

Chapitre 11

Cosmologie

Cosmologie

Faits observationnels:

- Le ciel est noir la nuit !
- La distribution des galaxies est uniforme, sur de grandes échelles angulaires
- On observe un rayonnement fossile à $T=2,73$ K, isotrope, avec de faibles oscillations $\Delta T/T \sim 10^{-5}$
- Le spectre du rayonnement de corps noir cosmologique est en parfait accord avec la théorie (du Big Bang)
- La quasi-totalité des galaxies s'éloigne de nous
- Les étoiles les plus vieilles ont un âge de 13,2 milliards d'années

Cosmologie

Le ciel est noir: paradoxe d'Olber

Si l'univers était infini, statique, et contenait une infinité d'étoiles, le ciel devrait être lumineux la nuit.

Ce n'est pas le cas donc l'une des hypothèses, au moins, est fausse.



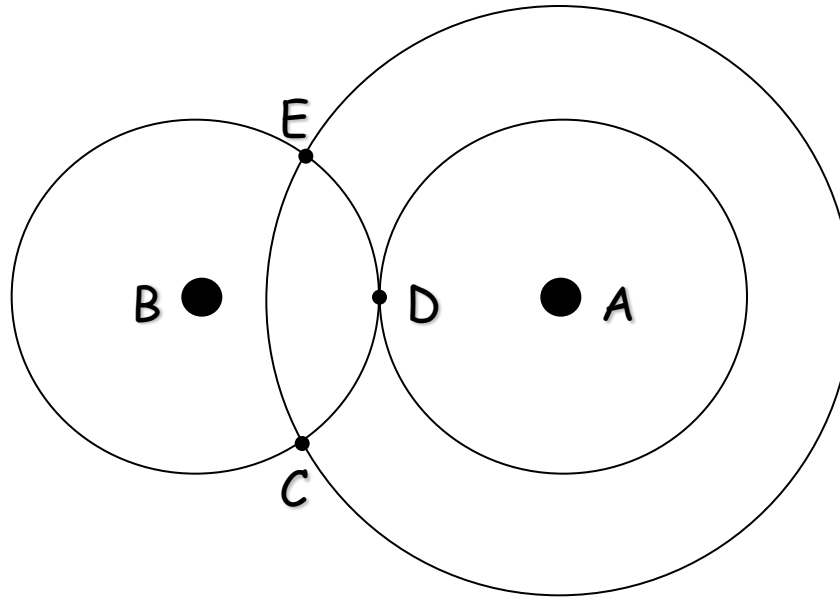
Cosmologie

Le ciel est noir: paradoxe d'Olber

- L'Univers n'est pas statique
- Le décalage vers le rouge fait « sortir » une partie du rayonnement du domaine visible
- Les étoiles ne sont pas en nombre infini
- Les étoiles ont un temps de vie fini

