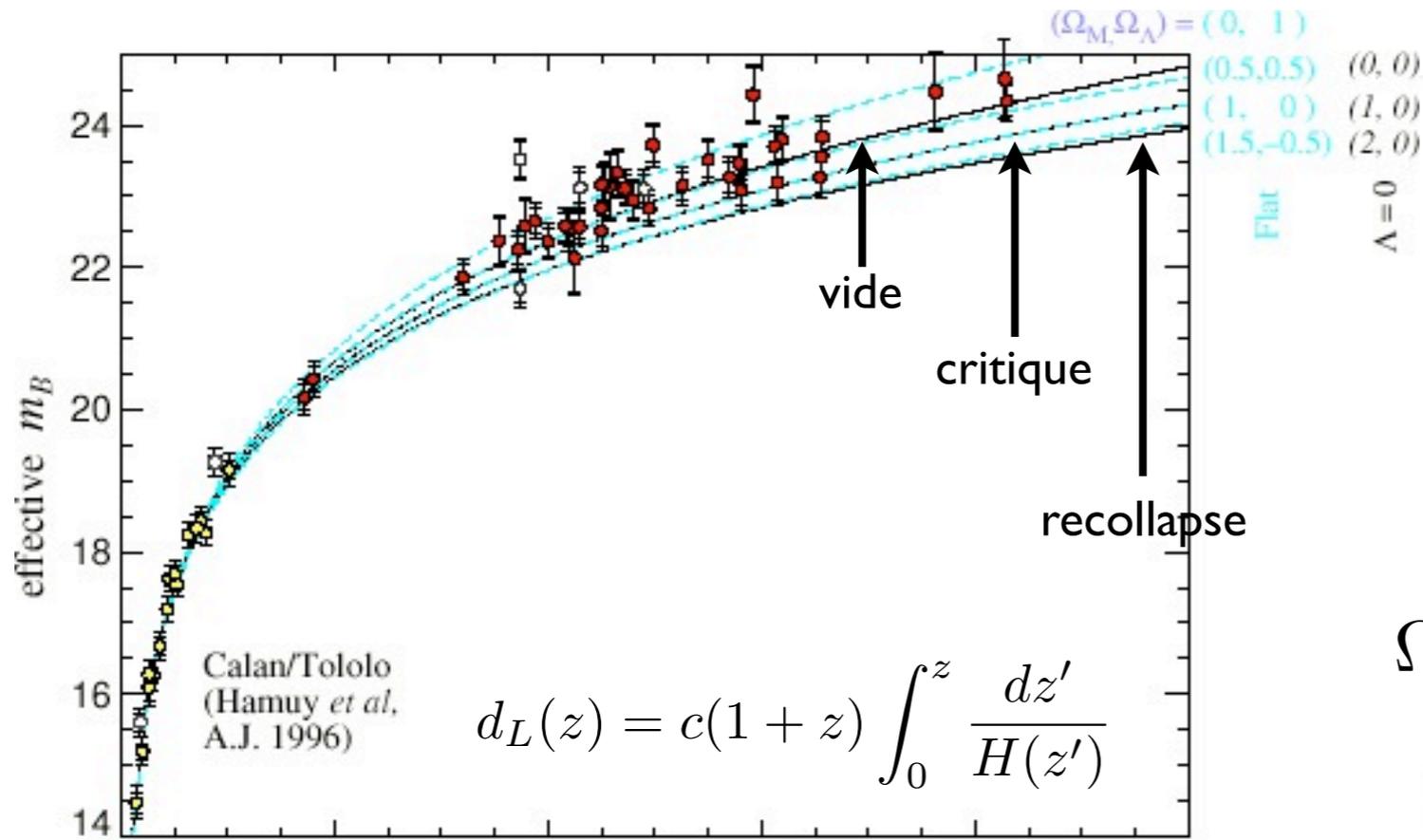
# Résultats : aucun des trois !



# Résultats : aucun des trois !



# Résultats : aucun des trois !

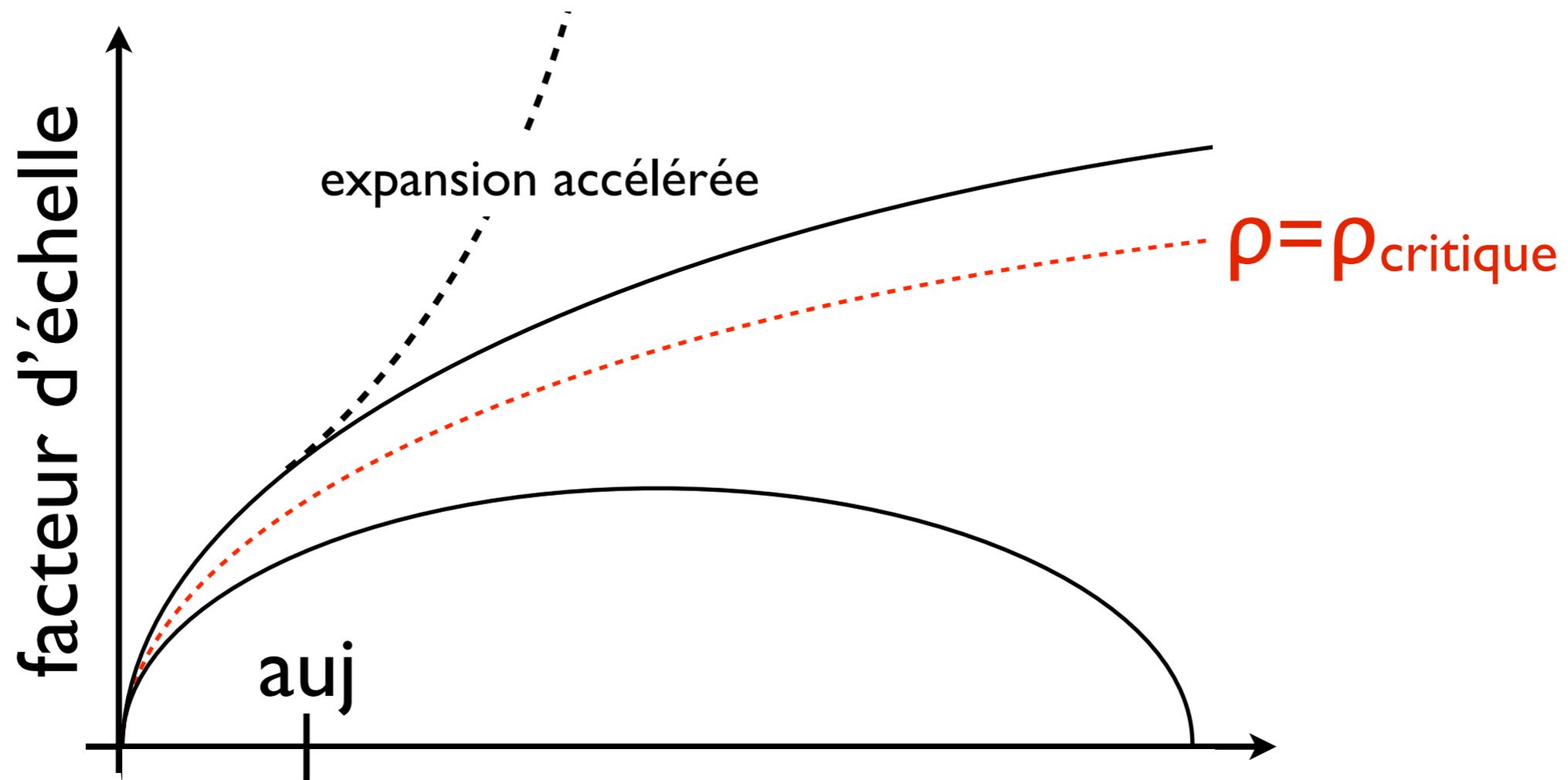


Pour fitter : on introduit  $\Omega_\Lambda$

$$H(z) = \sqrt{\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}$$

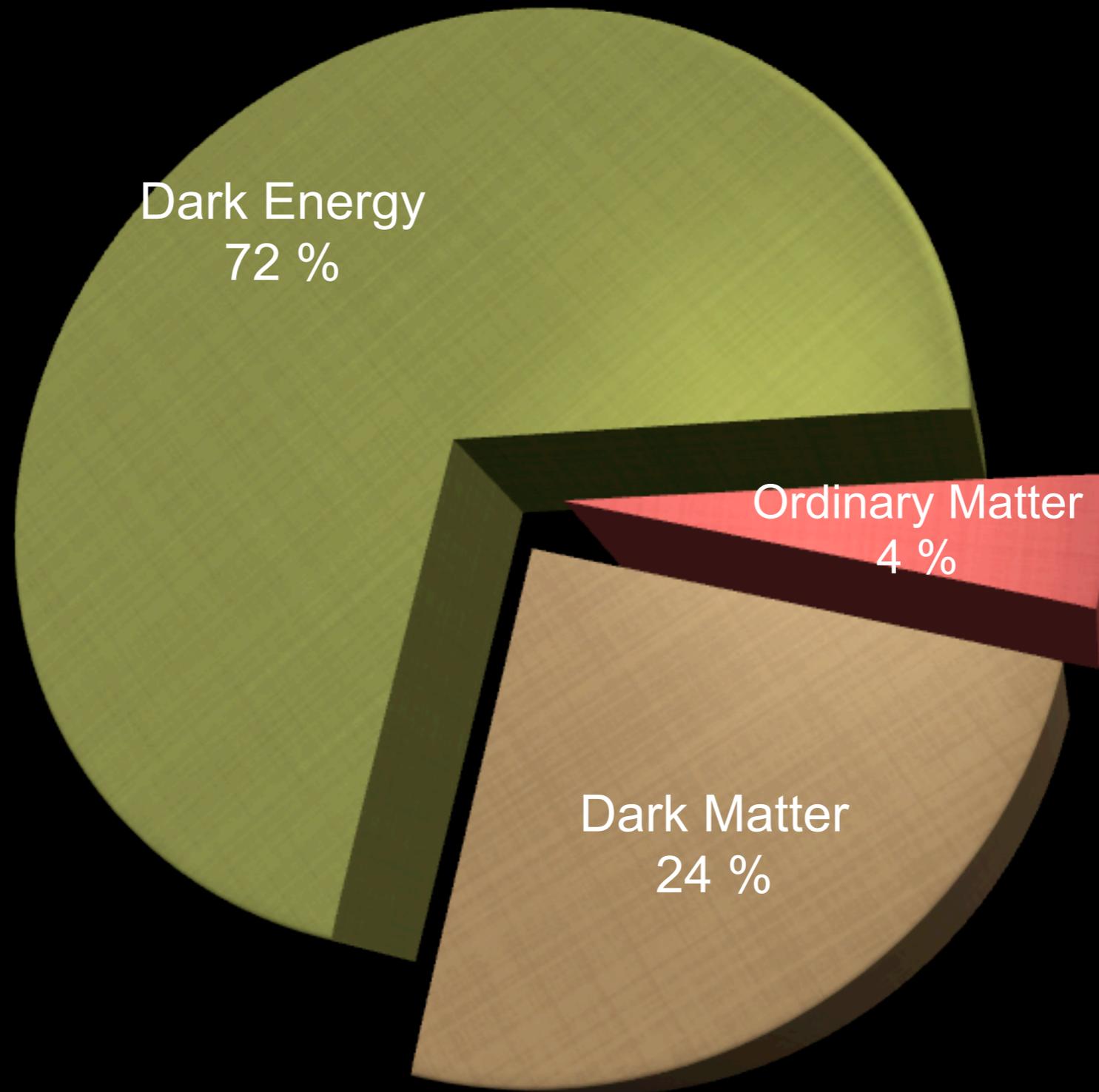
# L'avenir de l'Univers ?

jusqu'aux années ~ '98



$$H(z) = \sqrt{\Omega_M (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}$$

# (Tout?) Le côté obscure du Big Bang “known unknowns”



# Interprétation physique de $\Lambda$

**Energie sombre :**

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

**Gravité Modifiée :**  
**e.g. constante cosmologique**  
**(Einstein 1920's)**

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

# Interprétation physique de $\Lambda$

**Energie sombre :**

$$G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

$\Lambda$  : fluide avec  $\rho_\Lambda(z)$

$$H(z) = \sqrt{\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_\Lambda(z)}$$

**Gravité Modifiée :**

**e.g. constante cosmologique**

**(Einstein 1920's)**

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

# Interprétation physique de $\Lambda$

**Energie sombre :**

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

$\Lambda$  : fluide avec  $\rho_\Lambda(z)$

$$H(z) = \sqrt{\Omega_M (1+z)^3 + \Omega_\Lambda(z)}$$

**Gravité Modifiée :**

**e.g. constante cosmologique  
(Einstein 1920's)**

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

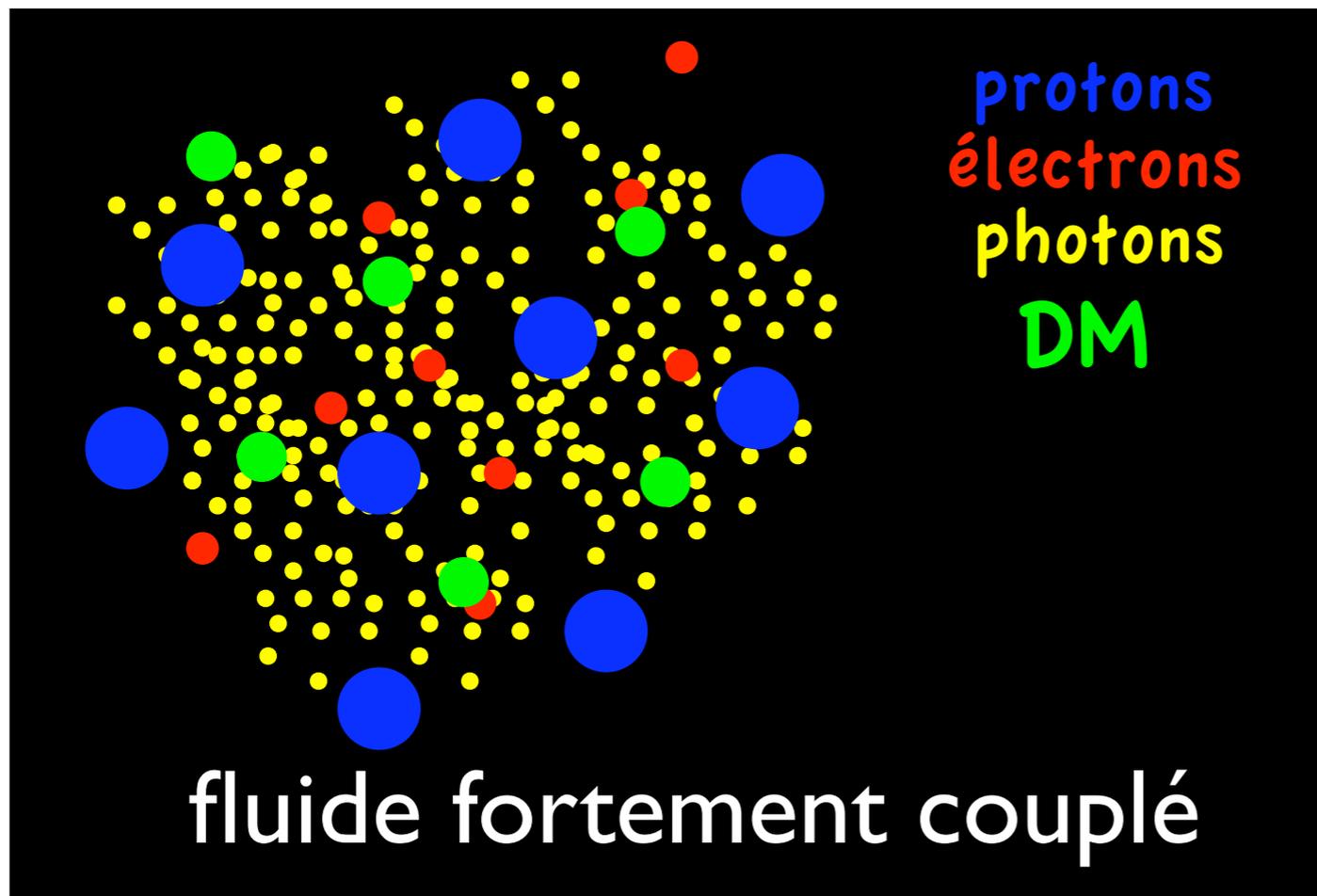
**Pour trancher :**

- mesures précises de  $H(z)$ , e.g. BOSS
- mesures précises de la gravité (formation des amas), e.g. DES

# BOSS : baryon oscillations spectroscopic survey

Oscillations de baryons :

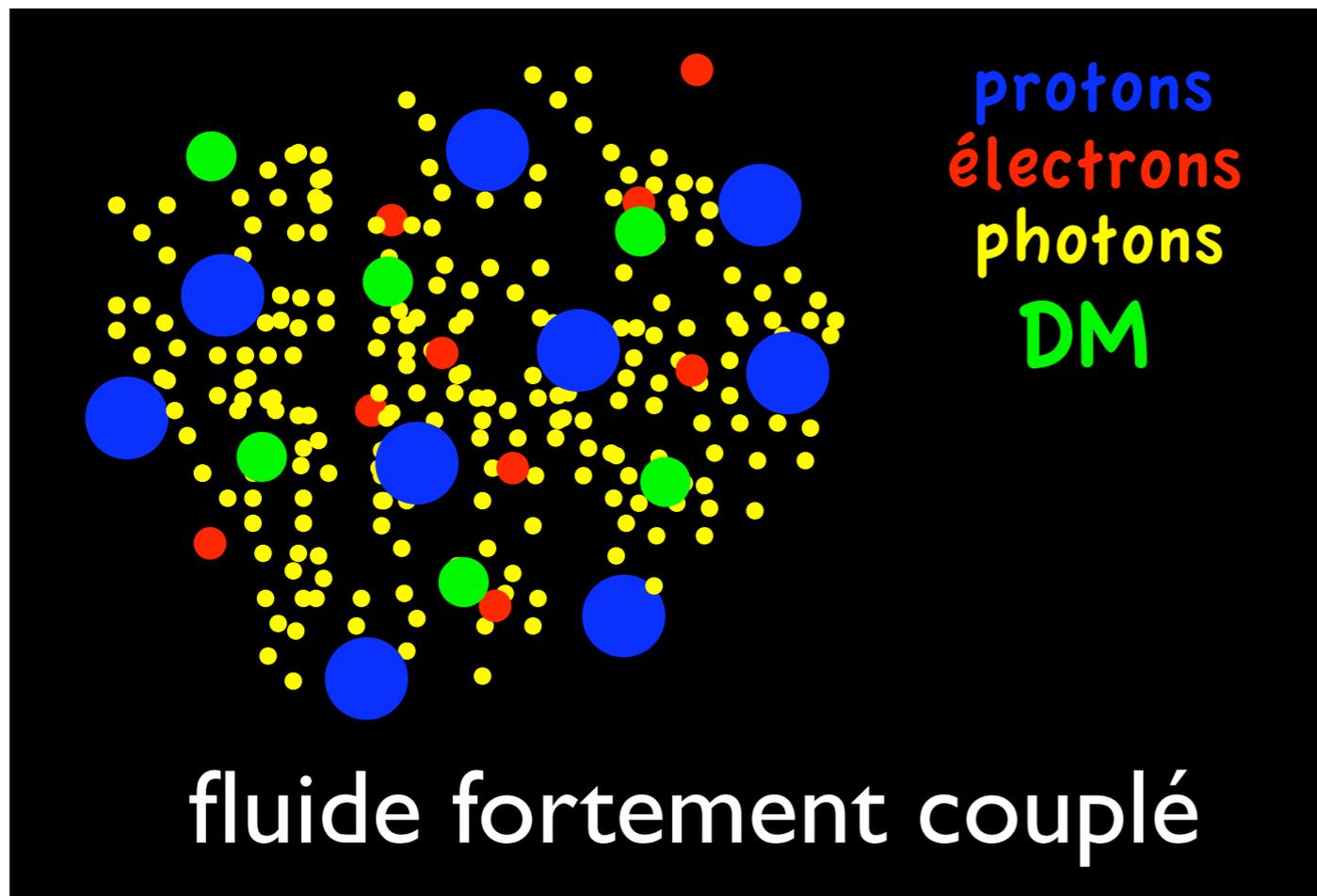
- Univers jeune (age < 370.000 ans)
- très dense ( $\rho \gg 10^9 \rho_{auj}$ )
- très chaud et ionisé ( $T \gg 3000 K$ )



# BOSS : baryon oscillations spectroscopic survey

Oscillations de baryons :

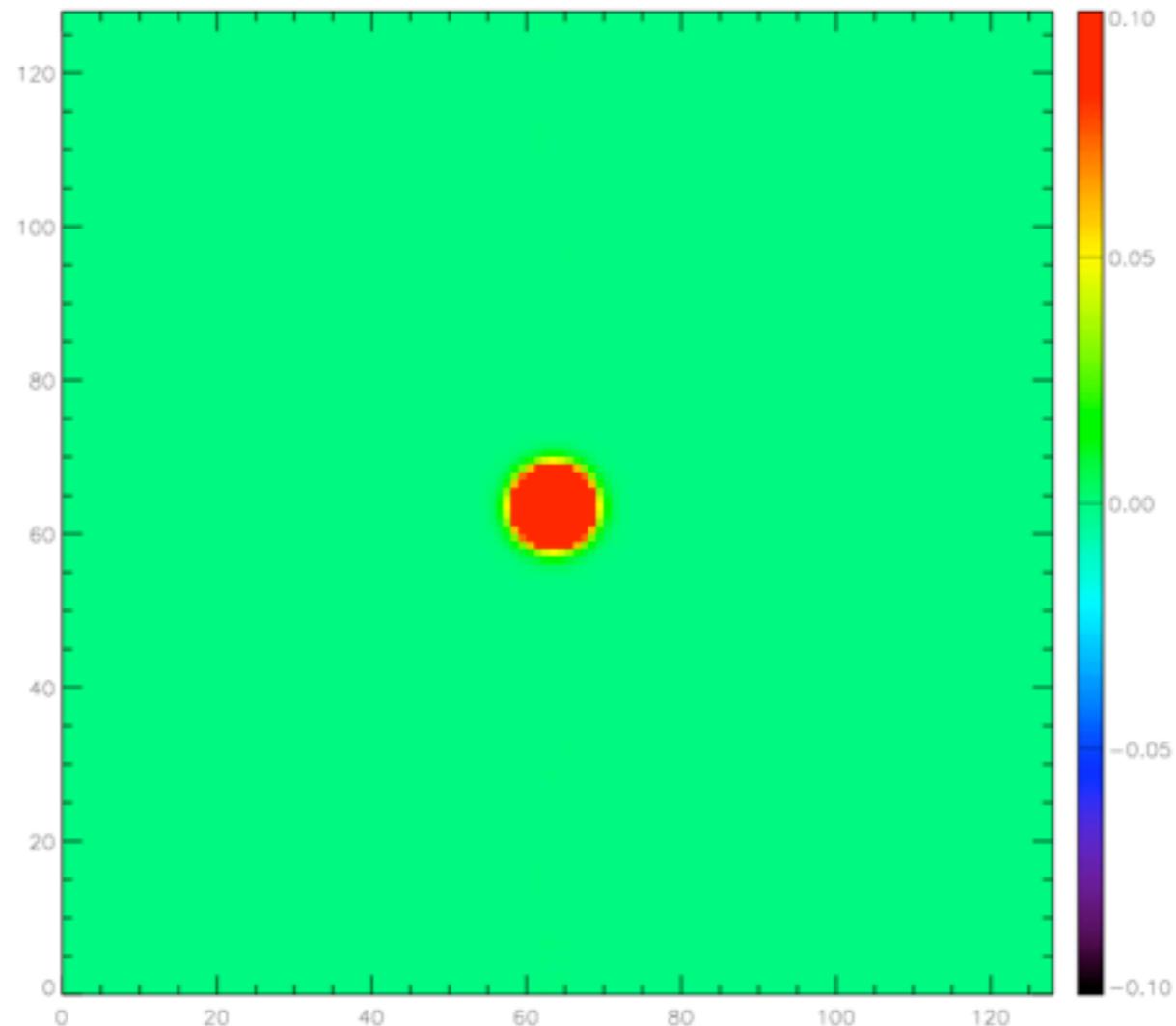
- Univers jeune (age < 370.000 ans)
- très dense ( $\rho \gg 10^9 \rho_{auj}$ )
- très chaud et ionisé ( $T \gg 3000 \text{ K}$ )



# BOSS : baryon oscillations spectroscopic survey

## Oscillations de baryons :

- Univers jeune (age < 370.000 ans)
- très dense ( $\rho \gg 10^9 \rho_{auj}$ )
- très chaud et ionisé ( $T \gg 3000 K$ )
- fluide capable de soutenir d'ondes de pression



