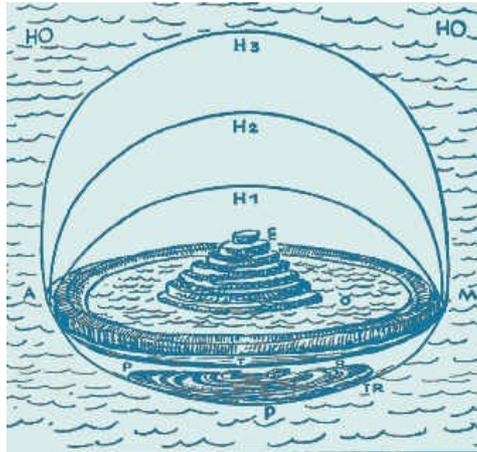
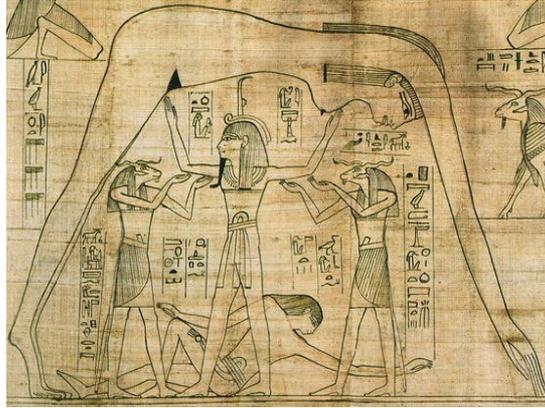


Cosmogonies des Anciens

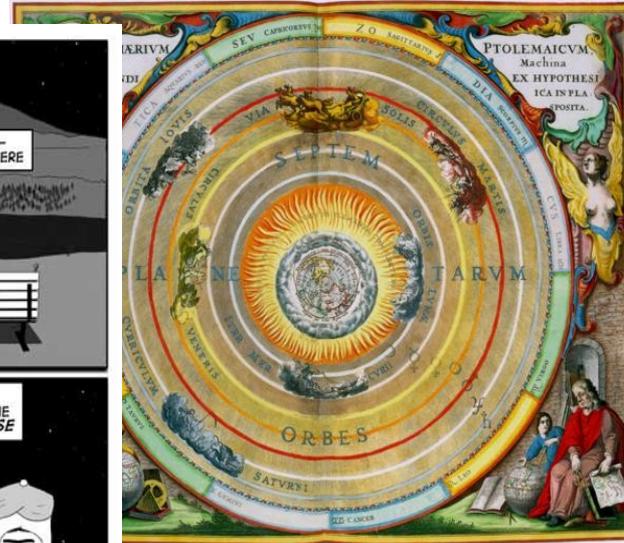
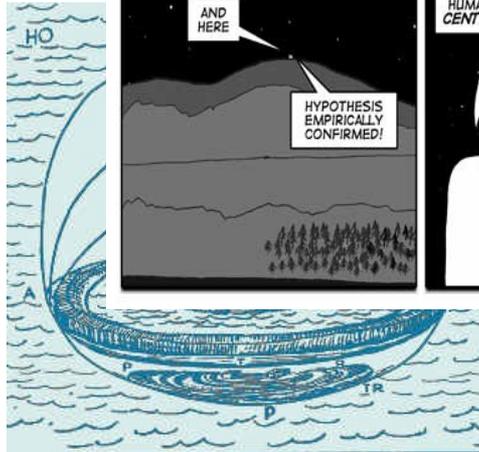
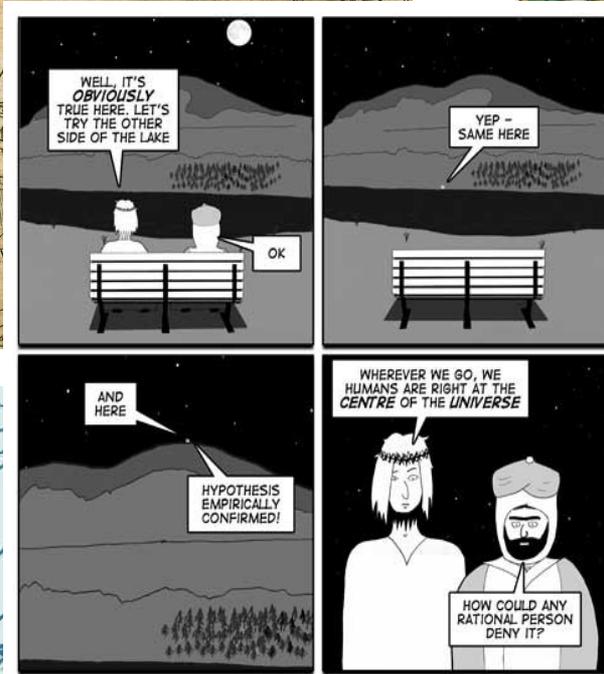
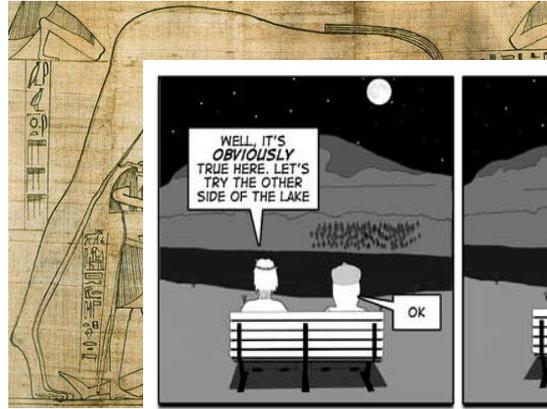


Cosmogonies des Anciens



- Des mondes clos et anthropocentrés
- Sans histoire: statiques ou répétitifs

Cosmogonies des Anciens

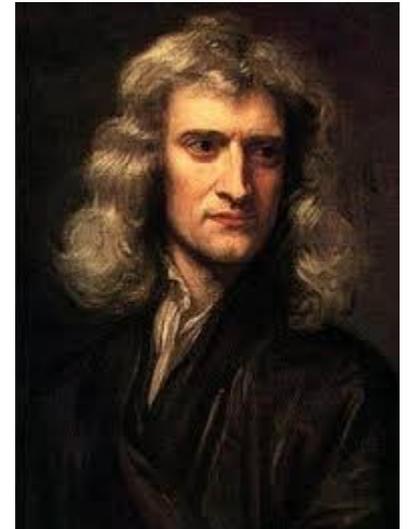


- Des mondes clos et anthropocentrés
- Sans histoire: statiques ou répétitifs

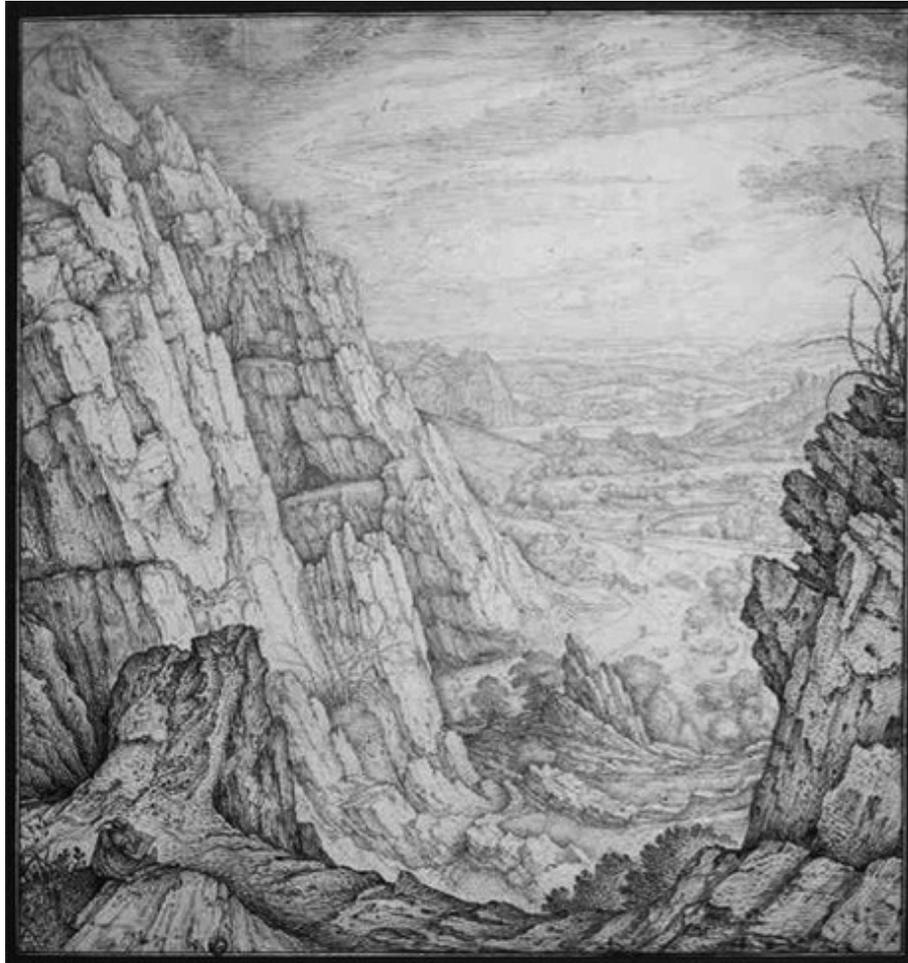
La révolution copernicienne



- Un observateur décentré
- Mais un monde stationnaire, sans histoire
- Cadre newtonien figera le tout: espace et temps absolus



L'univers relativiste

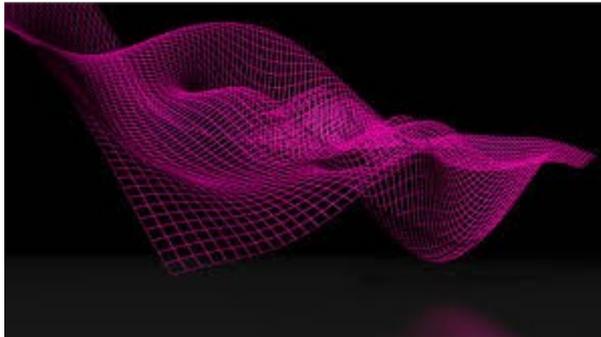
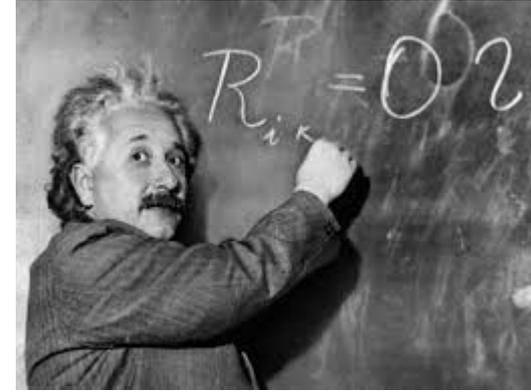


