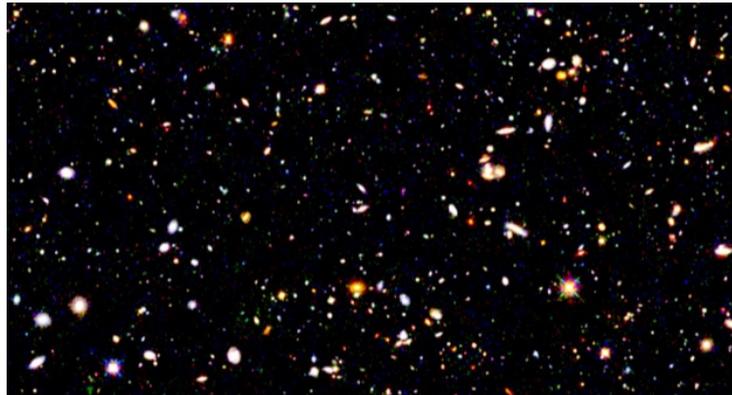
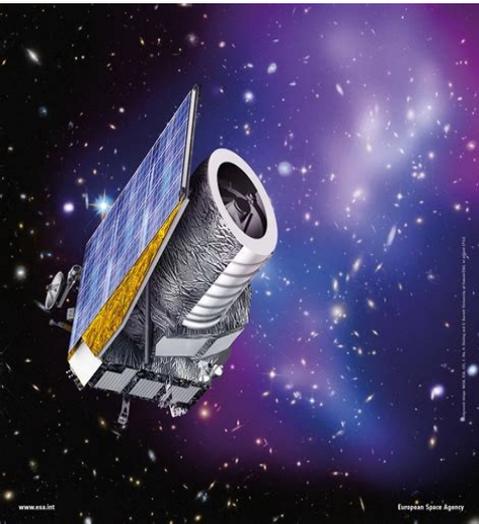


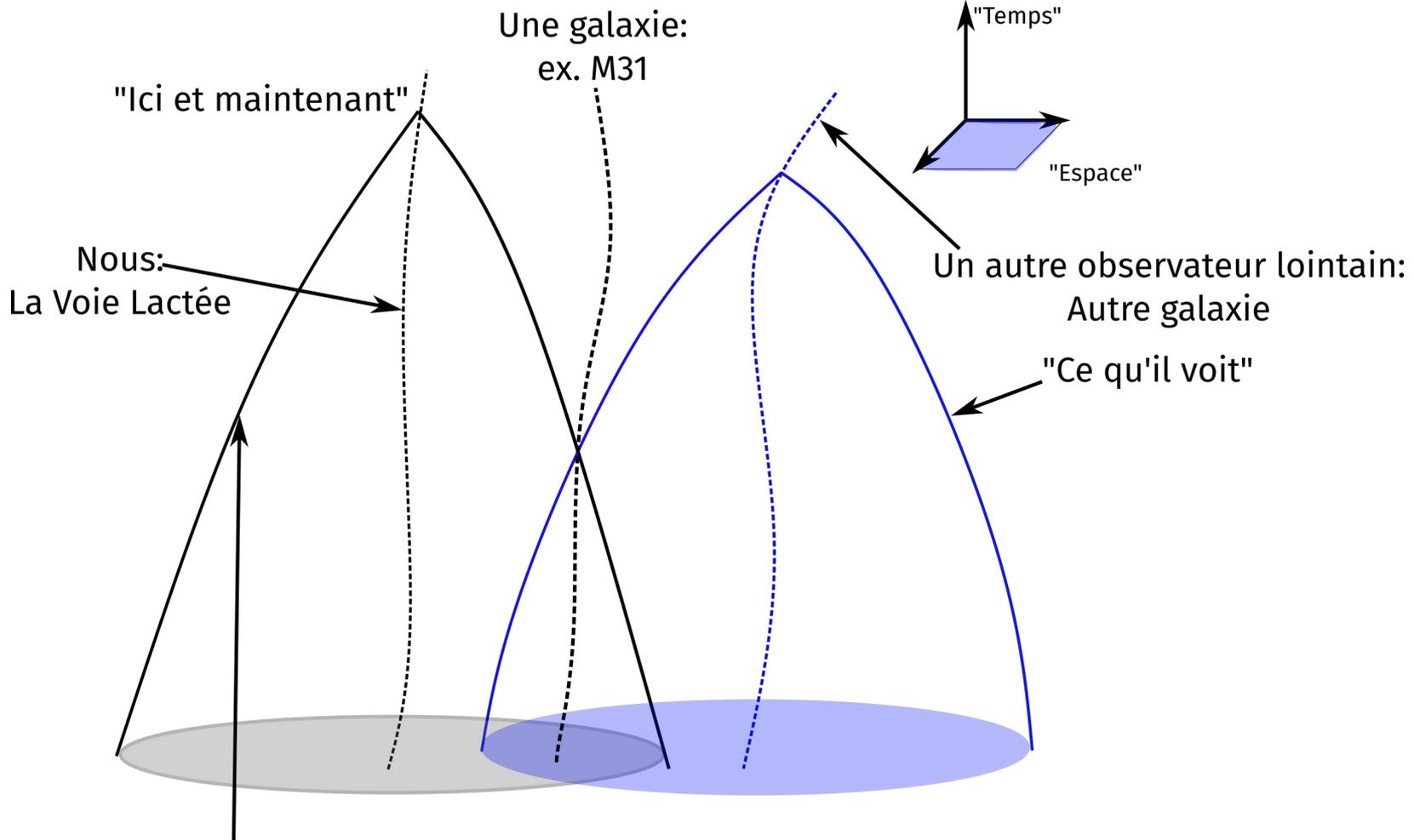
# Euclid: Cartographeur l'Univers

Julien Larena

Laboratoire Univers et Particules  
Université de Montpellier



# Cosmologie : une science à part



"Ici et maintenant"

Une galaxie:  
ex. M31

"Temps"

"Espace"

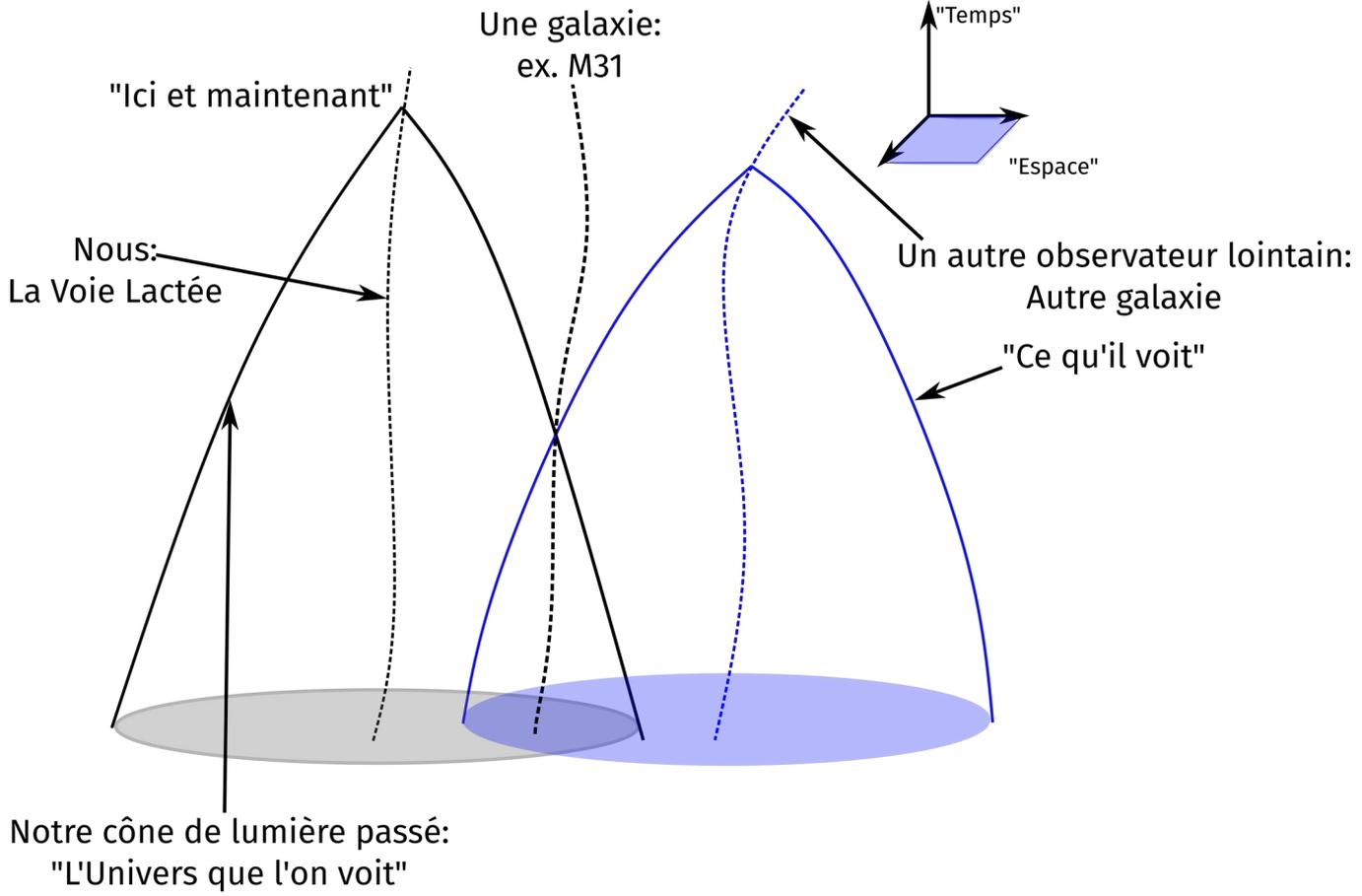
Nous:  
La Voie Lactée

Un autre observateur lointain:  
Autre galaxie

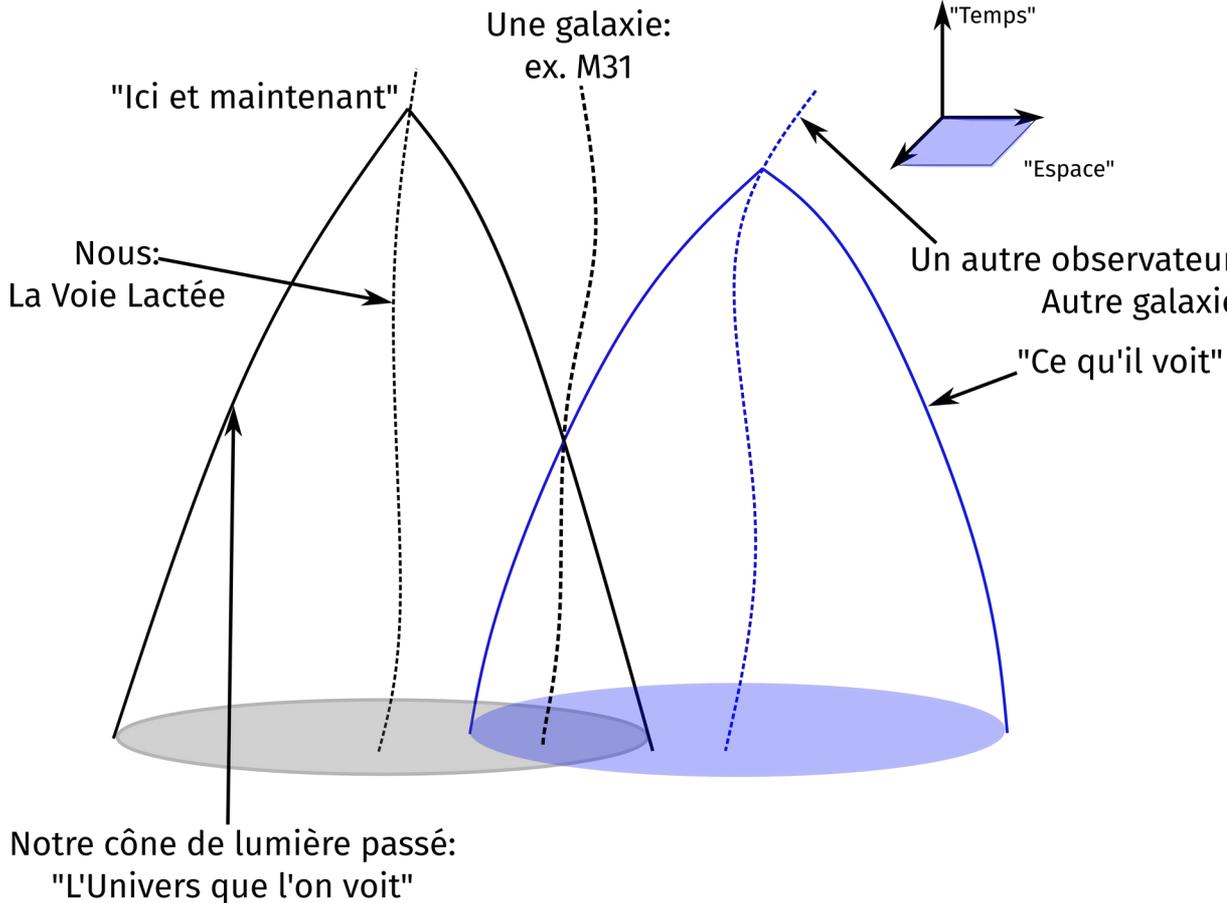
"Ce qu'il voit"

Notre cône de lumière passé:  
"L'Univers que l'on voit"