# **BOSS : baryon oscillations spectroscopic survey**

## **Oscillations de baryons :**

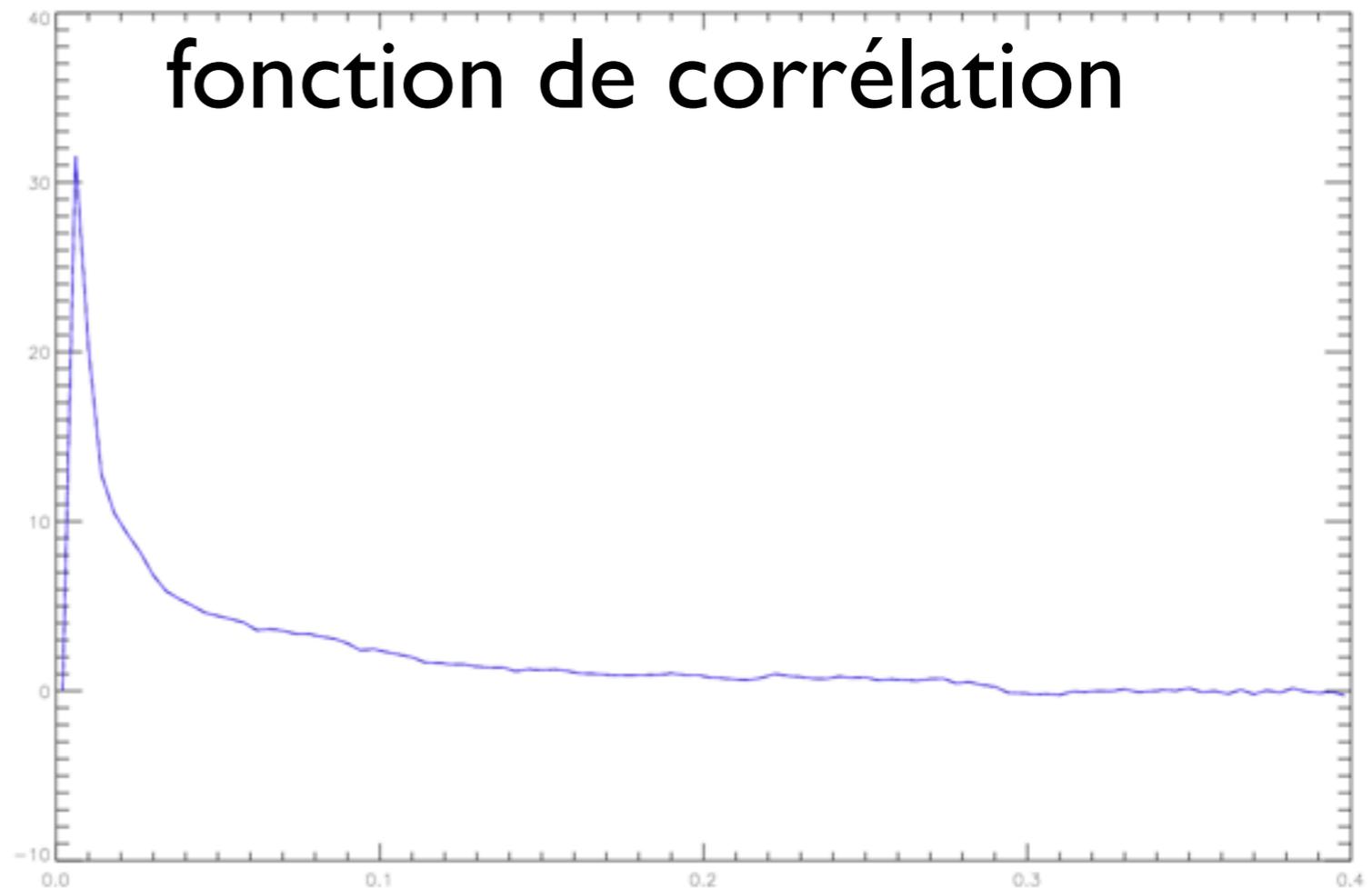
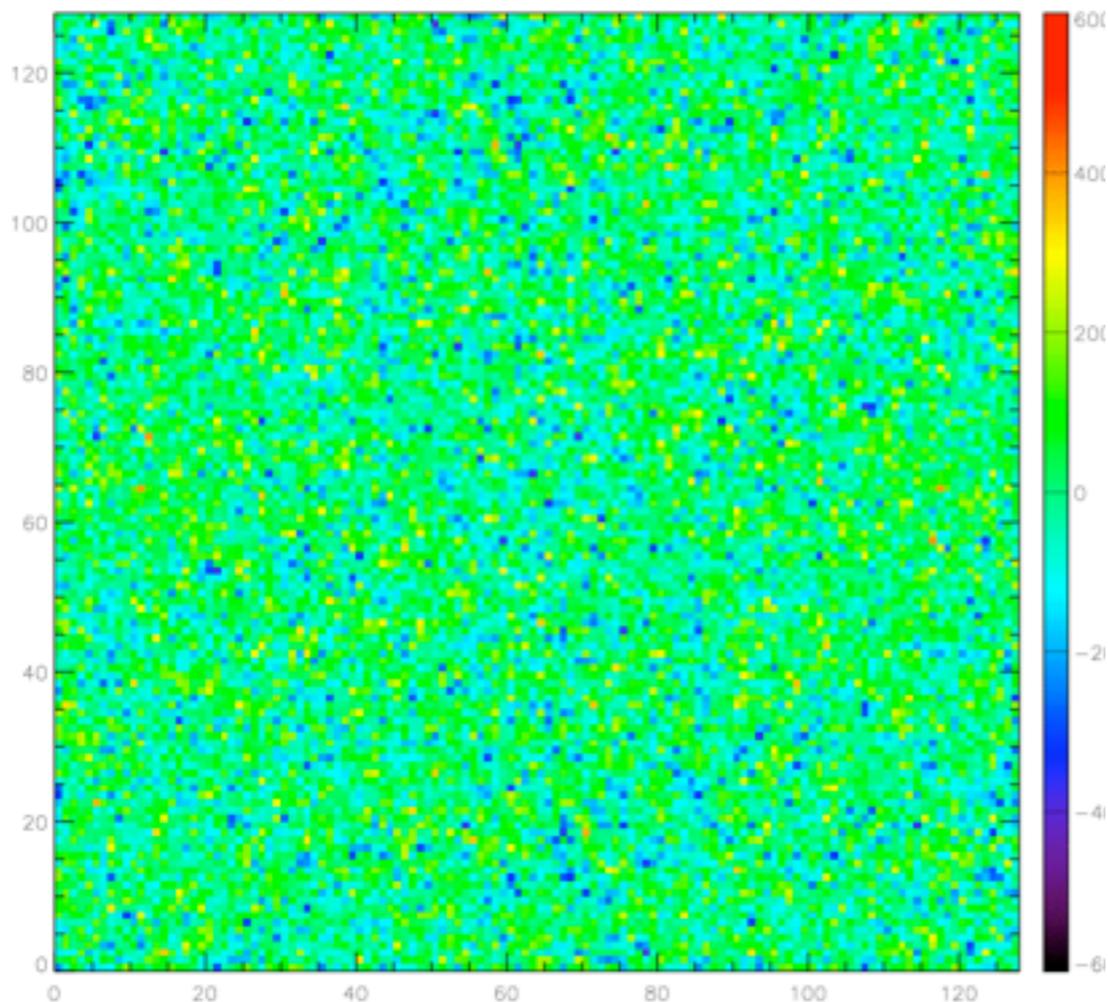
- **Univers jeune (age < 370.000 ans)**
- **très dense ( $\rho \gg 10^9 \rho_{auj}$ )**
- **très chaud et ionisé ( $T \gg 3000 \text{ K}$ )**
- **fluide capable de soutenir d'ondes de pression**
- **conditions initiales données par des fluctuations quantique**

**fonction de corrélation**

# BOSS : baryon oscillations spectroscopic survey

## Oscillations de baryons :

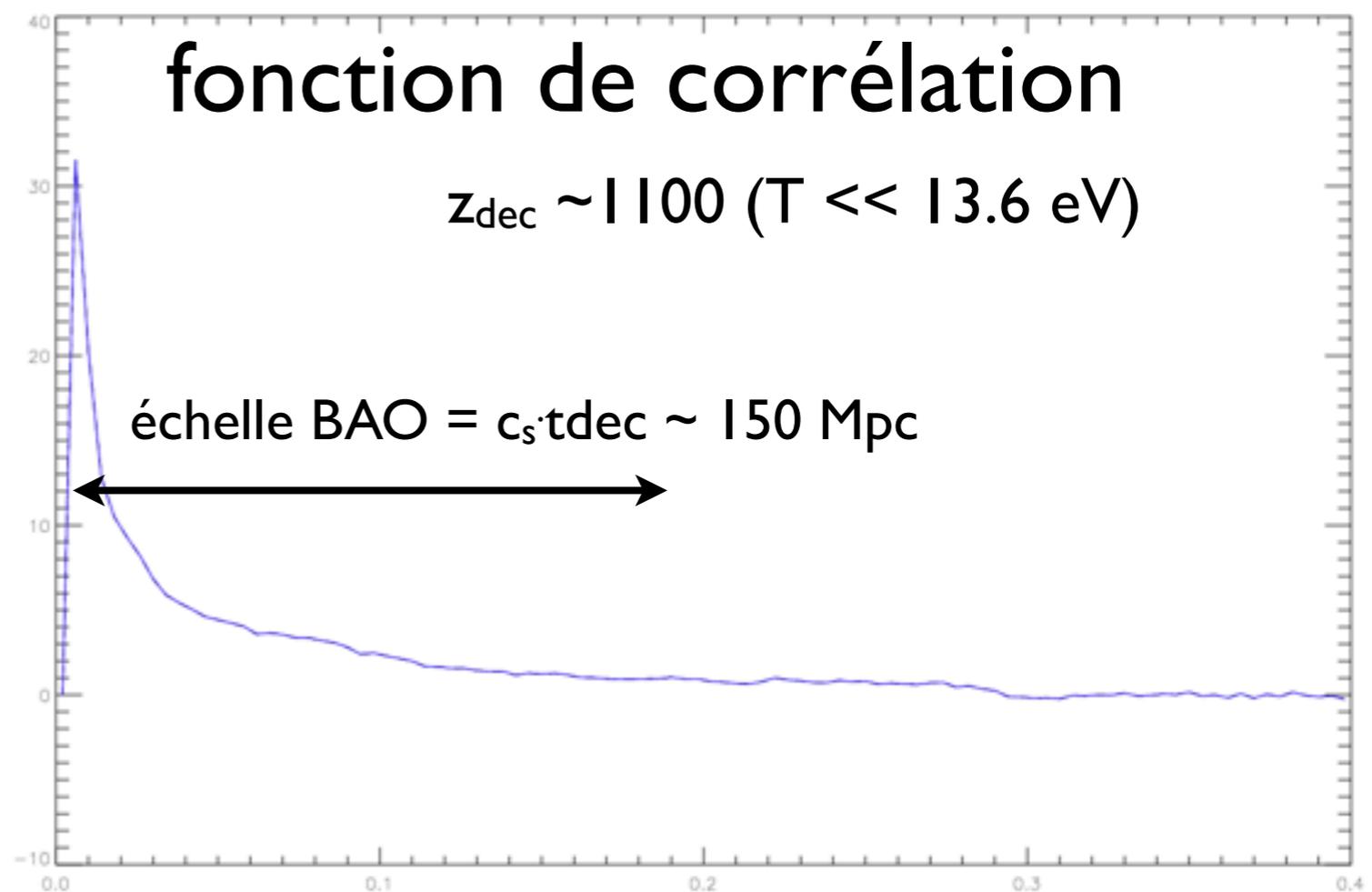
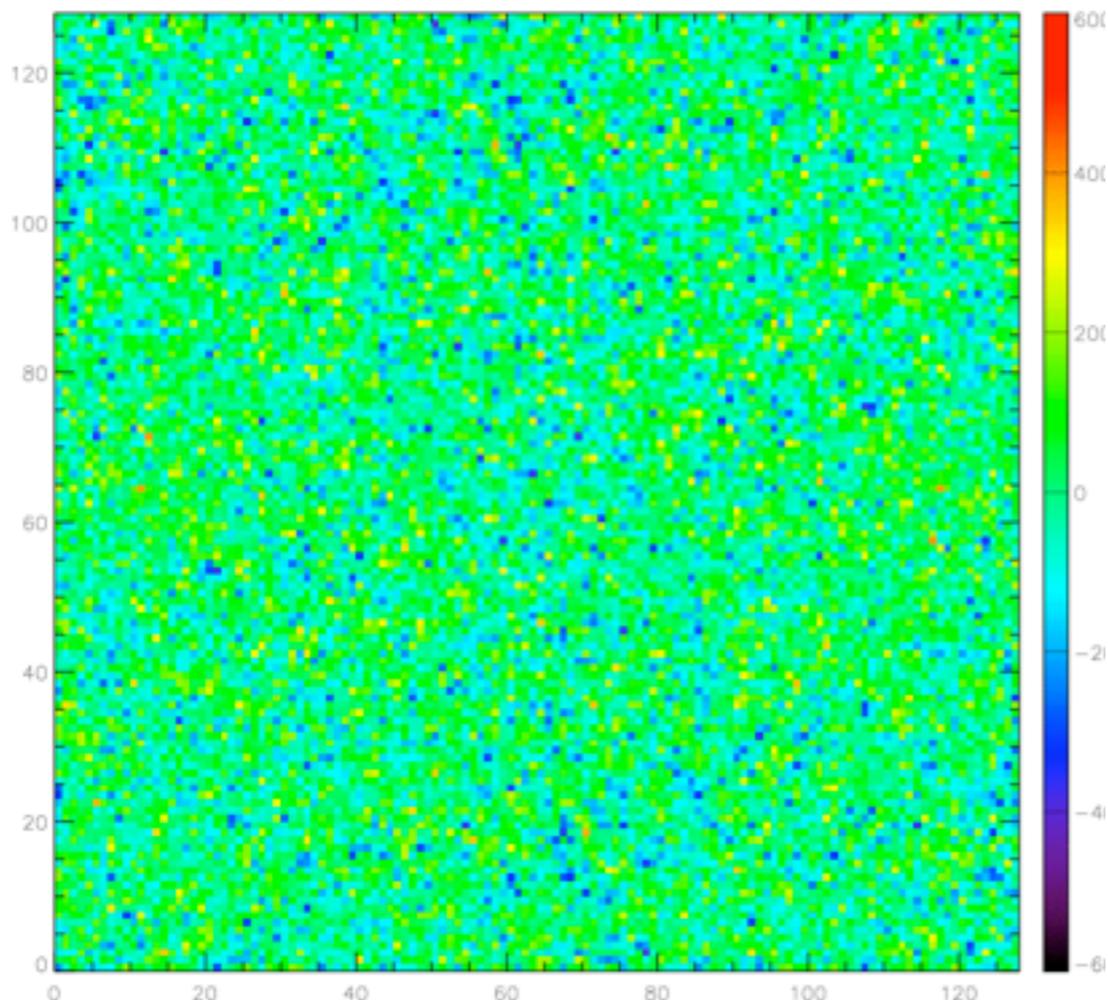
- Univers jeune (age < 370.000 ans)
- très dense ( $\rho \gg 10^9 \rho_{auj}$ )
- très chaud et ionisé ( $T \gg 3000 K$ )
- fluide capable de soutenir d'ondes de pression
- conditions initiales données par des fluctuations quantique



# BOSS : baryon oscillations spectroscopic survey

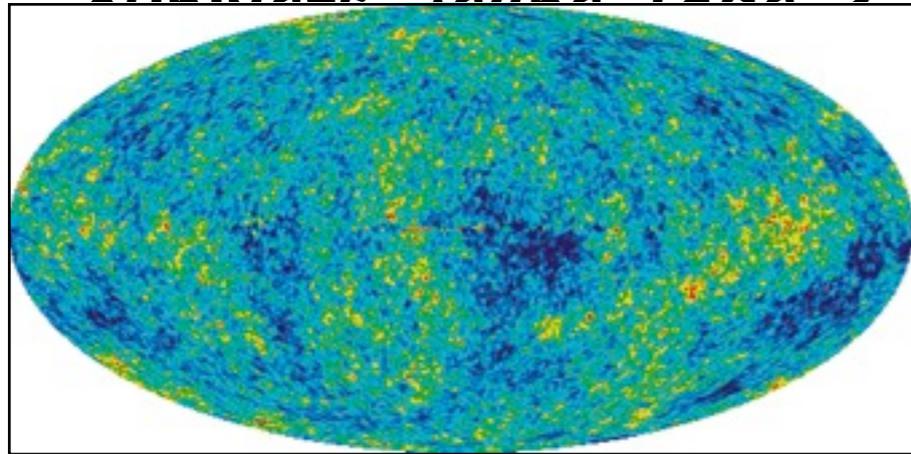
## Oscillations de baryons :

- Univers jeune (age  $< 370.000$  ans)
- très dense ( $\rho \gg 10^9 \rho_{auj}$ )
- très chaud et ionisé ( $T \gg 3000$  K)
- fluide capable de soutenir d'ondes de pression
- conditions initiales données par des fluctuations quantique

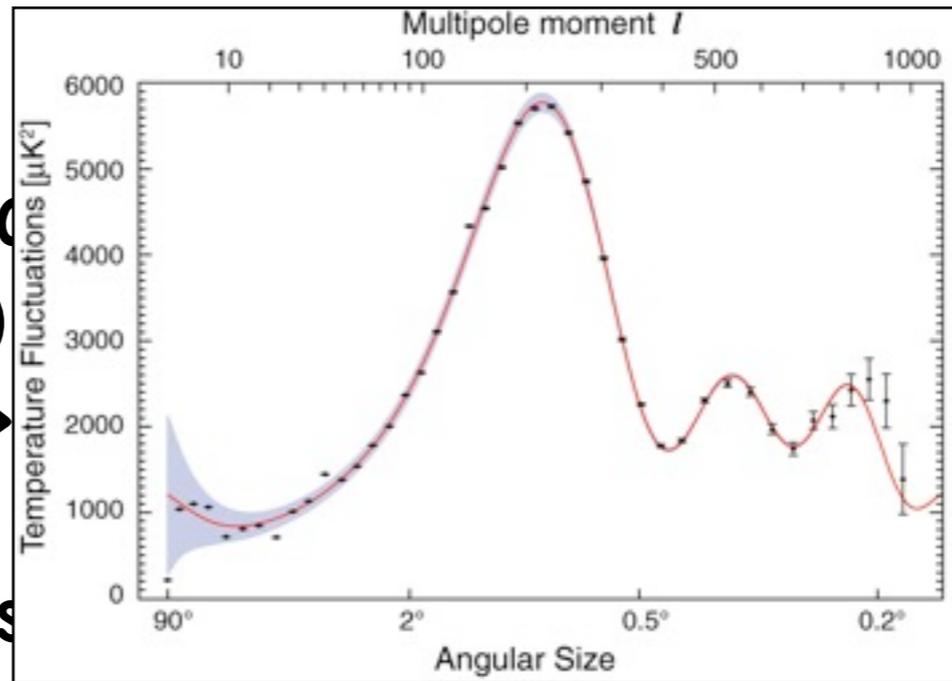


# BOSS : baryon oscillations spectroscopic survey

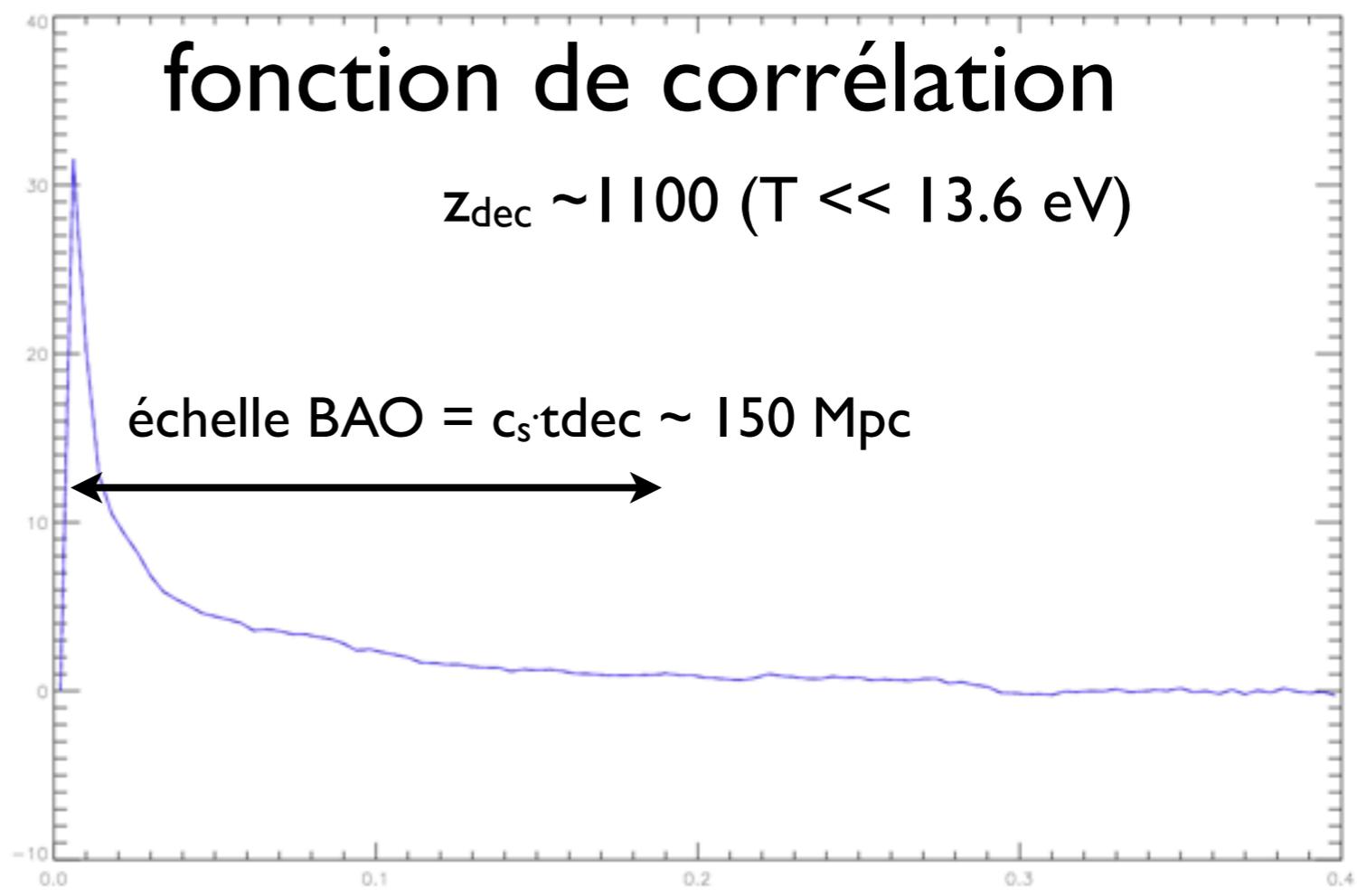
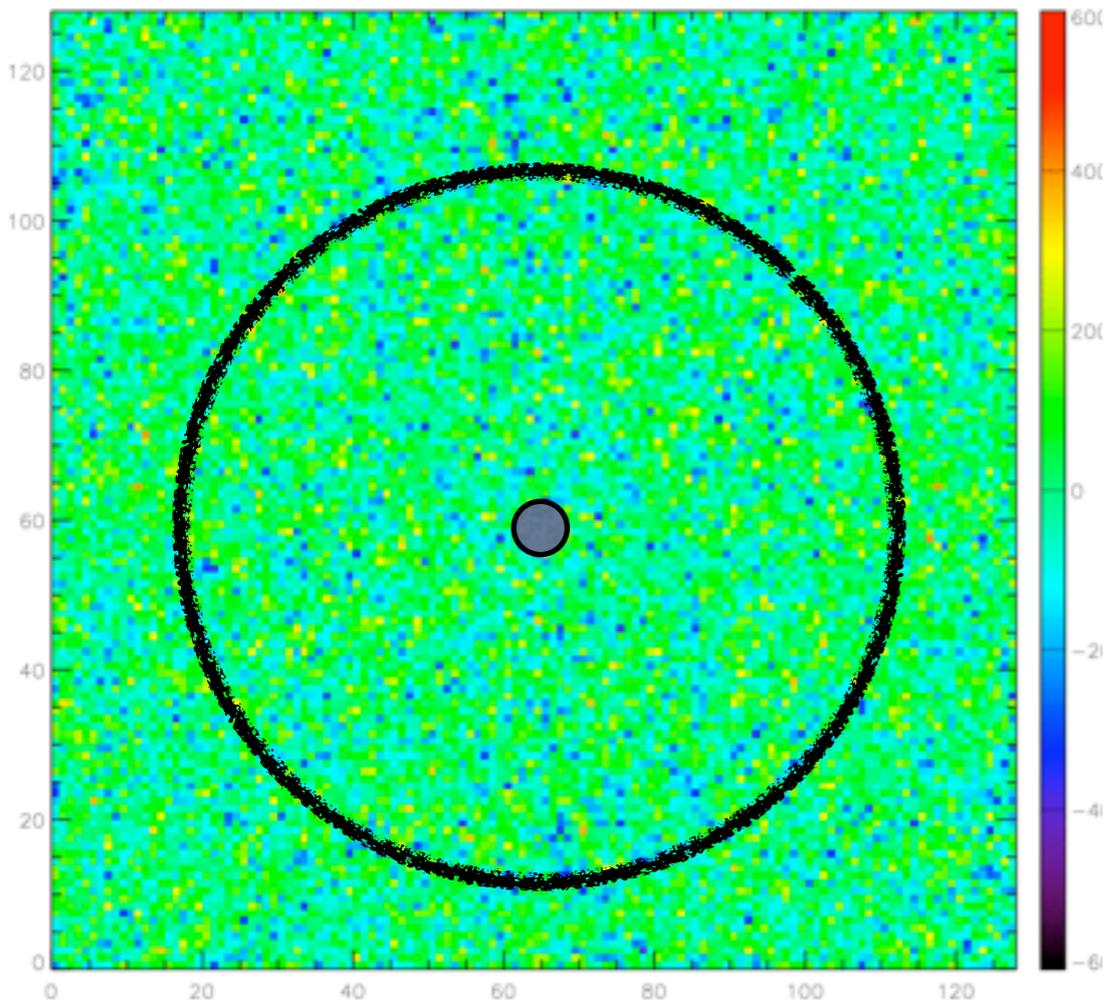
Oscillations de baryons :



l'univers jeune ( $t \approx 370.0$   
 $\rho_{auj}$   
 $(T \gg$   
 tenir  
 années