Relativité Générale

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

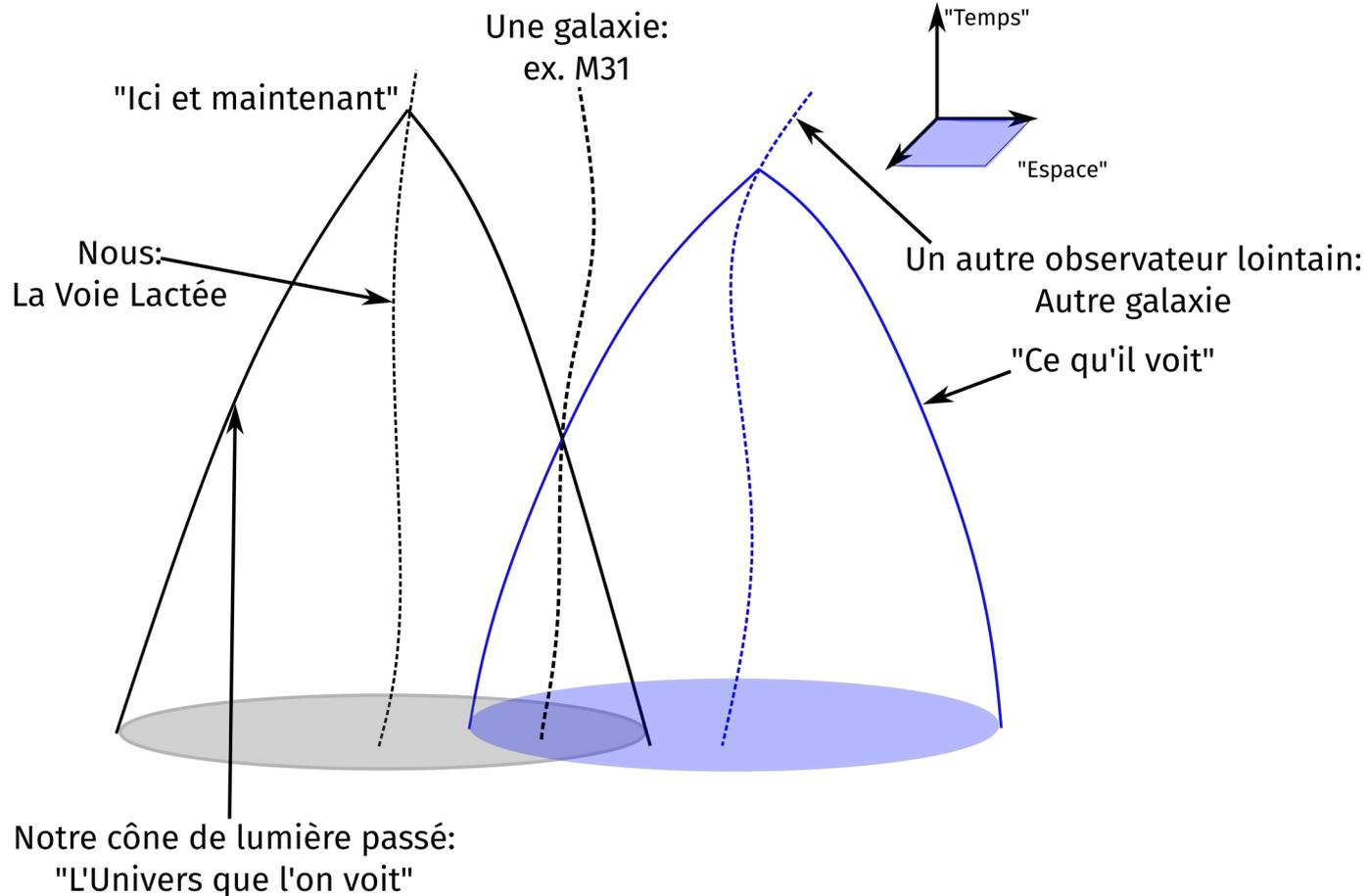
Geometry

Matter

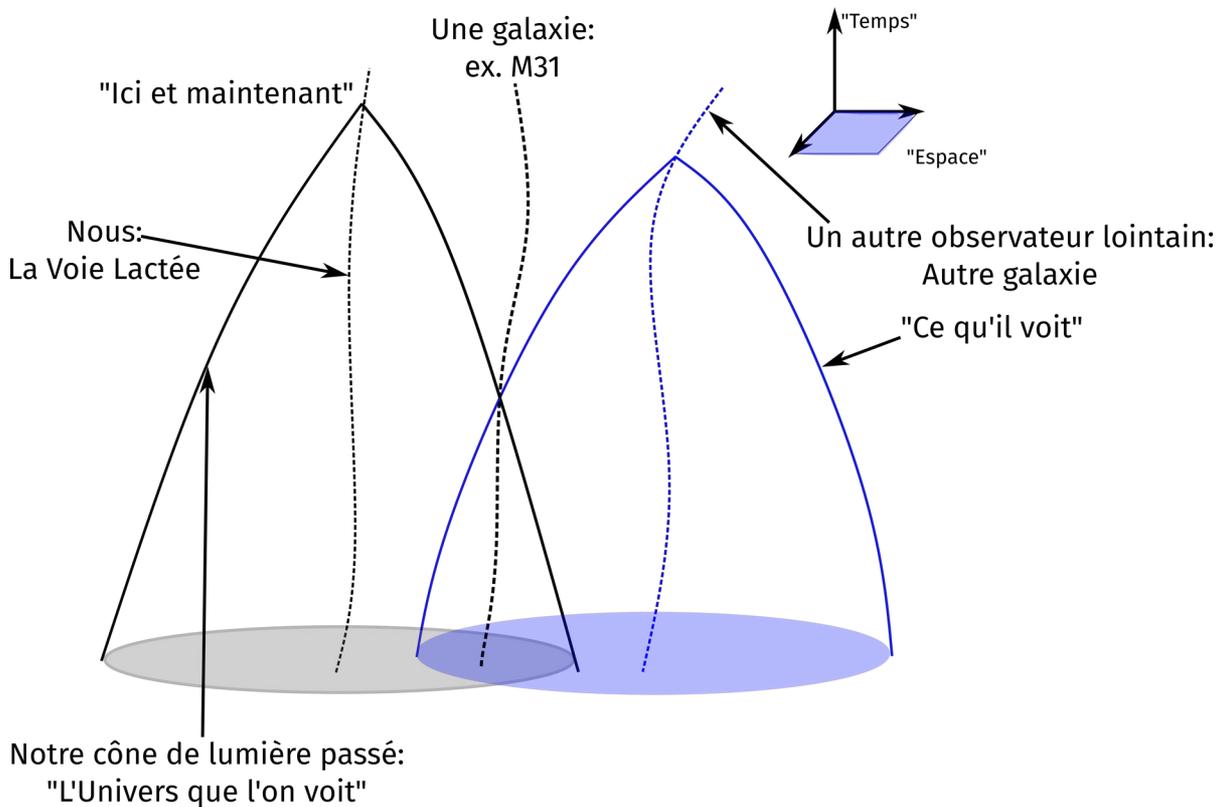


mass →	+0.3 MeV/c ²	+1.275 GeV/c ²	+173.07 GeV/c ²	0	+126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
QUARKS	+4.8 MeV/c ²	+95 MeV/c ²	+4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
LEPTONS	+0.22 eV/c ²	+0.17 MeV/c ²	+15.5 MeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS

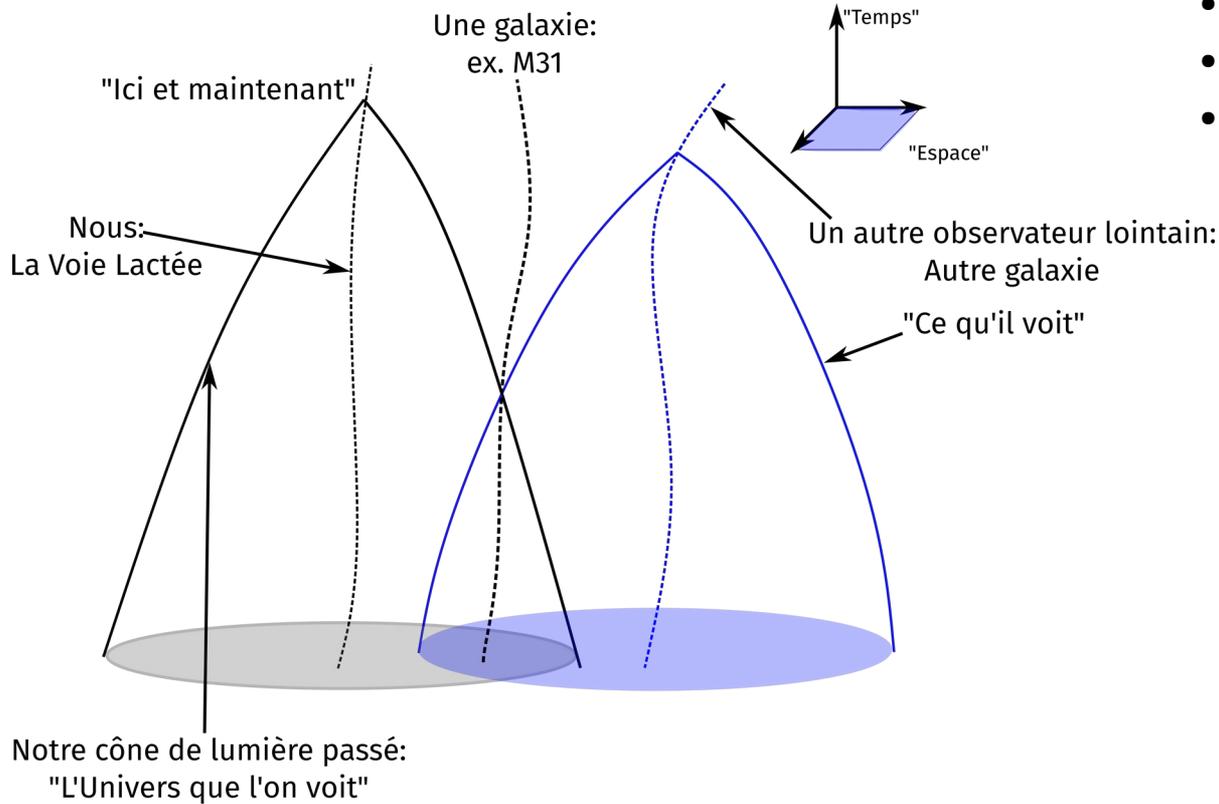
Cosmologie : une science à part



Cosmologie : une science à part

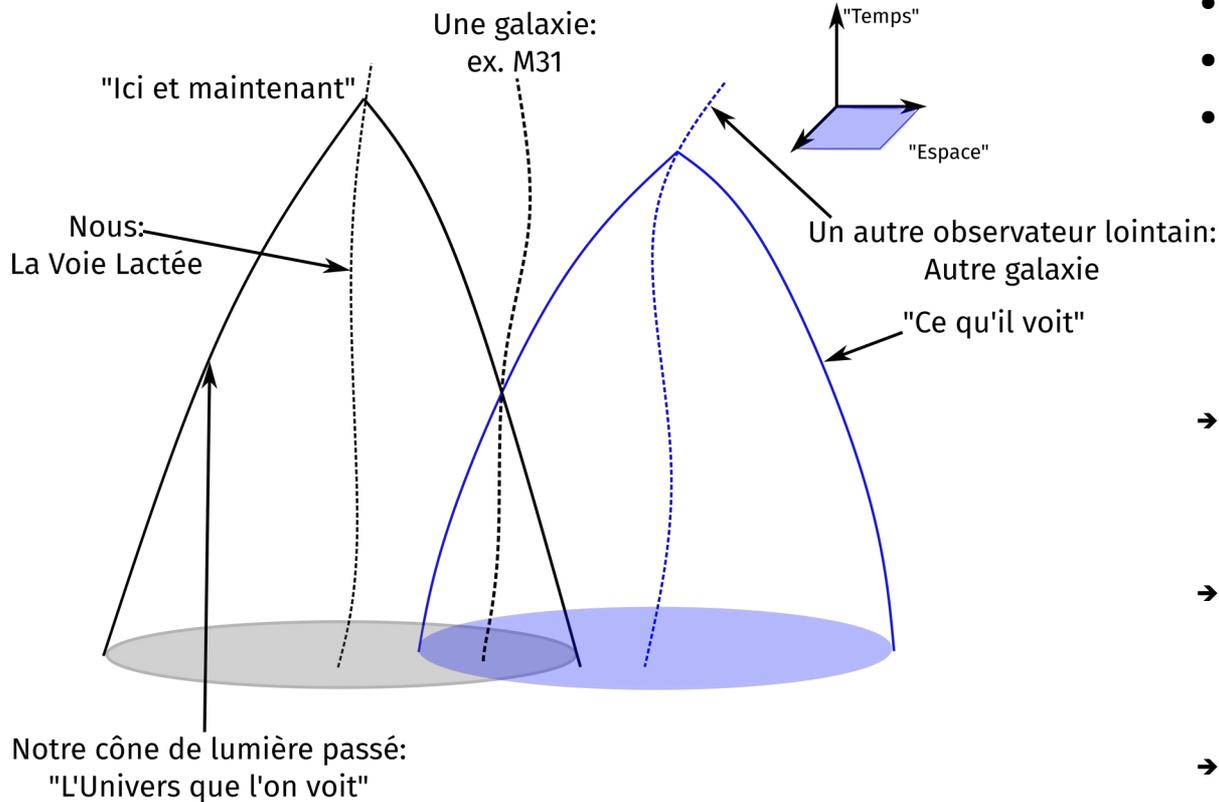


Cosmologie : une science à part



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

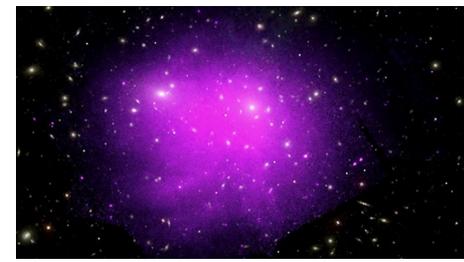
Cosmologie : une science à part



- 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 ?

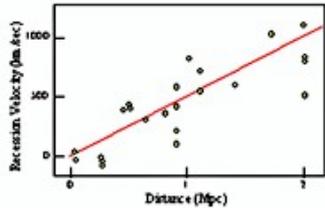


Alors que voit-on?