# Cosmologie : une science à part

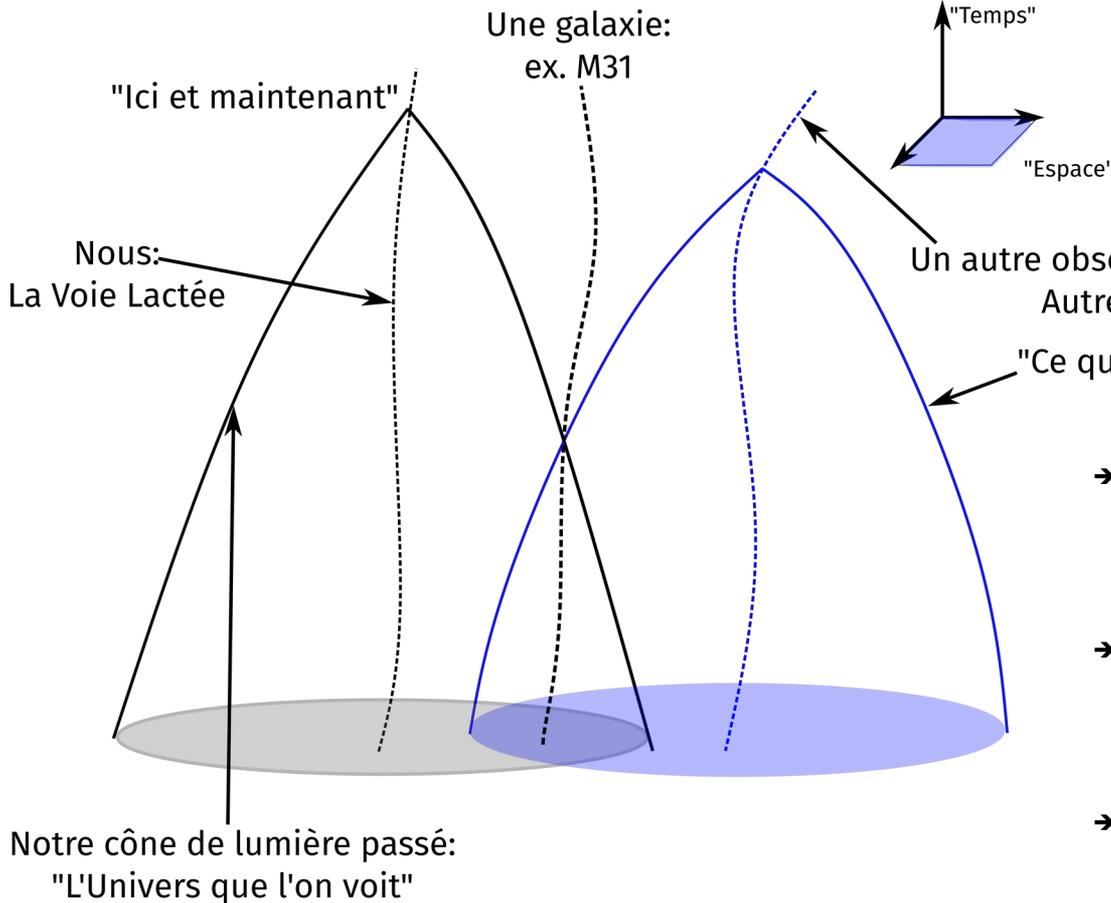


# Cosmologie : une science à part



- Un seul Univers
- Vu d'un seul point de vue
- Une seule fois

# Cosmologie : une science à part



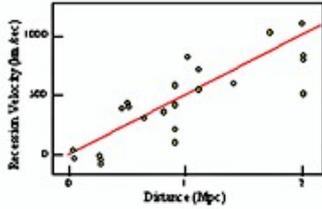
- Un seul Univers
- Vu d'un seul point de vue
- Une seule fois

- Relativité :  
**Regarder loin c'est regarder il y a longtemps**
- Hypothèse cosmo :  
**Sommes-nous spéciaux ?  
Que voient les autres ?**
- Conditions initiales :  
**Cet Univers est-il spécial ?**

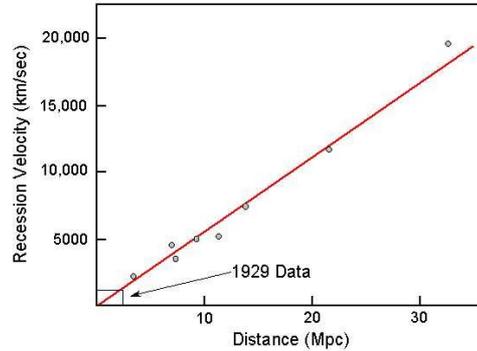
# Alors que voit-on?

Les galaxies lointaines s'éloignent de nous

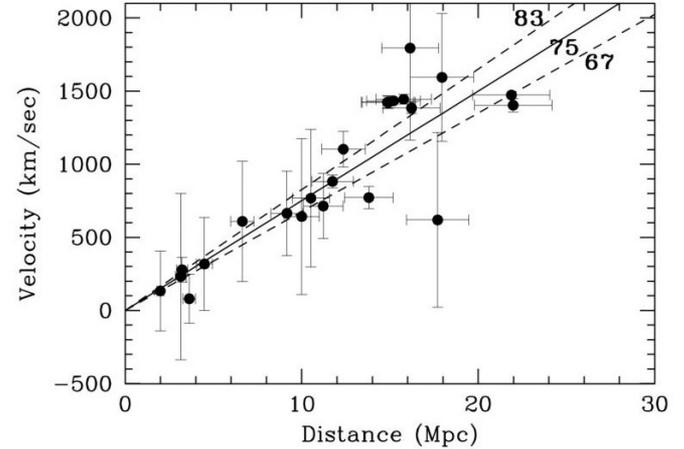
Hubble's Data (1929)



Hubble & Humason (1931)



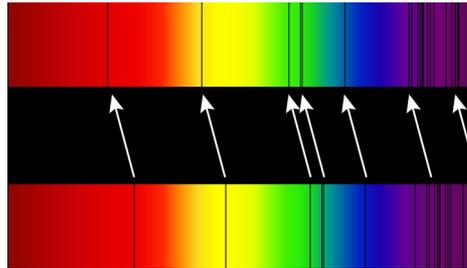
Freedman et al. (2001)



(1 Mpc ~3 million d'a.l. ~  $3 \times 10^{22}$  m)

Loi de Hubble :  $v = Hr$

Décalage spectral :  $z \sim v/c$



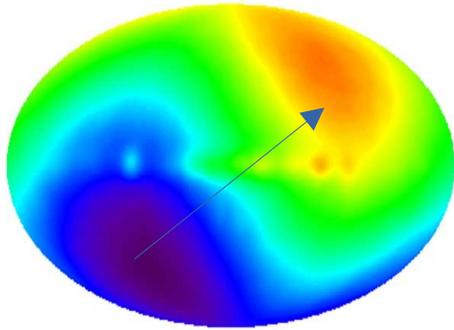
L'Univers est en expansion

# Alors que voit-on?

L'Univers est le même dans toutes les directions autour de nous

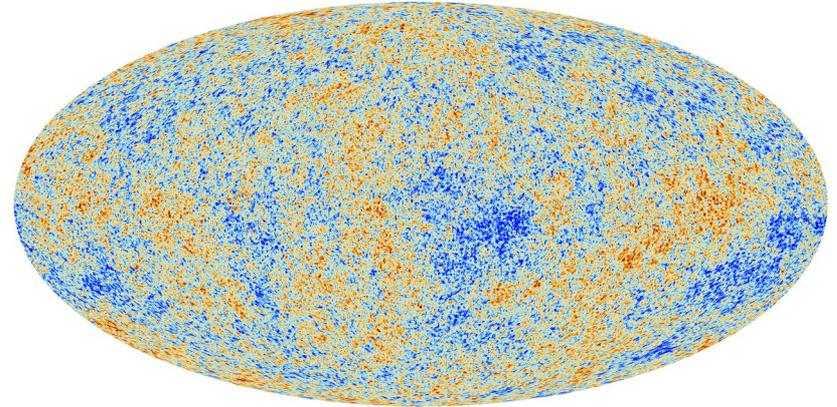
Fond diffus micro-onde :  
« Première lumière »

(COBE)



Notre mouvement propre :  
 $V \sim 630 \text{ km/s}$

(Planck)

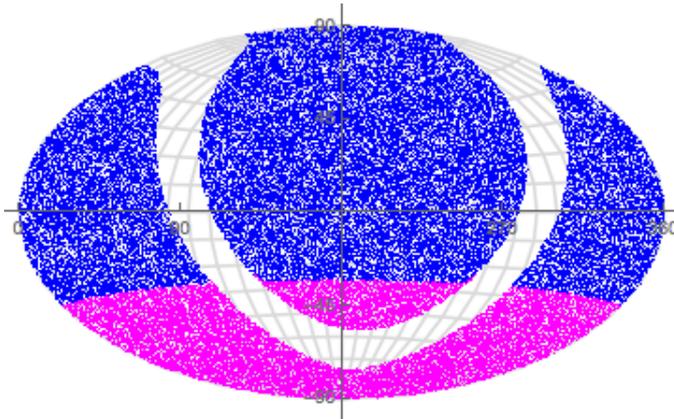


Fluctuations  $\sim 10^{-5}$

# Alors que voit-on?

L'Univers est le même dans toutes les directions autour de nous

## Radiogalaxies

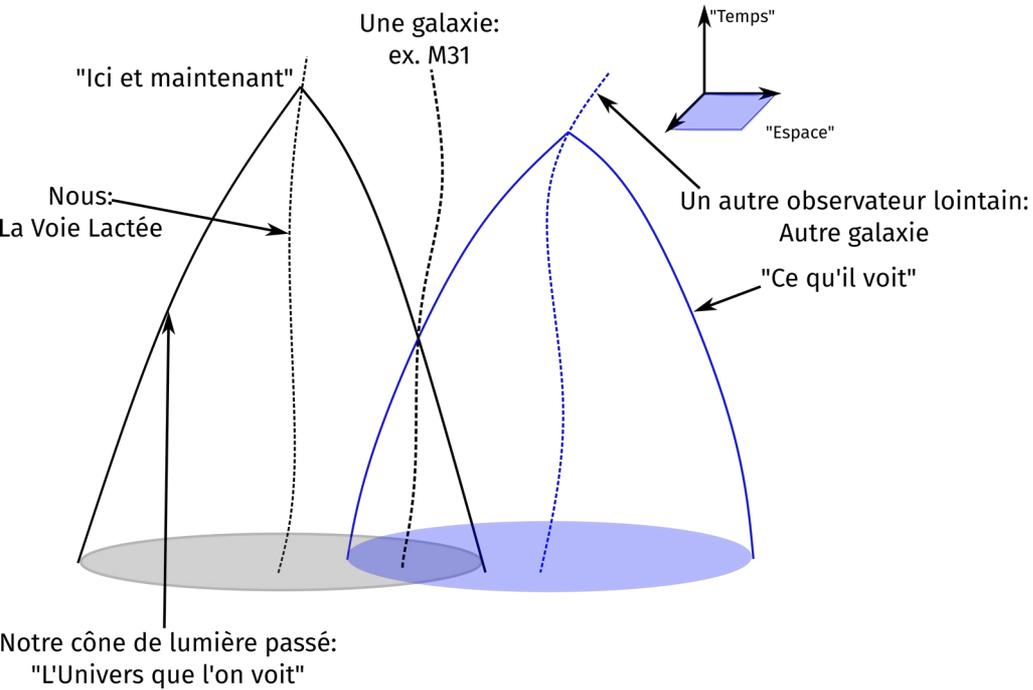


NVSUMMS, Colin et al (2017)

Encore le cas dans l'Univers proche

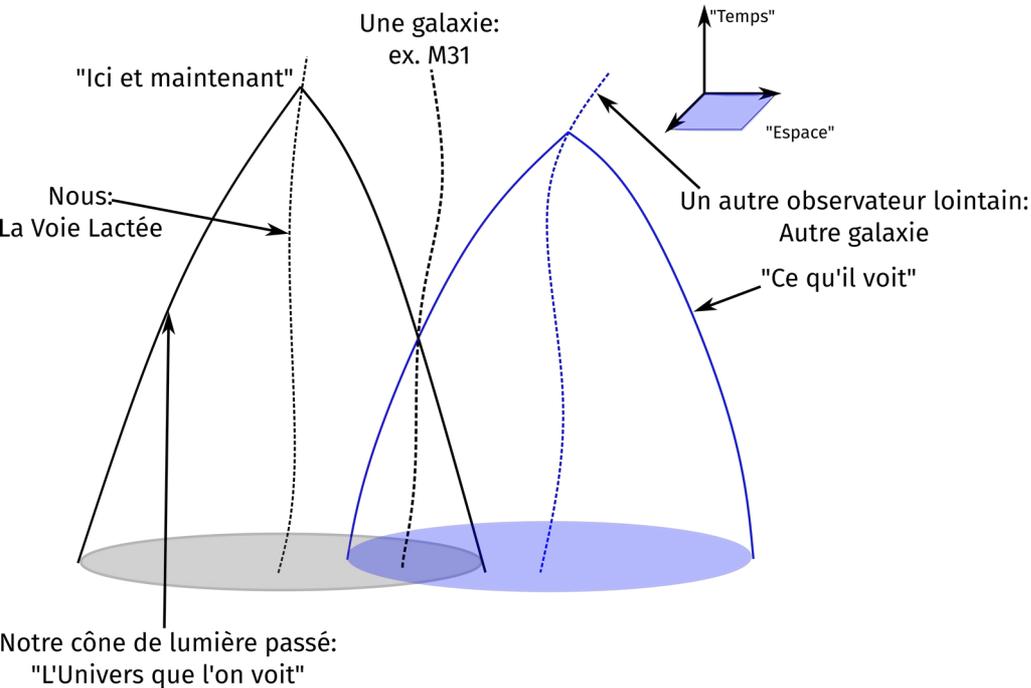
Matière et rayonnement  
distribués de manière **isotrope**