Cosmologie

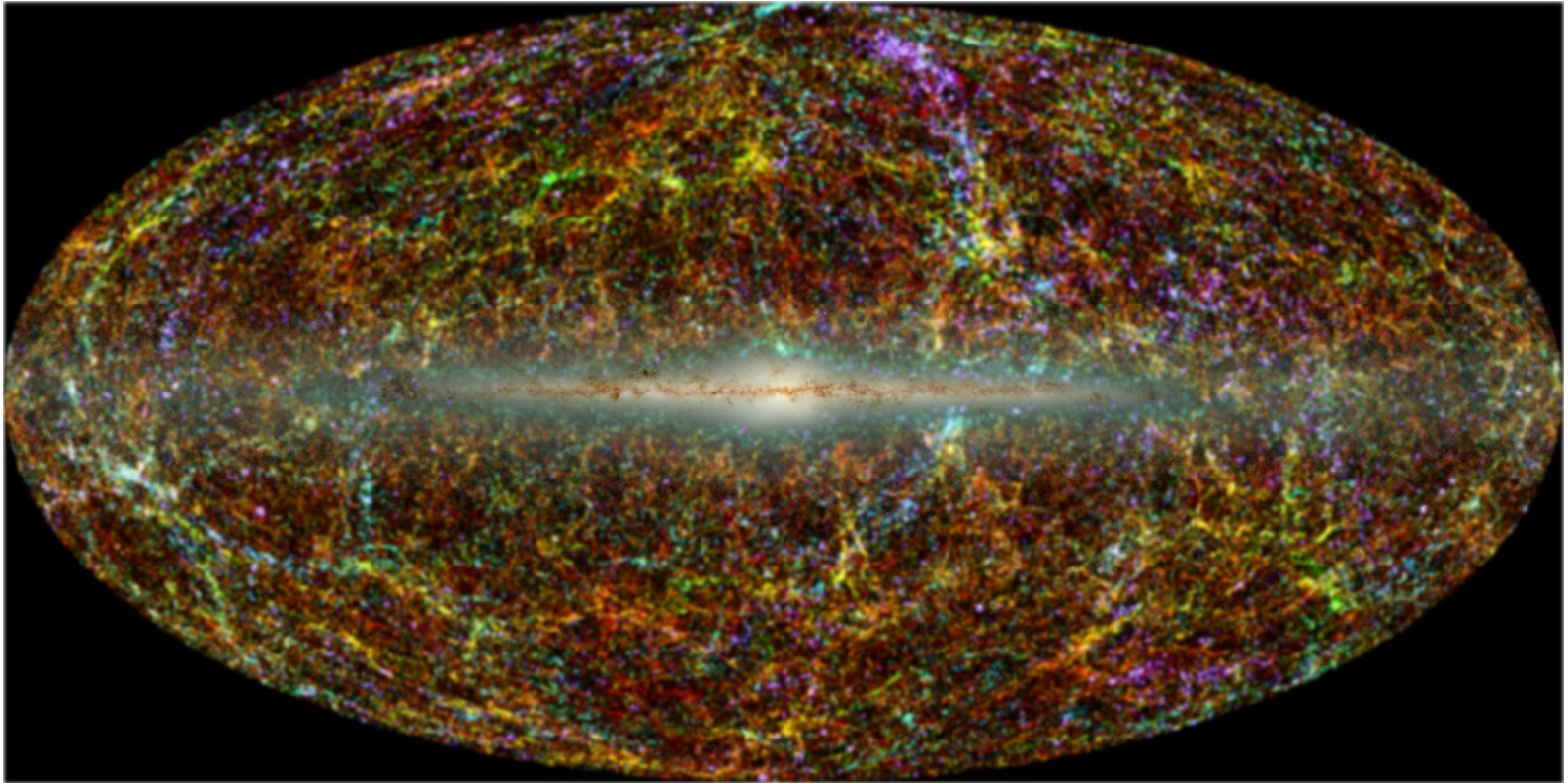
L'Univers est isotrope en tout point, et de ce fait, homogène:
c'est le principe cosmologique



Si l'Univers est isotrope autour de B, alors les densités de matière en C et D sont les mêmes. L'isotropie autour de A impose par ailleurs que les densités en C et E sont les mêmes, donc les densités en C, D et E sont les mêmes et l'Univers est homogène.