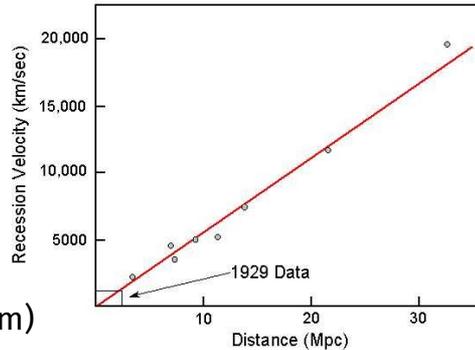
Les galaxies lointaines s'éloignent de nous

Hubble's Data (1929)

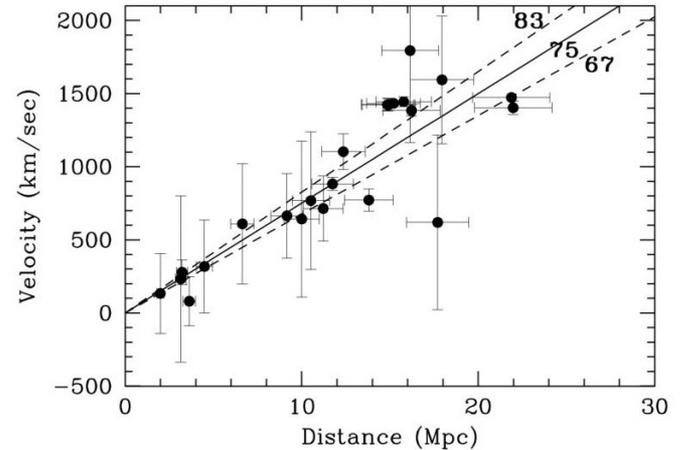


(1 Mpc ~3 million d'a.l. ~ 3×10^{22} m)

Hubble & Humason (1931)

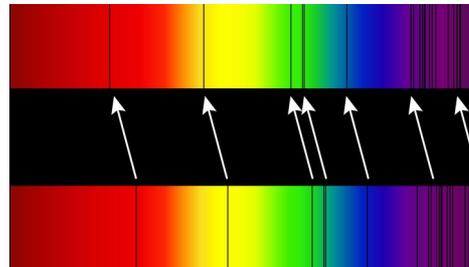


Freedman et al. (2001)



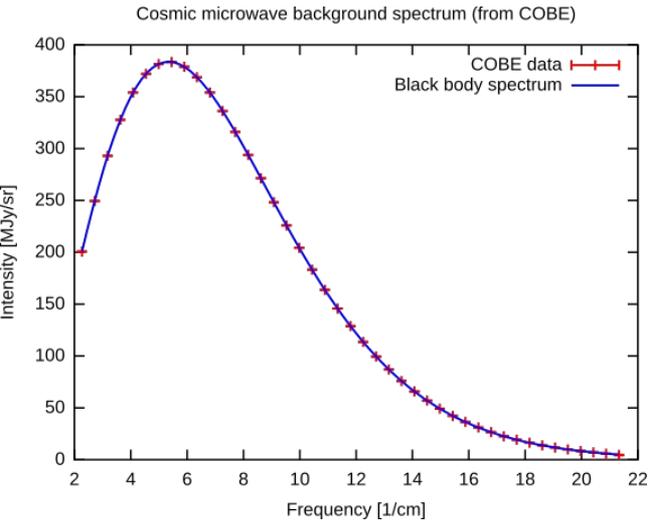
Loi de Hubble : $v = Hr$

Décalage spectral : $z \sim v/c$



L'Univers est en expansion

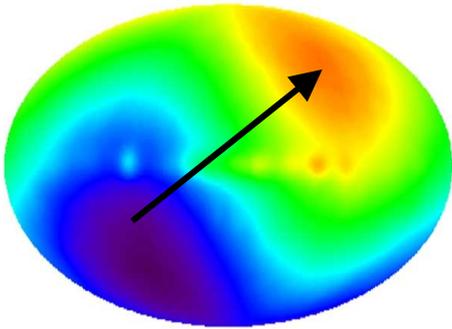
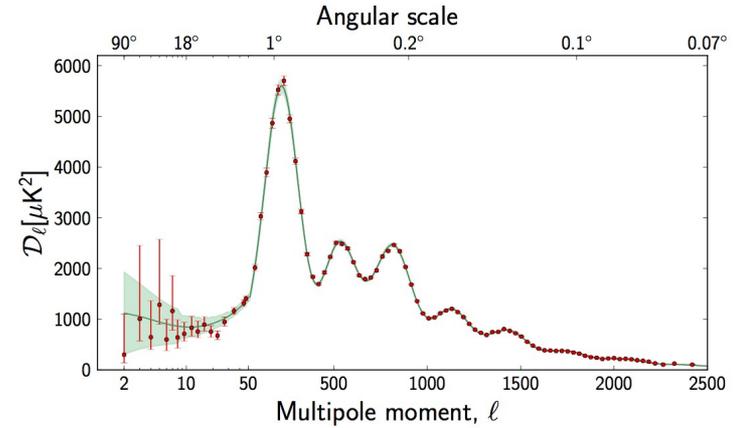
Alors que voit-on?



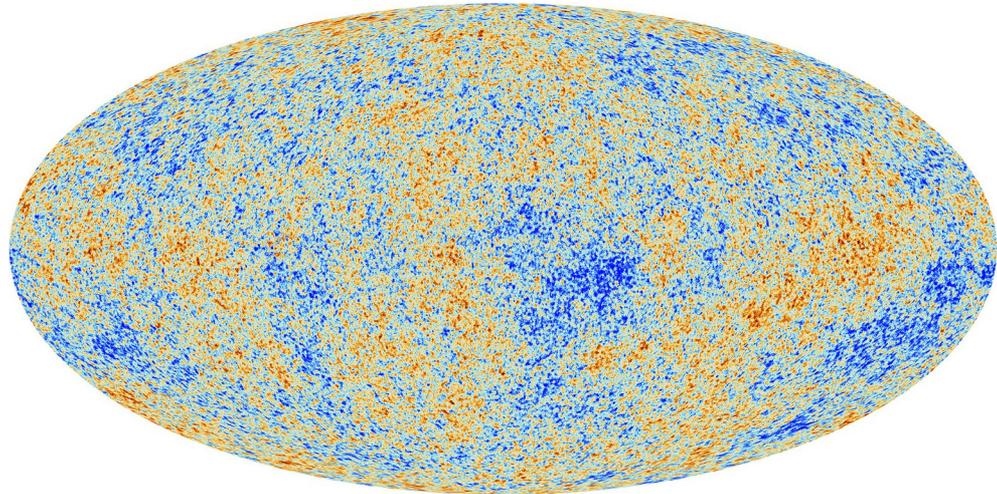
Fond diffus micro-onde
« Première lumière »

Très isotrope:

$T=2.725\text{ K}$



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



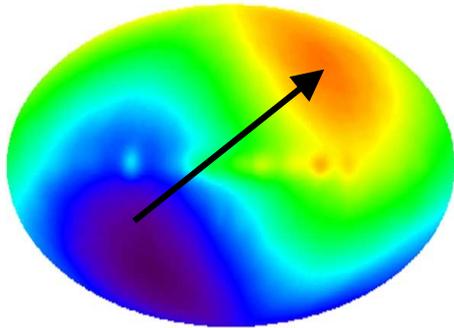
Fluctuations $\Delta T/T \sim 10^{-5}$

Alors que voit-on?

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

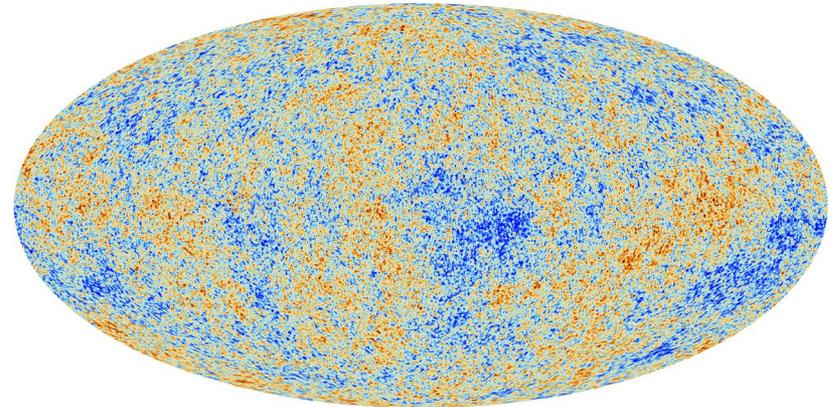
Fond diffus micro-onde :
« Première lumière »

(COBE)



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

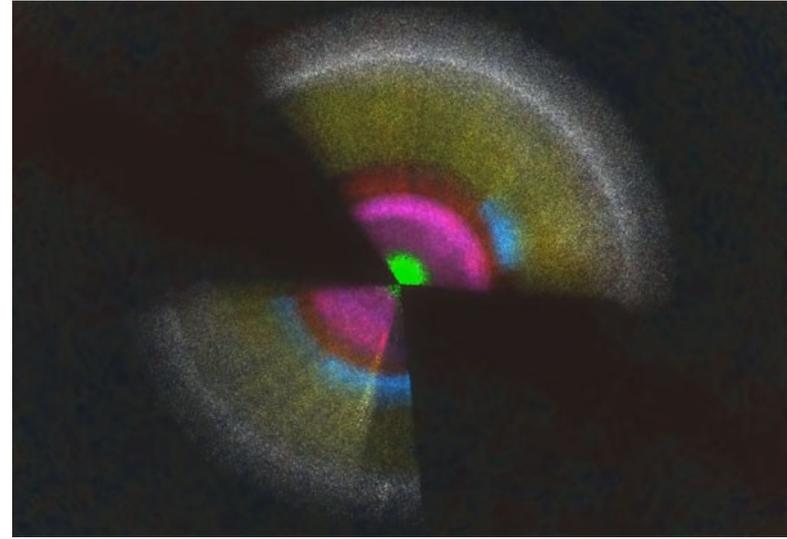
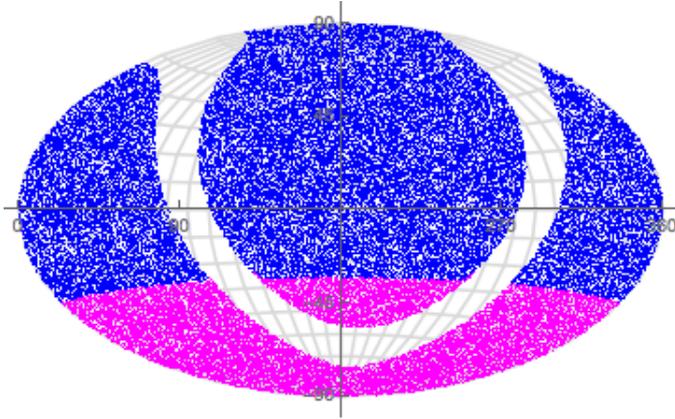
(Planck)



Fluctuations $\sim 10^{-5}$

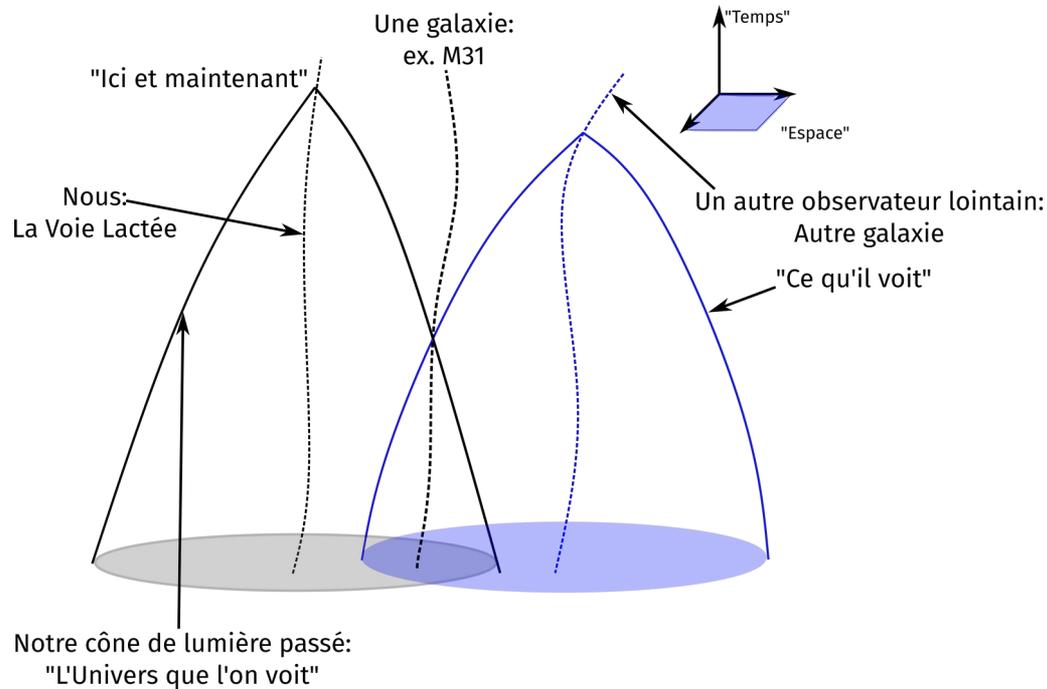
Alors que voit-on?

Encore le cas dans l'Univers "proche"



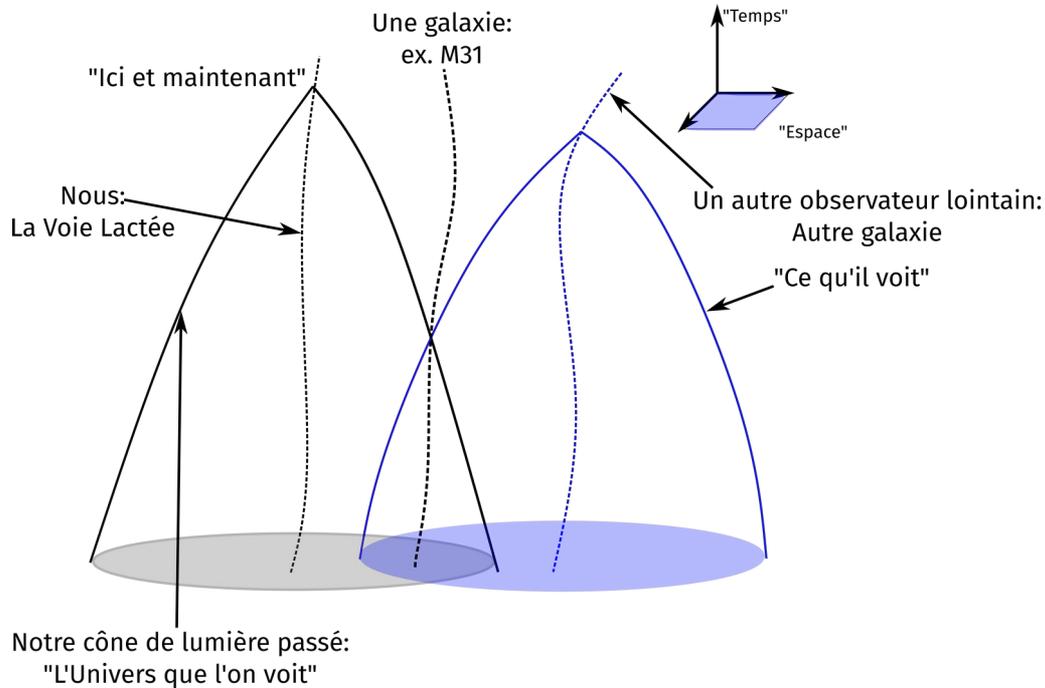
Matière et rayonnement
distribués de manière **isotrope**