# Le principe cosmologique



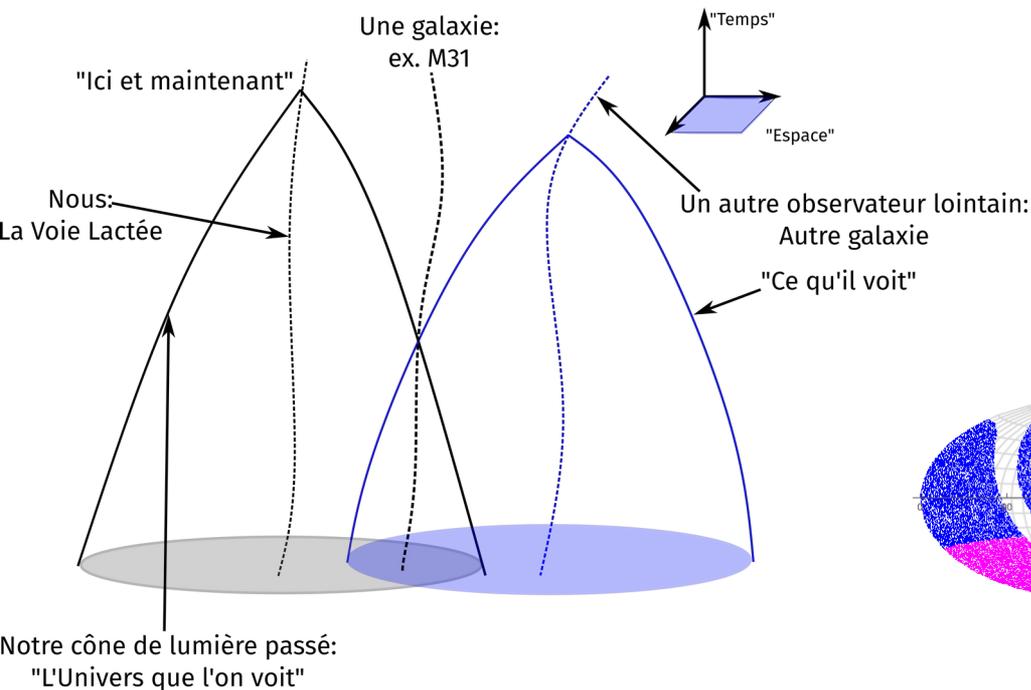
# Le principe cosmologique

- **Principe Copernicien** : « Nous ne sommes pas spéciaux »

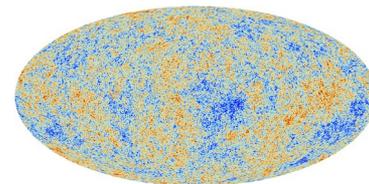
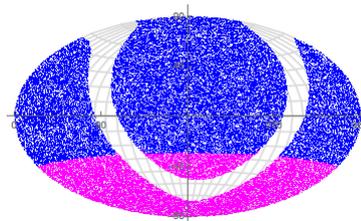
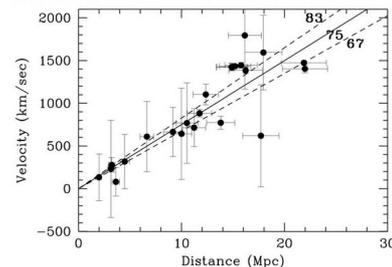


# Le principe cosmologique

- **Principe Copernicien** : « Nous ne sommes pas spéciaux »
- En moyenne : tout observateur voit le même Univers que nous :

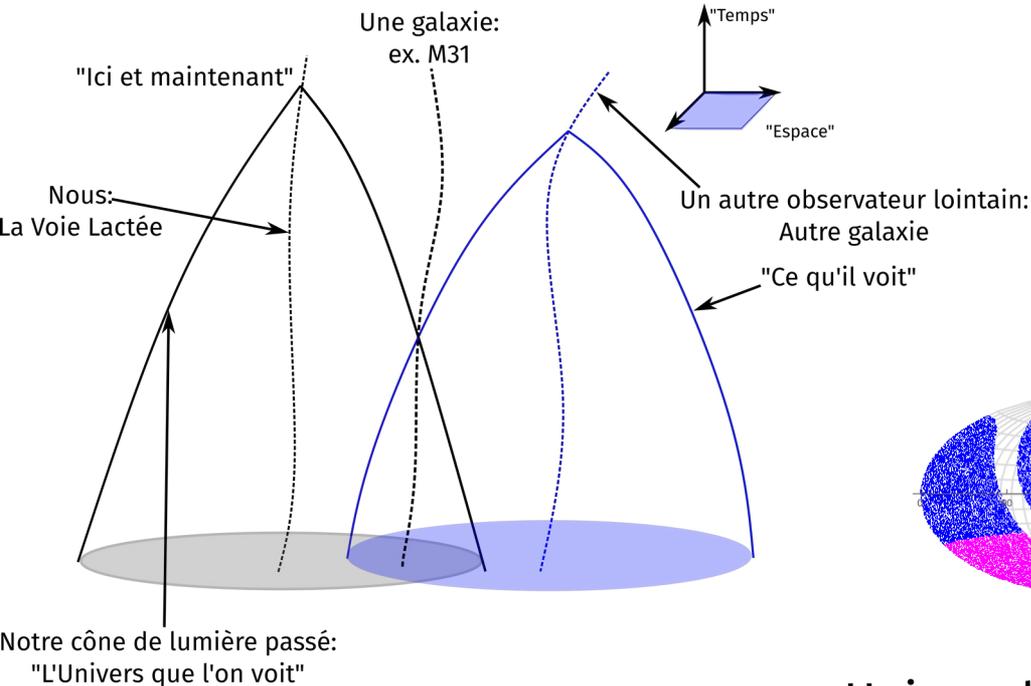


- Loi de Hubble
- Isotropie

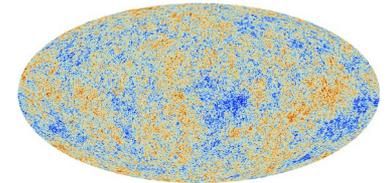
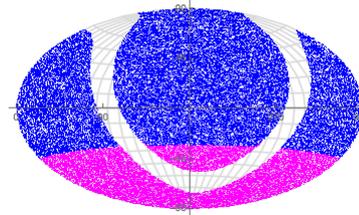
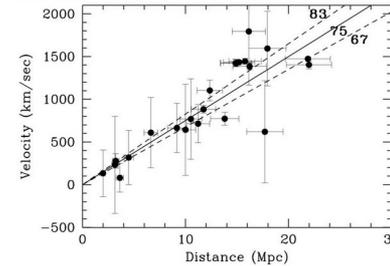


# Le principe cosmologique

- **Principe Copernicien** : « Nous ne sommes pas spéciaux »
- En moyenne : tout observateur voit le même Univers que nous :



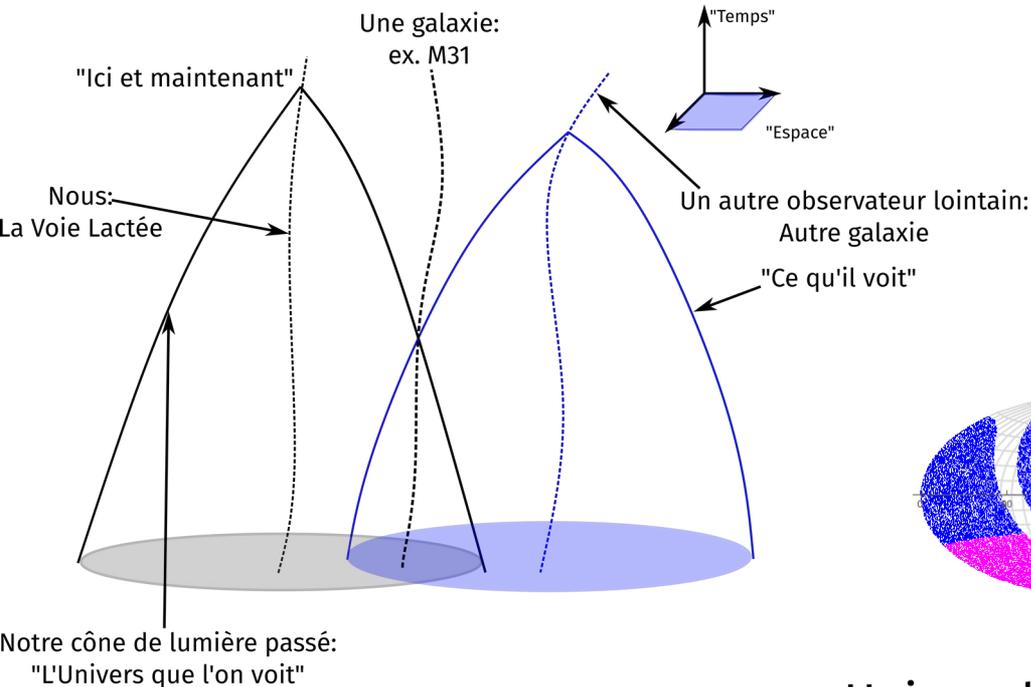
- Loi de Hubble
- Isotropie



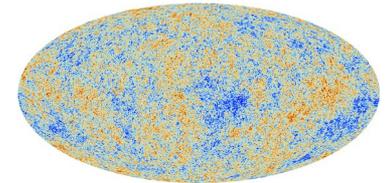
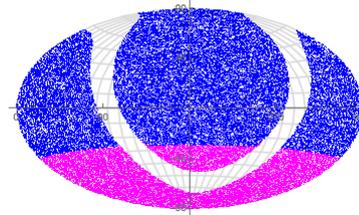
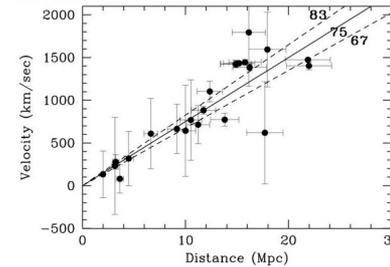
Univers homogène et isotrope (en moyenne) :

# Le principe cosmologique

- **Principe Copernicien** : « Nous ne sommes pas spéciaux »
- En moyenne : tout observateur voit le même Univers que nous :

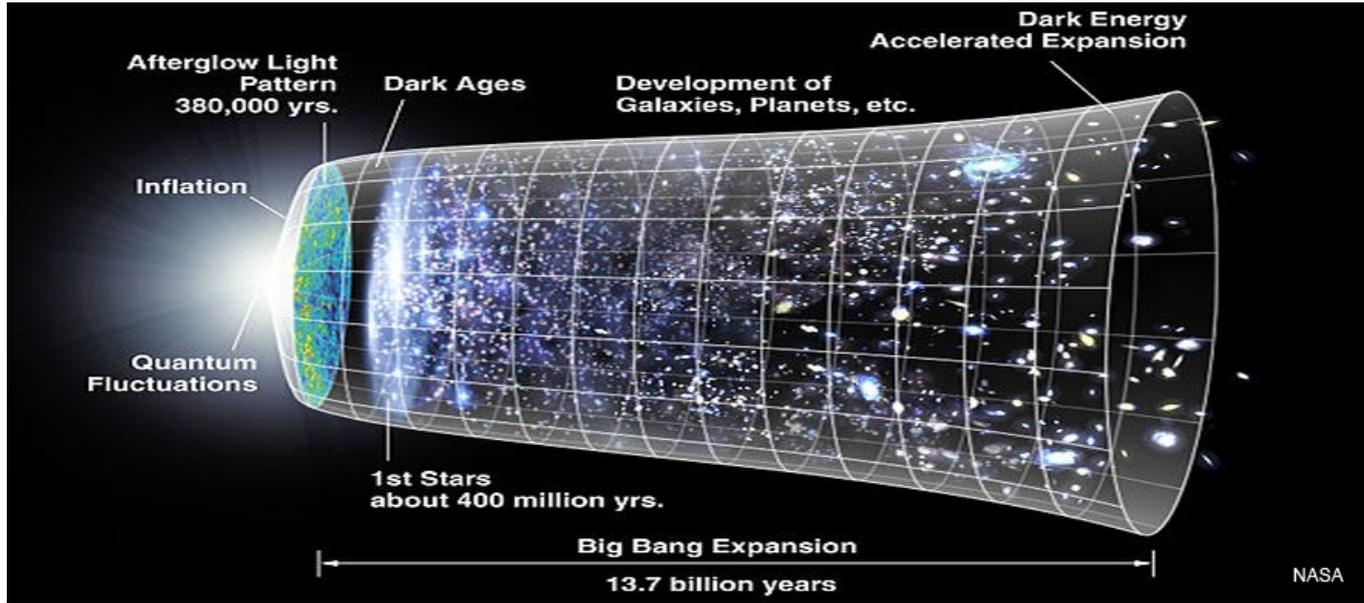


- Loi de Hubble
- Isotropie



Univers homogène et isotrope (en moyenne) :  
**Modèle du Big Bang chaud**

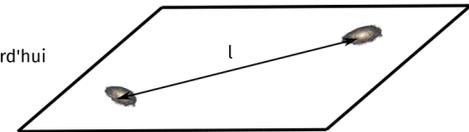
# Le Big Bang Chaud



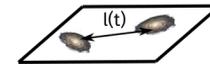
- **Dynamique** : Temps cosmique
- Univers **plus petit** dans le passé
- Plus dense, et chaud :  $T \sim (1+z)$ .