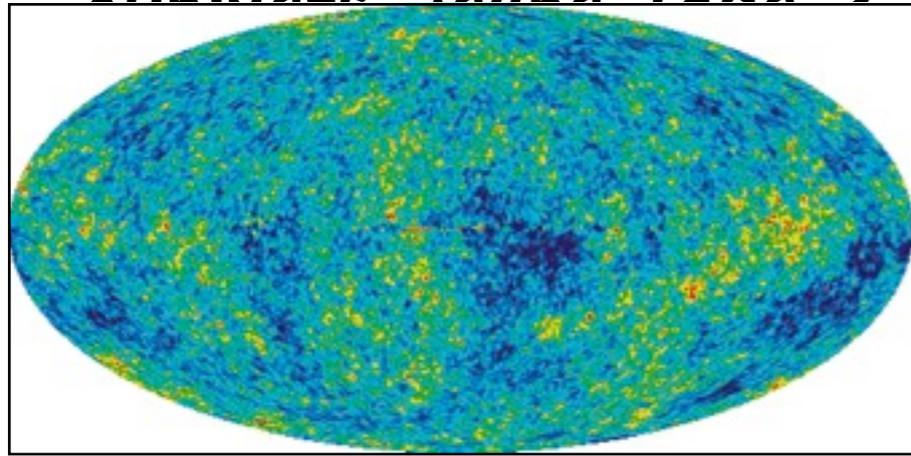


ntique

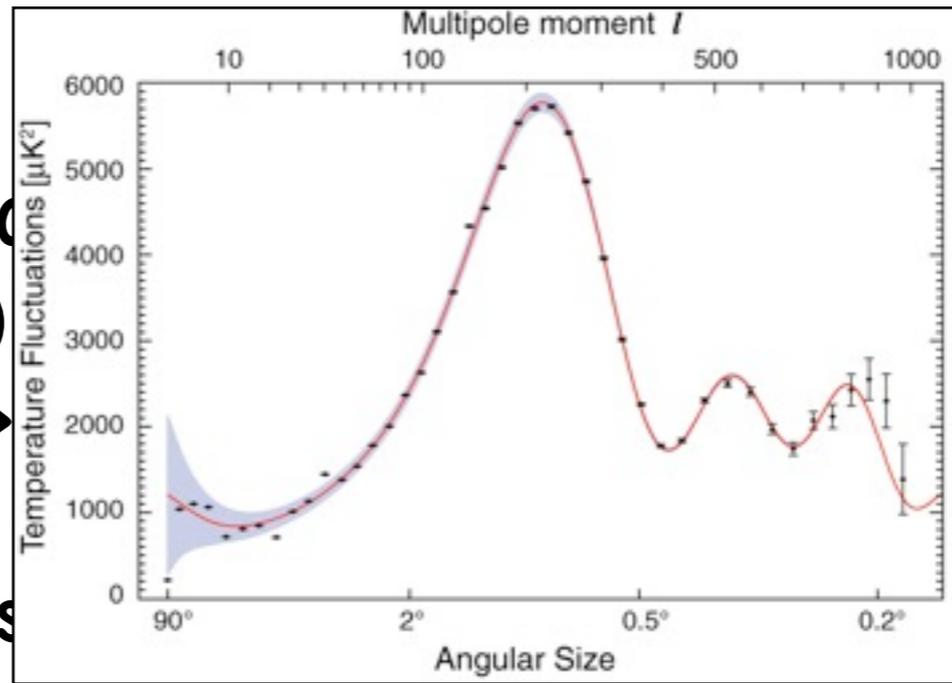


# BOSS : baryon oscillations spectroscopic survey

Oscillations de baryons :

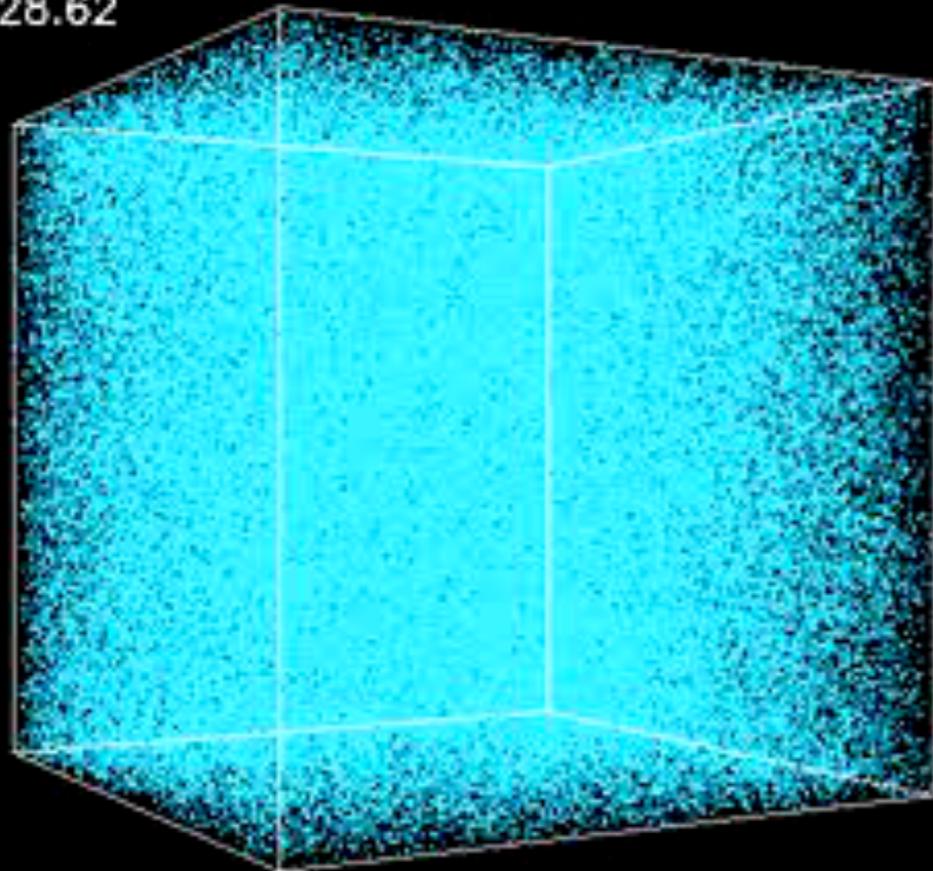


370.0  
 $\rho_{auj}$   
 $(T \gg$   
 tenir  
 années



ntique

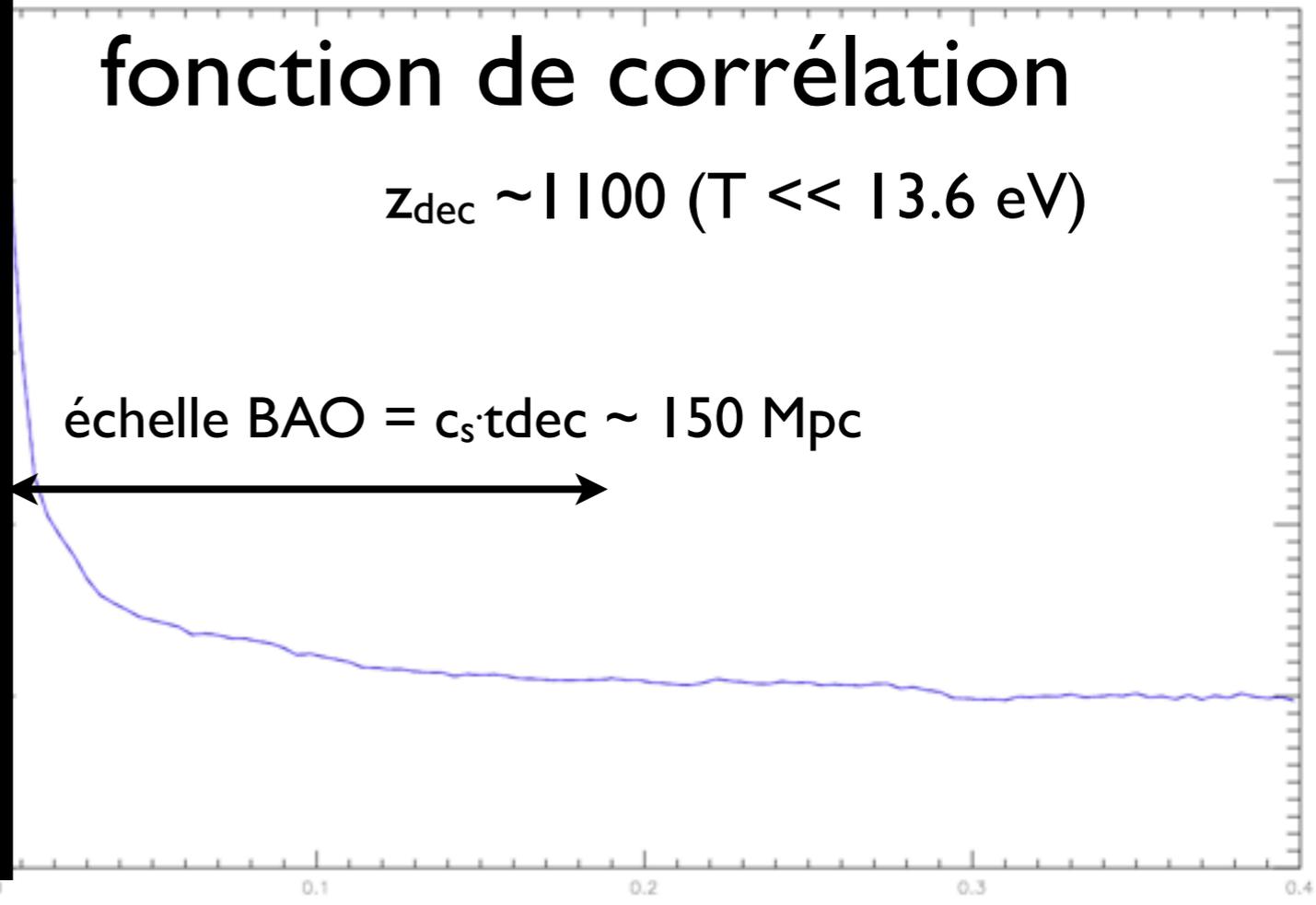
$Z=28.62$



fonction de corrélation

$$Z_{dec} \sim 1100 \quad (T \ll 13.6 \text{ eV})$$

$$\text{échelle BAO} = c_s \cdot t_{dec} \sim 150 \text{ Mpc}$$



# BOSS

- **Projet principal du dark time de SDSS-III en 2009-2014**
- **But: de déterminer la position du pic BAO avec une précision de 1% à  $z \sim 0.6$  et 1.5% à  $z \sim 2.3$**
- **Implication: meilleurs contraintes sur la équation d'état de l'énergie sombre jusqu'à la prochaine génération d'expériences**

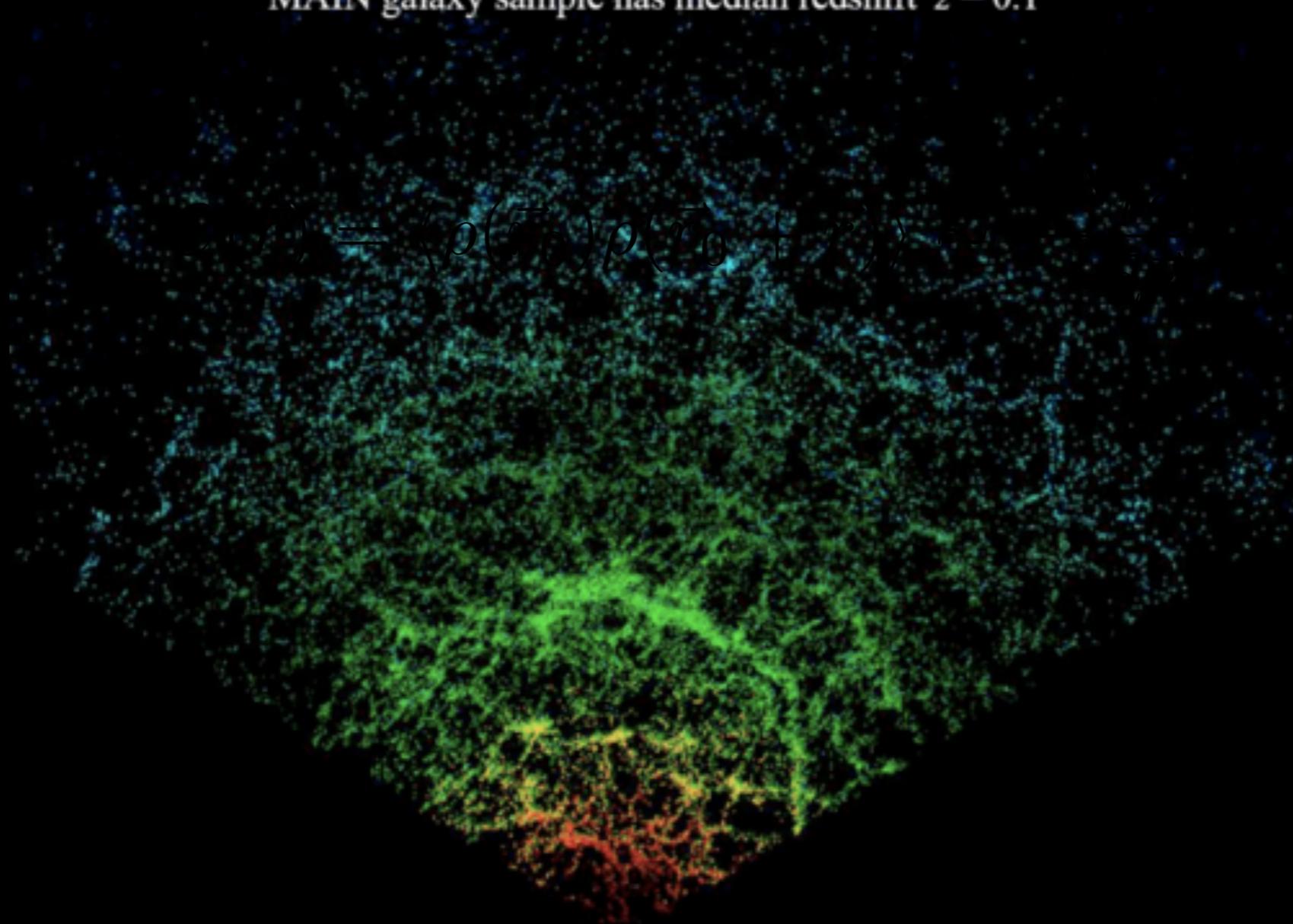
## SDSS - 2.4m telescope



- **Relevé spectrométrique**
- **1/4 du ciel ( $10,000 \text{ deg}^2$ )**
- **deux méthodes complémentaires :**
  - **LRG (garantie) :  $z \sim 0.6$**
  - **Ly $\alpha$  (nouvelle technique) :  $z \sim 2.3$**

# BOSS LRG

2.5-degree thick wedge of the redshift distribution of galaxies  
MAIN galaxy sample has median redshift  $z = 0.1$



$$\langle \rho(\vec{r}) \rho(\vec{r}_0 + \vec{r}) \rangle$$

- galaxies géantes rouges comme traceurs de la matière

# BOSS LRG

2.5-degree thick wedge of the redshift distribution of galaxies  
MAIN galaxy sample has median redshift  $z = 0.1$

$$C(\vec{r}) = \langle \rho(\vec{r}_0) \rho(\vec{r}_0 + \vec{r}) \rangle \sim \frac{dN_{pairs}}{d\vec{r}}$$

- estimated from the number of pairs of galaxies
- compare to random data sets (without BAOs) to remove FoV biases

- galaxies géantes rouges comme traceurs de la matière

# BOSS LRG

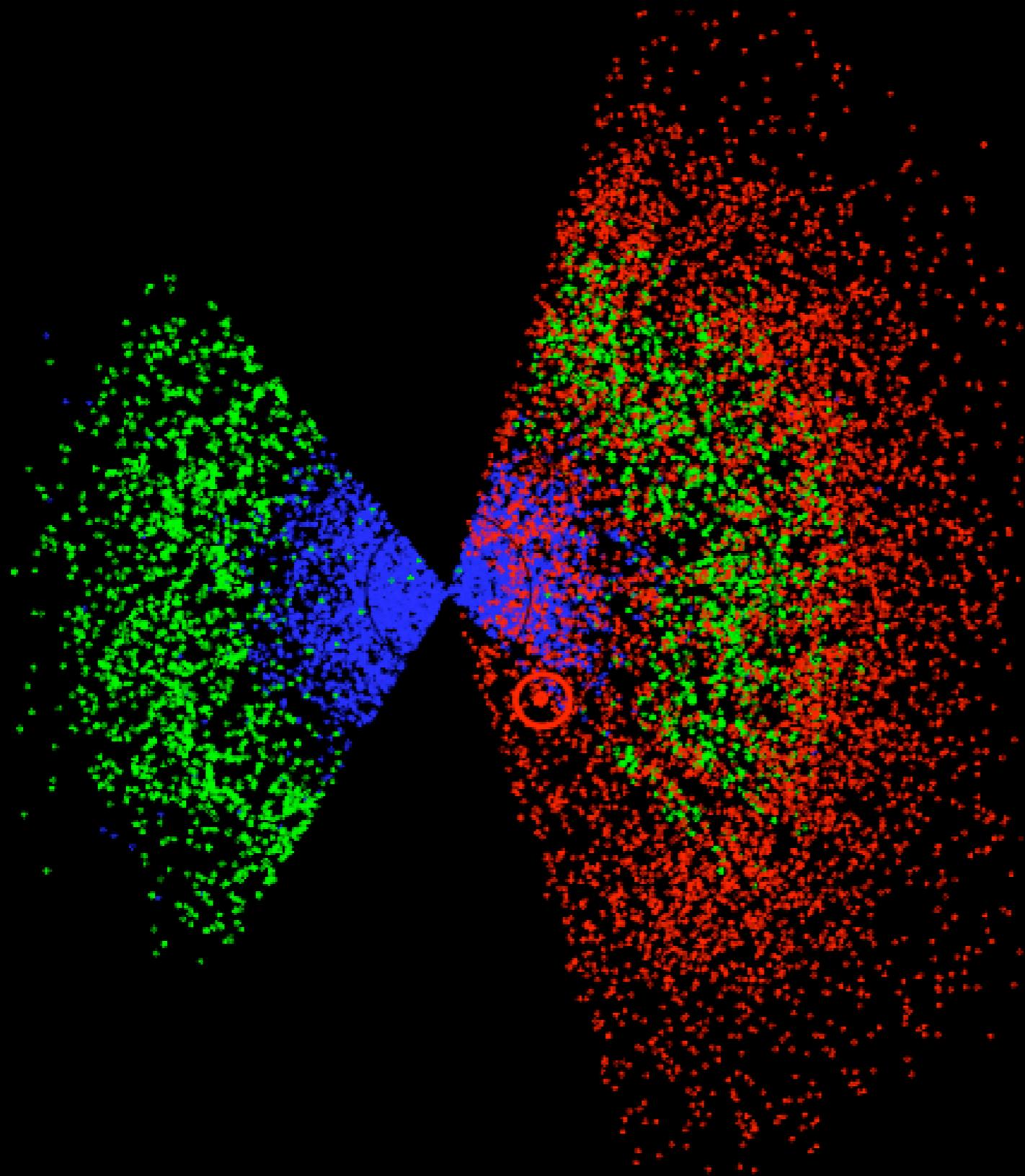
2.5-degree thick wedge of the redshift distribution of galaxies  
MAIN galaxy sample has median redshift  $z = 0.1$

$$C(\vec{r}) = \langle \rho(\vec{r}_0) \rho(\vec{r}_0 + \vec{r}) \rangle \sim \frac{dN_{pairs}}{d\vec{r}}$$

- estimated from the number of pairs of galaxies
- compare to random data sets (without BAOs) to remove FoV biases

- galaxies géantes rouges comme traceurs de la matière
- gamme de  $z$  déterminée par le spectro (visible) :  $0 < z < 0.7$

# How: BOSS-LRG vs SDSS-II



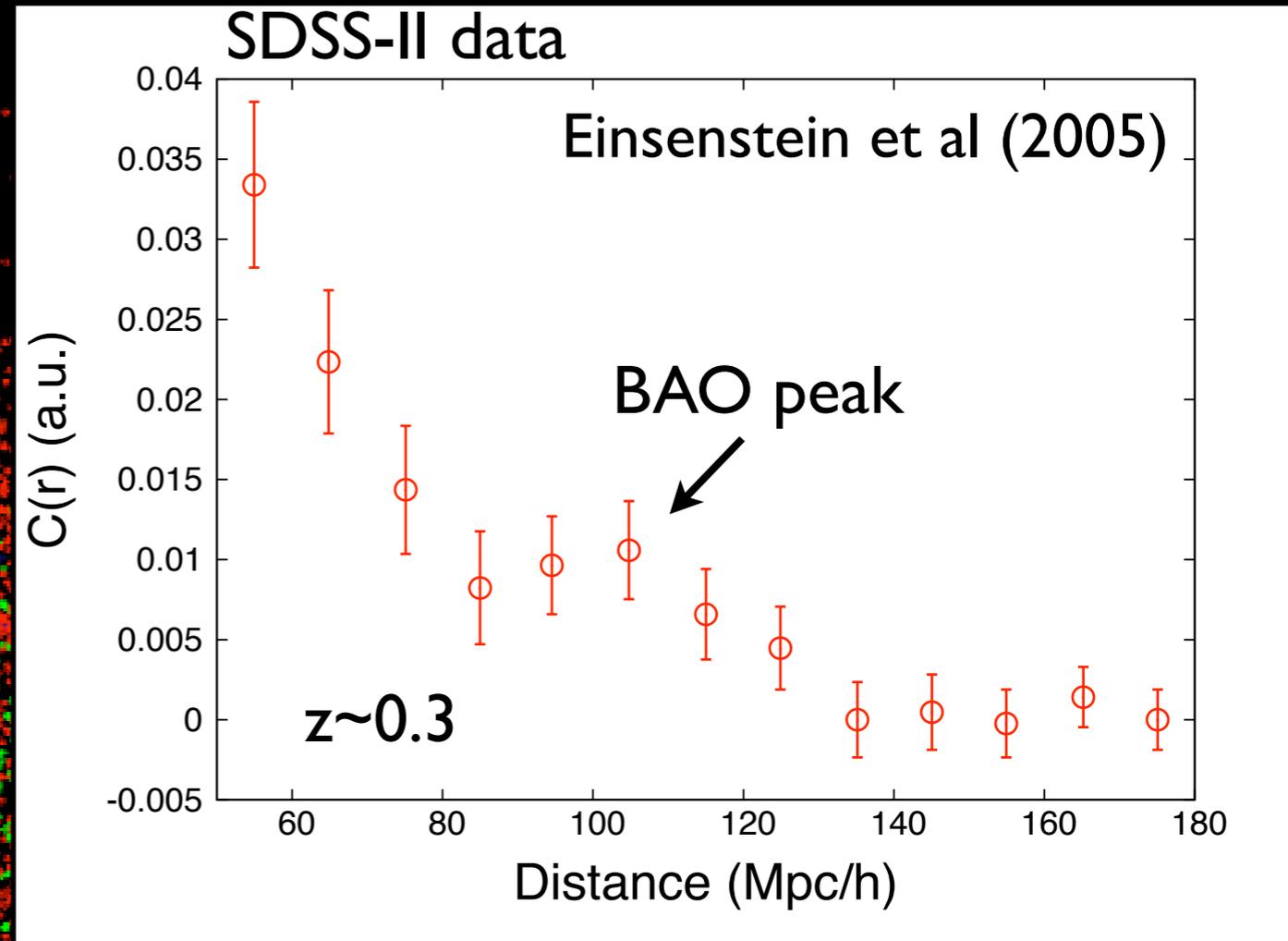
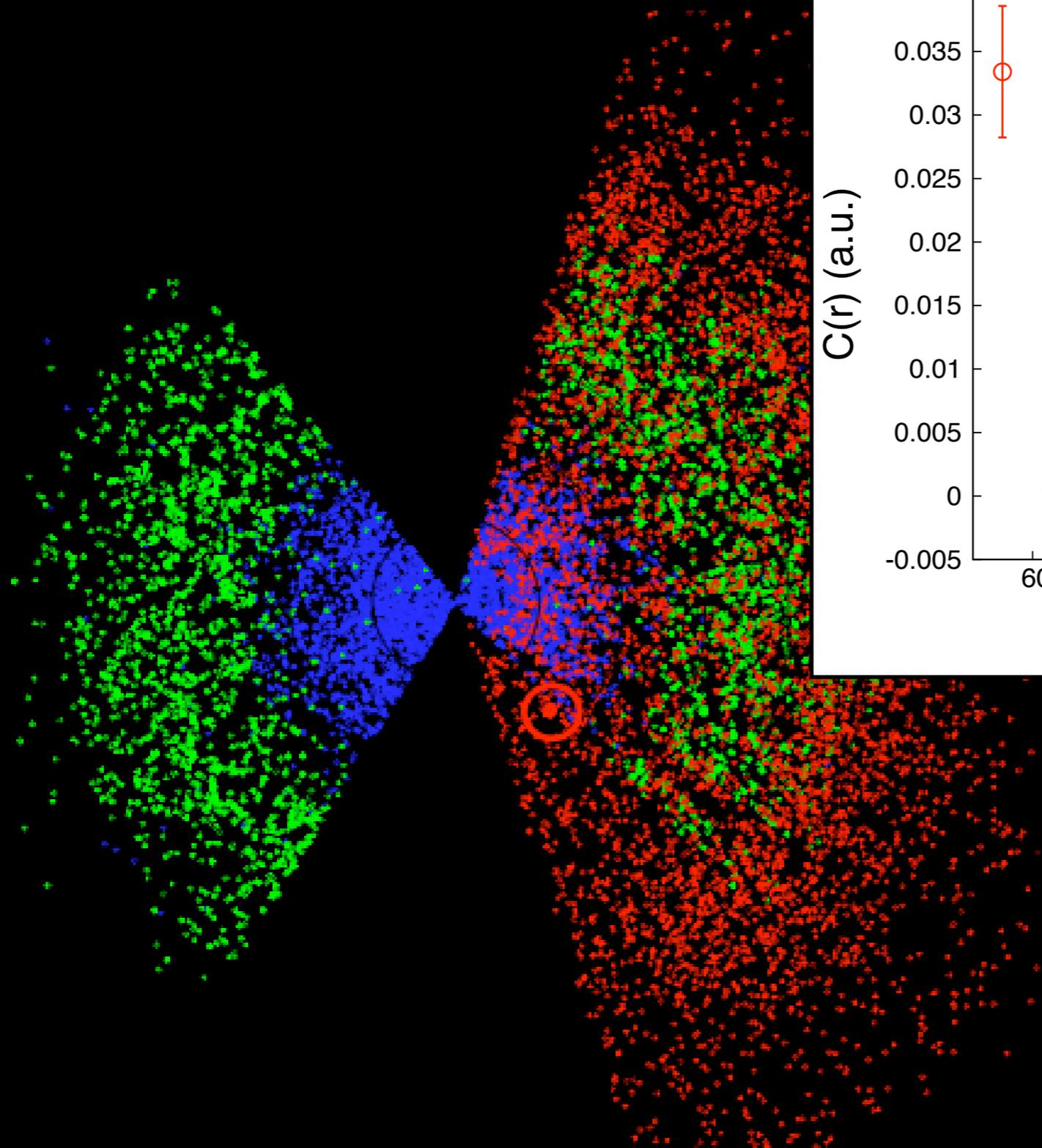
- 2x volume
- 5x density
- 10x statistics
- 1,600,000 LRGs