Le principe cosmologique



Le principe cosmologique

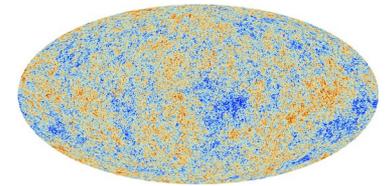
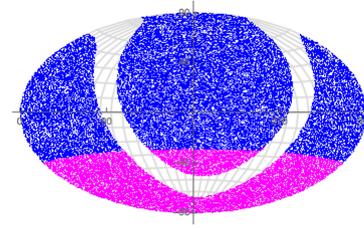
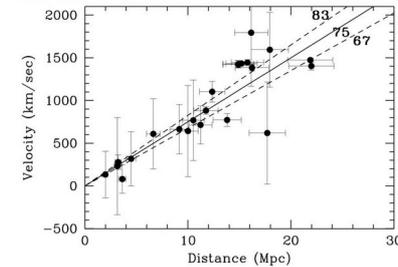
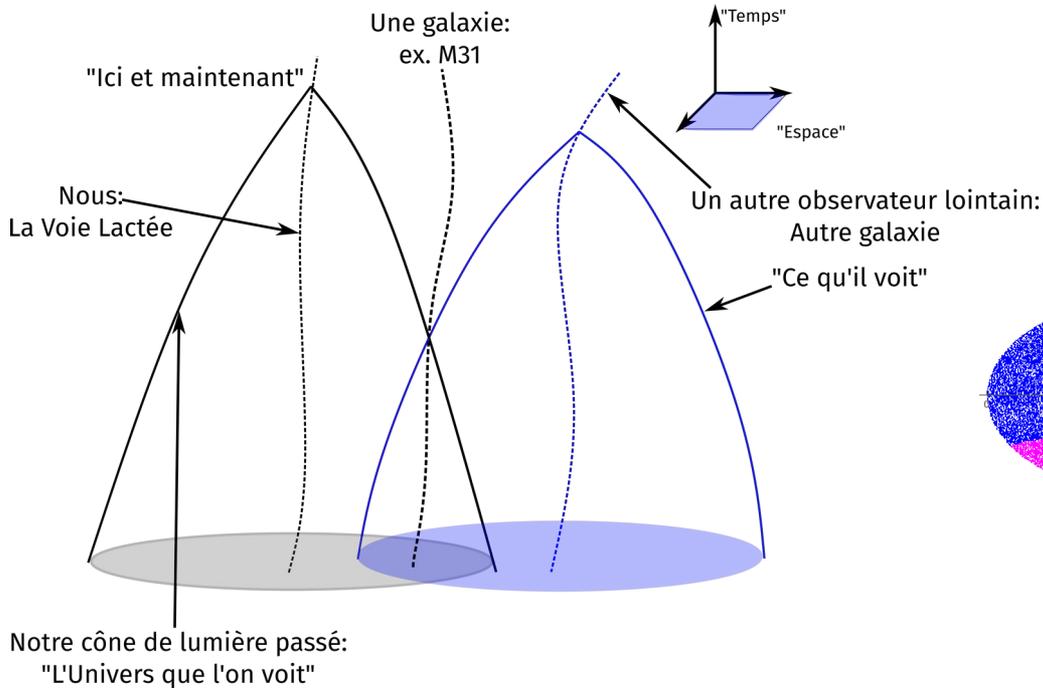
- Principe copernicien : « Nous ne sommes pas spéciaux »



Le principe cosmologique

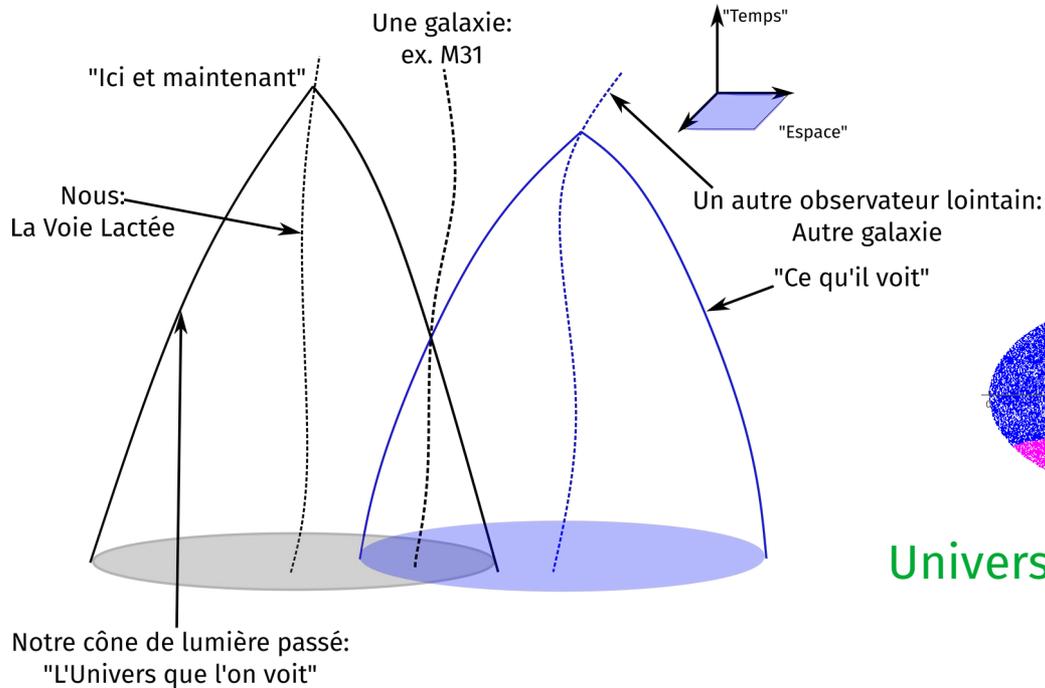
- Principe copernicien : « Nous ne sommes pas spéciaux »
- En moyenne : tout observateur voit le même Univers que nous :

- Loi de Hubble
- Isotropie

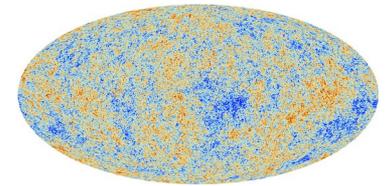
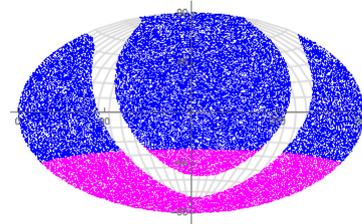
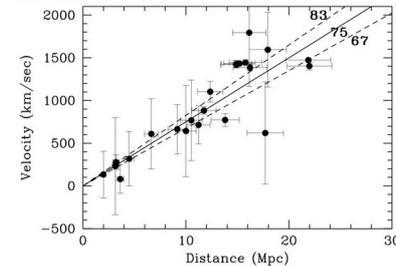


Le principe cosmologique

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



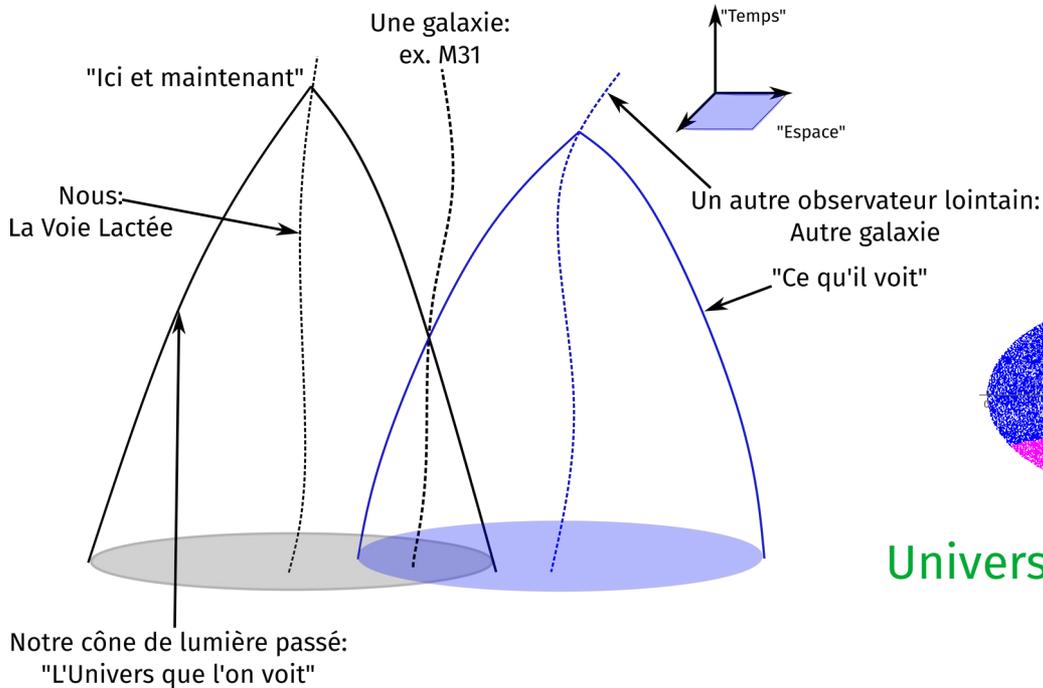
- Loi de Hubble
- Isotropie



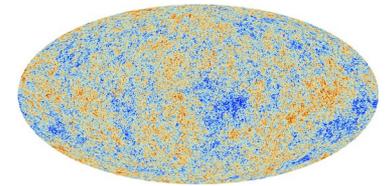
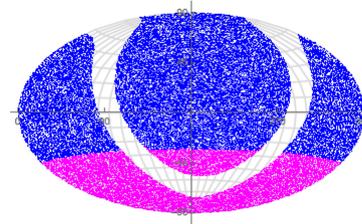
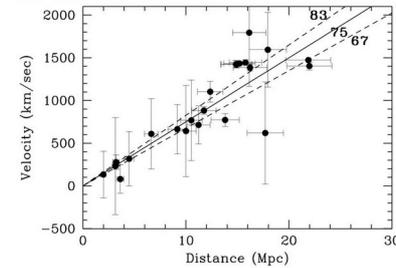
Univers homogène et isotrope (en moyenne) :