Temps cosmique

Aujourd'hui

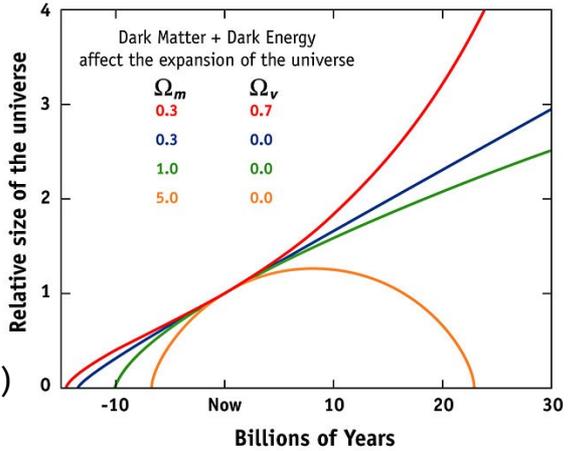


$$l(t) = \frac{l}{(1+z)}$$

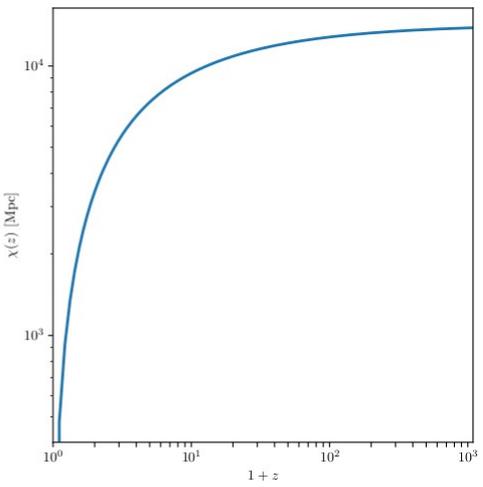
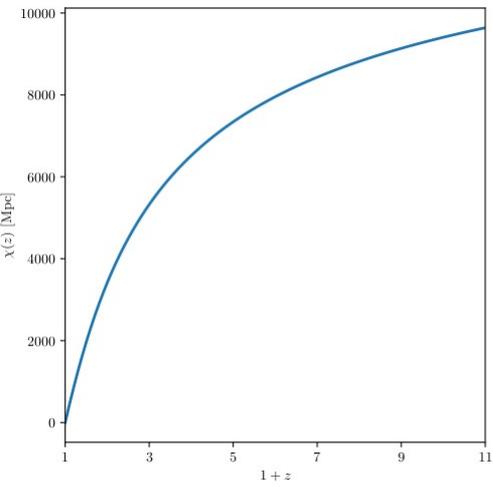


# Le Big Bang chaud

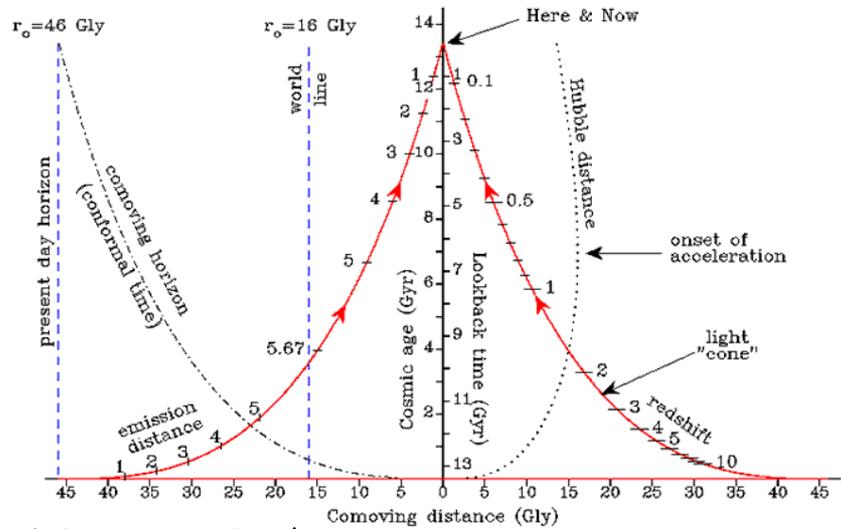
## EXPANSION OF THE UNIVERSE



(Crédit : NASA/WMAP)



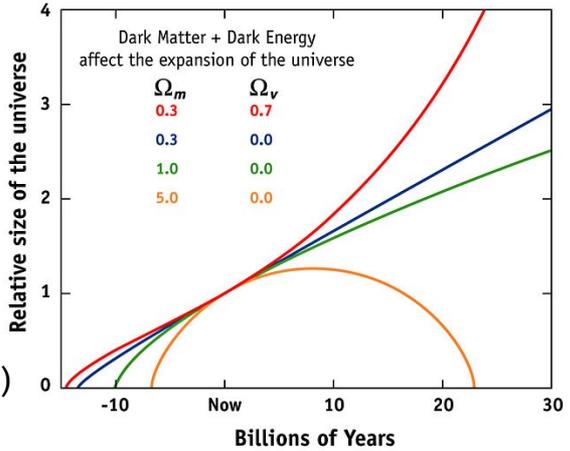
## Space-time diagram: comoving distance & normal time



(Crédit : Mark Whittle)

# Le Big Bang chaud

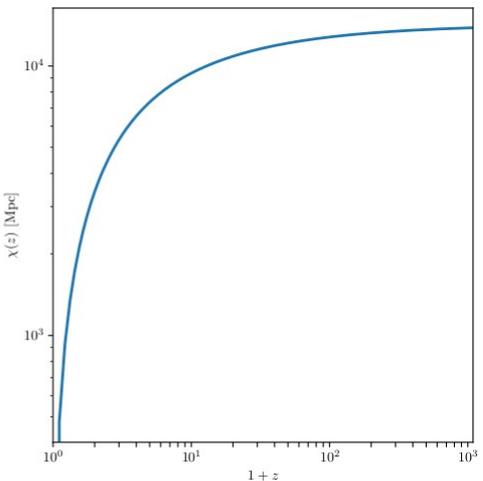
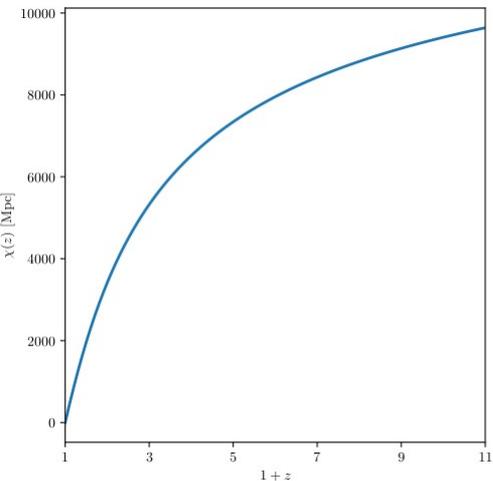
## EXPANSION OF THE UNIVERSE



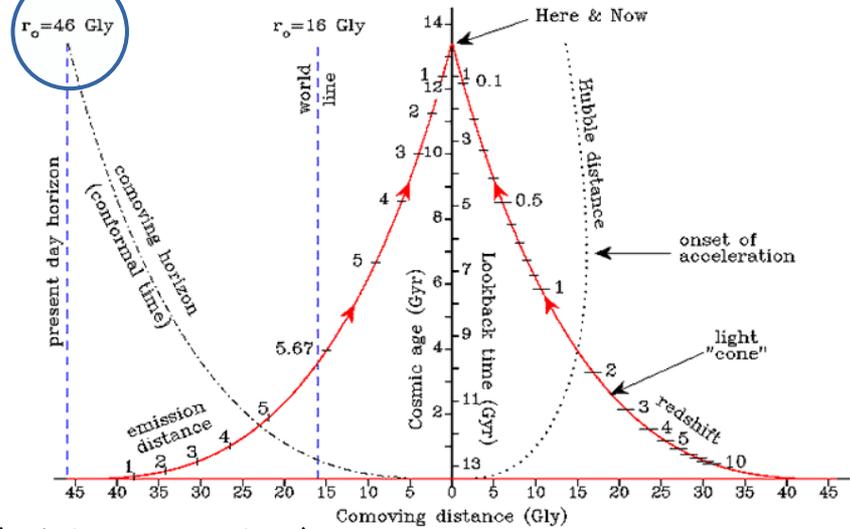
(Crédit : NASA/WMAP)

Univers observable :  $L \sim 15$  Gpc

- $L \sim 15$  Mpc au CMB
- $L \sim 1$  mm au Big Bang



Space-time diagram: comoving distance & normal time

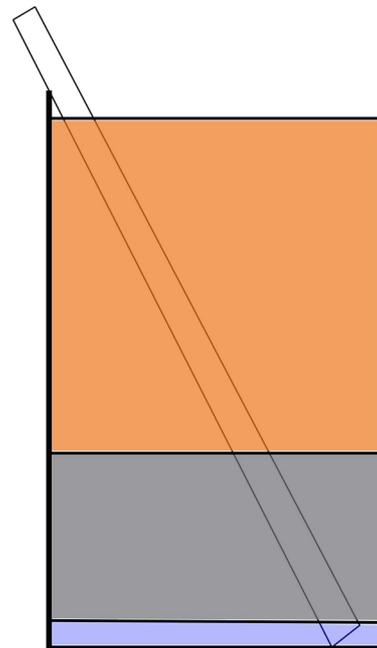


(Crédit : Mark Whittle)

# Le Big Bang chaud

- Modèle prédictif
- Testé et robuste
- Deux grandes inconnues :

× Matière sombre

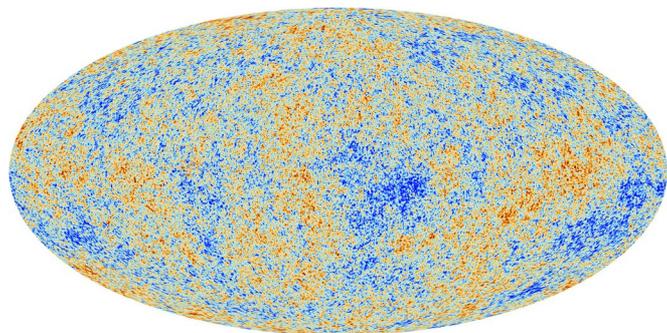
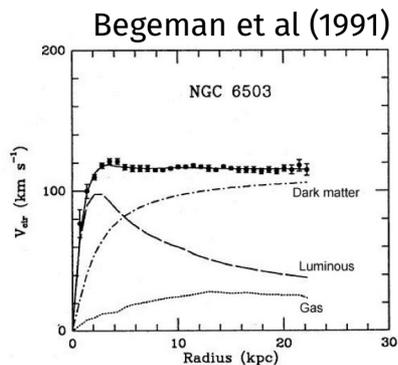


66 % d'énergie sombre

30 % de matière sombre

4 % de matière ordinaire

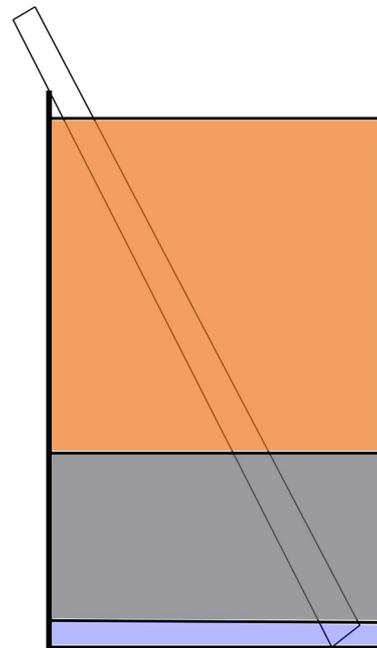
Euclid Consortium



# Le Big Bang chaud

- Modèle prédictif
- Testé et robuste
- Deux grandes inconnues :
  - × Énergie sombre :  
L'expansion s'accélère ( $1+z \sim 1.5$ )

Constante cosmologique  $\Lambda$

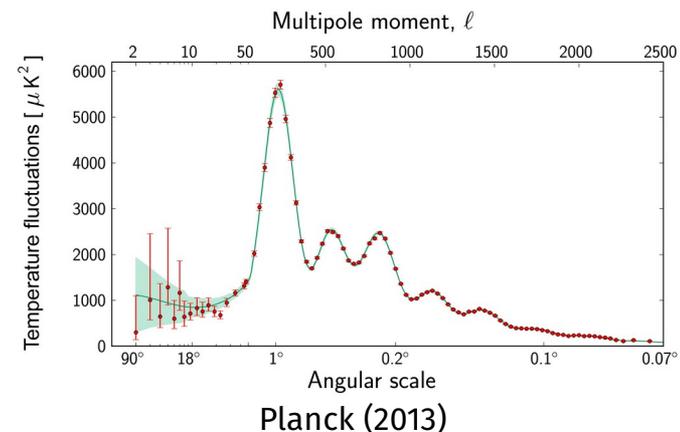
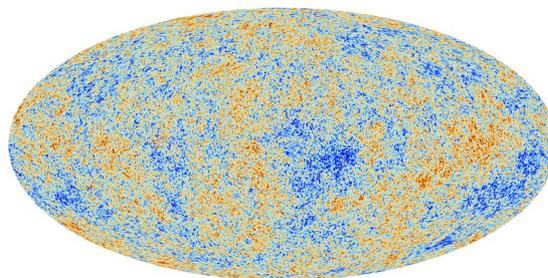
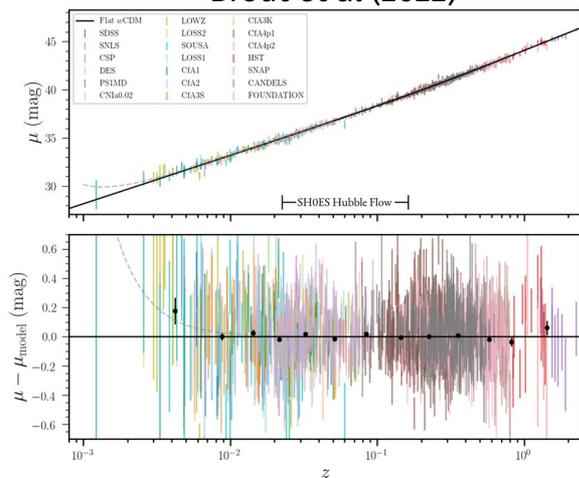