Cosmologie

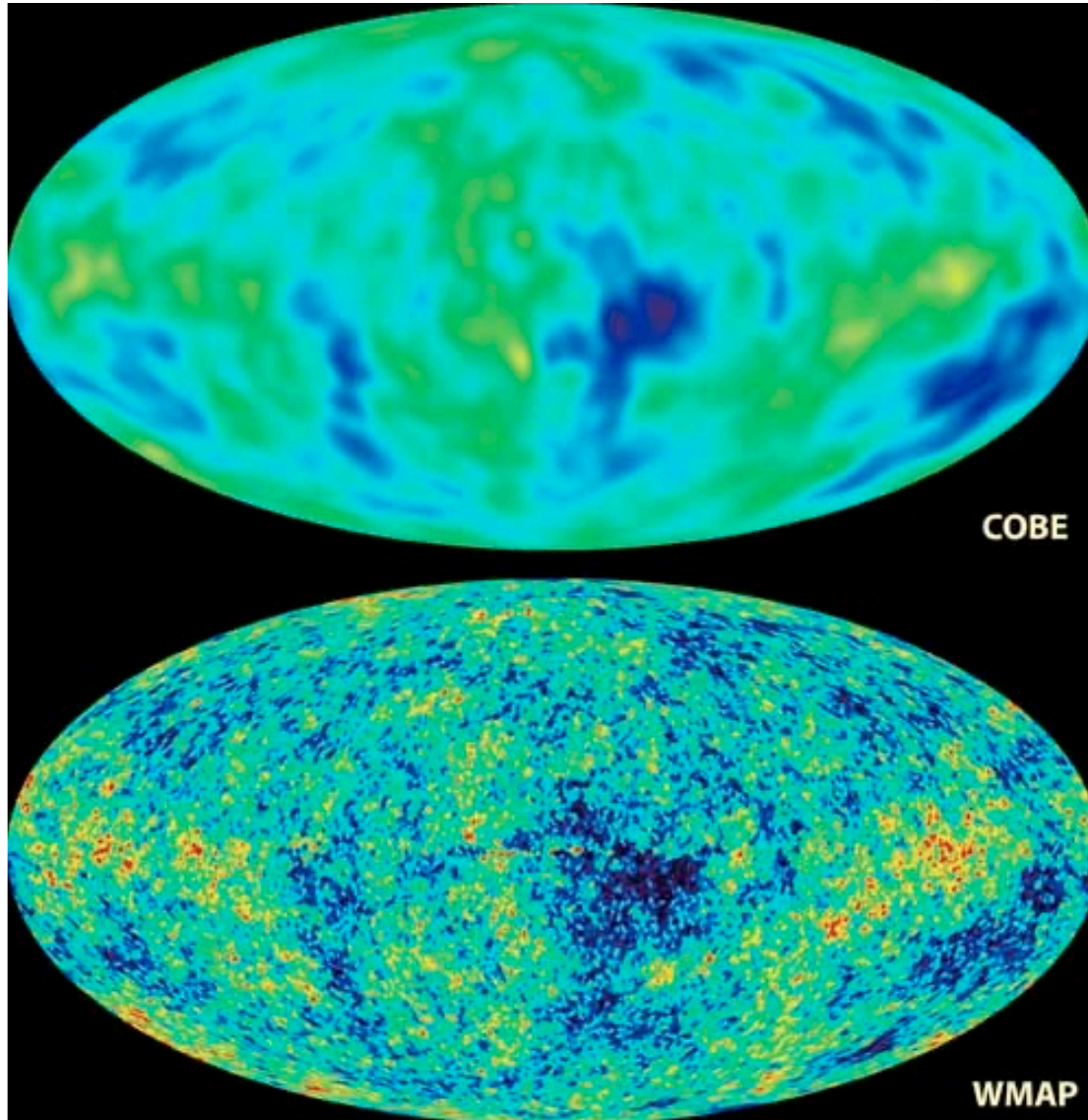
Illustration de l'homogénéité



Carte infrarouge du ciel montrant une distribution uniforme des galaxies sur des échelles de plusieurs degrés. Sur des échelles inférieures, la distribution n'est pas du tout uniforme.