Le principe cosmologique

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

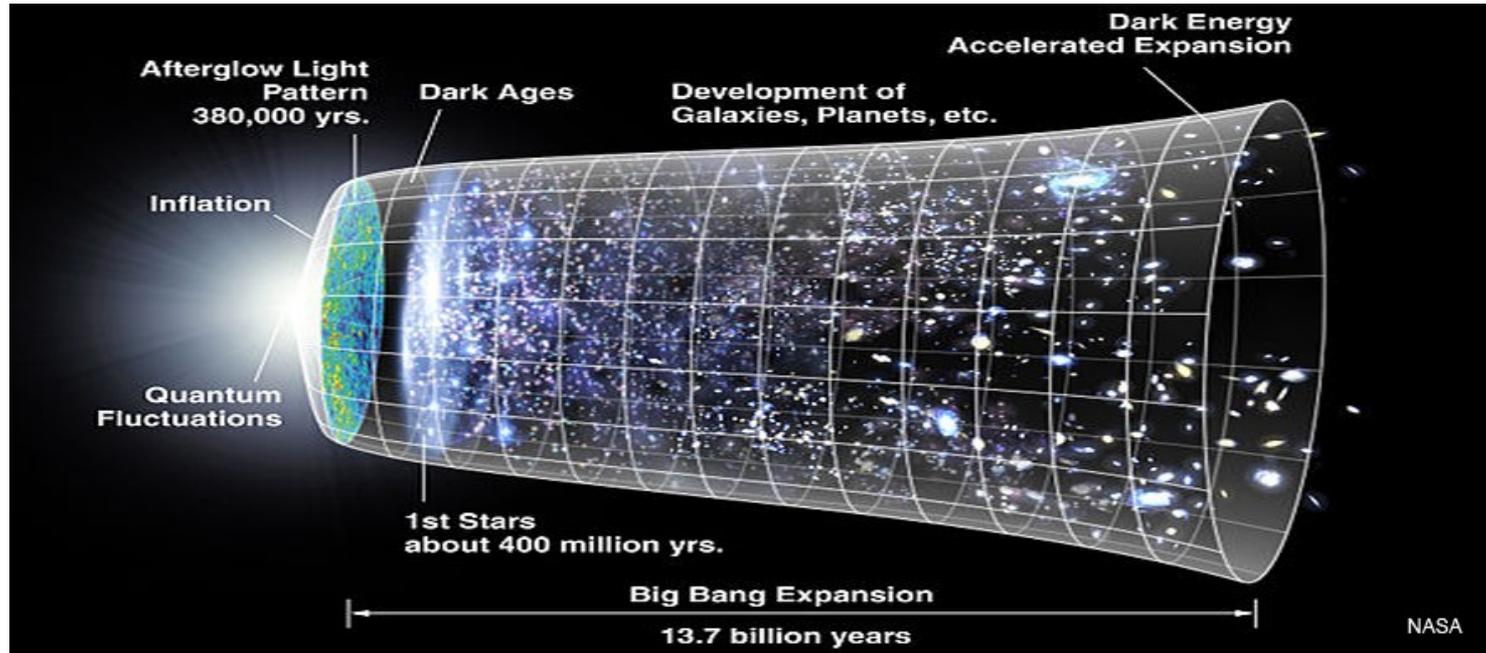


- Loi de Hubble
- Isotropie

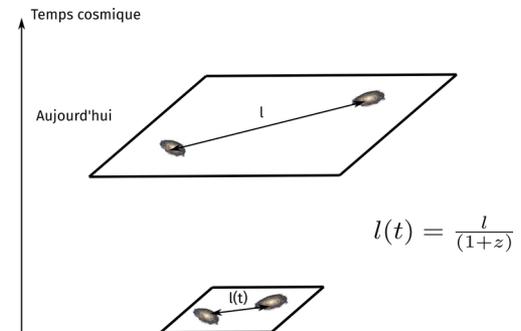


Univers homogène et isotrope (en moyenne) :
Modèle du Big Bang chaud

Le Big Bang Chaud

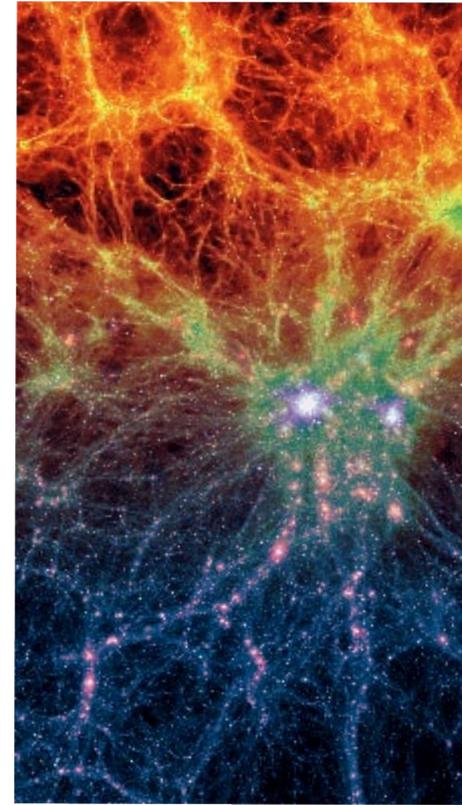
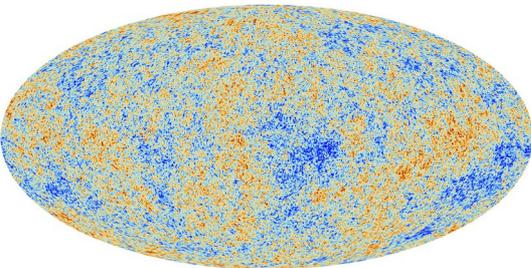
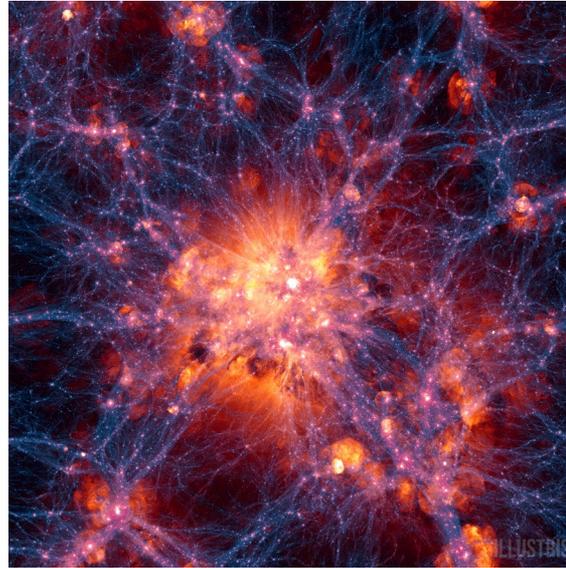
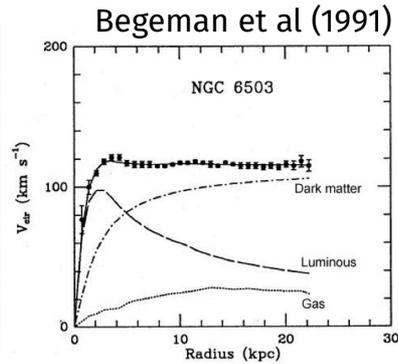


- **Dynamique** : Temps cosmique
- Univers **plus petit** dans le passé
- Plus dense, et chaud : $T \sim (1+z)$.
- Pas de position spatiale privilégiée
- MAIS un temps privilégié



Le Big Bang chaud

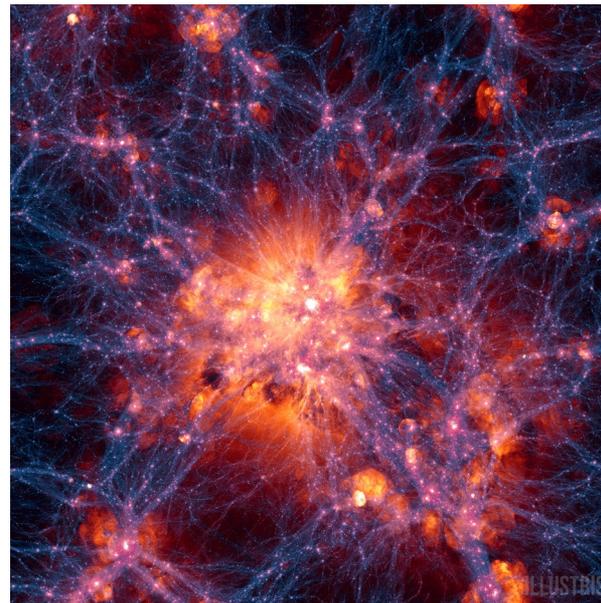
- Modèle prédictif
- Testé et robuste
- Deux grandes inconnues :
 - × Matière sombre



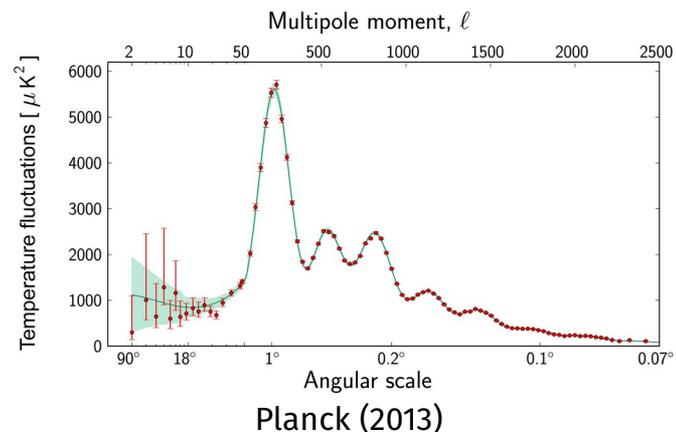
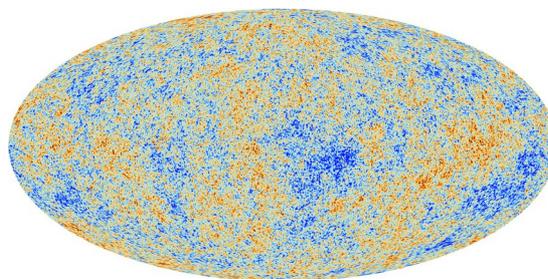
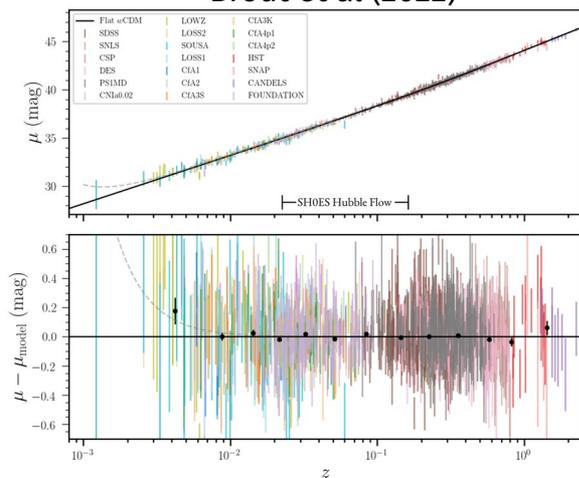
Le Big Bang chaud

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

Constante cosmologique Λ

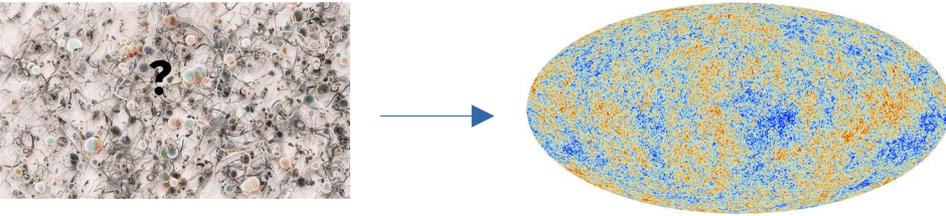


Brout et al (2022)



Pourquoi aller plus loin ?

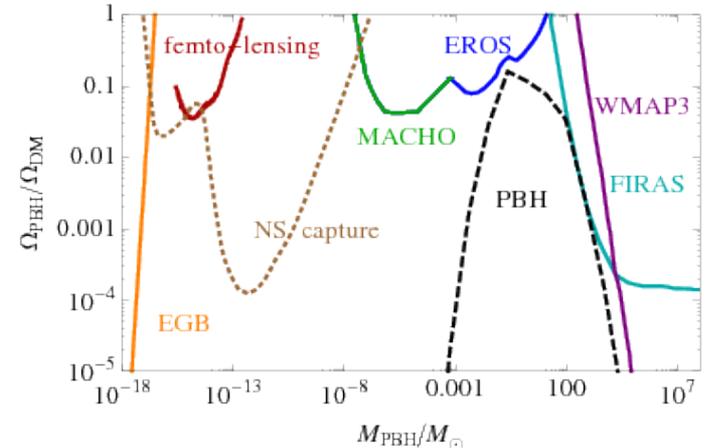
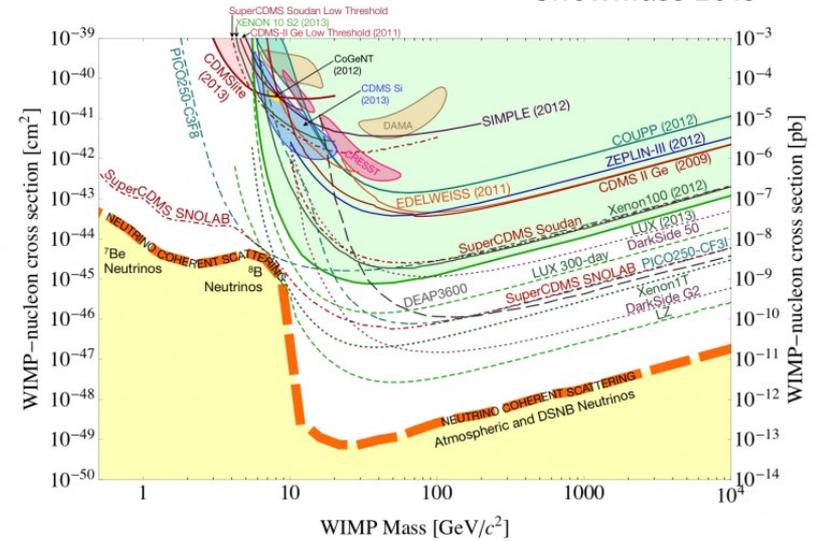
- Que s'est-il passé au début ?



- Nature de la matière sombre :

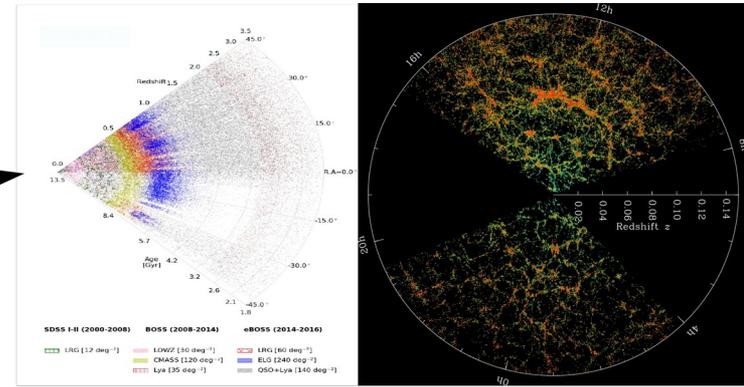
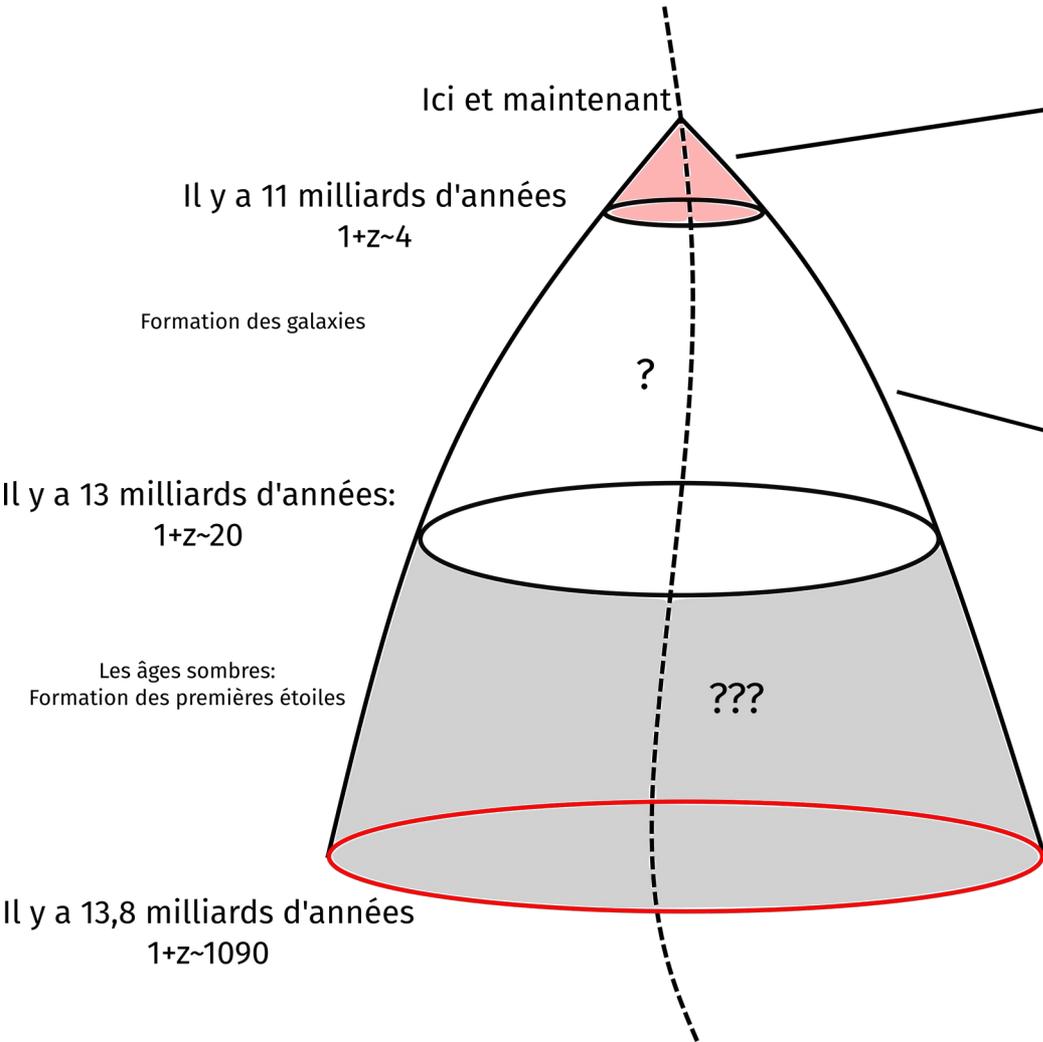
- Nouvelles particules ?
- Petits trous noirs ?
- Modification de la gravitation ?
- Une combinaison ?