66 % d'énergie sombre

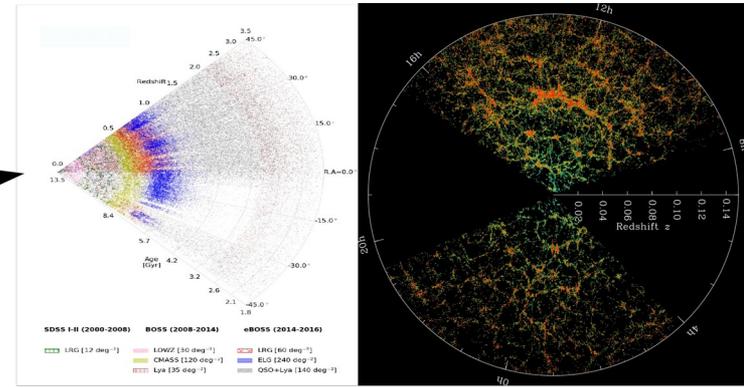
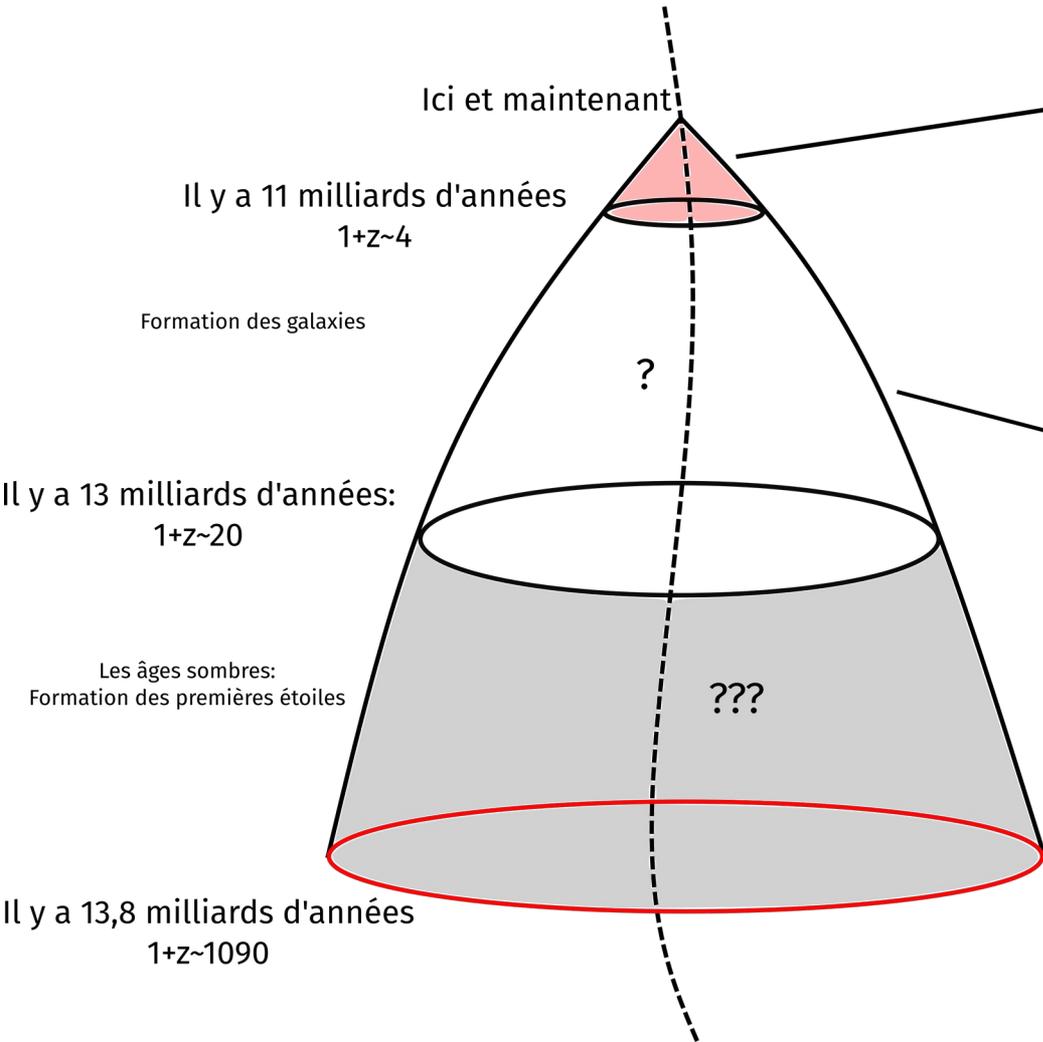
30 % de matière sombre

4 % de matière ordinaire

Brout et al (2022)



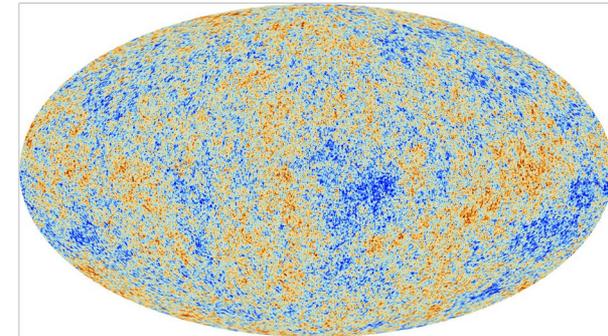
# Qu'avons-nous observé ?



Visible en radio



Square Kilometer Array  
(Image SKAO)

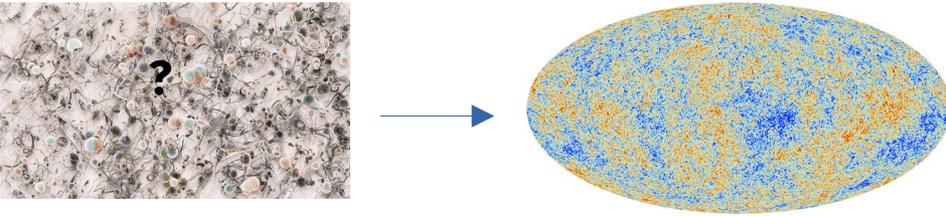


Emission du fond diffus cosmologique

(Image Planck)

# Pourquoi aller plus loin ?

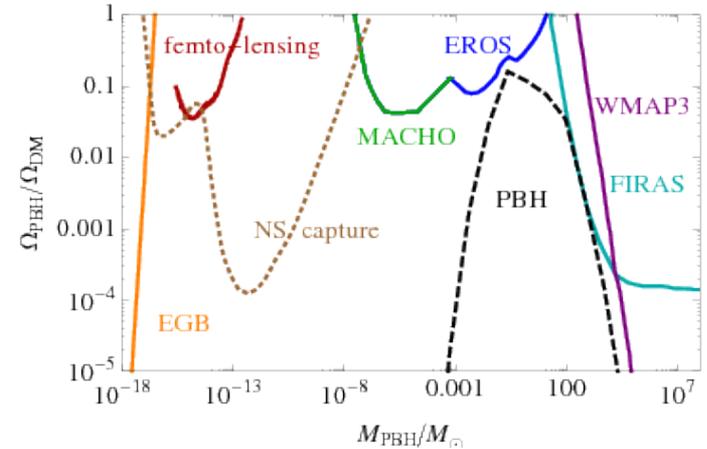
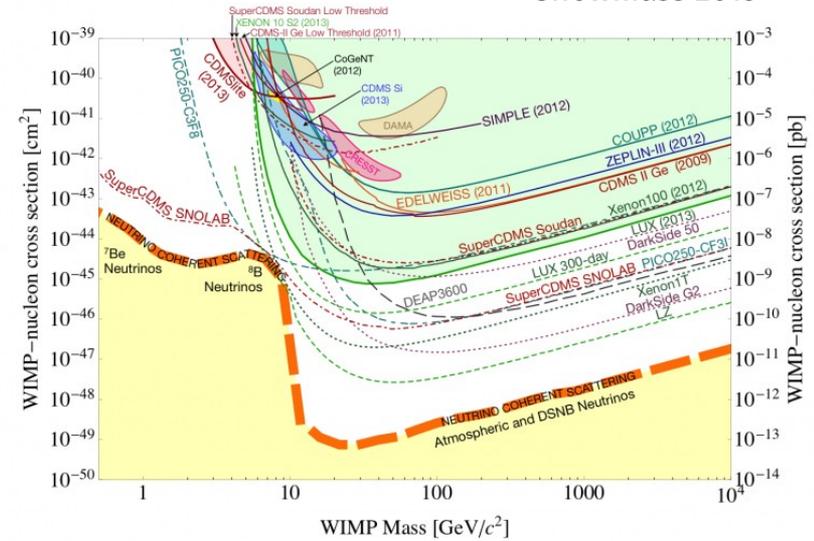
- Que s'est-il passé au début ?



- Nature de la matière sombre :

- Nouvelles particules ?
- Petits trous noirs ?
- Modification de la gravitation ?
- Une combinaison ?

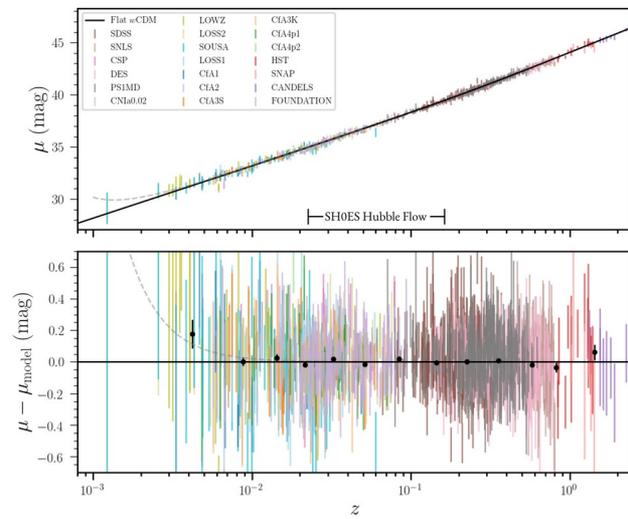
Snowmass 2013



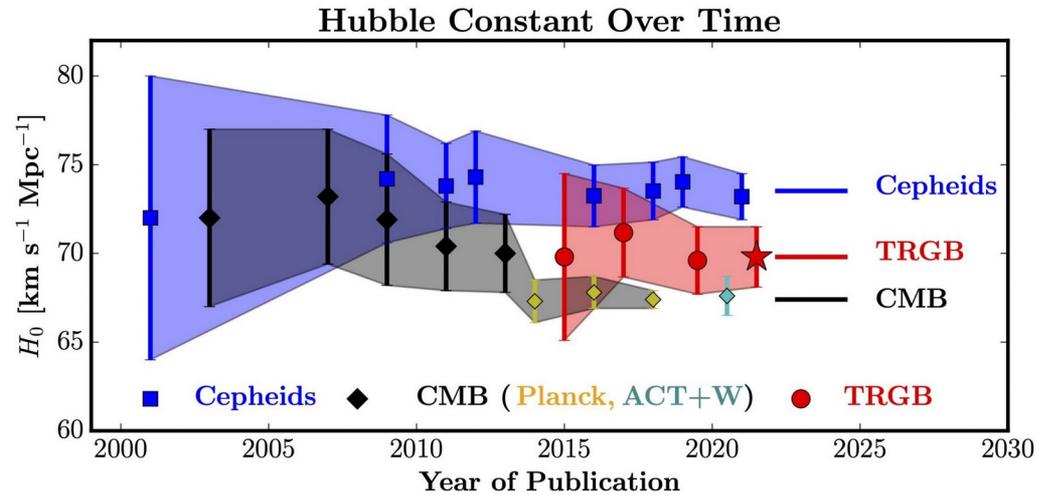
Clesse et al (2017)

# Pourquoi aller plus loin ?

- Nature de l'énergie sombre :
  - ♦ Une constante mais laquelle ?
  - ♦ Gravitation faiblit aux grandes échelles?
  - ♦ Nouvelle interaction
  - ♦ Quelque chose d'autre ?



- Des tensions se font jour :
  - ♦ Nouvelle physique ?
  - ♦ Modélisation plus fine requise ?