SDSS main sample

SDSS I+II

BOSS (SDSS III)

# How: BOSS-LRG vs SDSS-II



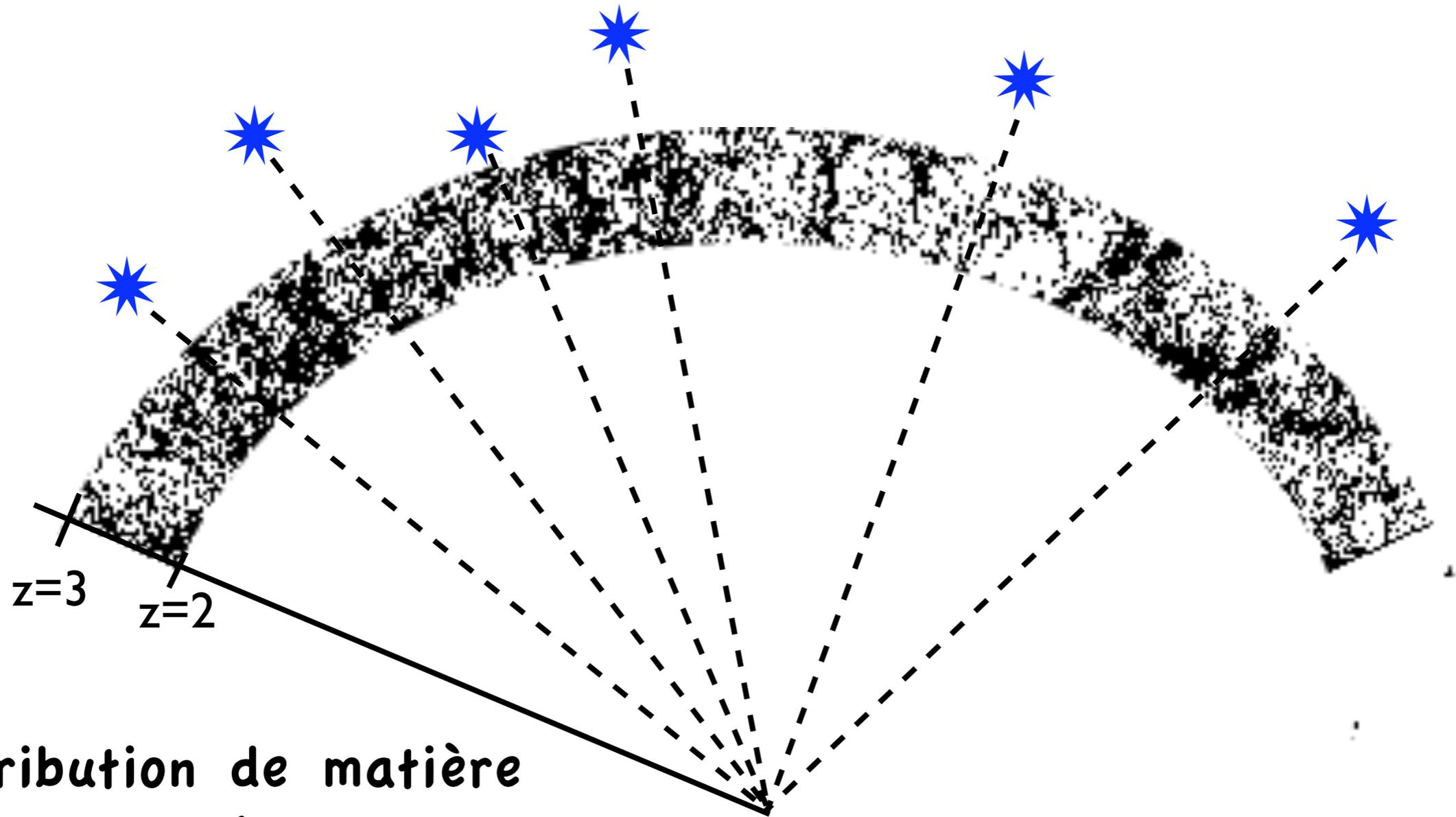
SDSS main sample

SDSS I+II

BOSS (SDSS III)

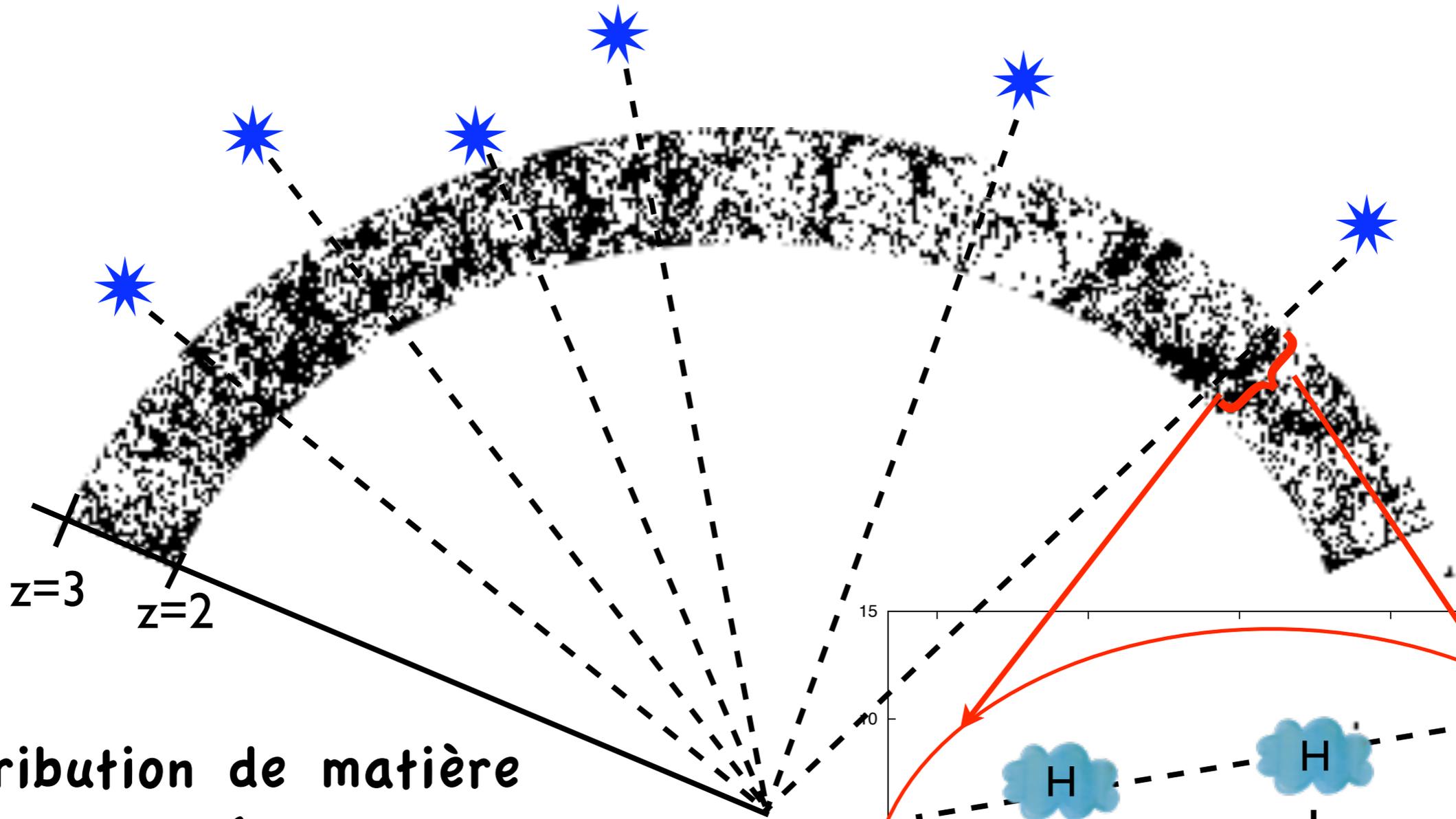
Mesure garantie : pic observé dans SDSS II

# How: BOSS-Ly $\alpha$

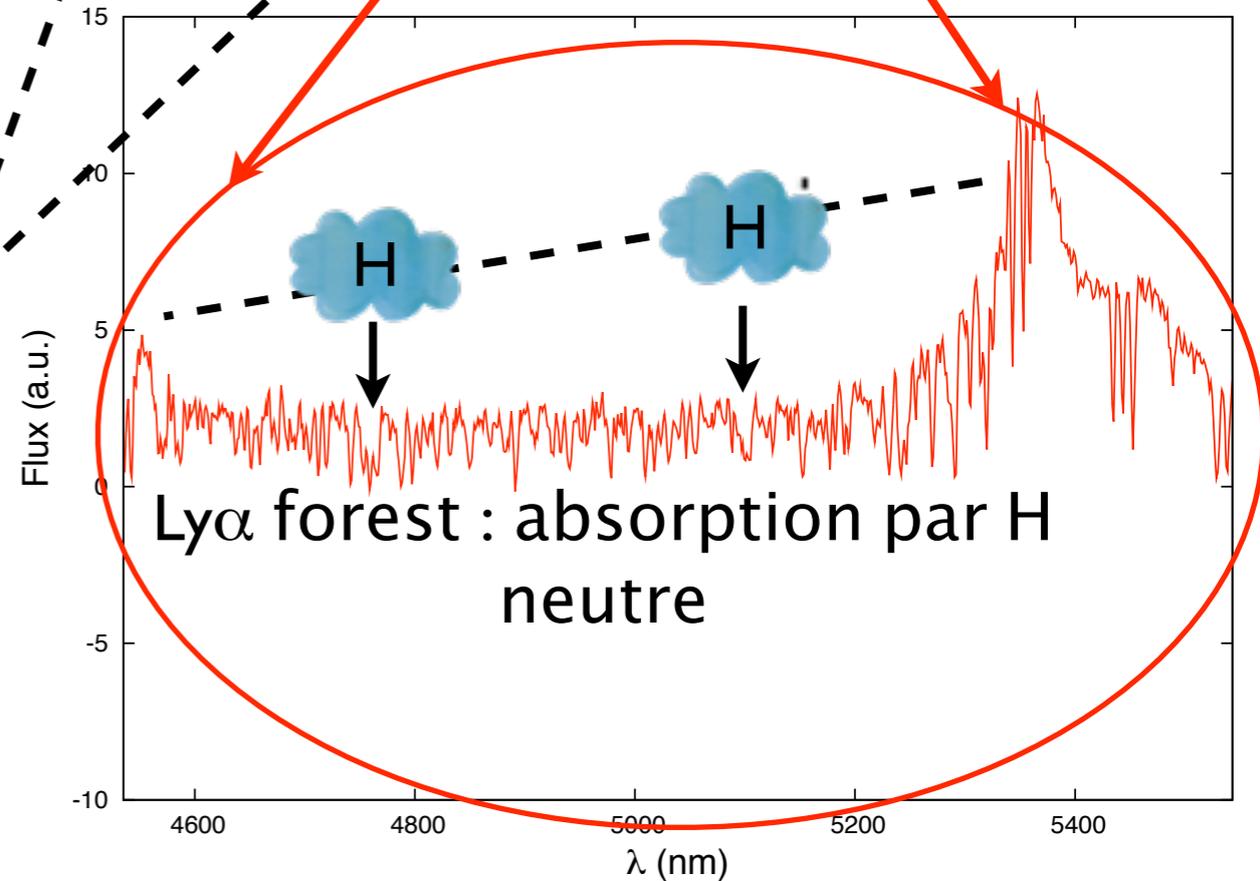


Distribution de matière  
échantillonnée par des  
lignes de visée de QSOs

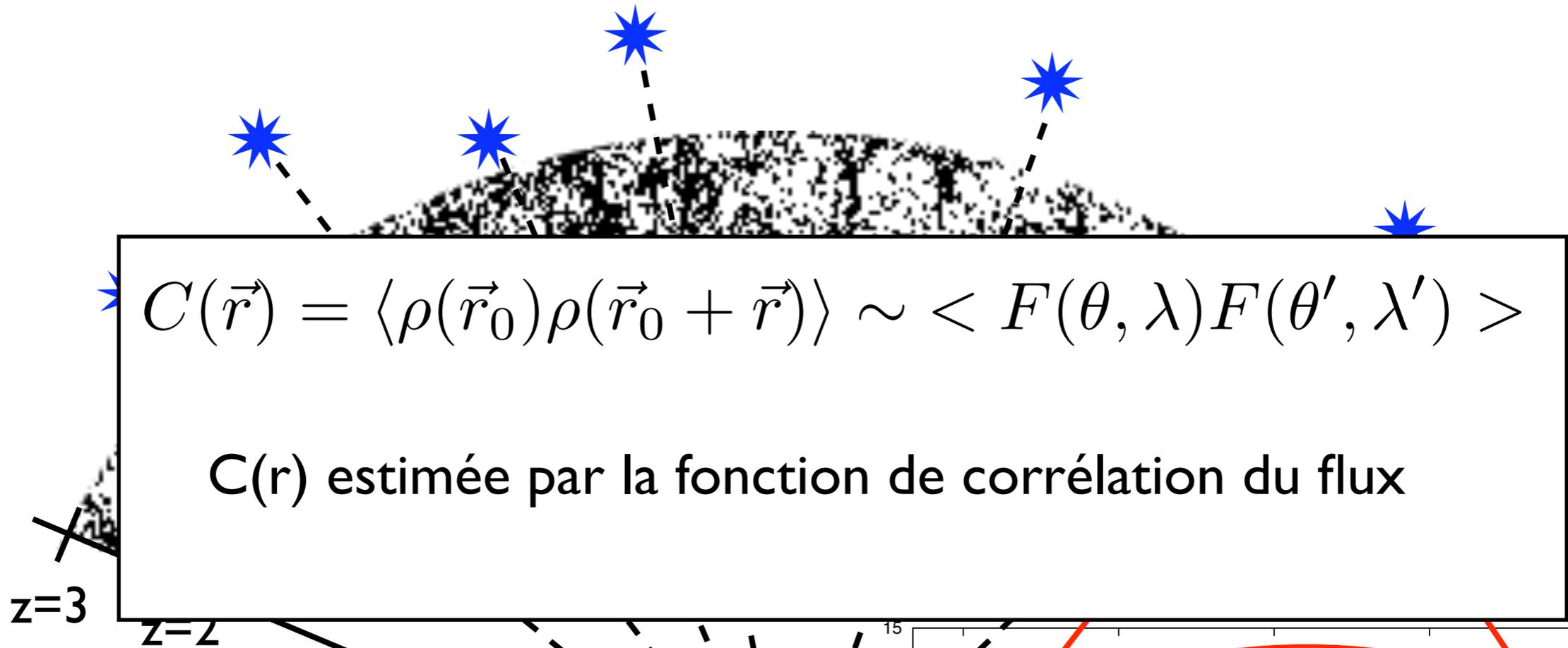
# How: BOSS-Ly $\alpha$



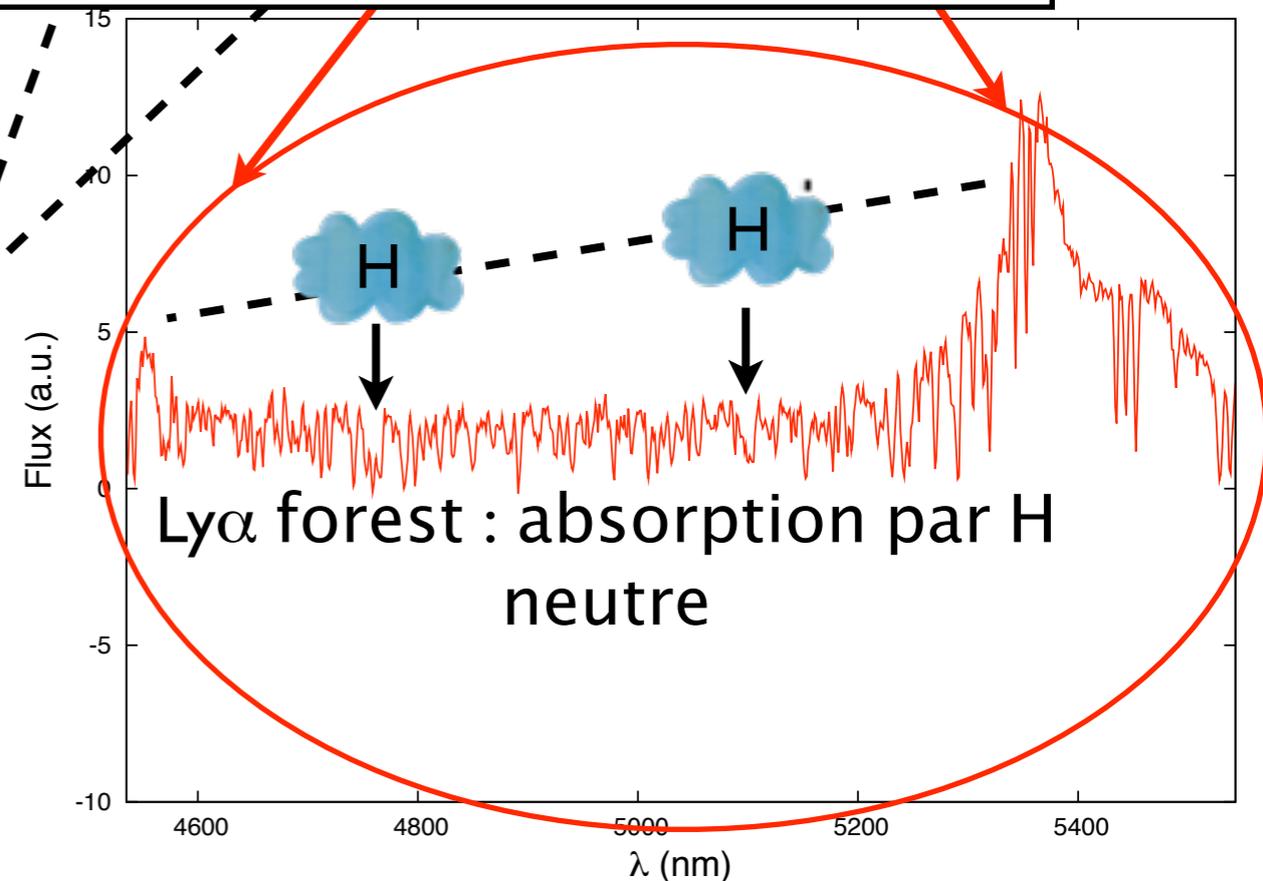
Distribution de matière échantillonnée par des lignes de visée de QSOs