Snowmass 2013



Clesse et al (2017)

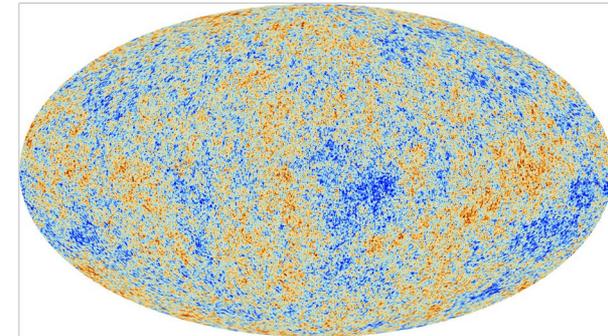
Qu'avons-nous observé ?



Visible en radio



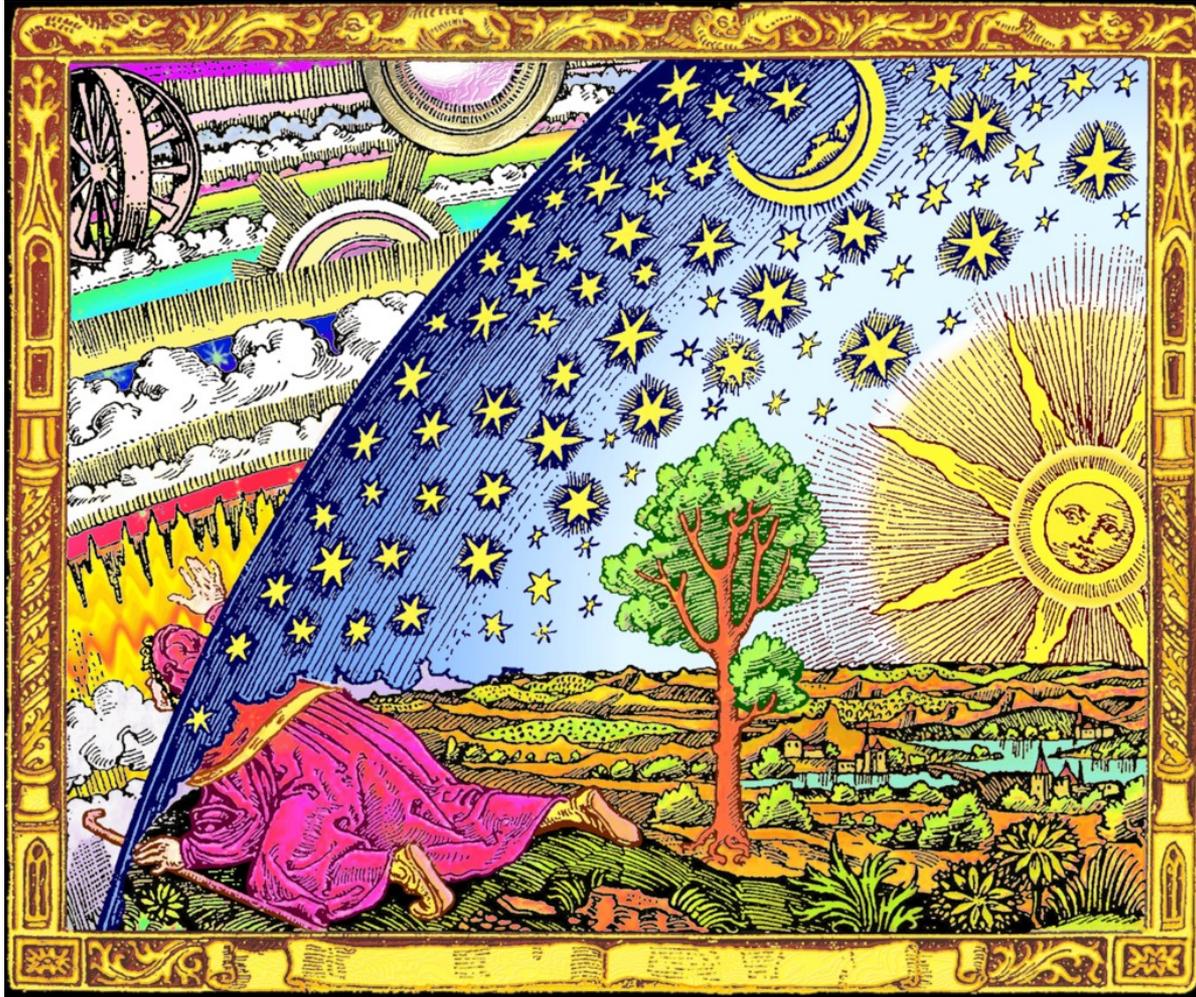
Square Kilometer Array
(Image SKAO)



Emission du fond diffus cosmologique

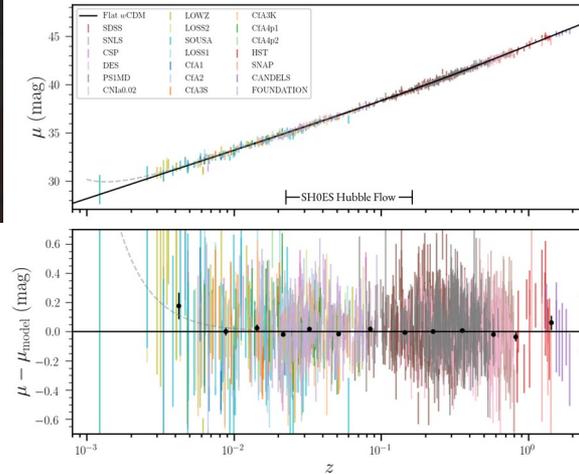
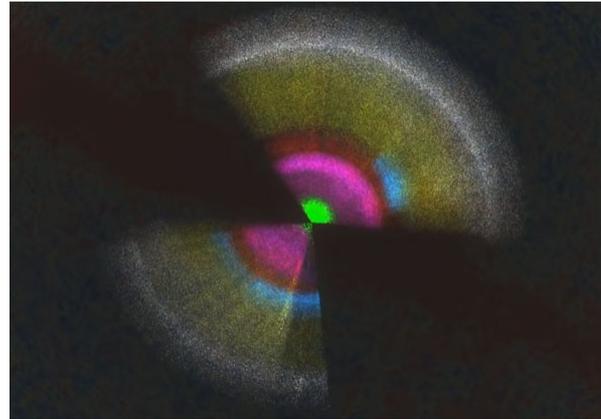
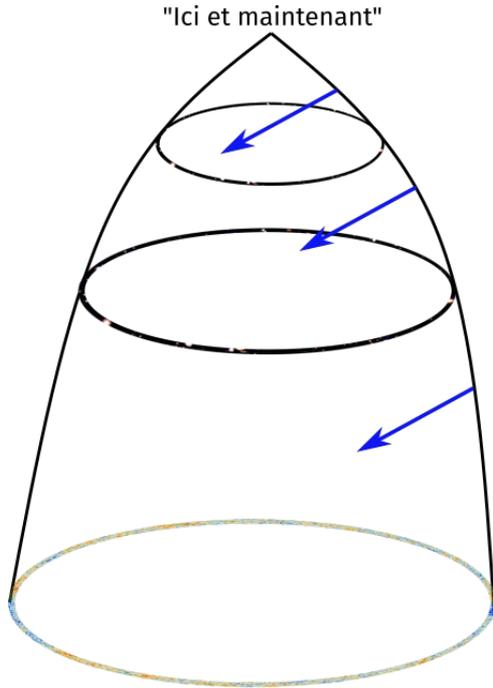
(Image Planck)