Freedman (2021)

# Les relevés de galaxies

- Jusqu'en 1924 :  
Nébuleuses dans Voie Lactée



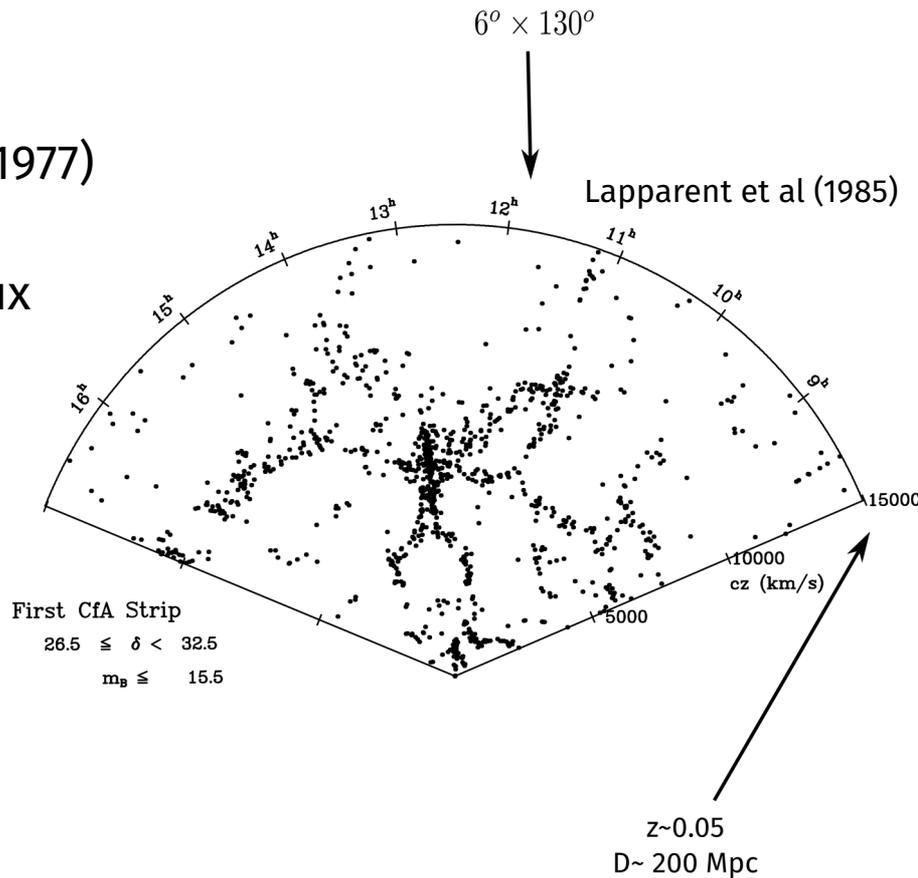
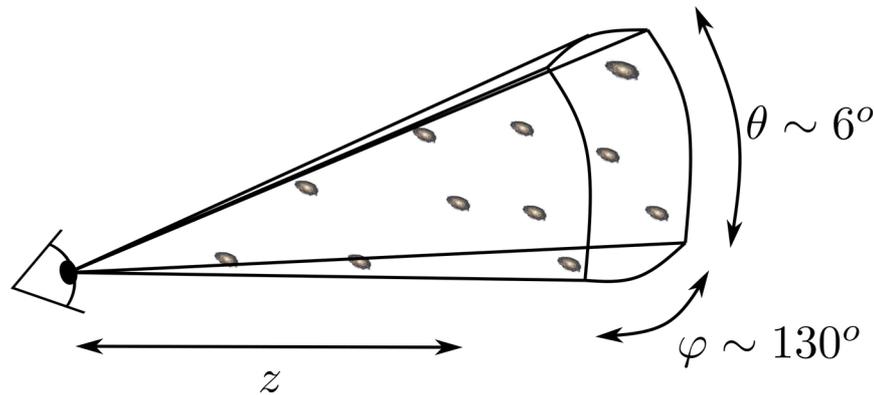
(Florian Breuer)

Hubble (1924) : Premières mesures de distances précises  
Nébuleuses sont des galaxies lointaines



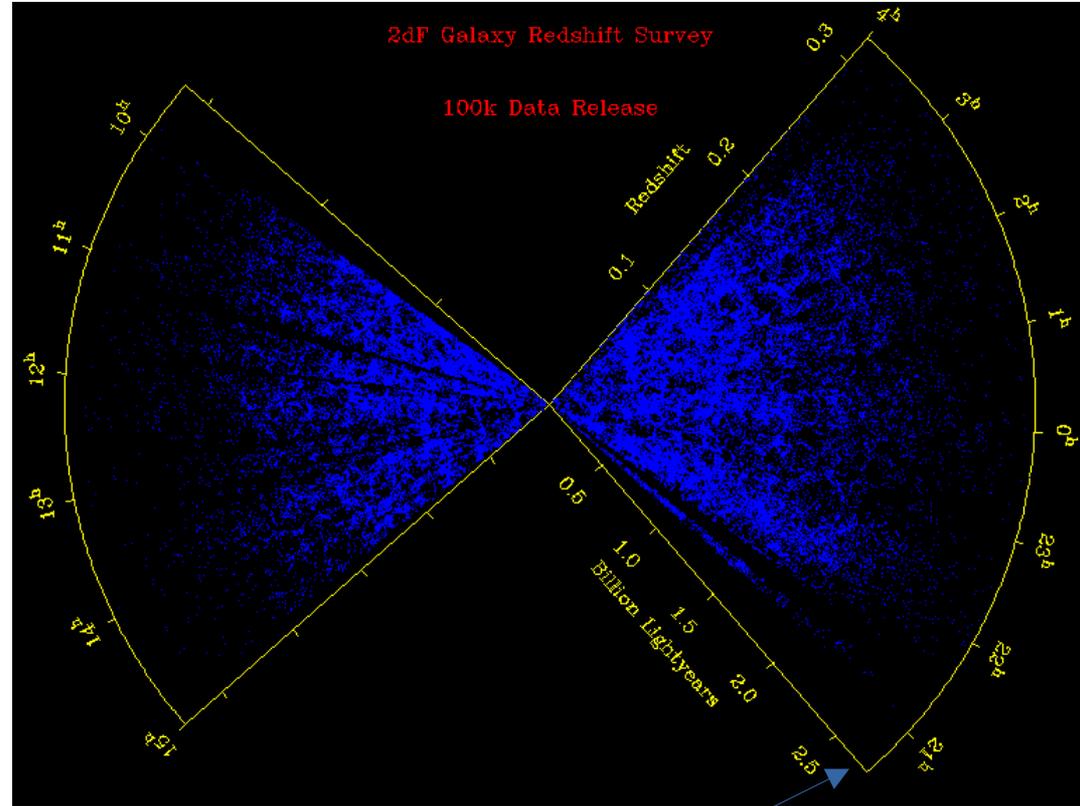
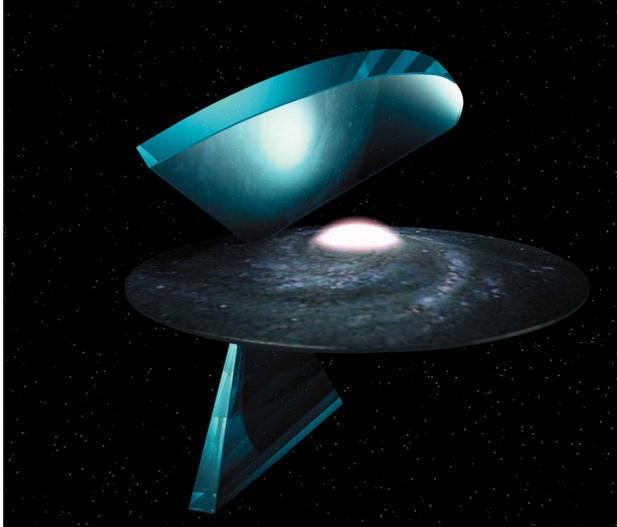
# Les relevés de galaxies

- Premier relevé systématique 3D : CfA (1977)
- 1 100 galaxies avec décalages spectraux
- Filaments et vides



# Les relevés de galaxies

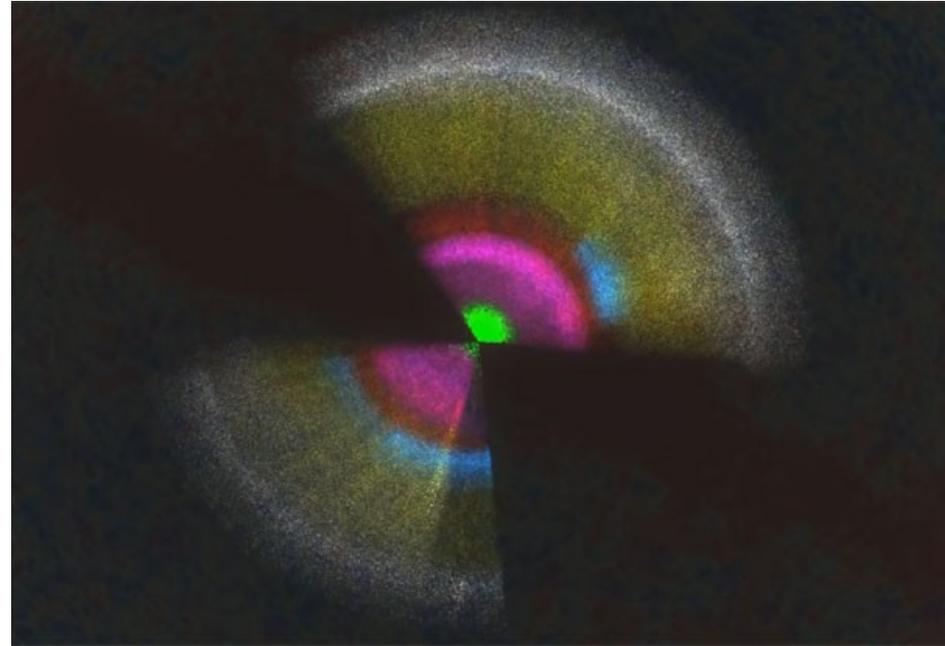
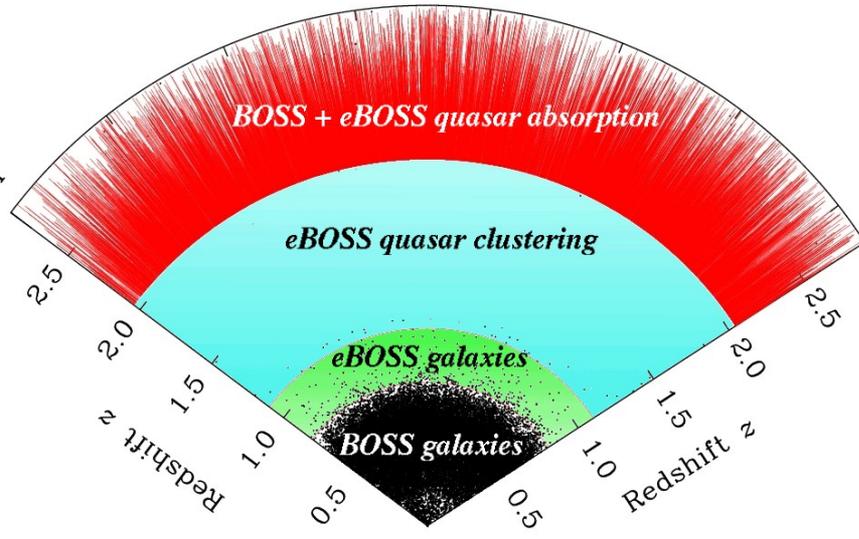
- 2dF (2000's)
- 221 414 galaxies
- ~1 500 degrés carrés



1 Gpc

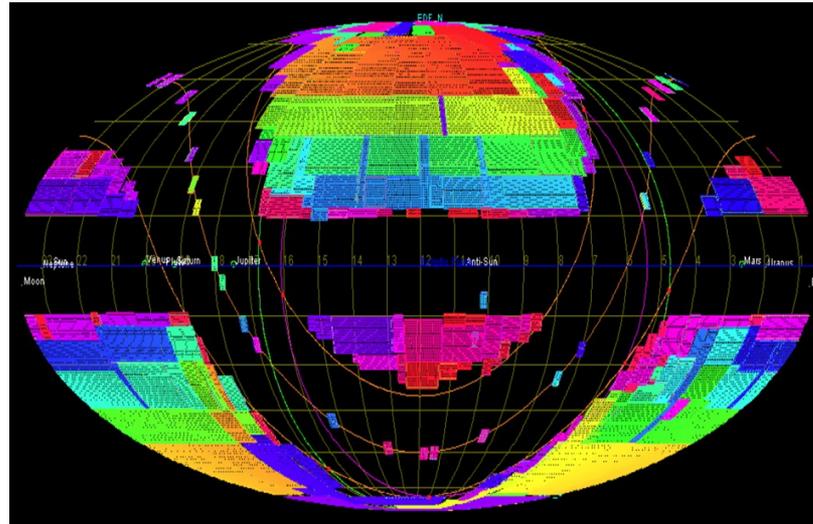
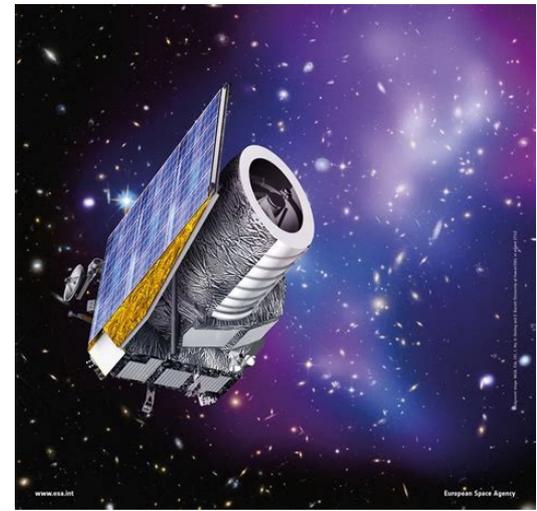
# Les relevés de galaxies