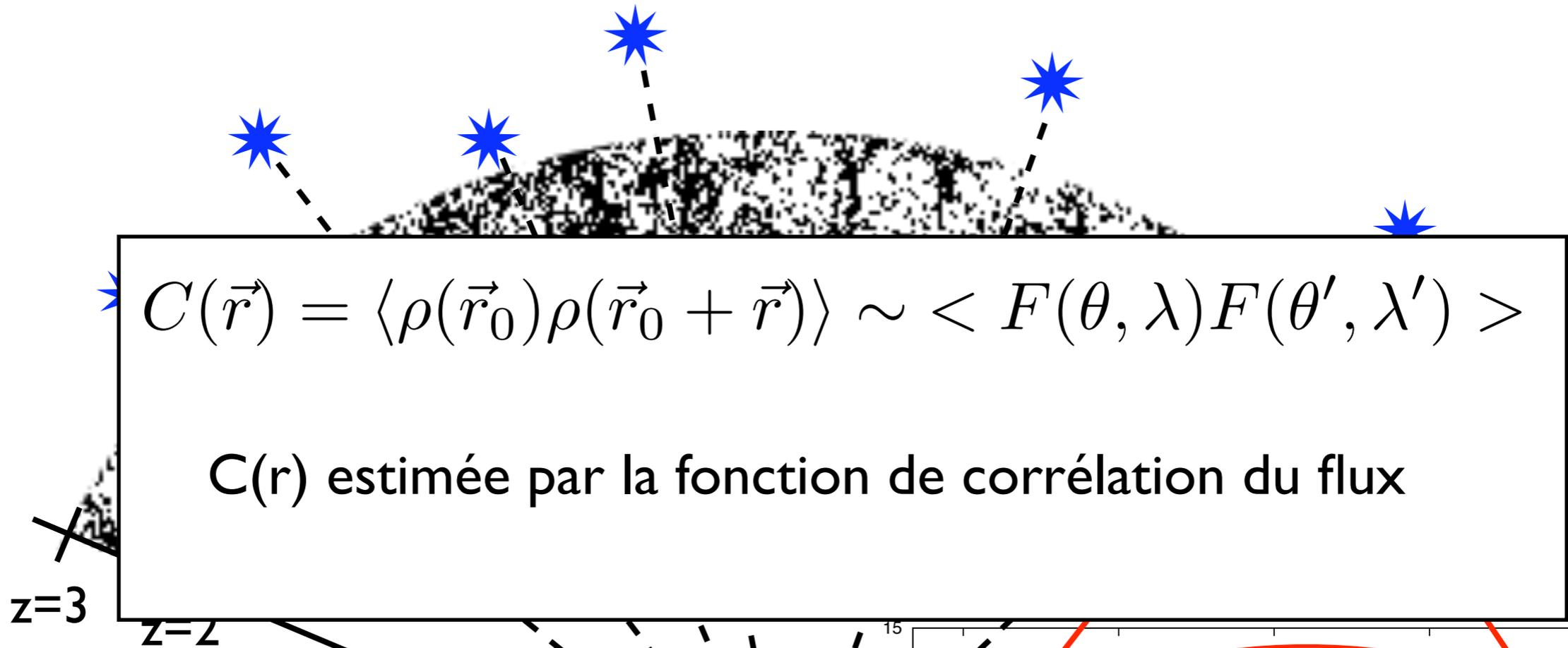
# How: BOSS-Ly $\alpha$



Distribution de matière échantillonnée par des lignes de visée de QSOs

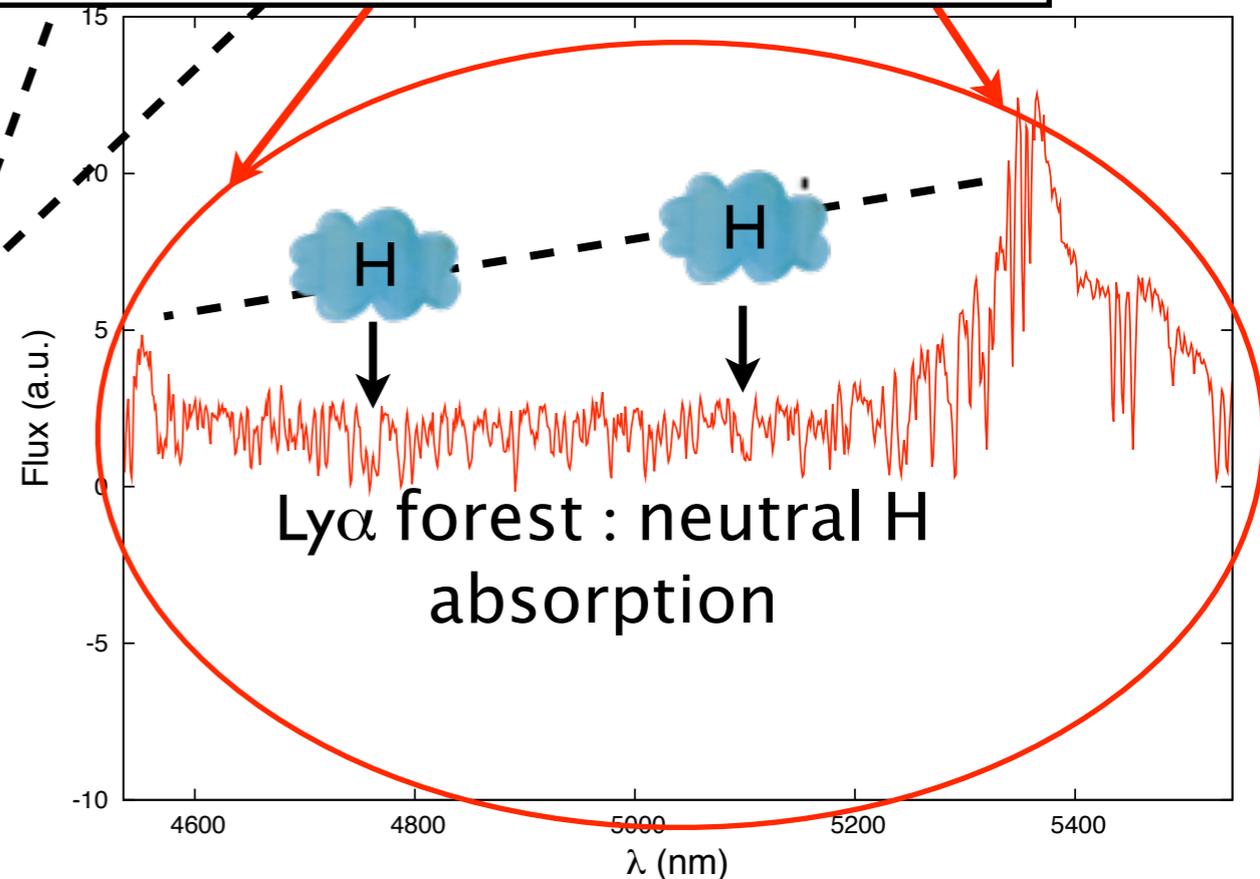


# How: BOSS-Ly $\alpha$

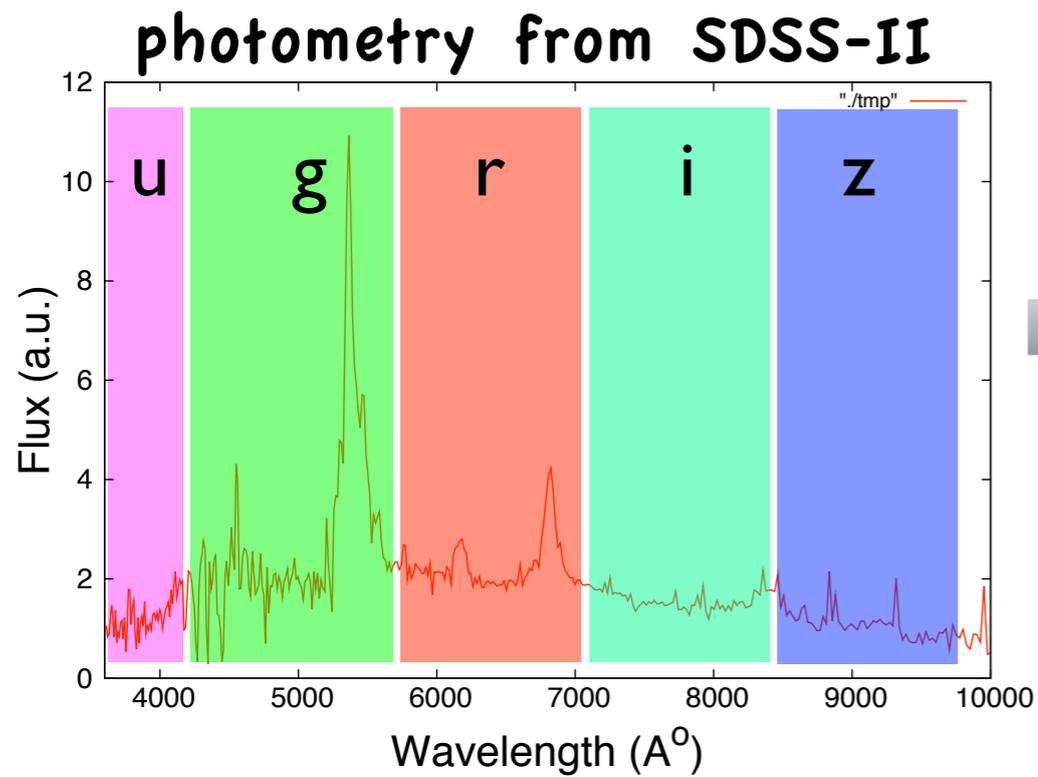


Distribution de matière échantillonnée par des lignes de visée de QSOs

Gamme de  $z$  :  $2 < z < 8$



# BOSS-data taking



target selection

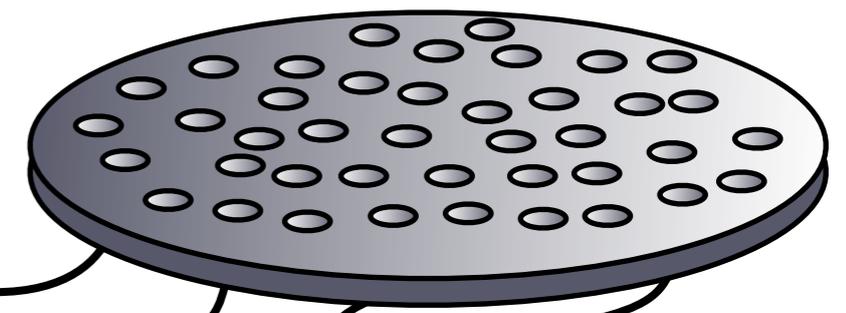


List of targets

```
SDSS J112253.51+005329.8
SDSSp J120441.73-002149.6
SDSSp J130348.94+002010.4
SDSSp J141205.78-010152.6
SDSSp J141315.36+000032.1
....
```



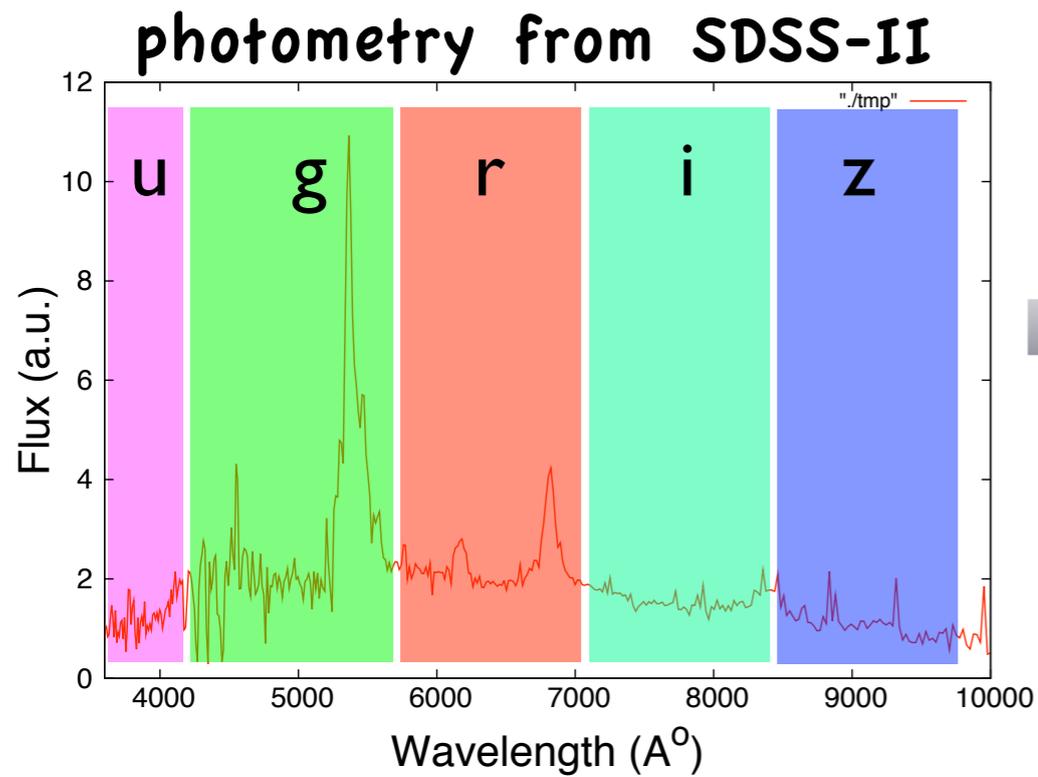
plate



optical fibers



# BOSS-data taking



target selection

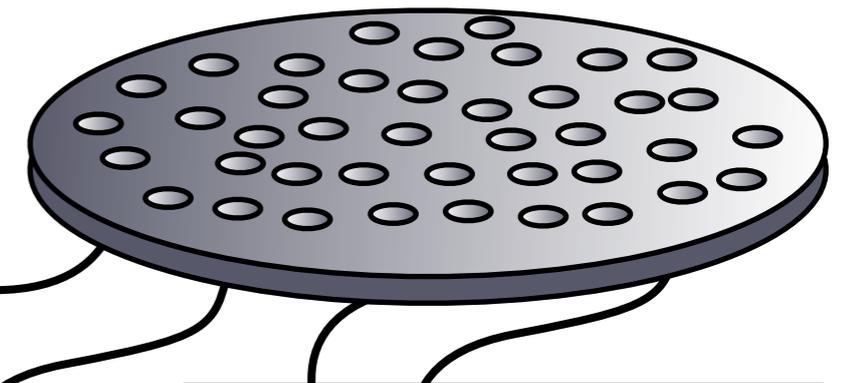


List of targets

```
SDSS J112253.51+005329.8
SDSSp J120441.73-002149.6
SDSSp J130348.94+002010.4
SDSSp J141205.78-010152.6
SDSSp J141315.36+000032.1
....
```



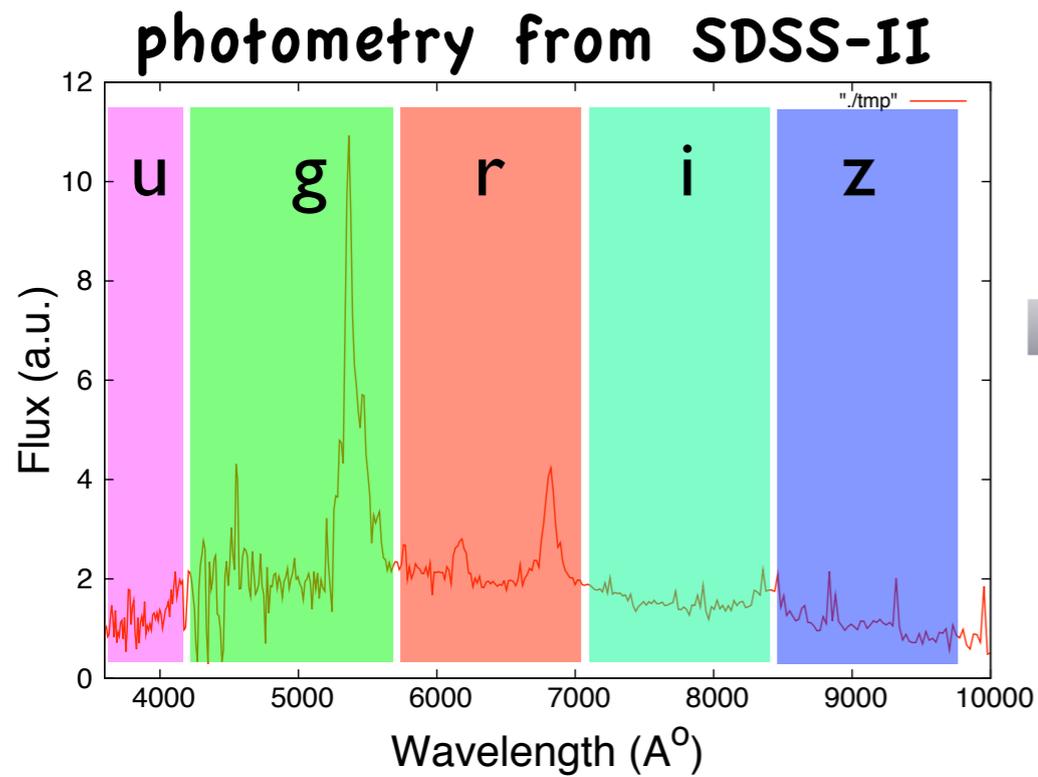
plate



- 1000 fibers/plate
- 250 dedicated to QSO
- 750 dedicated to LRG



# BOSS-data taking

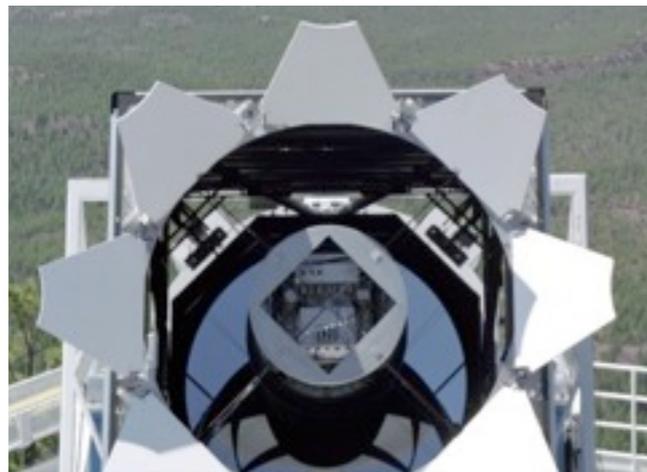


target selection



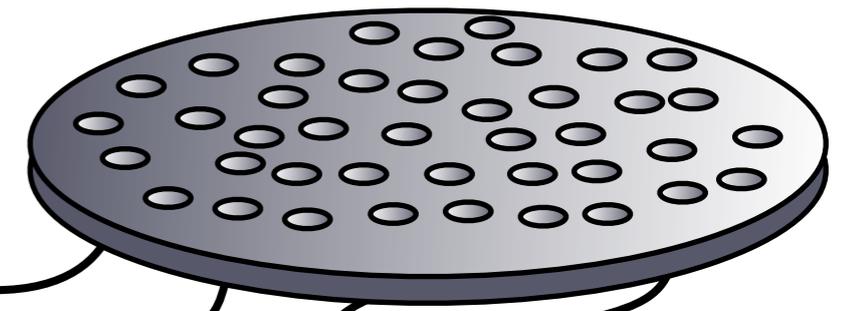
List of targets

```
SDSS J112253.51+005329.8
SDSSp J120441.73-002149.6
SDSSp J130348.94+002010.4
SDSSp J141205.78-010152.6
SDSSp J141315.36+000032.1
....
```



- plate goes to focal plane
- 80min/plate
- 10min to change the plate

plate

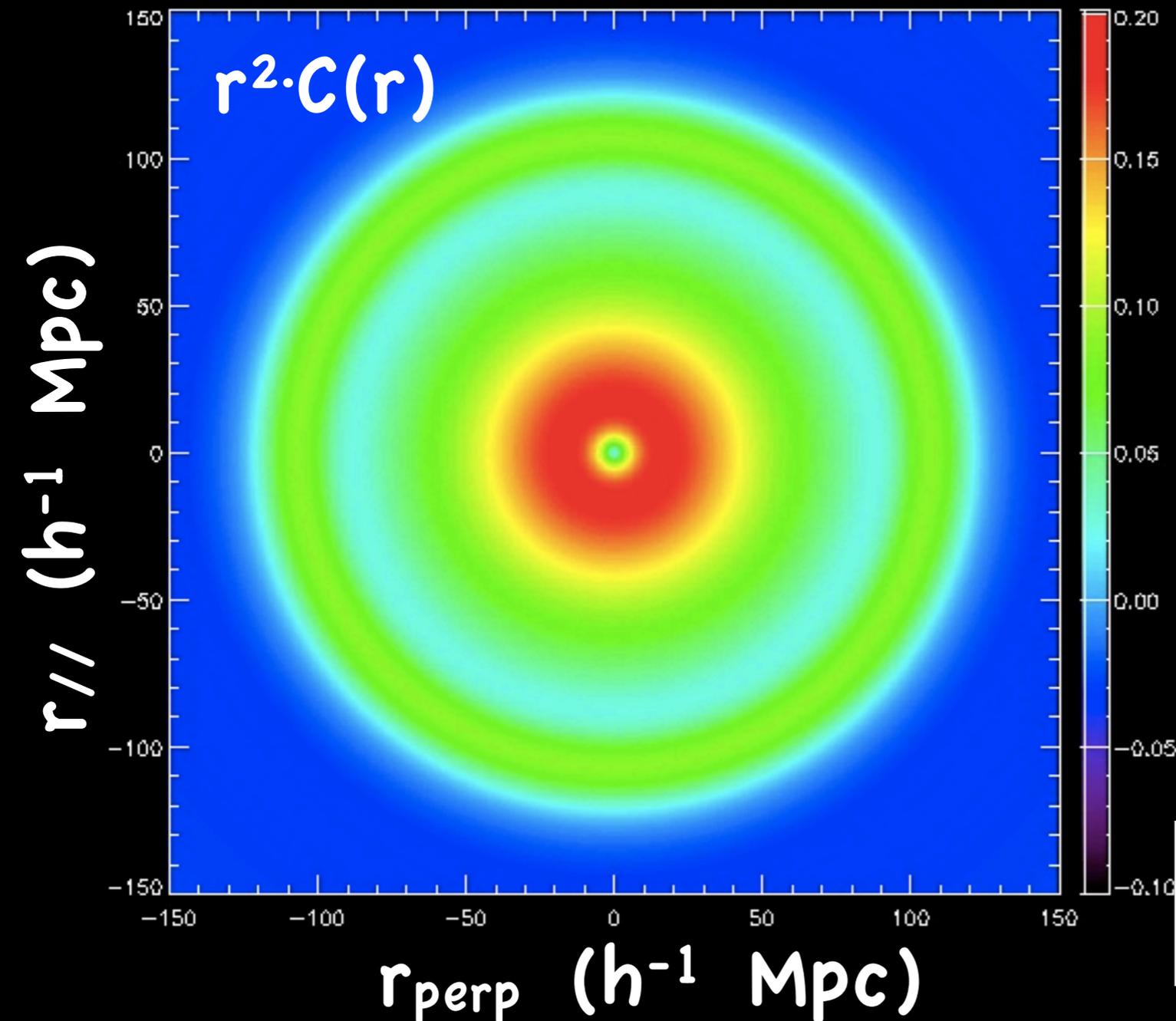


optical fibers



# La fonction de corrélation en 2D

$$C(r_{\parallel}, r_{\perp}) = C(r_{\parallel}^2 + r_{\perp}^2)$$



$$r_{\parallel} = (r_1 - r_2) \cos(\theta/2)$$

$$r_{\perp} = (r_1 + r_2) \sin(\theta/2)$$

$$r(z) = c \int_0^z \frac{dz}{H(z)}$$

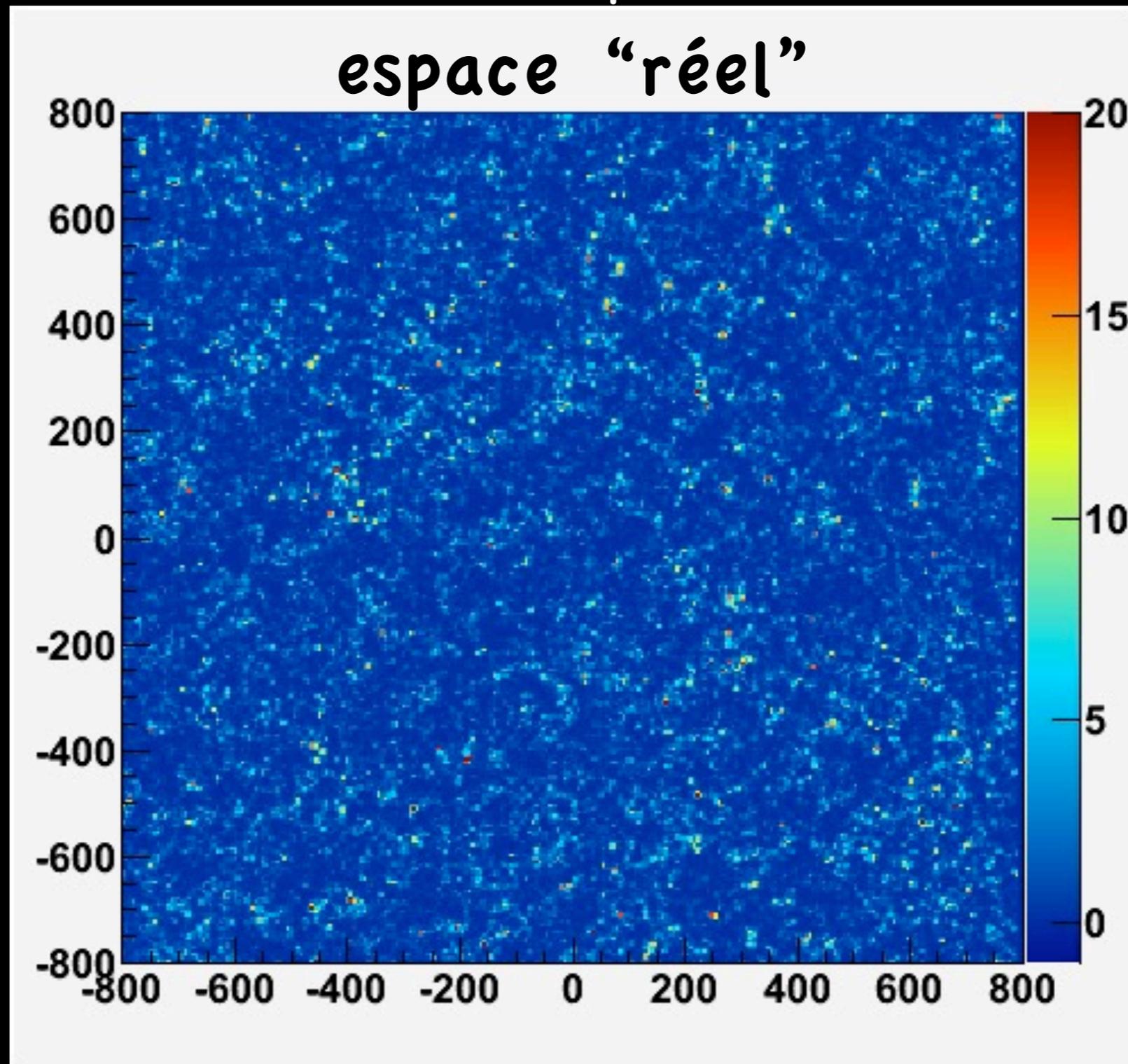
Une cosmologie incorrecte  
brise la symétrie polaire

Alcock & Paczyński (1979)