Tester le principe cosmologique

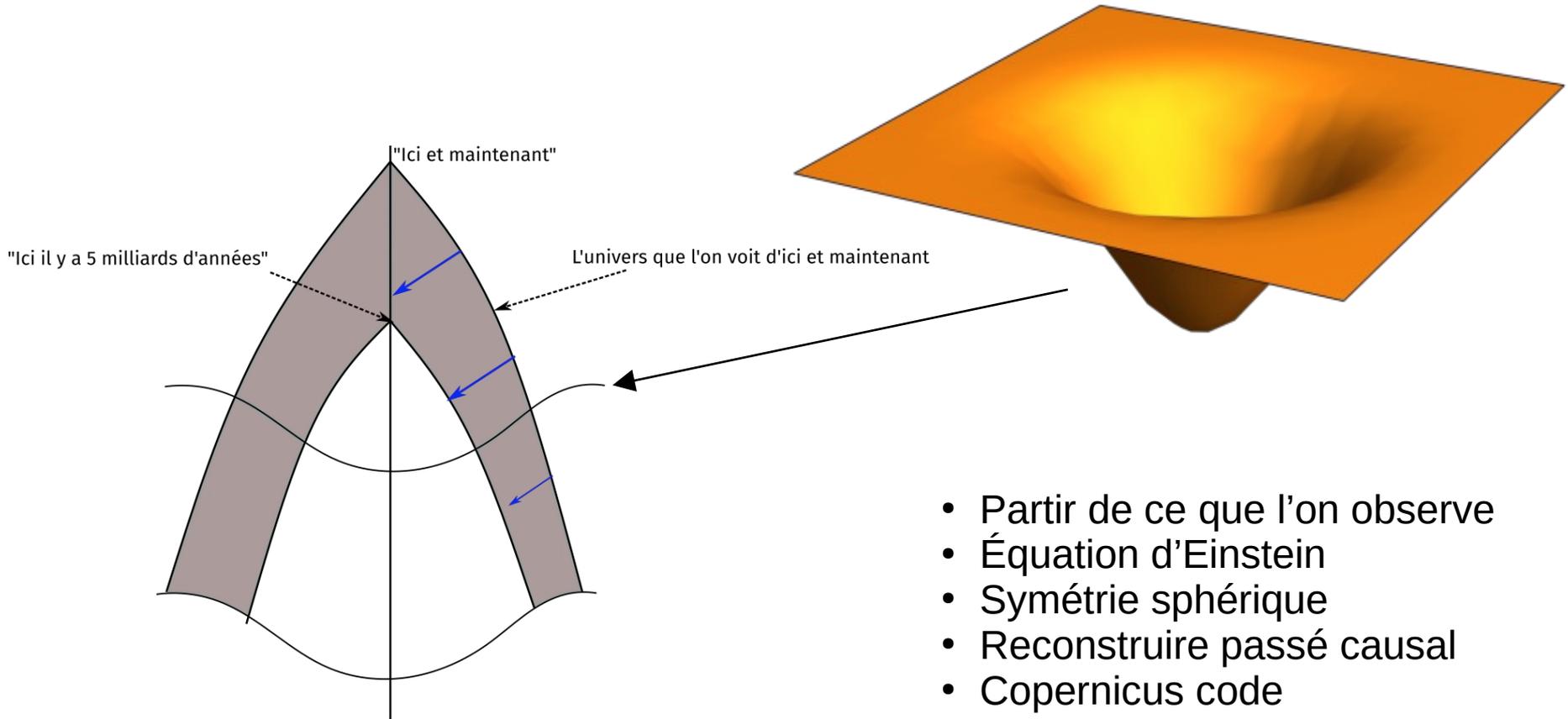


Reconstruire la géométrie

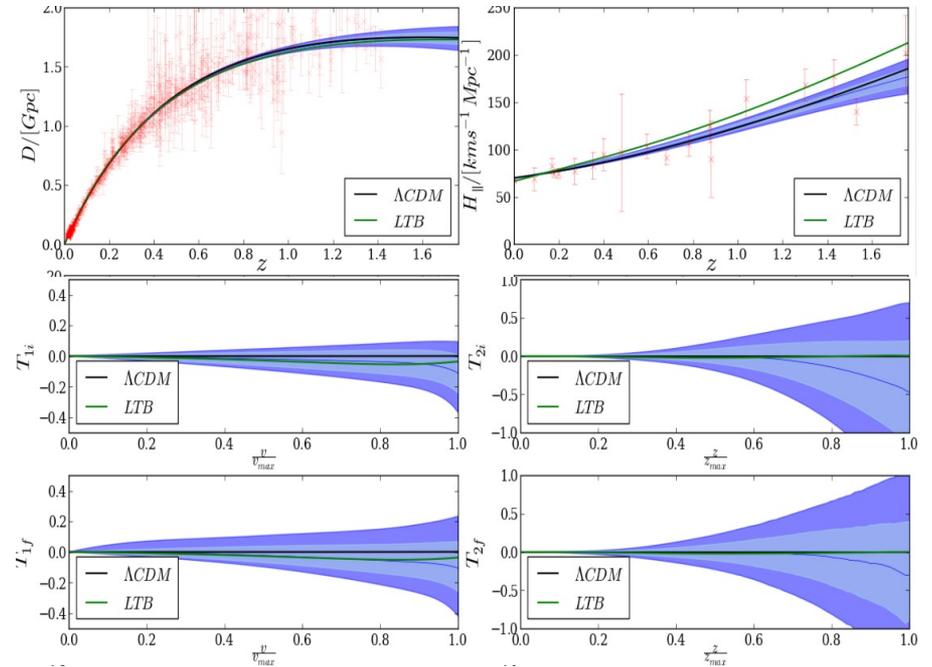
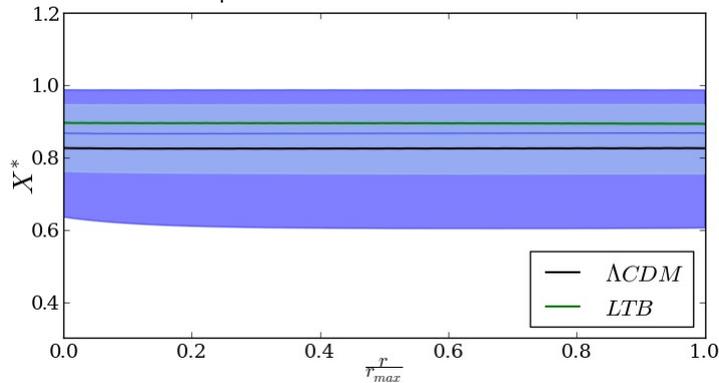
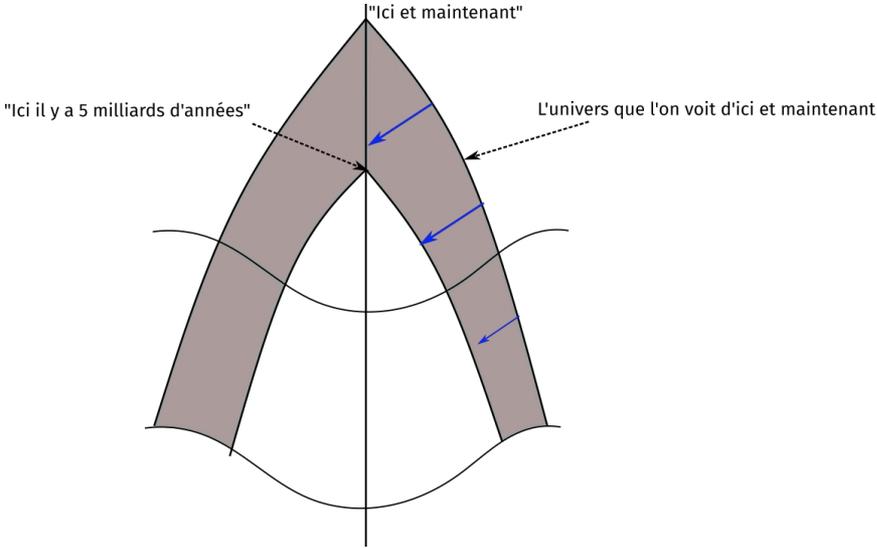
- Géométrie de l'univers?
- À partir uniquement de ce que l'on observe?
- Passé causal



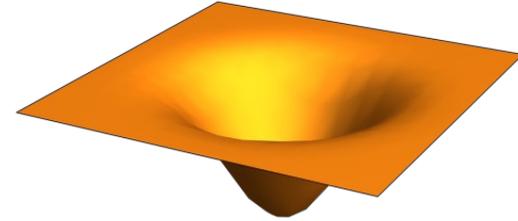
Reconstruire la géométrie



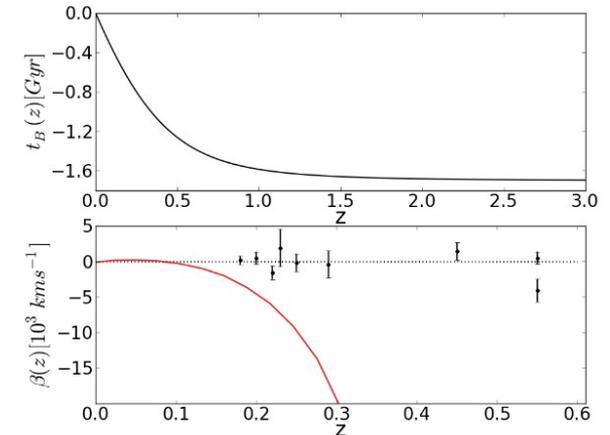
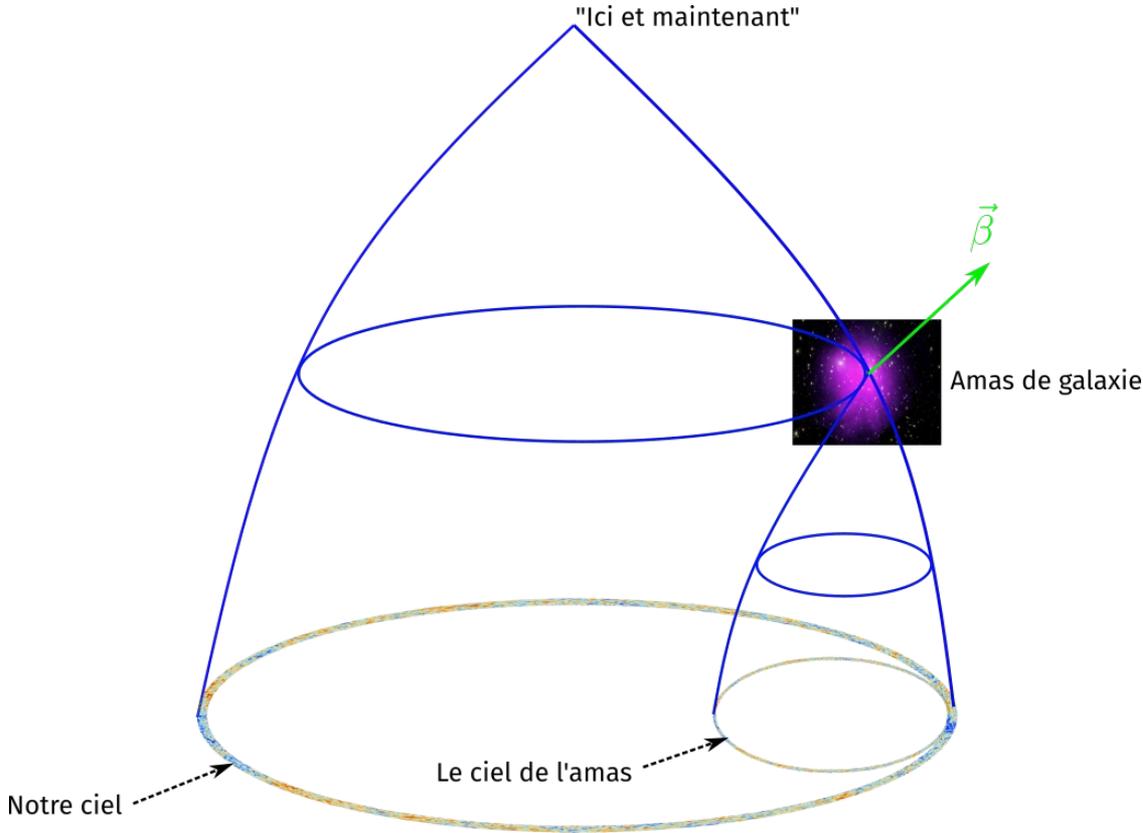
Reconstruire la géométrie



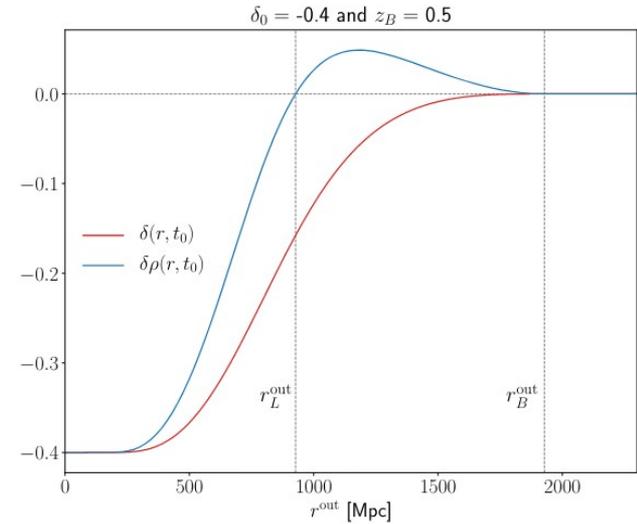
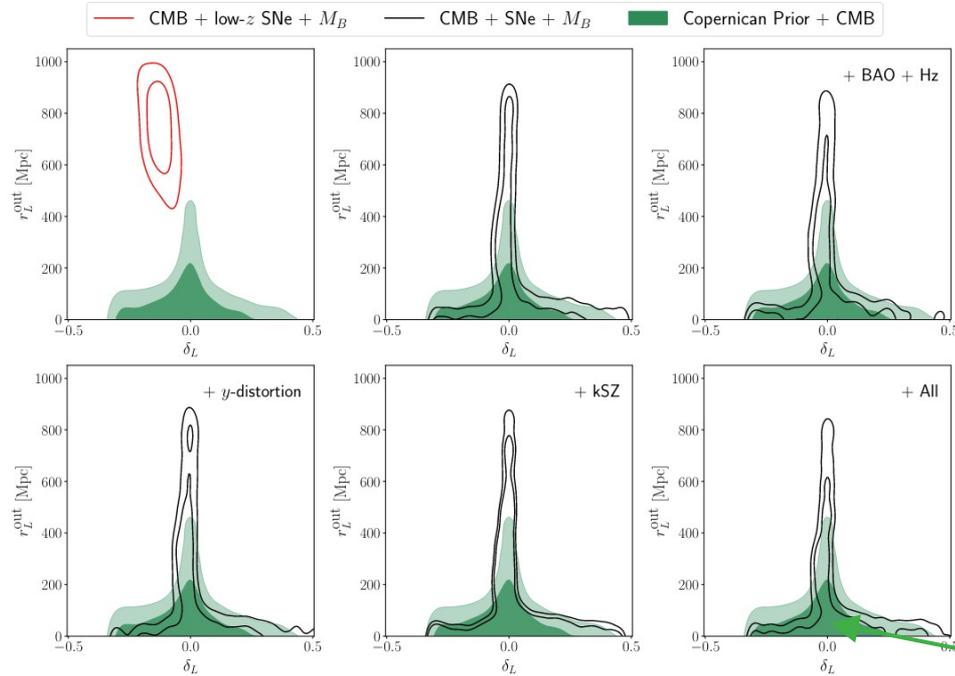
Sommes-nous spéciaux?



- Diffusion de photons
- Distortions du spectre
- Anisotropies excédentaires



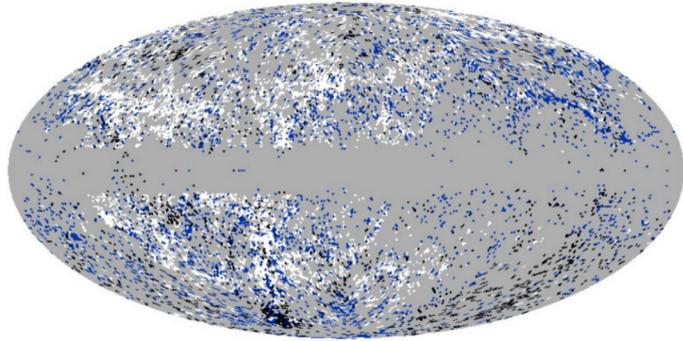
Sommes-nous spéciaux?