Fond de rayonnement cosmologique

Inhomogénéités à petite échelle



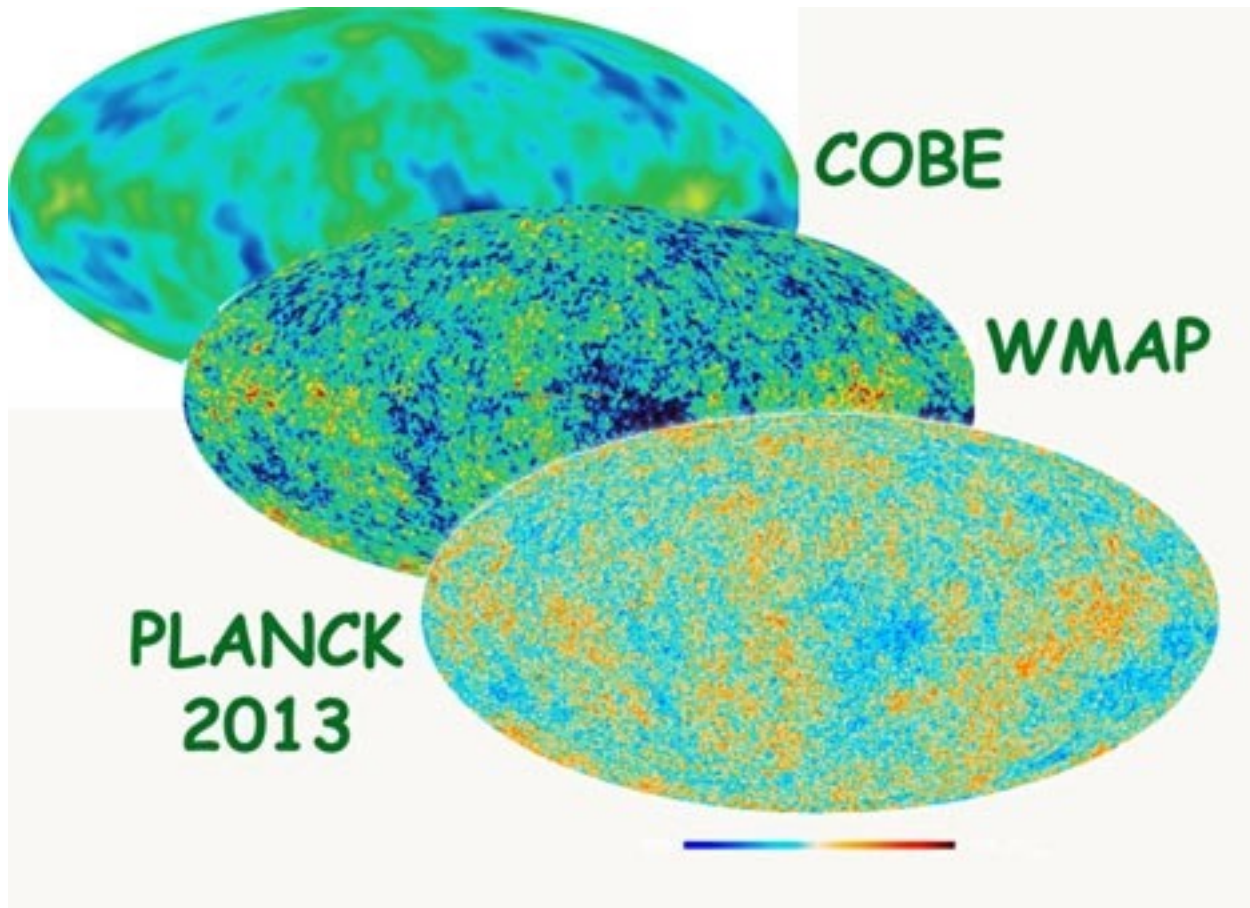
Wilkinson Microwave
Anisotropy Probe,
Spergel et al. 2006, 2009