**Caveat ! distorsions dans l'espace de z**

$$z = z_{\text{cosmo}} + z_{\text{particulière}}$$

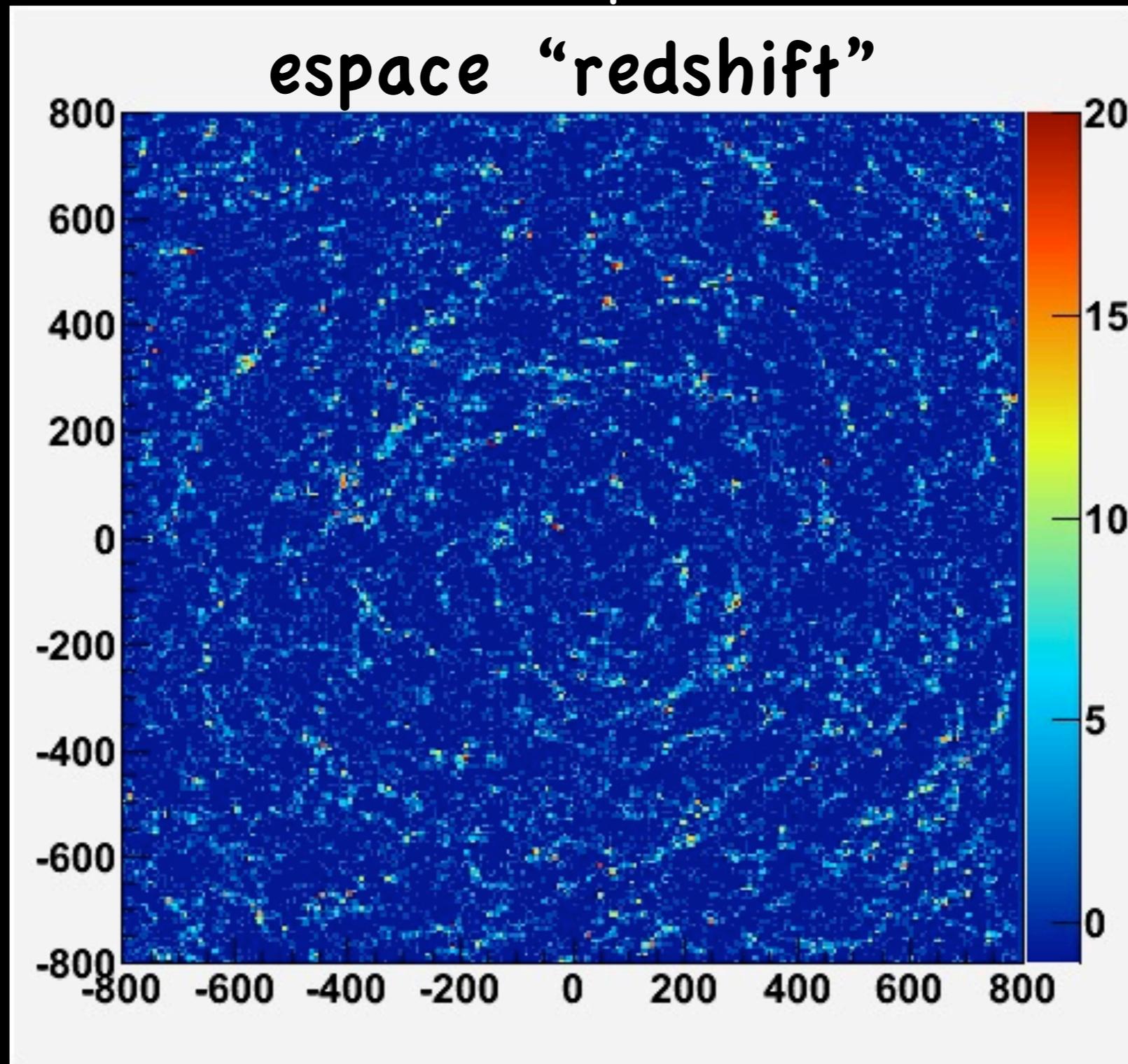
**espace "réel"**



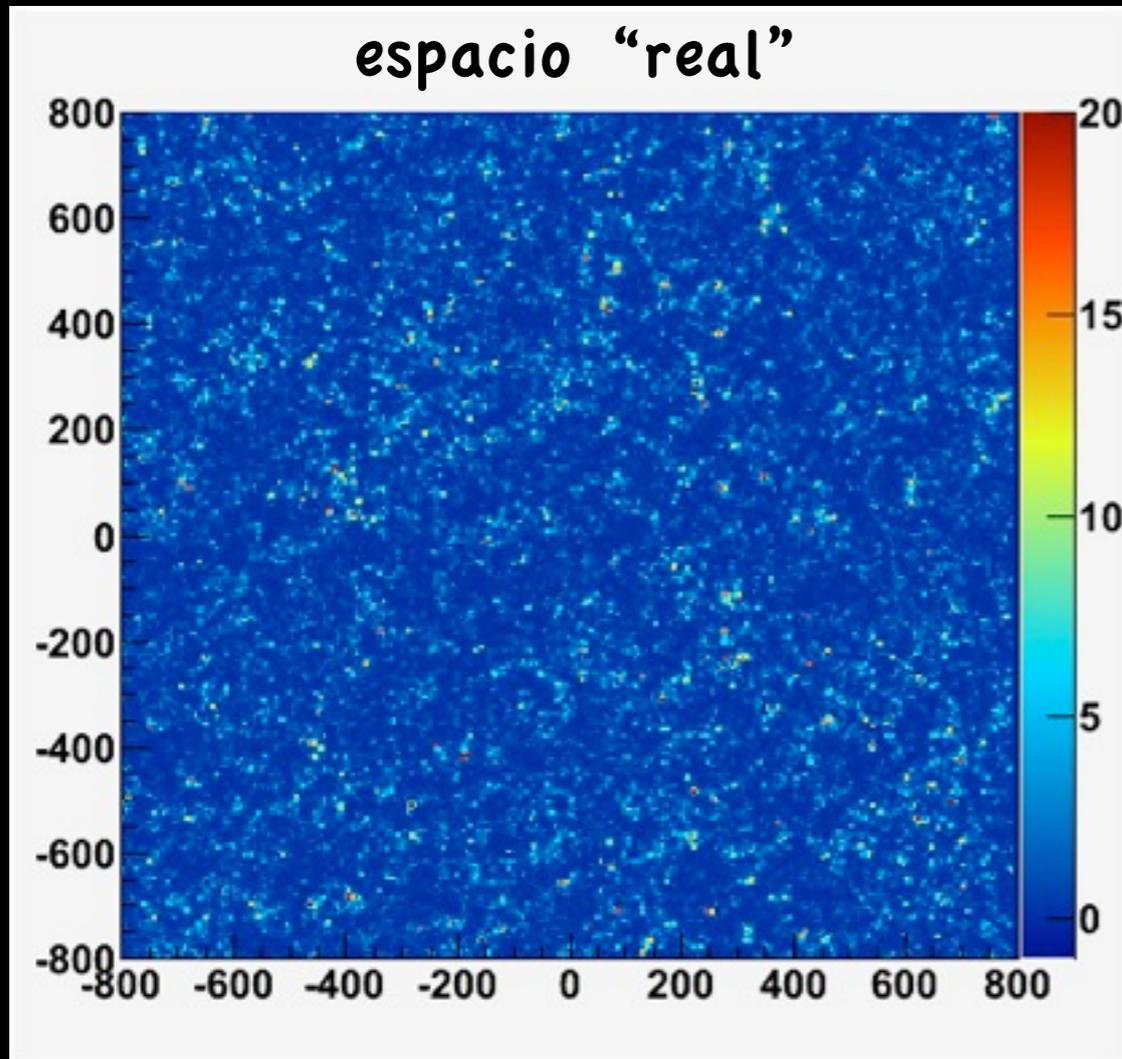
**Caveat ! distorsions dans l'espace de  $z$**

$$z = z_{\text{cosmo}} + z_{\text{particulière}}$$

espace "redshift"

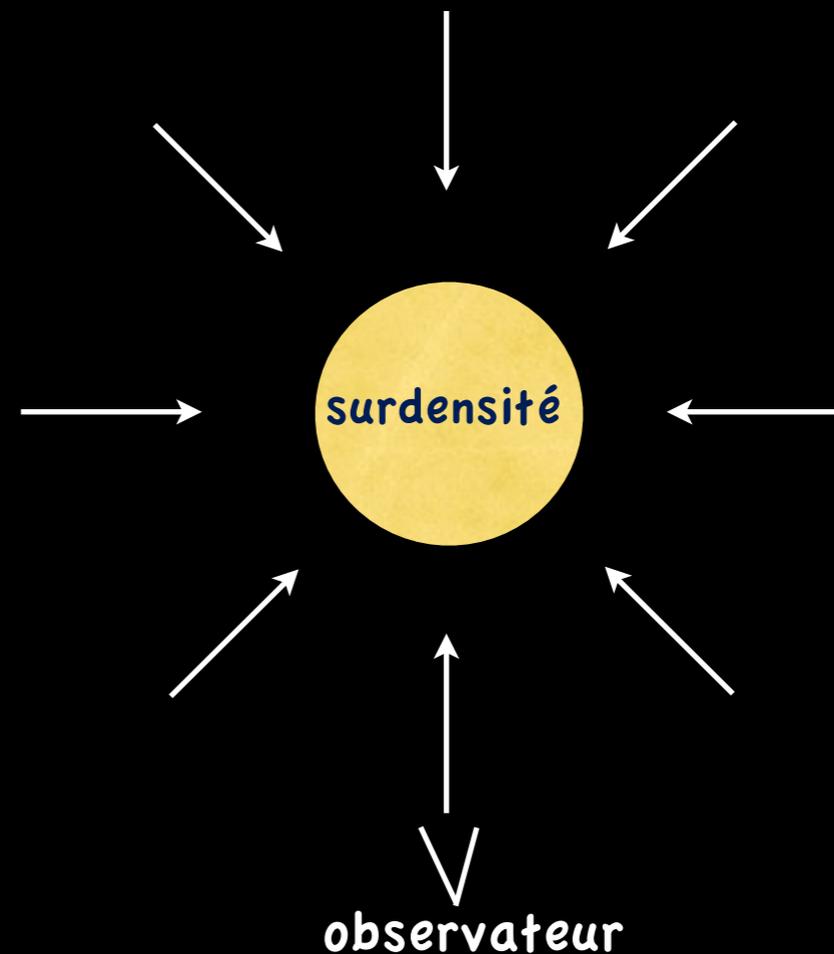


# Caveat ! distorsions dans l'espace de $z$



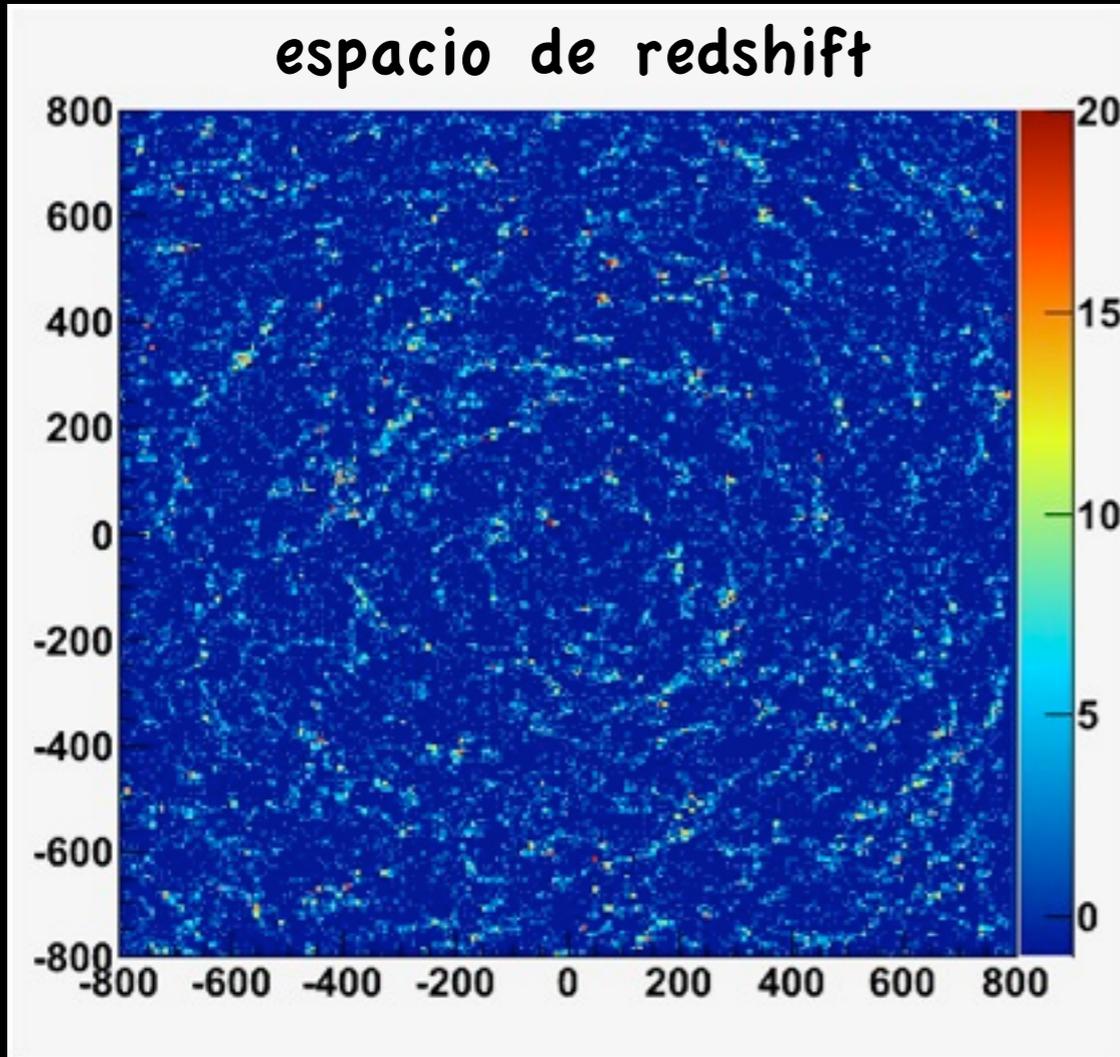
- effet Kaiser: la matière tombe dans les puits de potentiel

$$z = z_{\text{cosmo}} + z_{\text{particulière}}$$



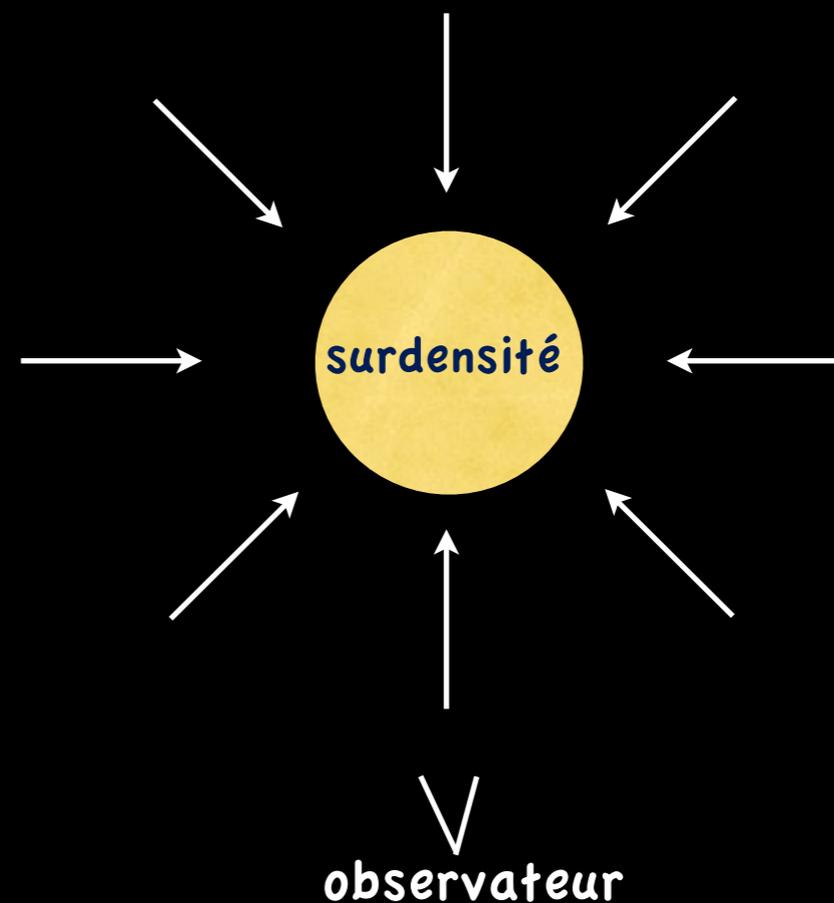
# Distorsiones en el espacio de redshift

espacio de redshift



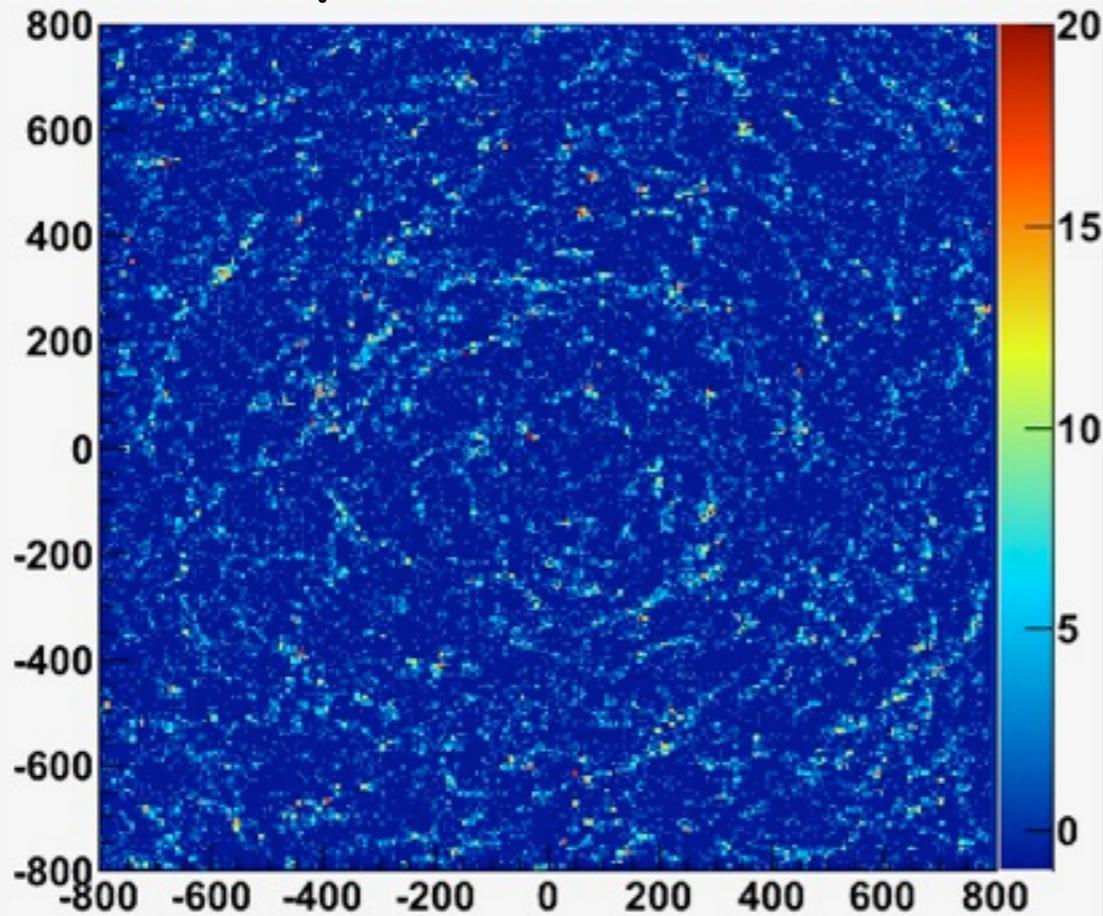
- **effet Kaiser: la matière tombe dans les puits de potentiel**

$$z = z_{\text{cosmo}} + z_{\text{particulière}}$$

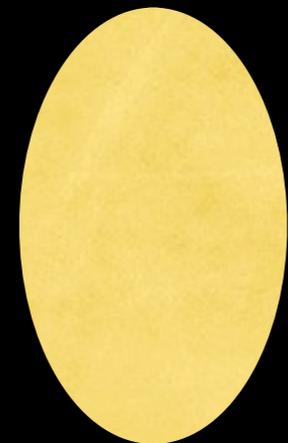
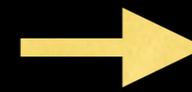


# Distorsiones en el espacio de redshift

espacio de redshift



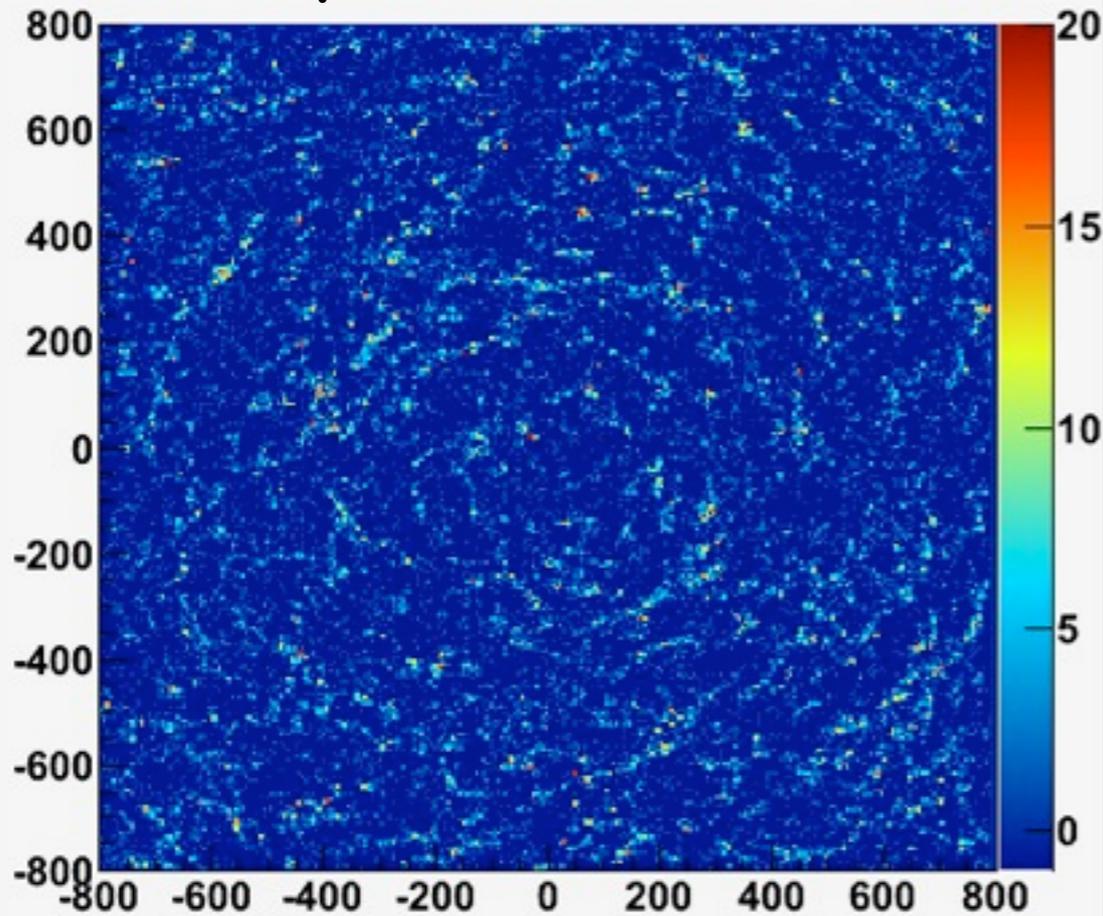
- **effet Kaiser:** la matière tombe dans les puits de potentiel
- **doigts de Dieu :** amas virialisés



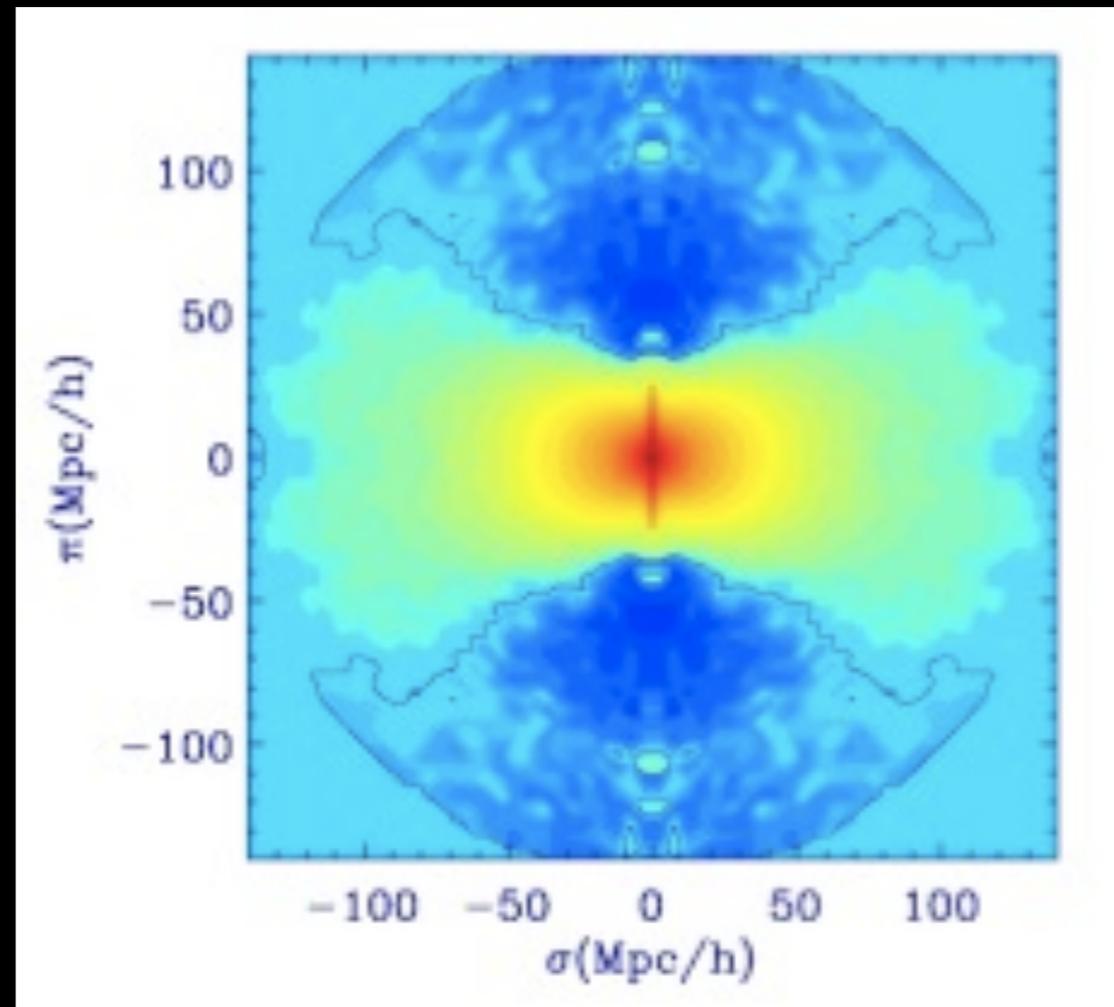
observateur

# Distorsiones en el espacio de redshift

espacio de redshift



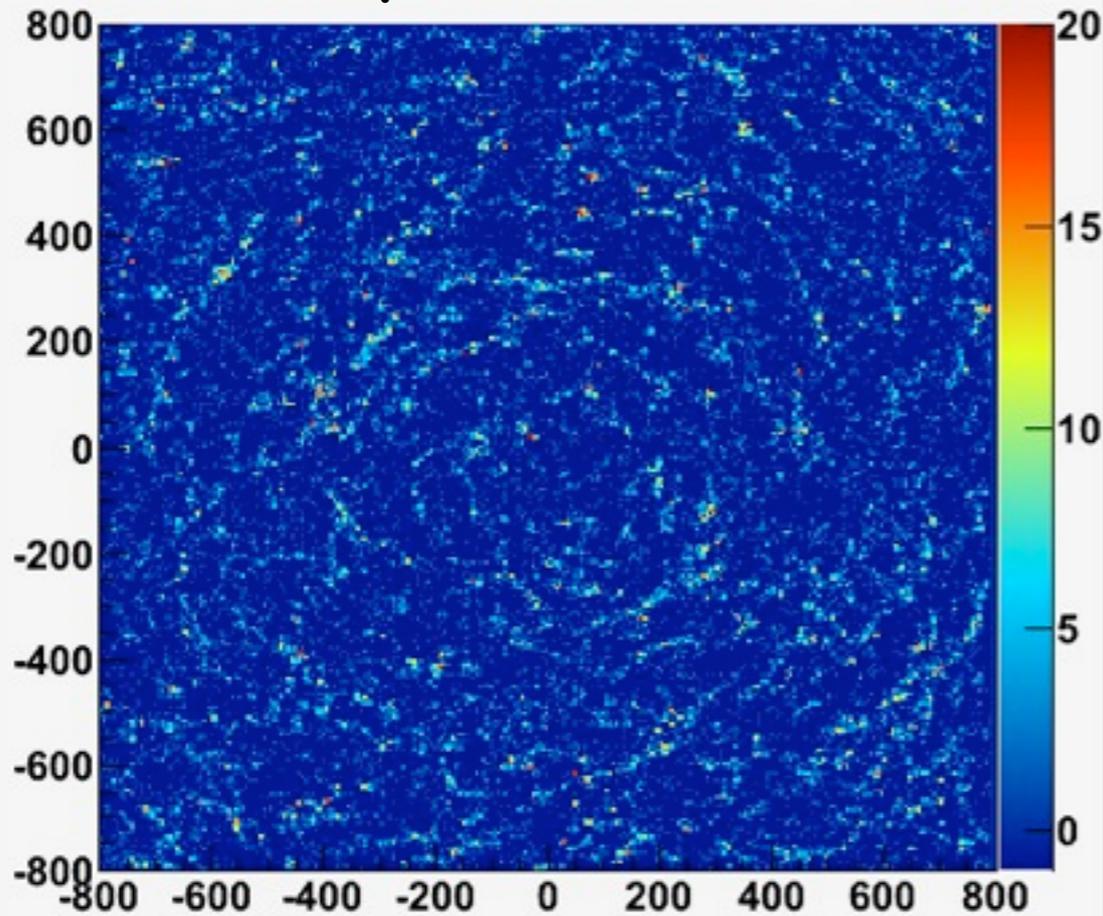
- efecto Kaiser: la materia cae en los pozos de potencial gravitatorio
- dedos de Dios: clusters virializados