- Sloan Digital Sky survey (2000-)
- Relevé le plus récent : eBOSS
- 300 000 galaxies ; 6 000 degrés carrés ;  $0.6 < z < 1$  (~ 3Gpc)
- 500 000 quasars ; 6 000 degrés carrés ;  $0.8 < z < 3.5$

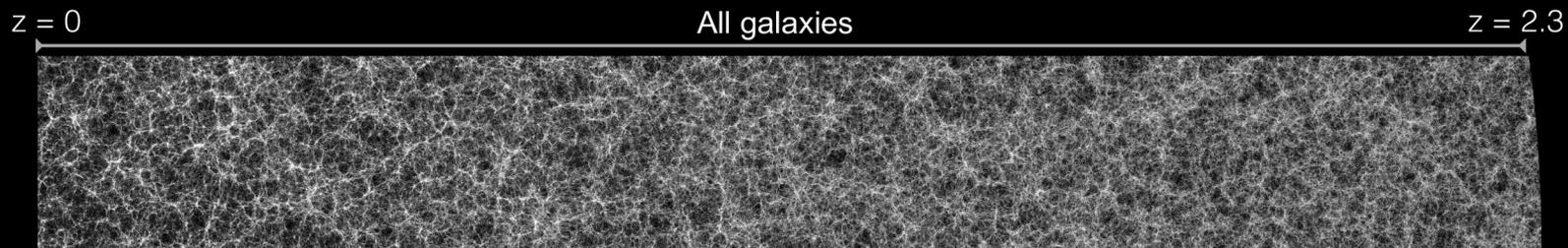


# Euclid

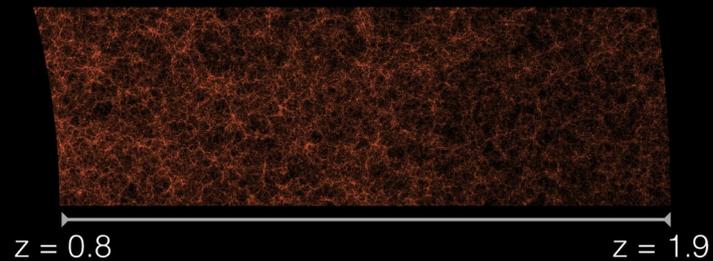
- 15 000 degrés carrés
- **50 millions de galaxies**
- Optique et IR proche
- $0 < z < 2$  : 5.5 Gpc !
- Point de Lagrange L2
- Date de lancement incertaine à ce jour



# Flagship mock galaxy catalog



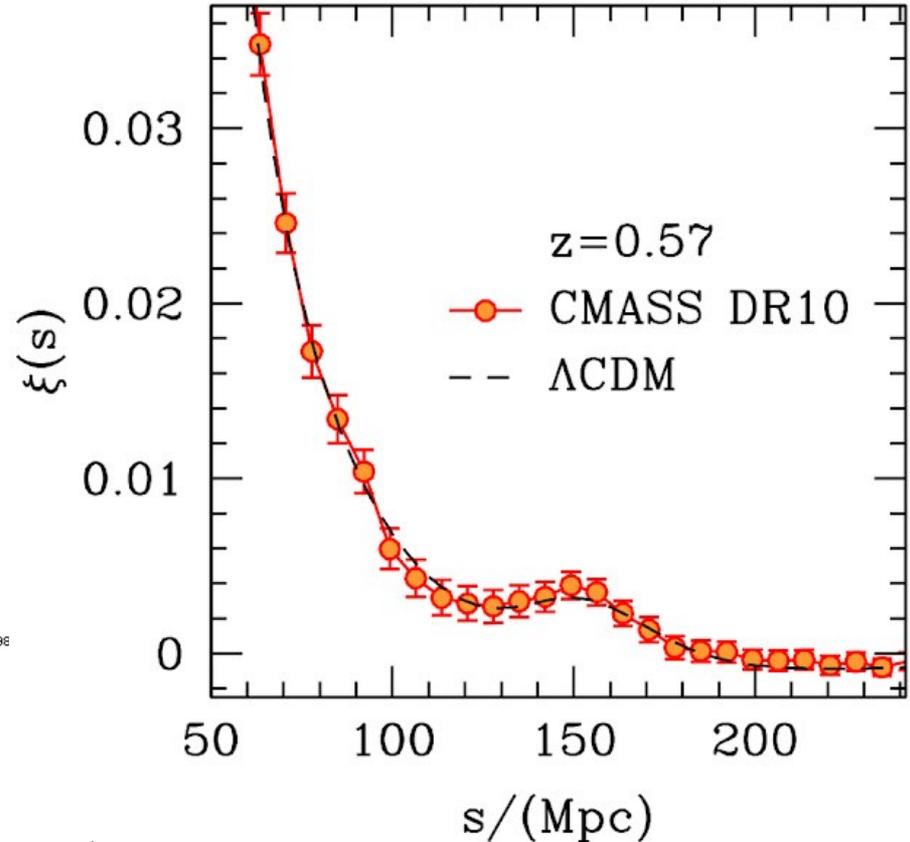
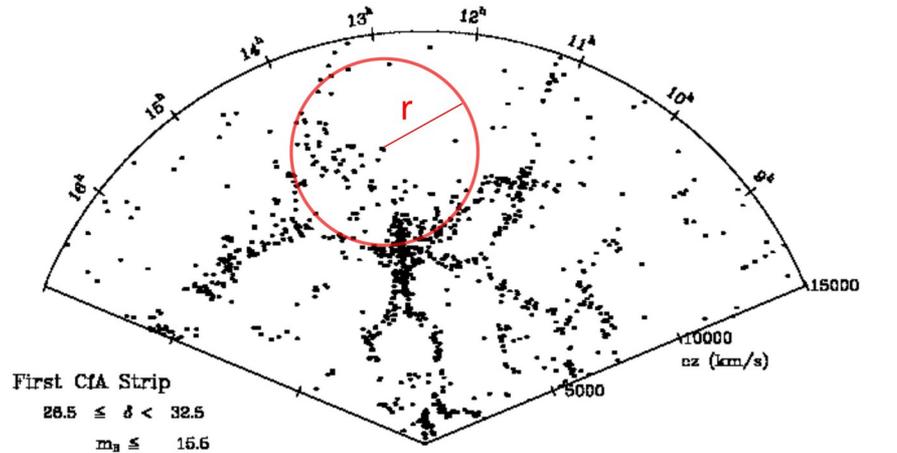
NISP  $H\alpha > 1.e-16$



# Qu'en fait-on ?

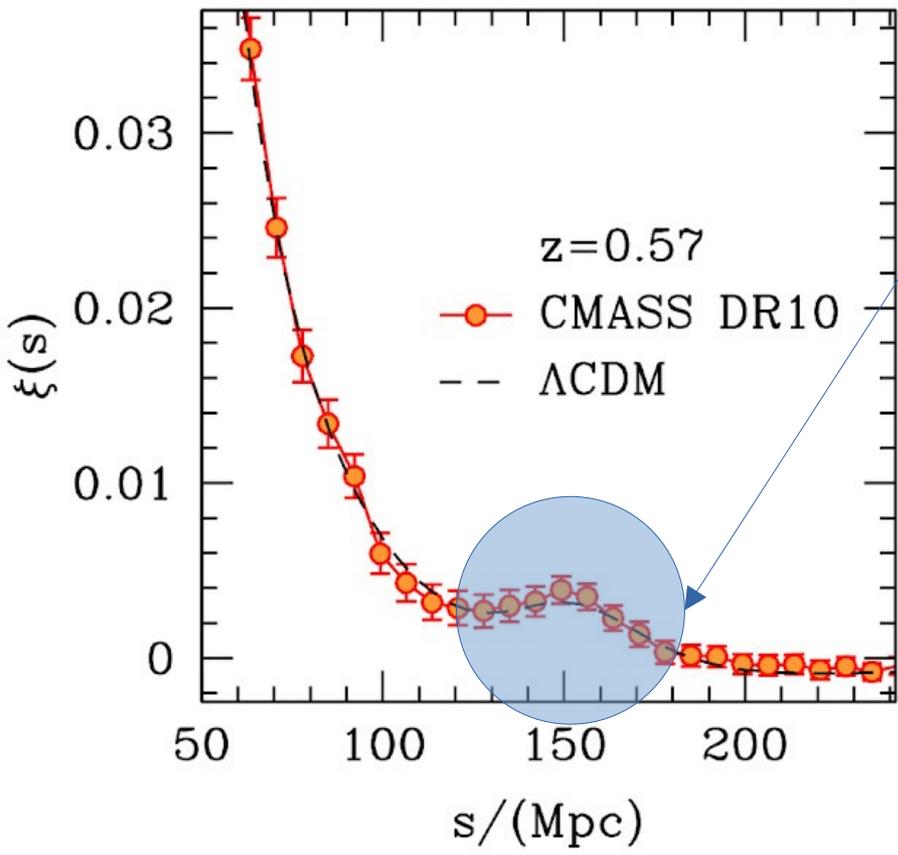
## Fonction de corrélation à deux points

$$dP = \bar{n} (1 + \xi(r)) dV$$

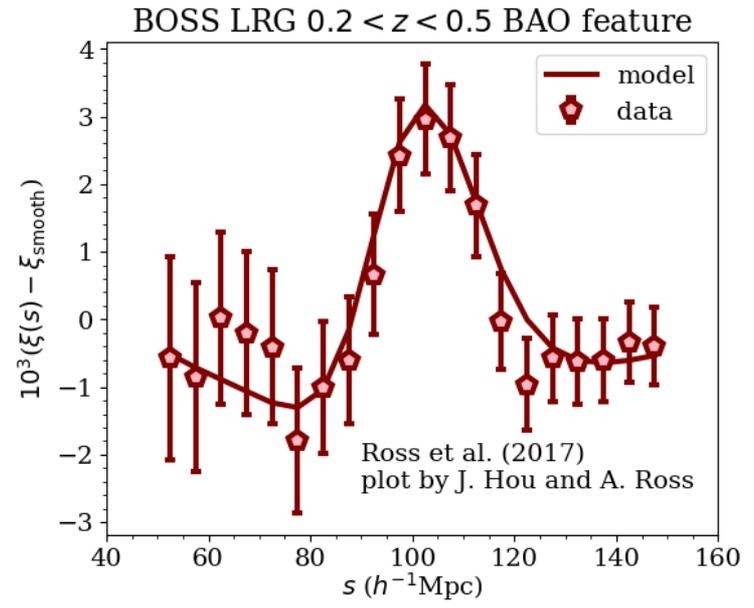


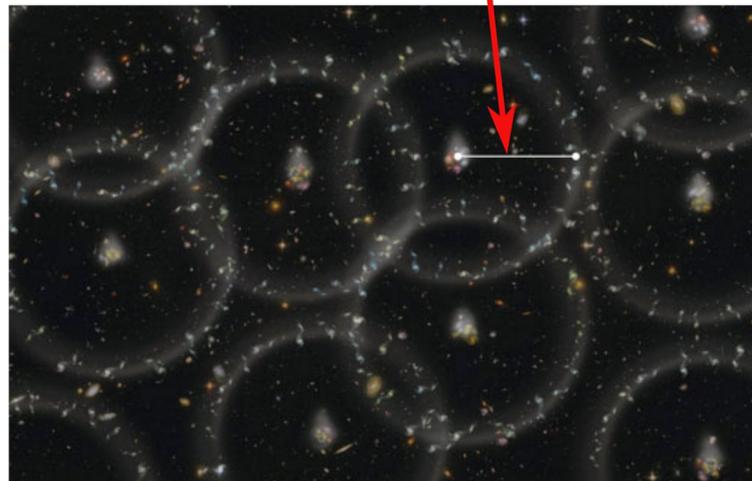
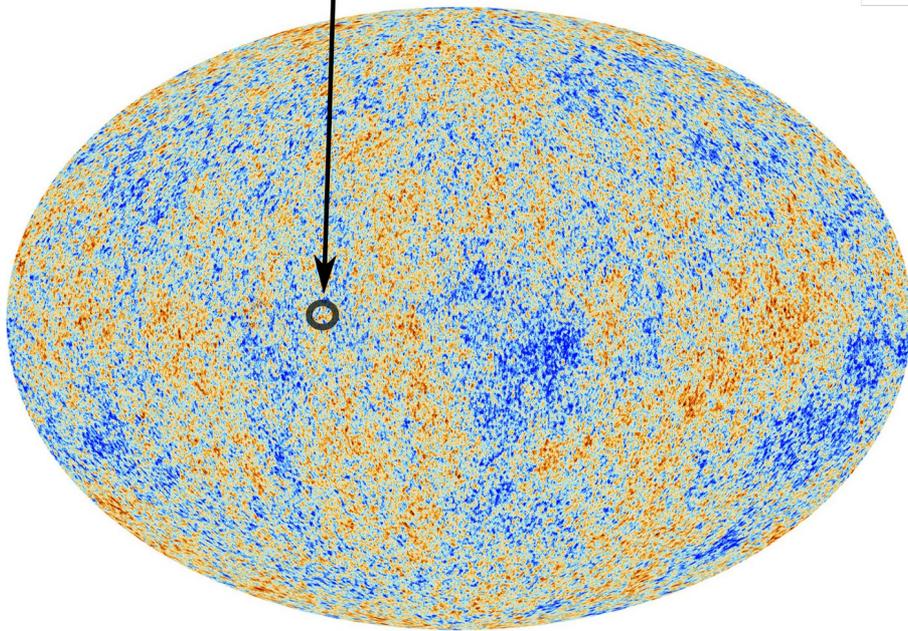
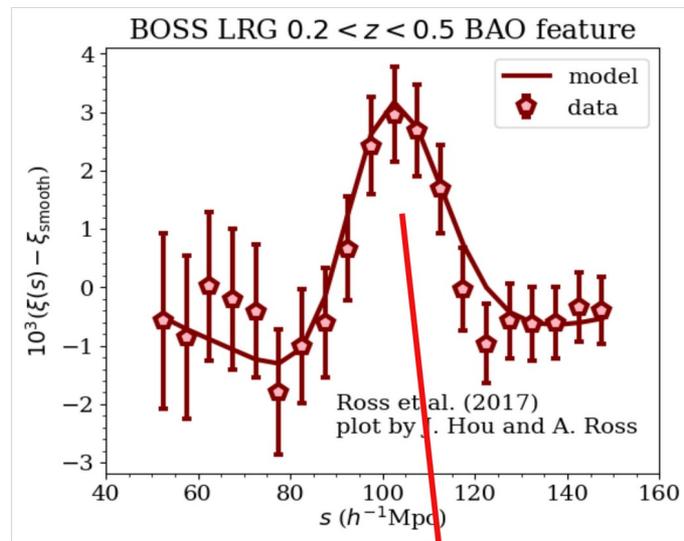
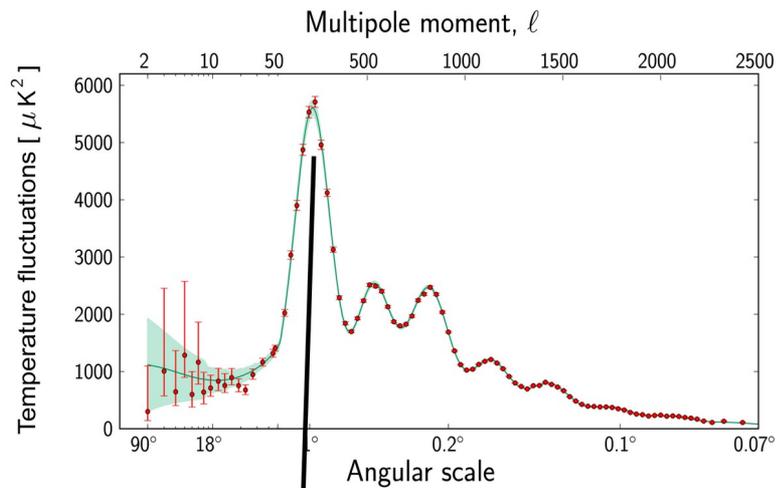
Ariel G. Sánchez and SDSS collaboration