Mesure des fluctuations
de température

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

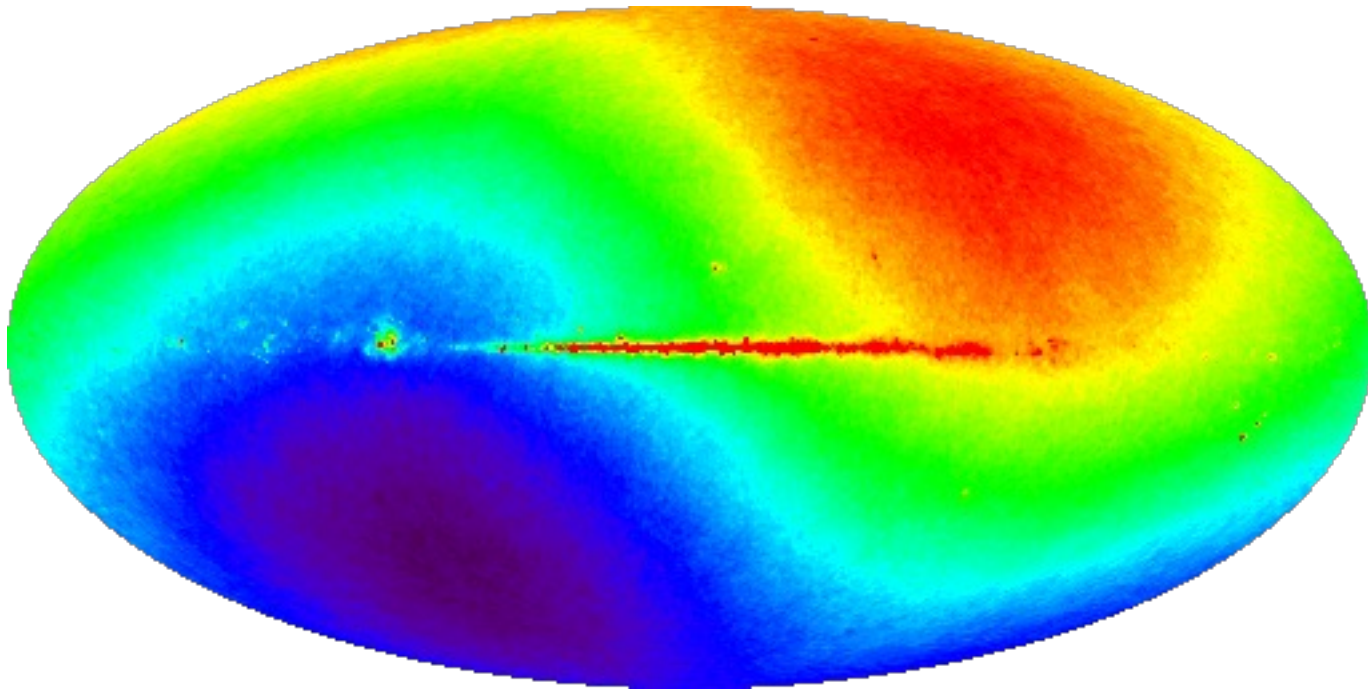
Rayonnement résiduel
quand l'Univers avait
seulement 380000 ans
après le Big-Bang