Cabré & Gastagnaga (2008)

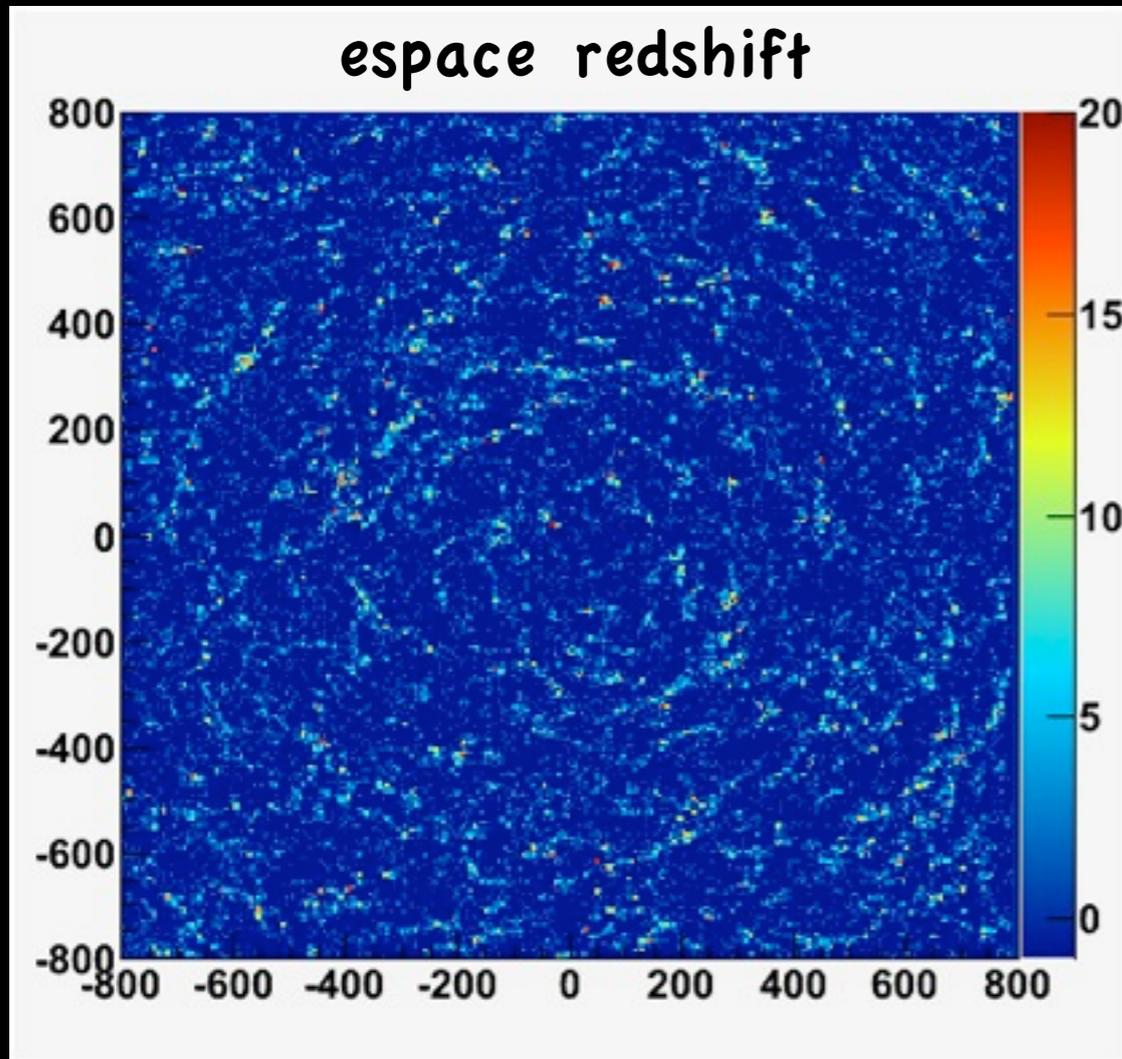
# Distorsions dans l'espace de redshift

espace redshift



- effet Kaiser : la matière tombe dans les puits de potentiel
  - doigts de dieu : amas virialisés
- gêne ça la cosmologie ?

# Distorsions dans l'espace de redshift

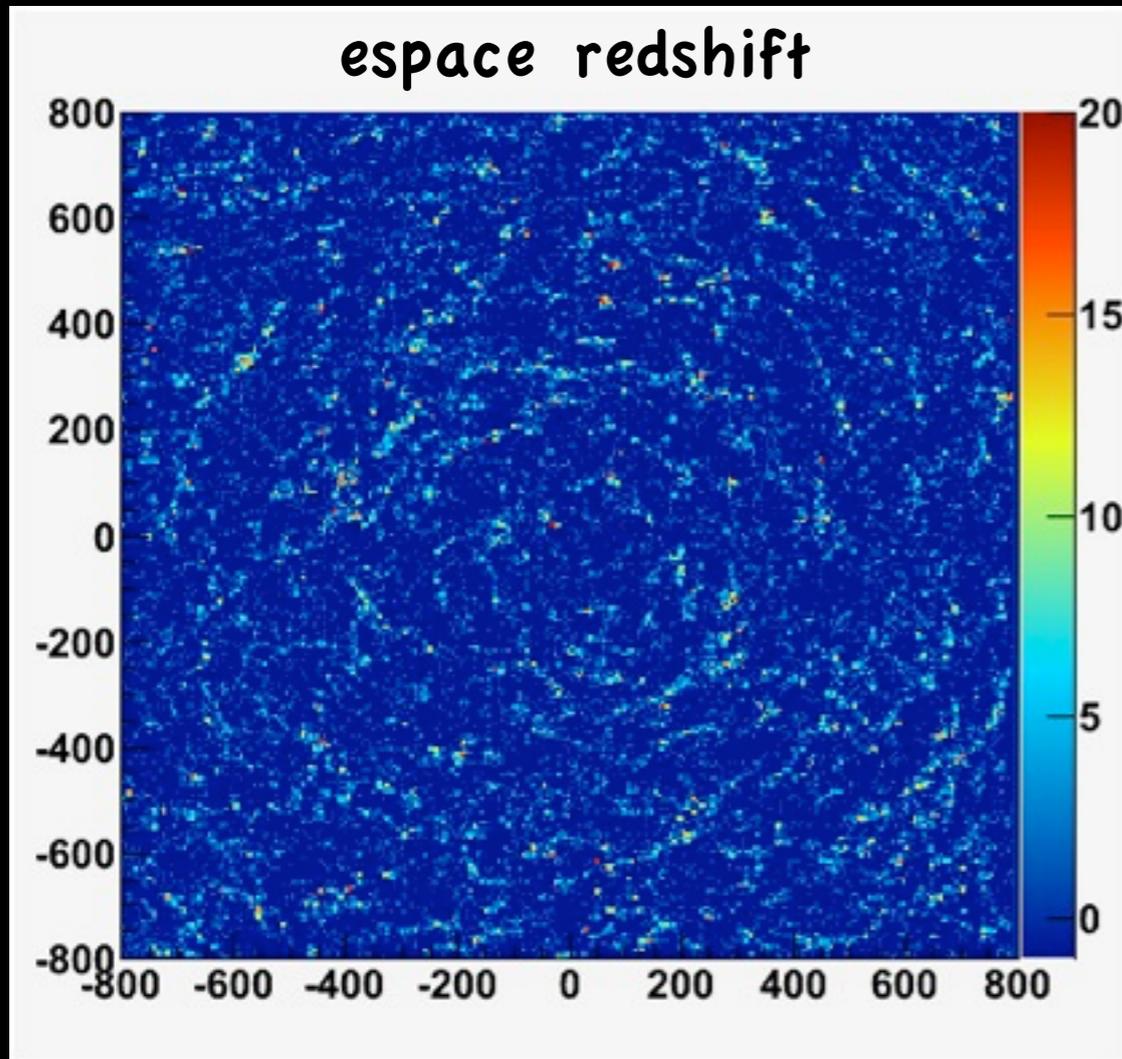


- effet Kaiser : la matière tombe dans les puits de potentiel
  - doigts de dieu : amas virialisés
- gêne ça la cosmologie ?

Non !

- doigts de dieux sont non linaires mais à petites échelles
- l'effet Kaiser est à échelles linaires : corrections analytique
- les vitesses ont un effet sur  $C(r)$  différent du rescaling de la cosmologie, donc on peut les séparer

# Distorsions dans l'espace de redshift



- effet Kaiser : la matière tombe dans les puits de potentiel
  - doigts de dieu : amas virialisés
- gêne ça la cosmologie ?

Non !

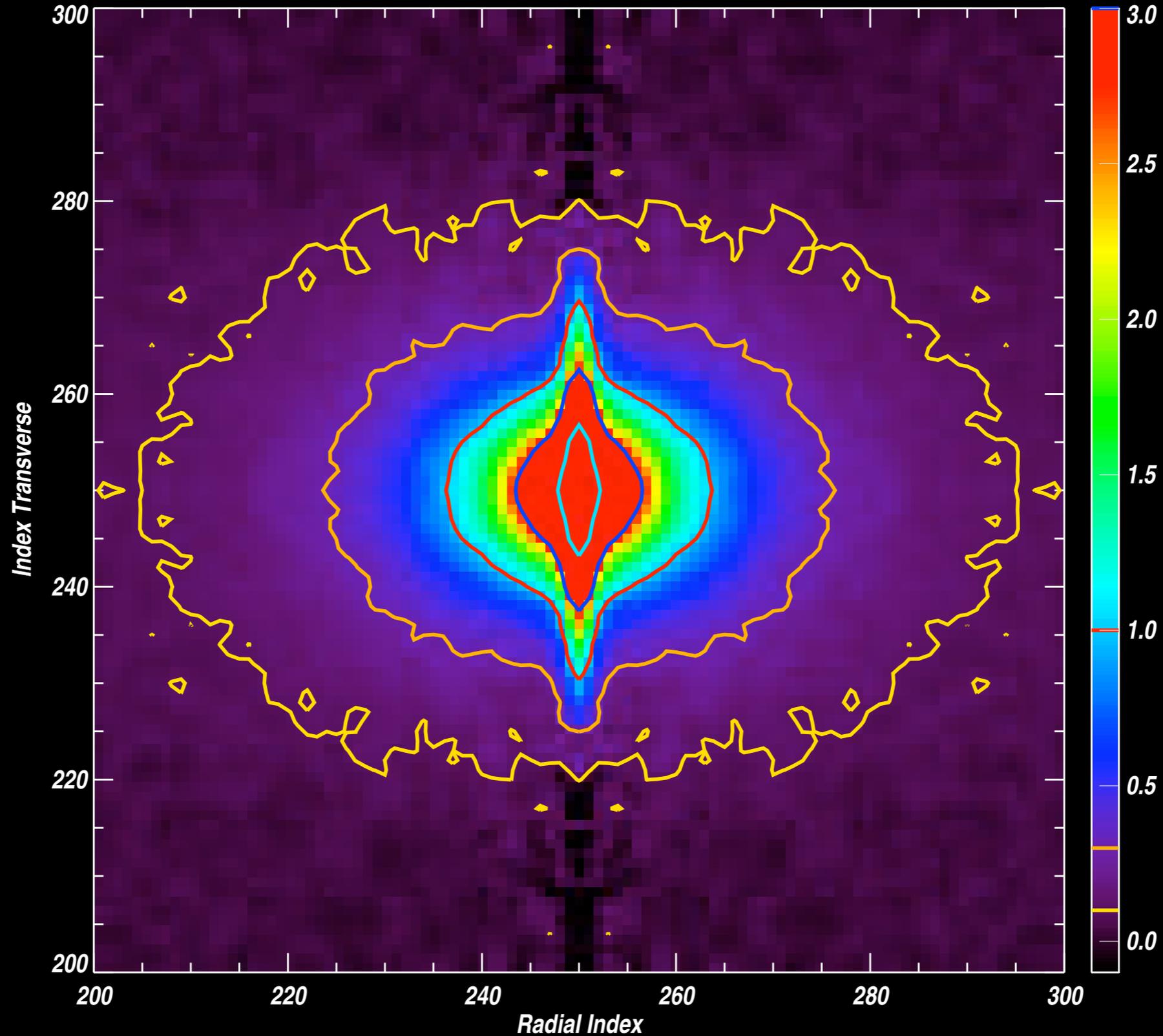
- un paramètre additionnel :  
 $P_{\text{meas}}(k) = b^2 (1 + \beta \cos^2 \theta)^2 P(k)$

$\beta$  : paramètre de formation d'structure

# Résultats

(pas encore des contraintes sur la cosmo)

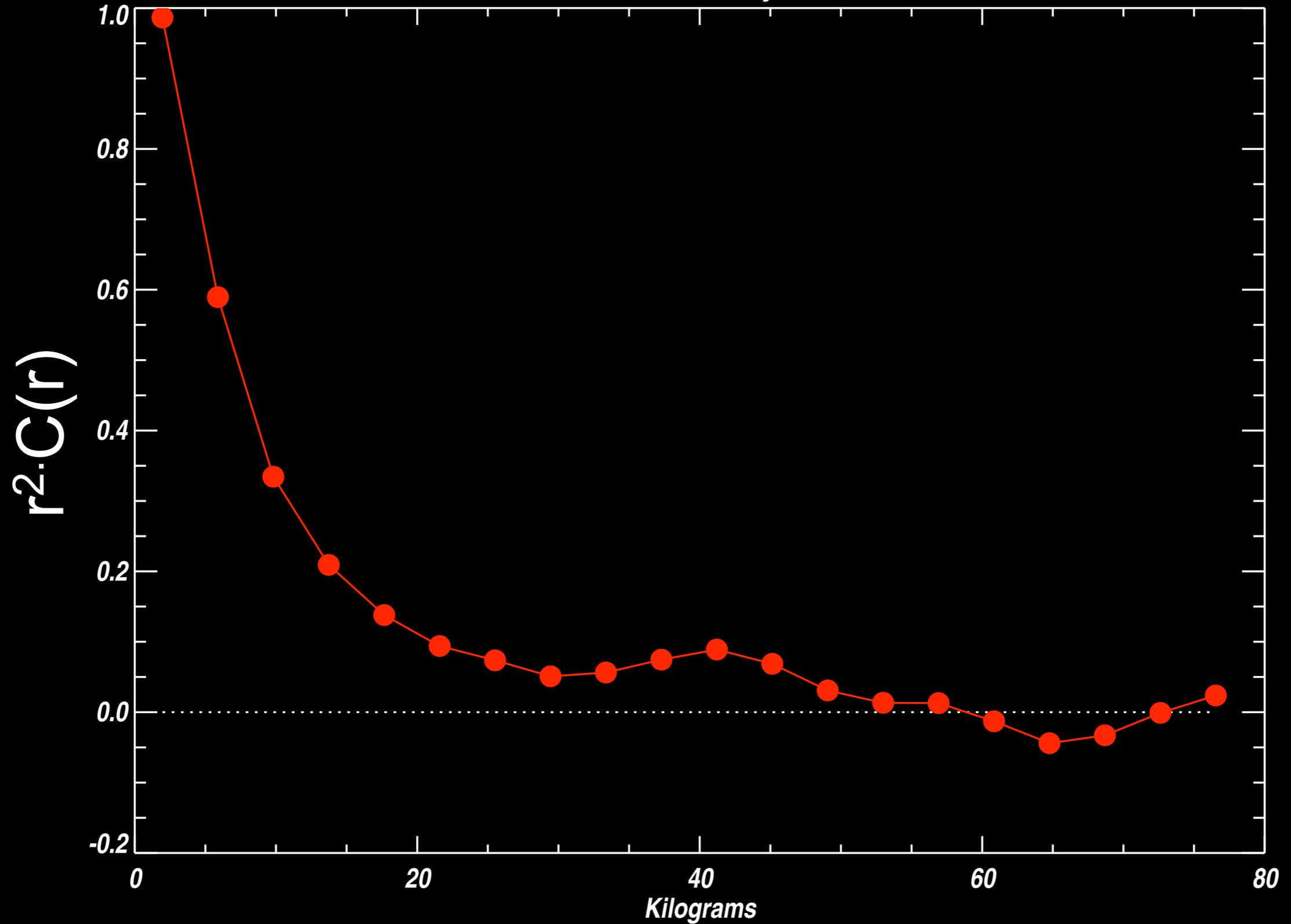
*Preliminary*



# Résultats

(pas encore des contraintes sur la cosmo)

*Preliminary*

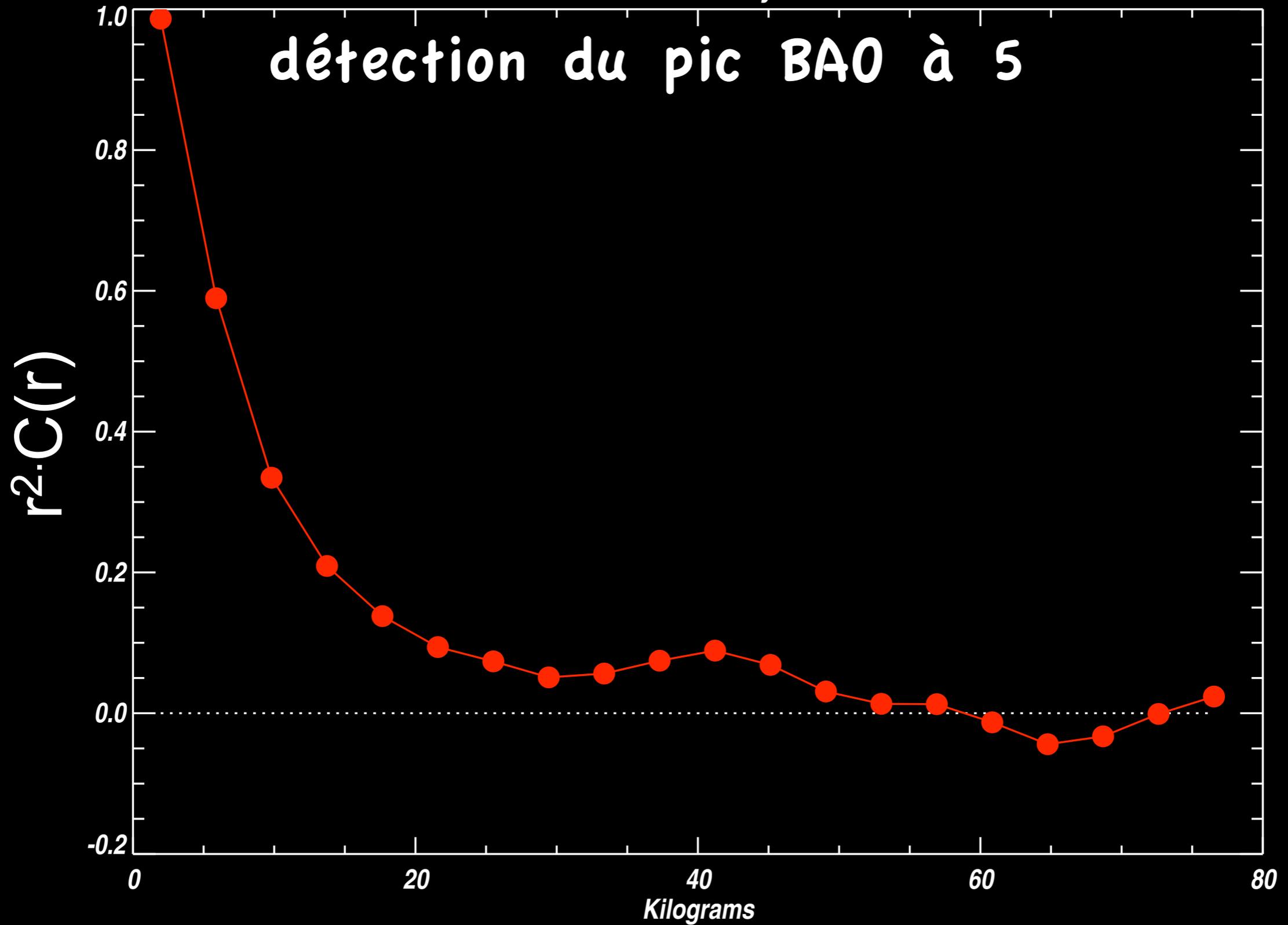


# Résultats

(pas encore des contraintes sur la cosmo)