# Fonction de corrélation à deux points



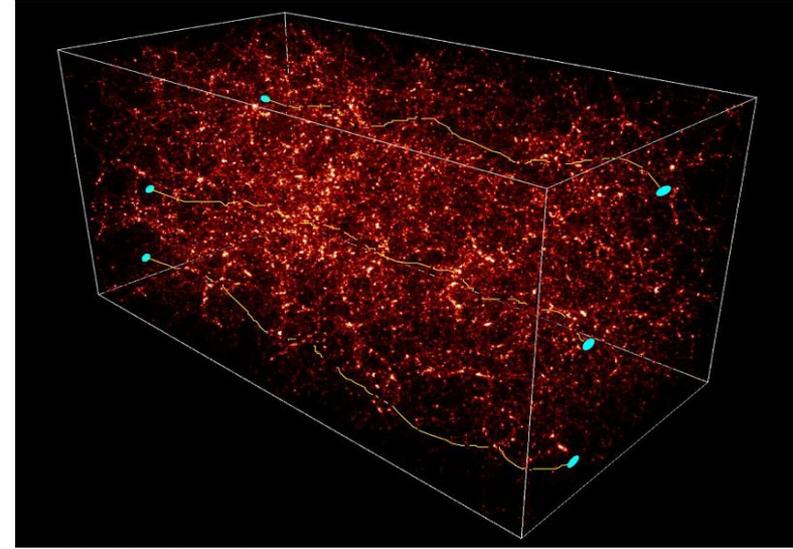
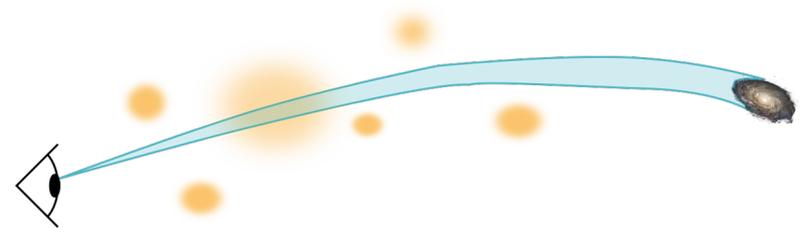
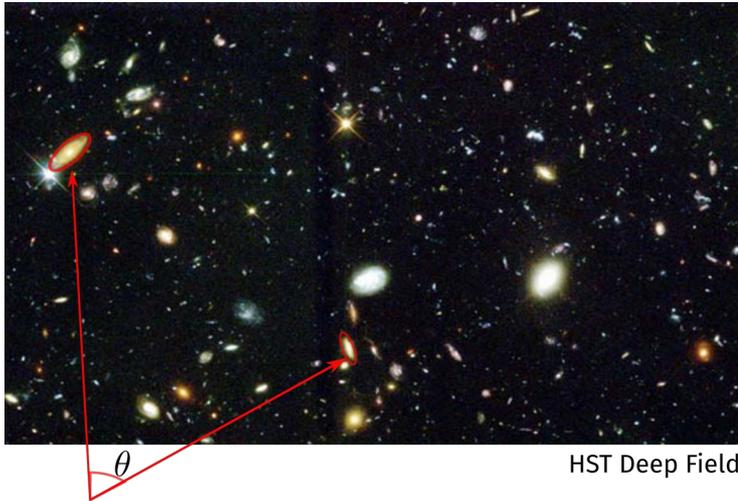
# Oscillations acoustiques des baryons



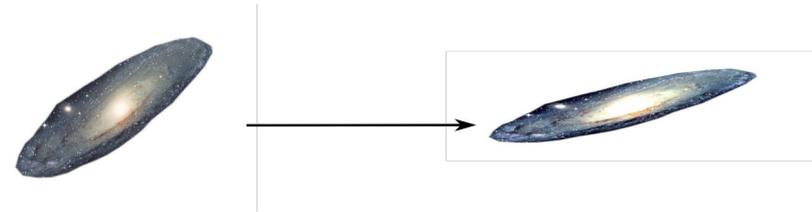


# Lentillage faible

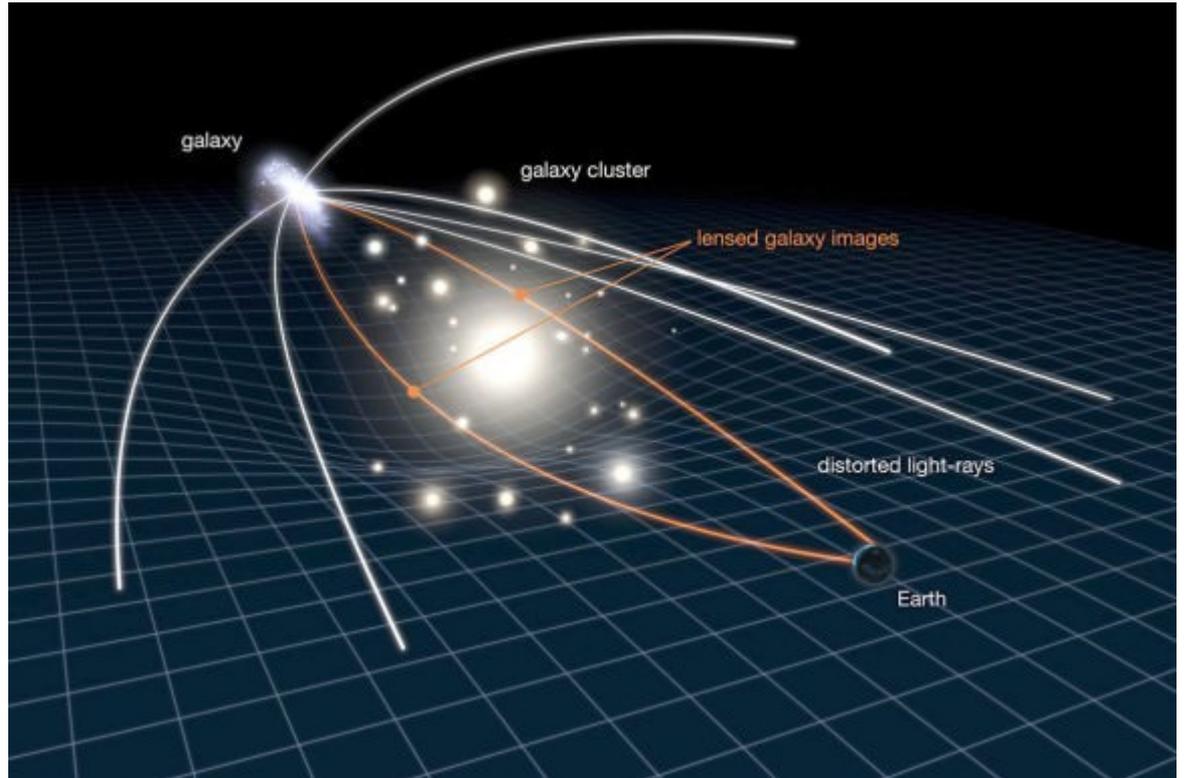
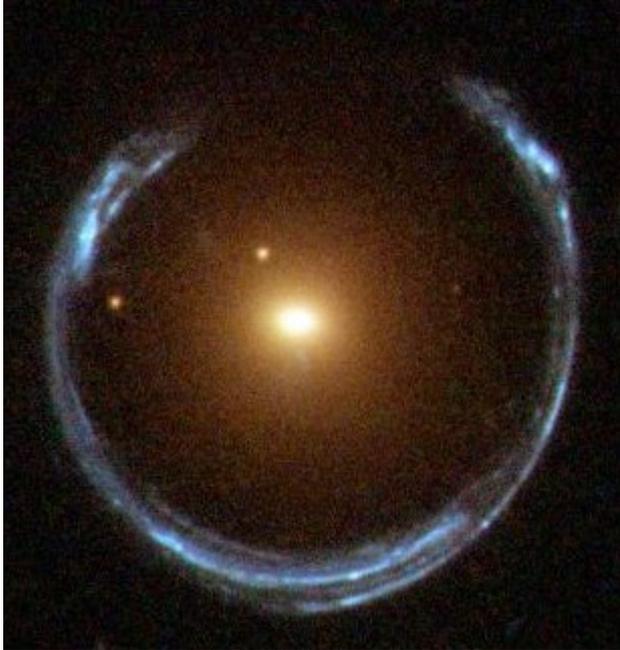
- Vue 2D
- Avant plan déforme galaxies
- Déformations corrélées sur le ciel
- Renseigne sur histoire des structures



(Colombi, CFHT, 2008)

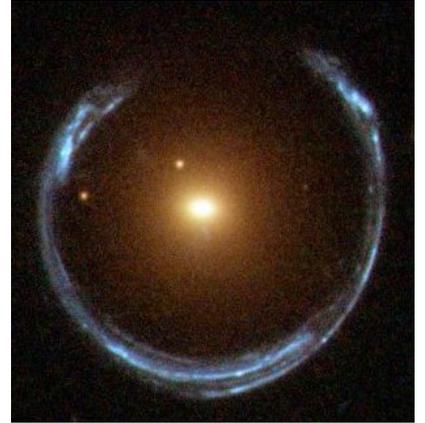
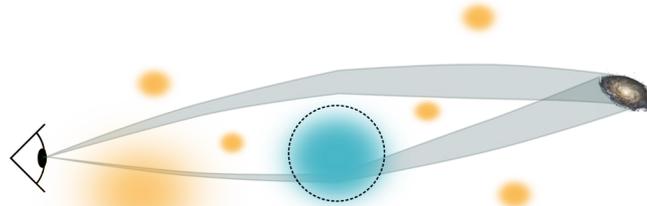


# Lentillage fort

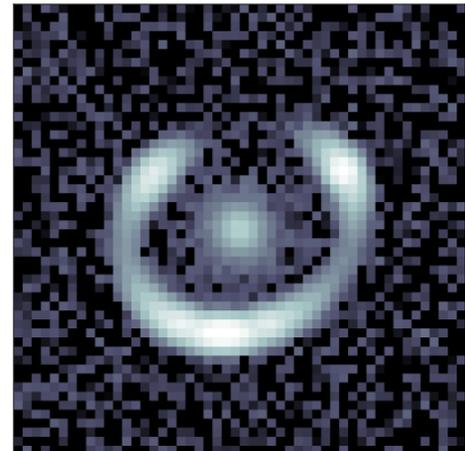
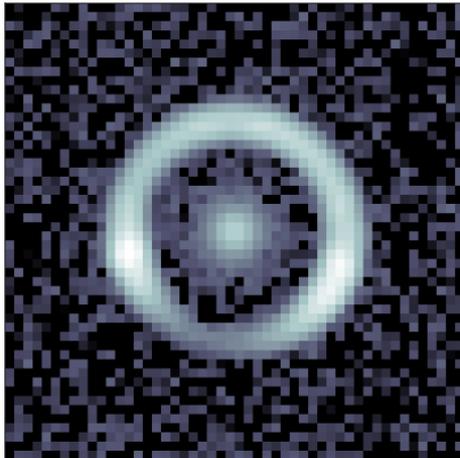


(Calcada, L., NASA/ESA)

# Lentillage fort



- Effets des grandes structures sur images
- Anneaux d'Einstein comme forme standard
- Euclid : 100 000 anneaux



# Synergies