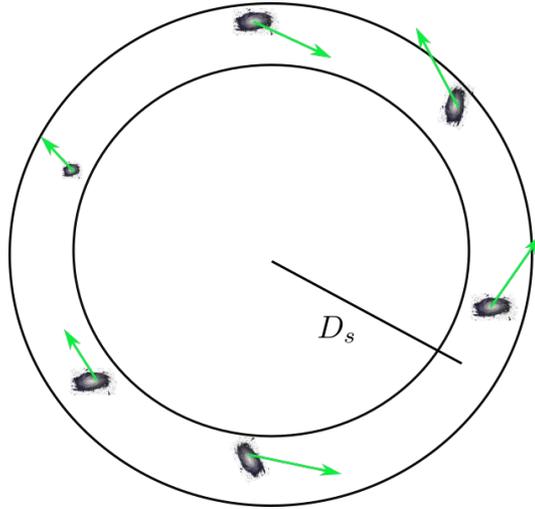
arxiv:2107.02296

Paramètres permis dans modèle homogène

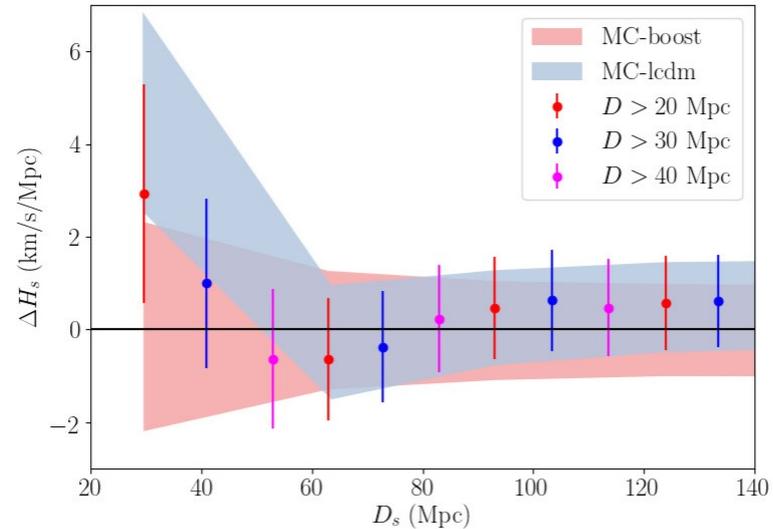
Et dans l'Univers local?



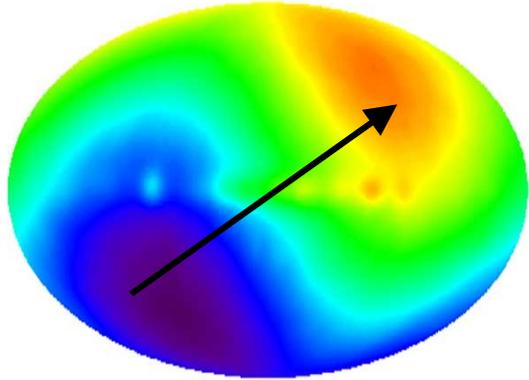
CosmicFlows 3 radiogalaxies



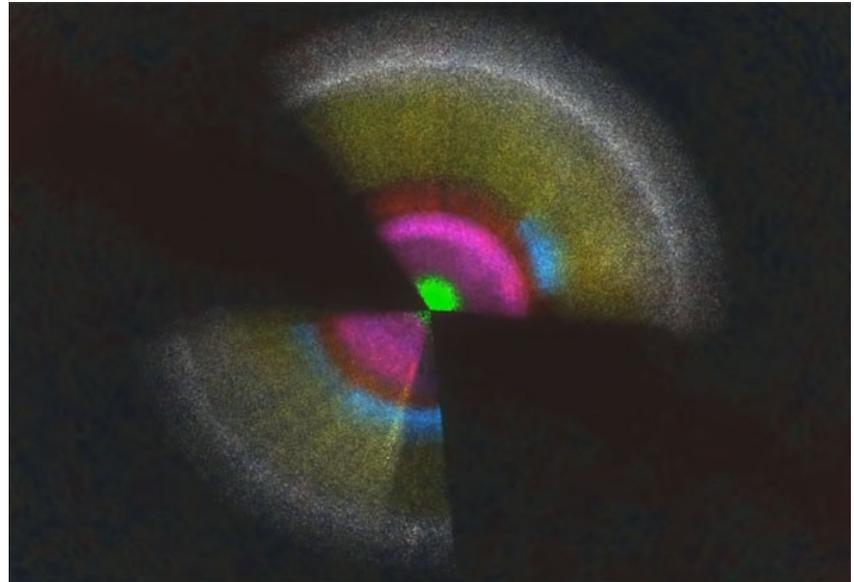
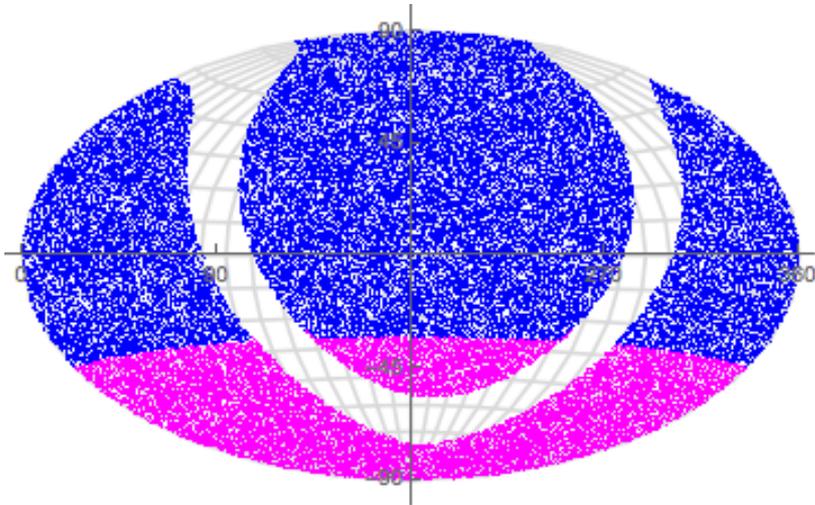
- Champ de vitesse dans l'univers local
- Loi de Hubble moyenne dans deux référentiels



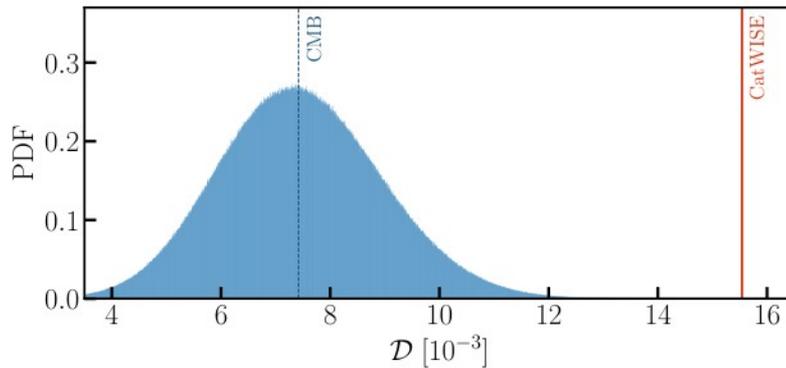
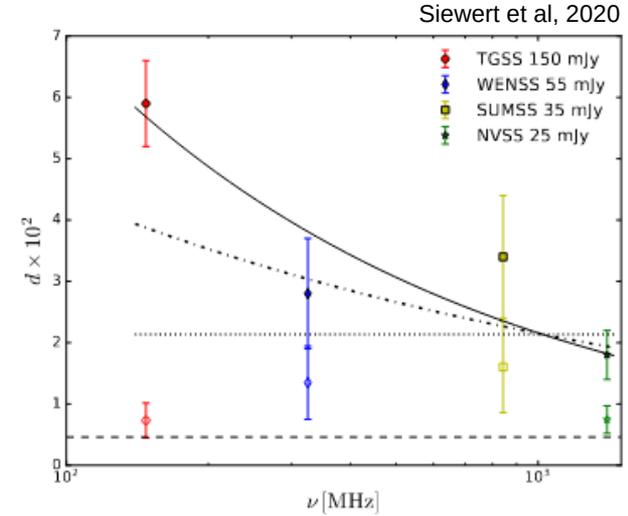
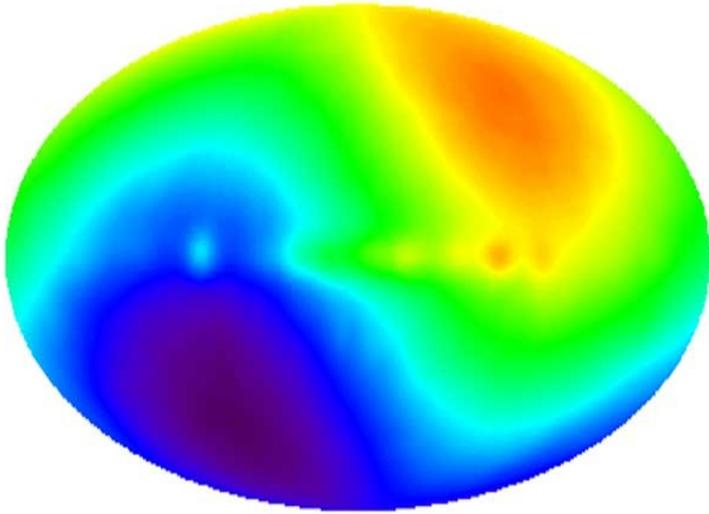
Une anomalie dipolaire?



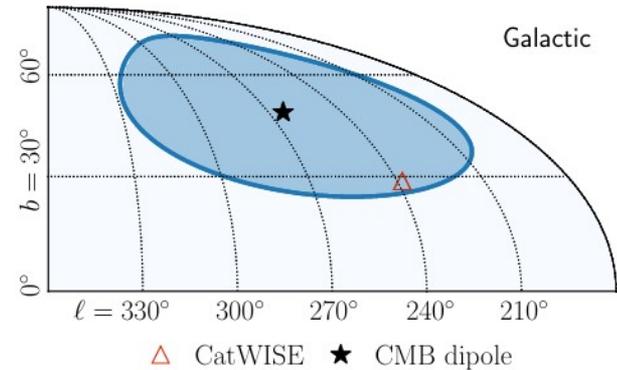
- Dipole = mouvement/ Univers Homogène et isotrope
 - Est-ce le cas?
 - Si oui: même dipole dans distrib des galaxies



Une anomalie dipolaire?

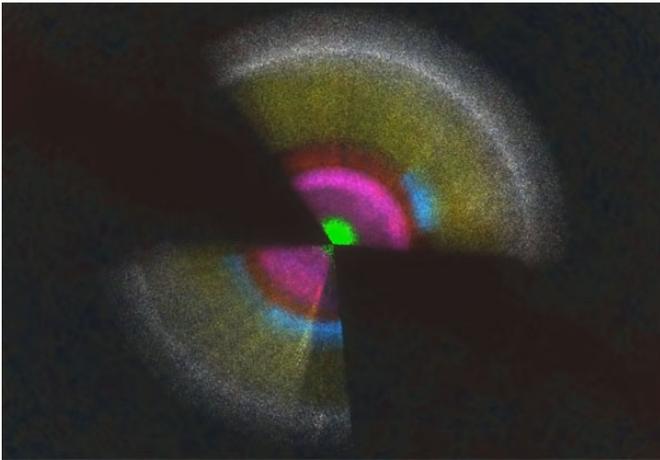
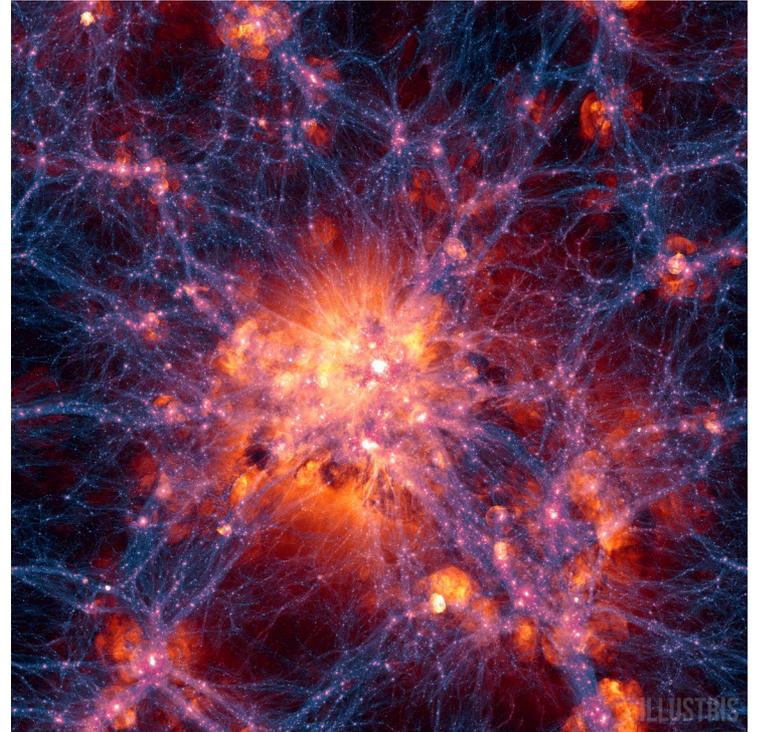
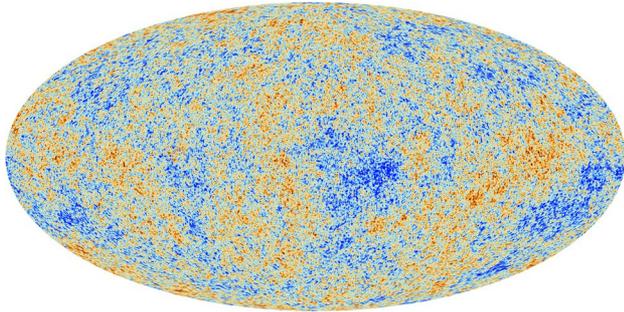


Secrest et al, 2020



Conclusion

- Principe copernicien est un pilier de la cosmologie relativiste
- Prédit (correctement) un univers dynamique au pris d'un relativisme spatial
- Testé à de multiples échelles: plus qu'un principe métaphysique
- Violations très faibles (mais fondamentale!) possibles



- “Nouveau” questionnement: exobiologie