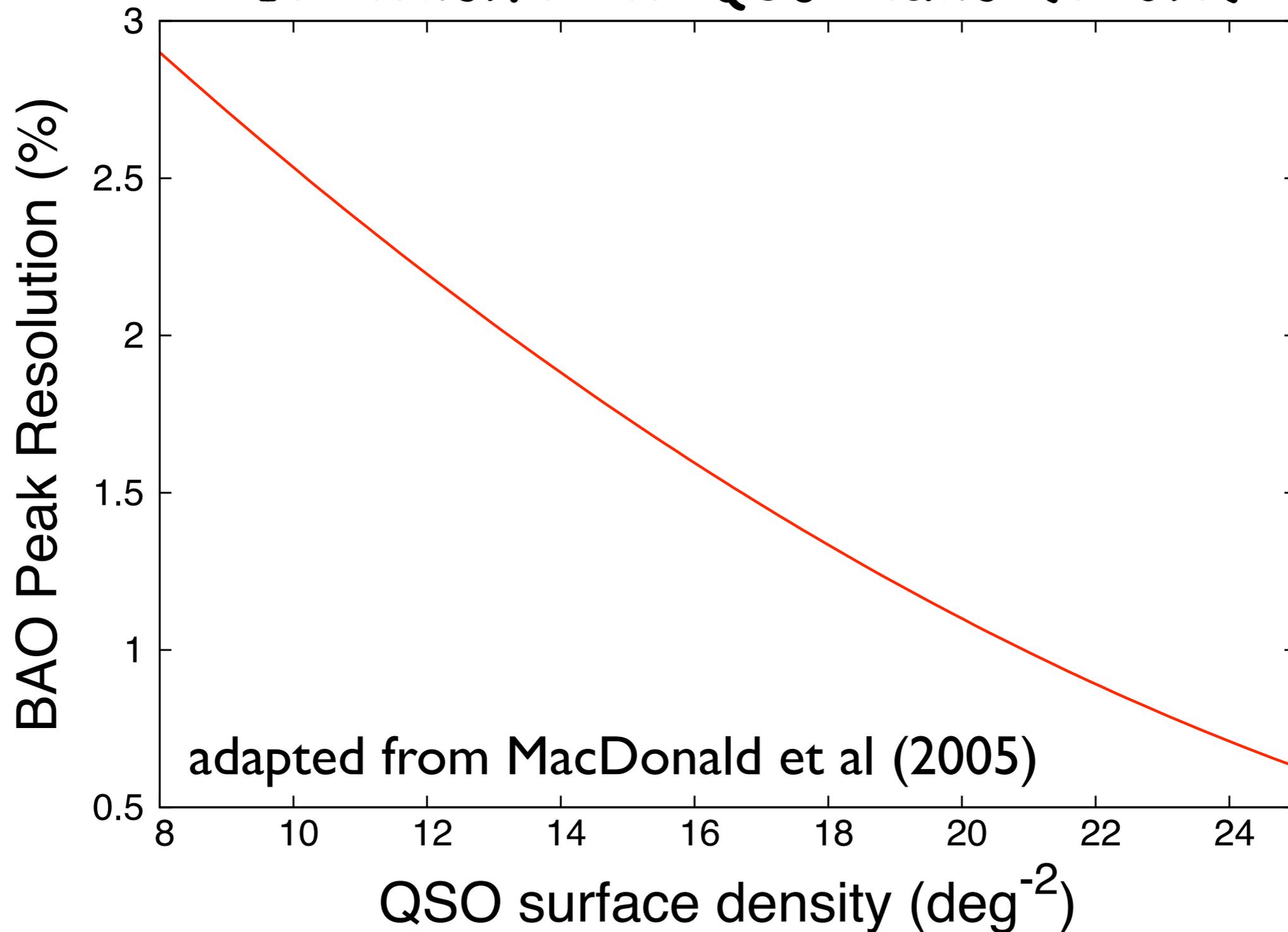
*Preliminary*

détection du pic BAO à 5



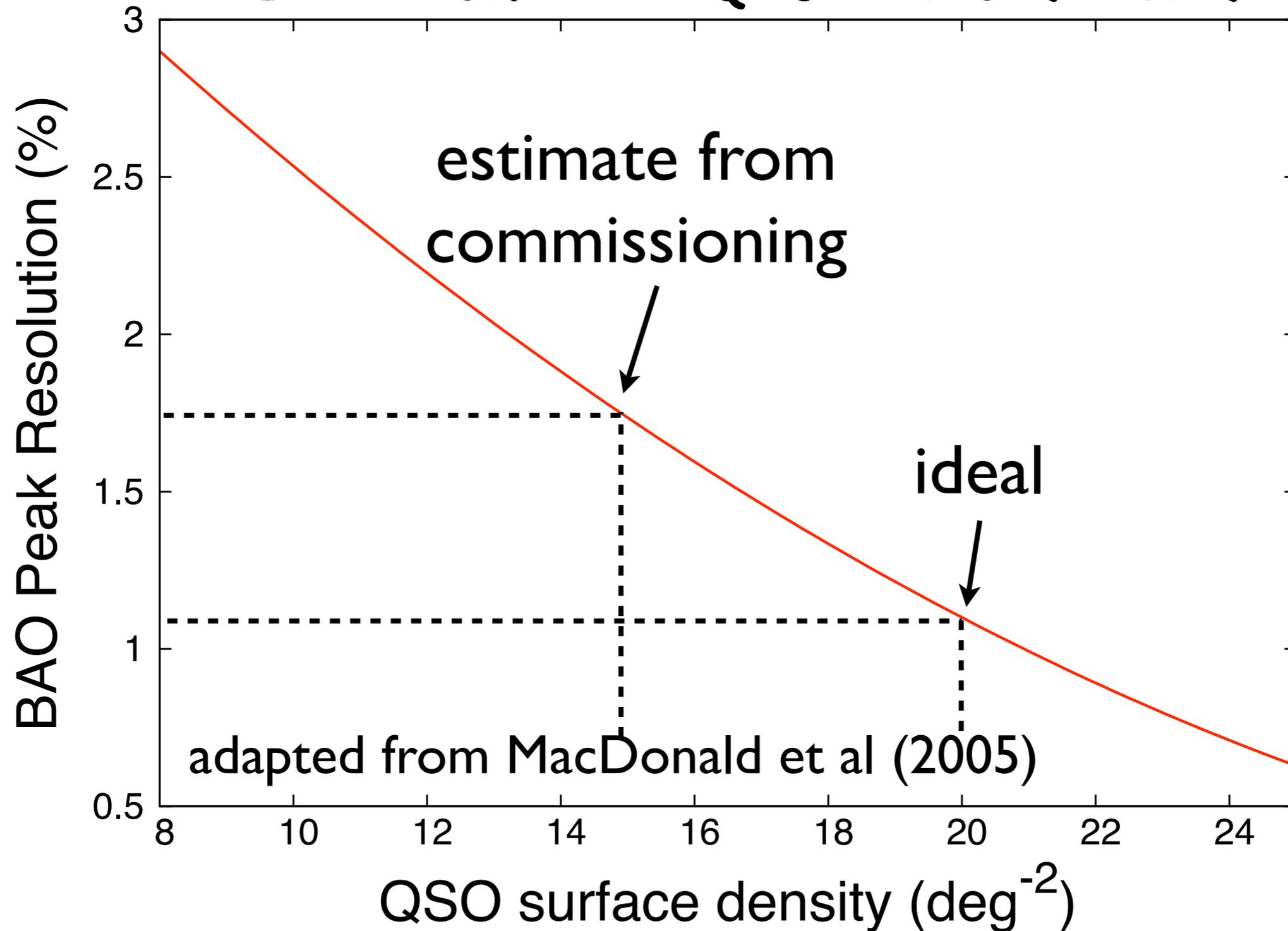
# défis de BOSS Ly $\alpha$

## #1: densité de QSO dans le ciel



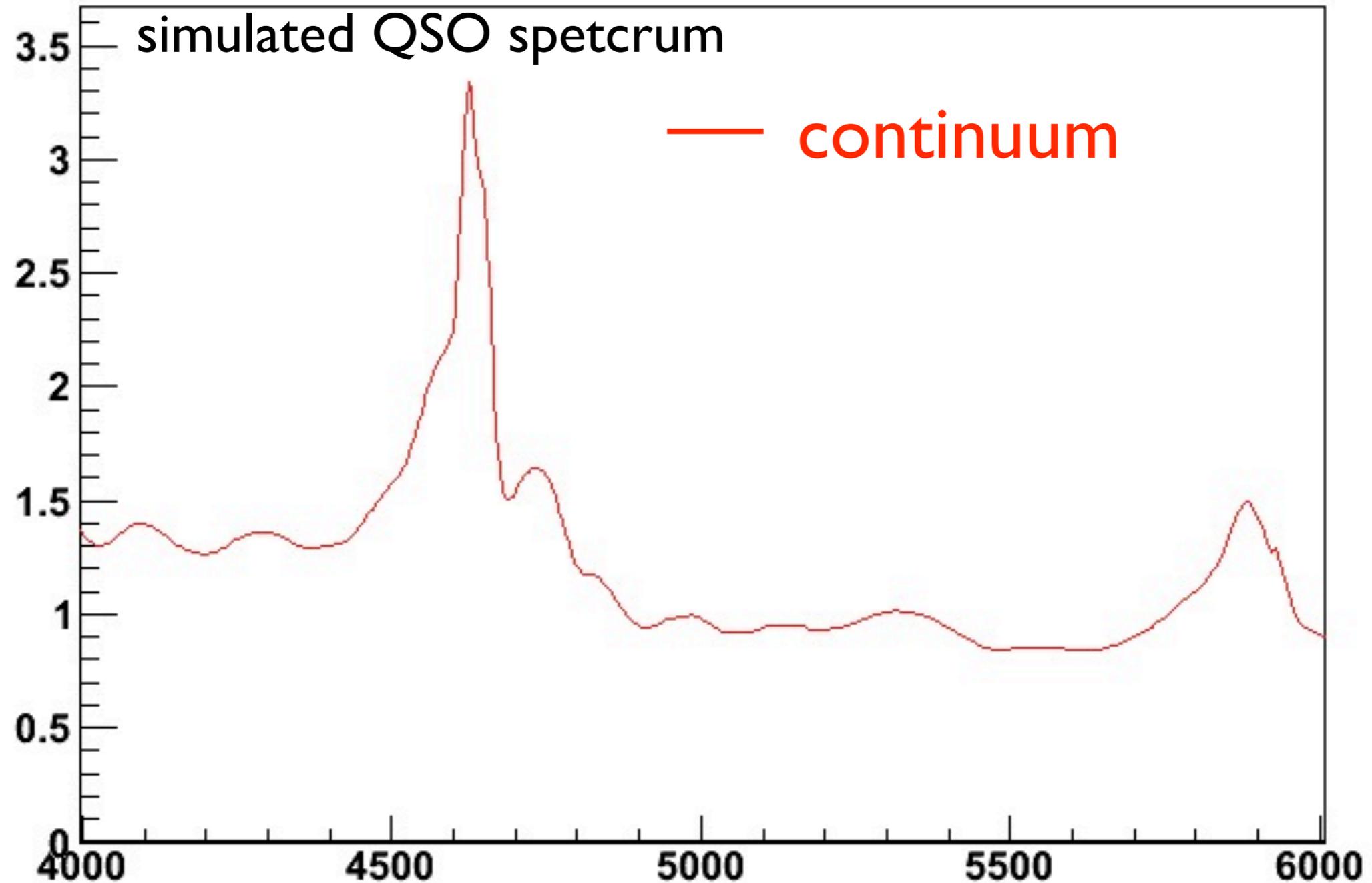
# défis de BOSS Ly $\alpha$

## #1: densité de QSO dans le ciel



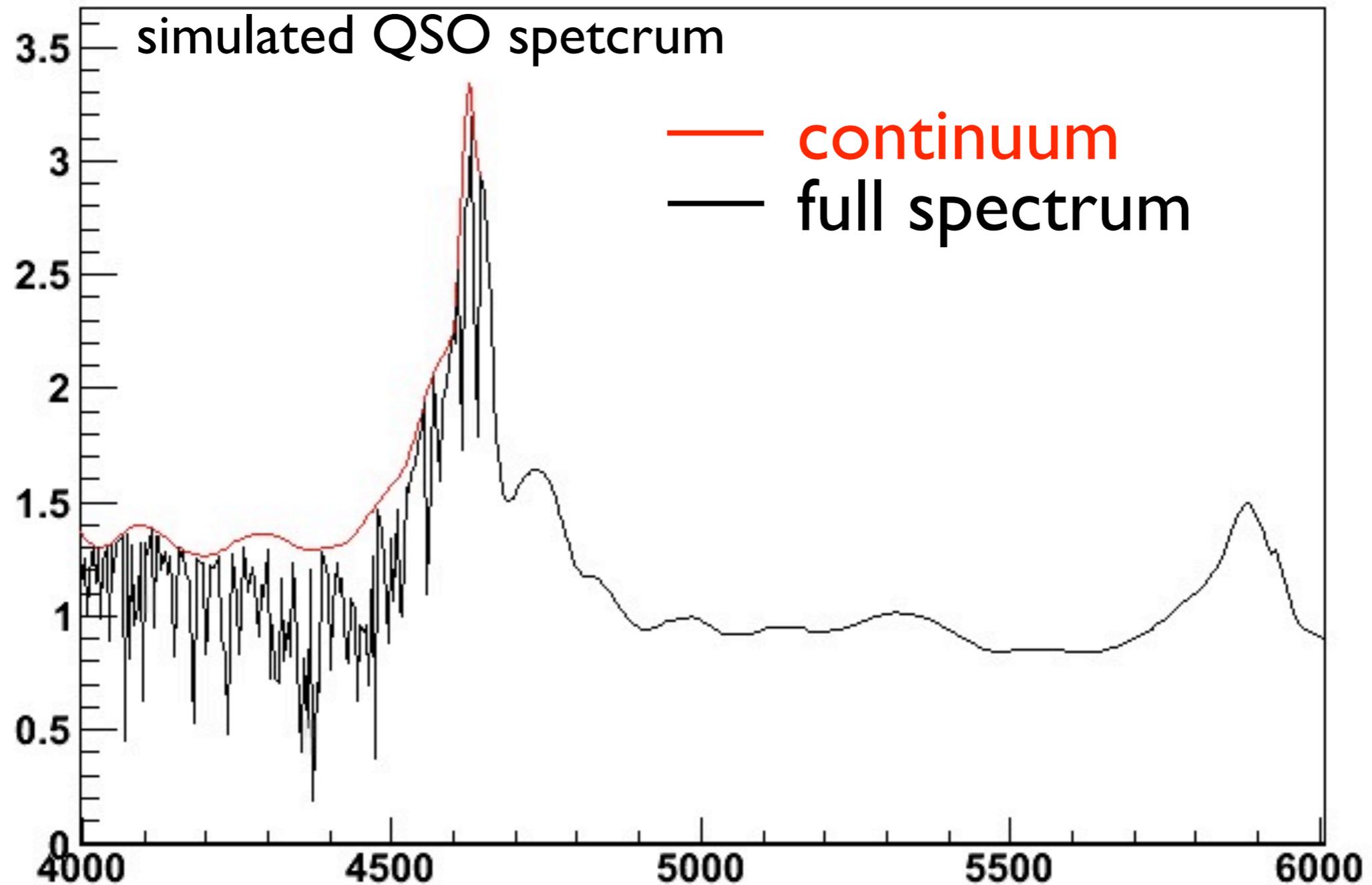
# défis de BOSS Ly $\alpha$

## #2: fit du continuu



# défis de BOSS Ly $\alpha$

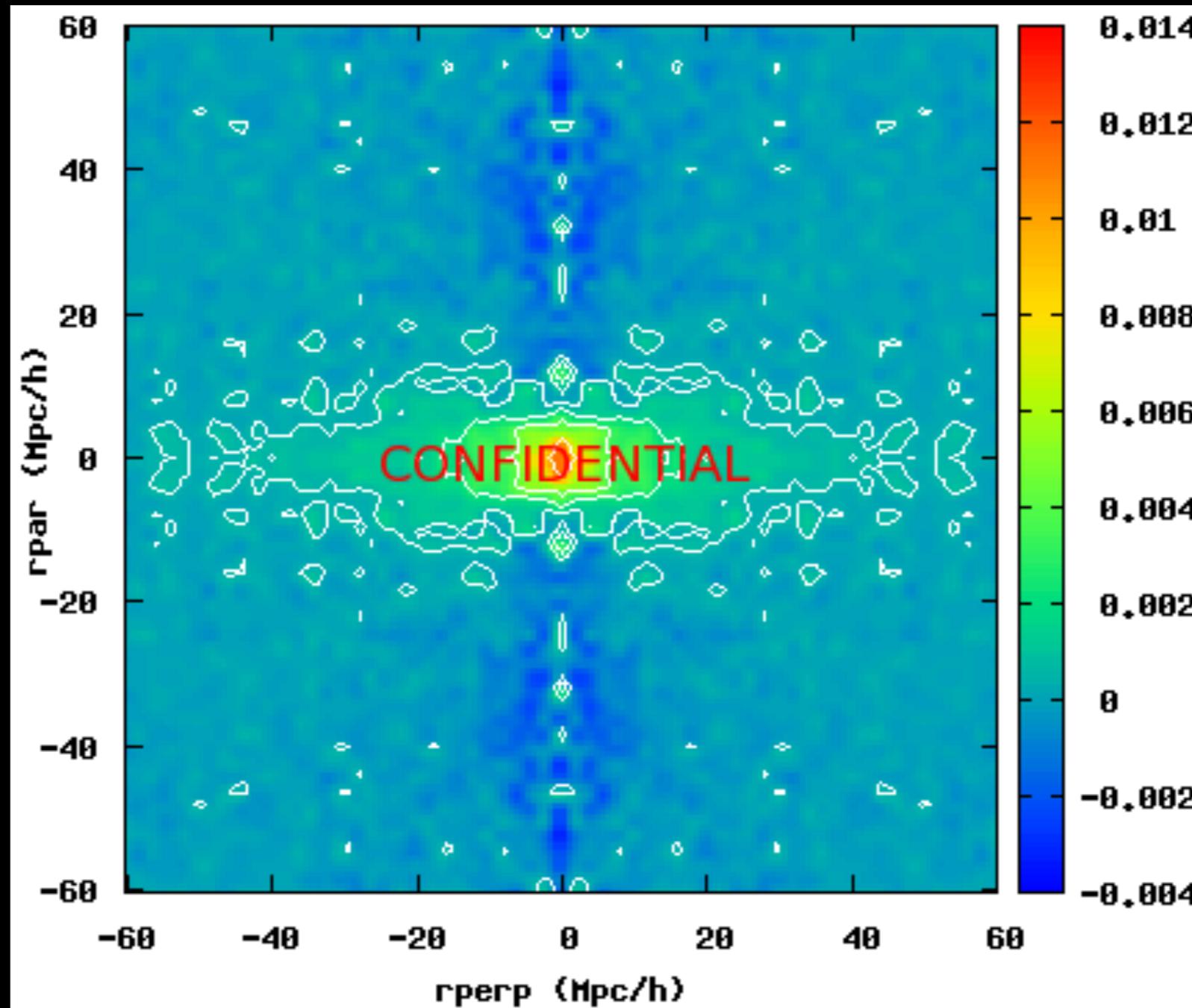
## #2: fit du continu



le fit du continu biase la fonction de corrélation, impact sur la position du pic ?

# Resultats Ly $\alpha$

$$C(r_{\text{par}}, r_{\text{perp}})$$

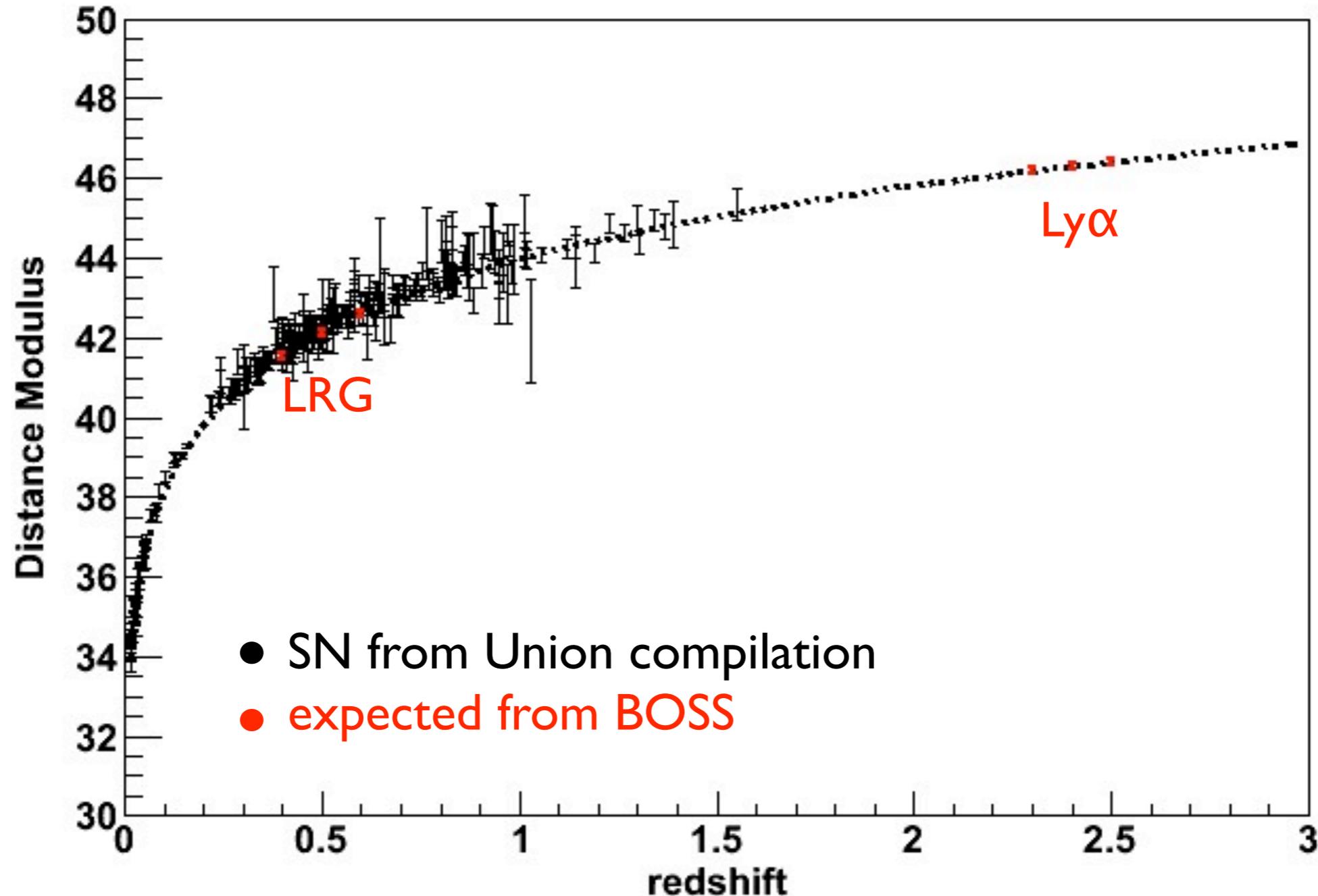


premiers résultats de physique de BOSS LyA !

# Contraintes attendus pour full BOSS

BOSS dans le diagram de Hubble

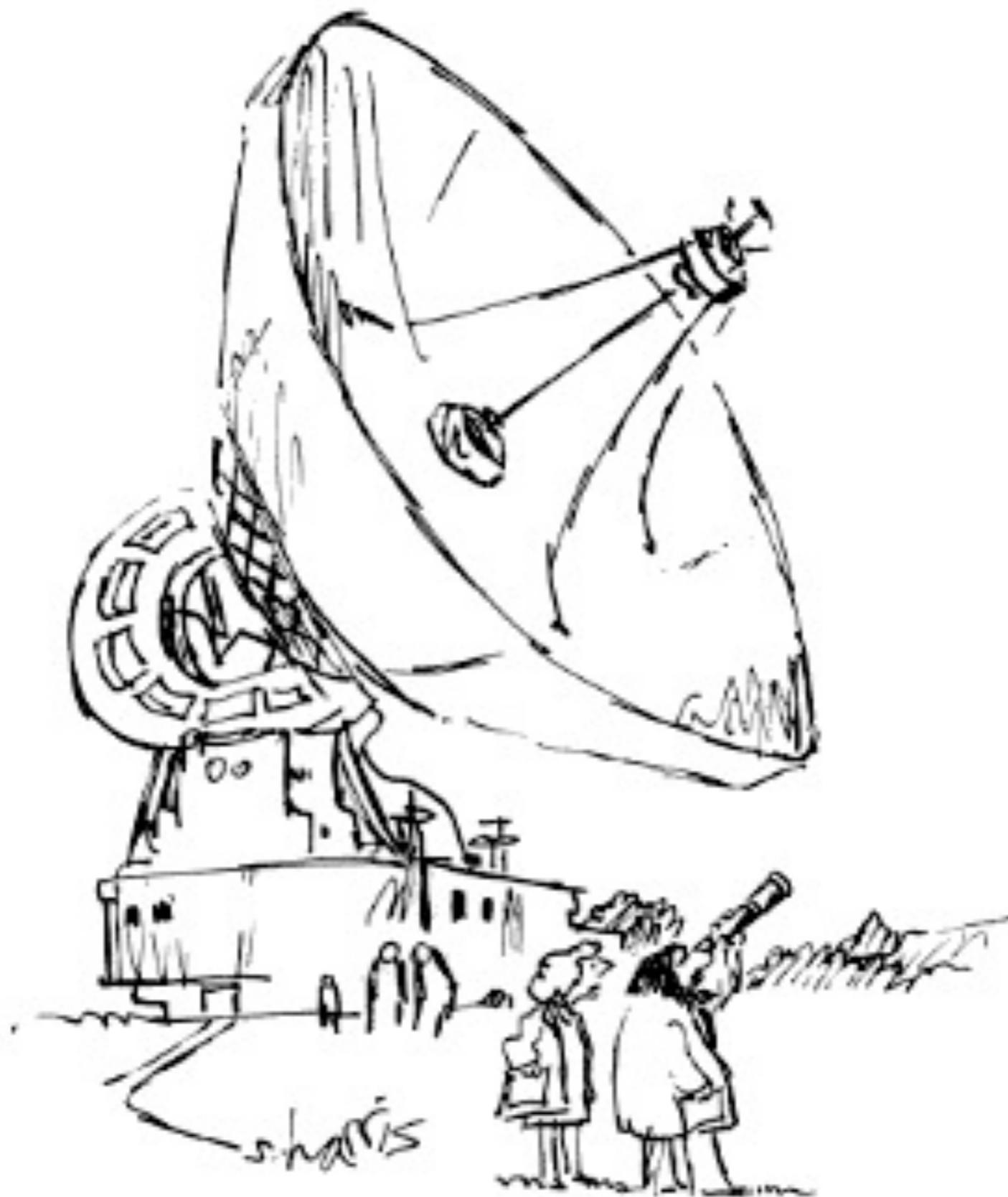
$$d_L^{eff}(z) = (1+z)^2 d_A(z)$$



who da BOSS?

# Conclusions

- La physique des BAO est simple et bien comprise
- Elle fournit un étalon standard qui permet de contraindre la cosmologie avec des systématiques complémentaires aux SN
- BOSS LRG a déjà plus de 5x la statistique de SDSS II, le pic BAO est détecté sans ambiguïtés
- BOSS LyA fournit les premières observations de la distribution de matière à  $z \sim 2.5$ , la fonction de corrélation mesurée s'accorde bien avec les attentes théoriques jusqu'à  $\sim 100$  Mpc
- Premières contraintes cosmologiques et détection (ou pas!) du pic BAO LyA attendues pour juillet !



"Just checking."