Fond de rayonnement cosmologique



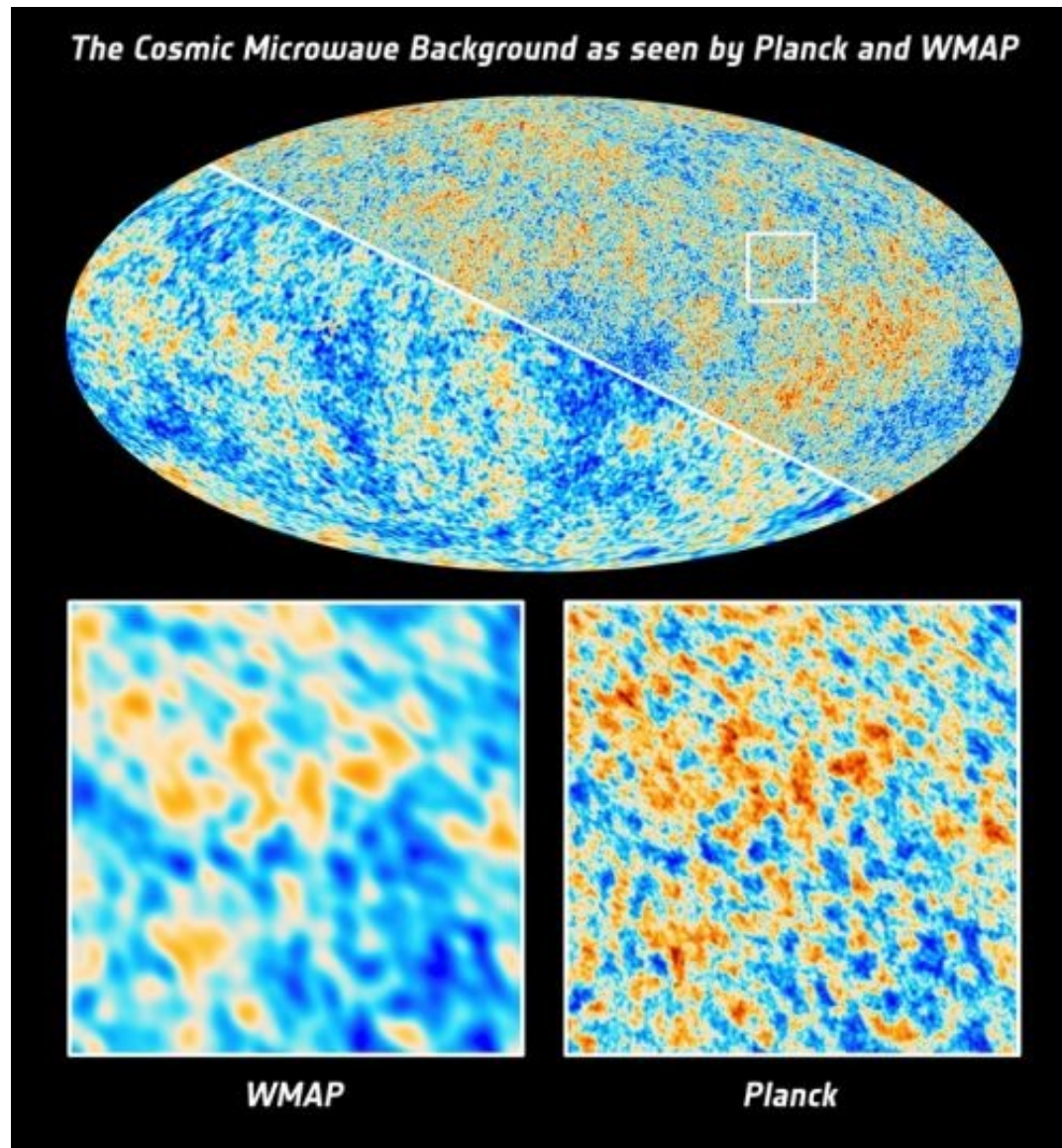
Carte du satellite Planck

Dipôle cosmologique reflétant le mouvement de la Voie Lactée



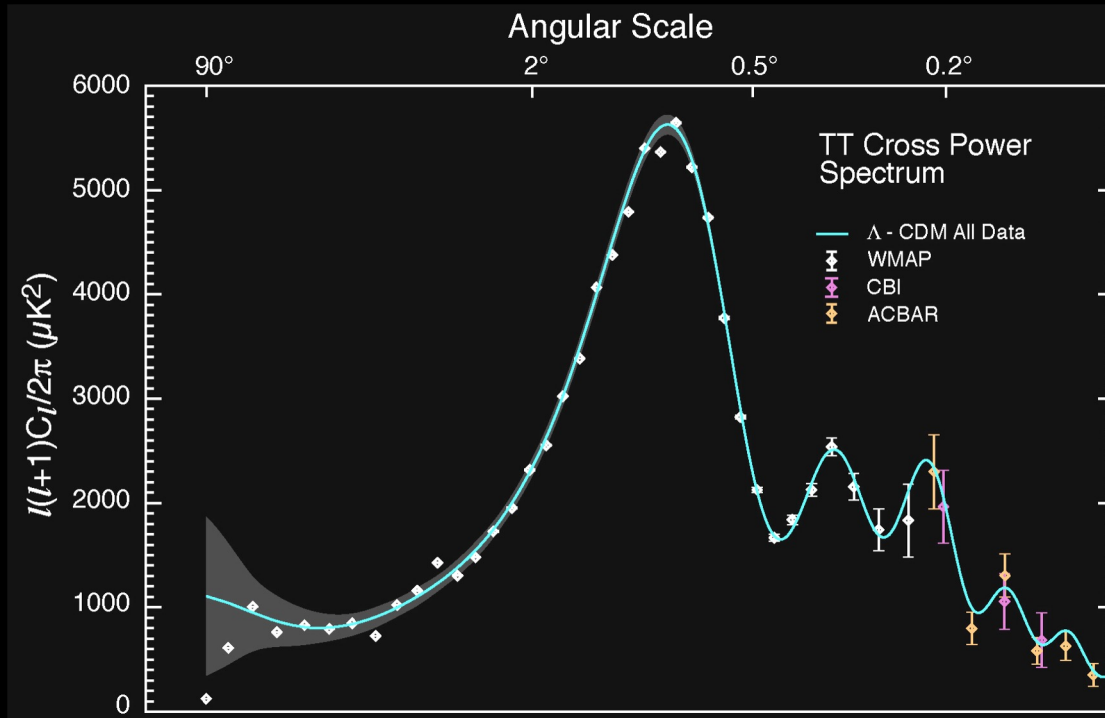
Carte du satellite Planck

Fond de rayonnement cosmologique



Cosmologie

Inhomogénéités aux petites échelles

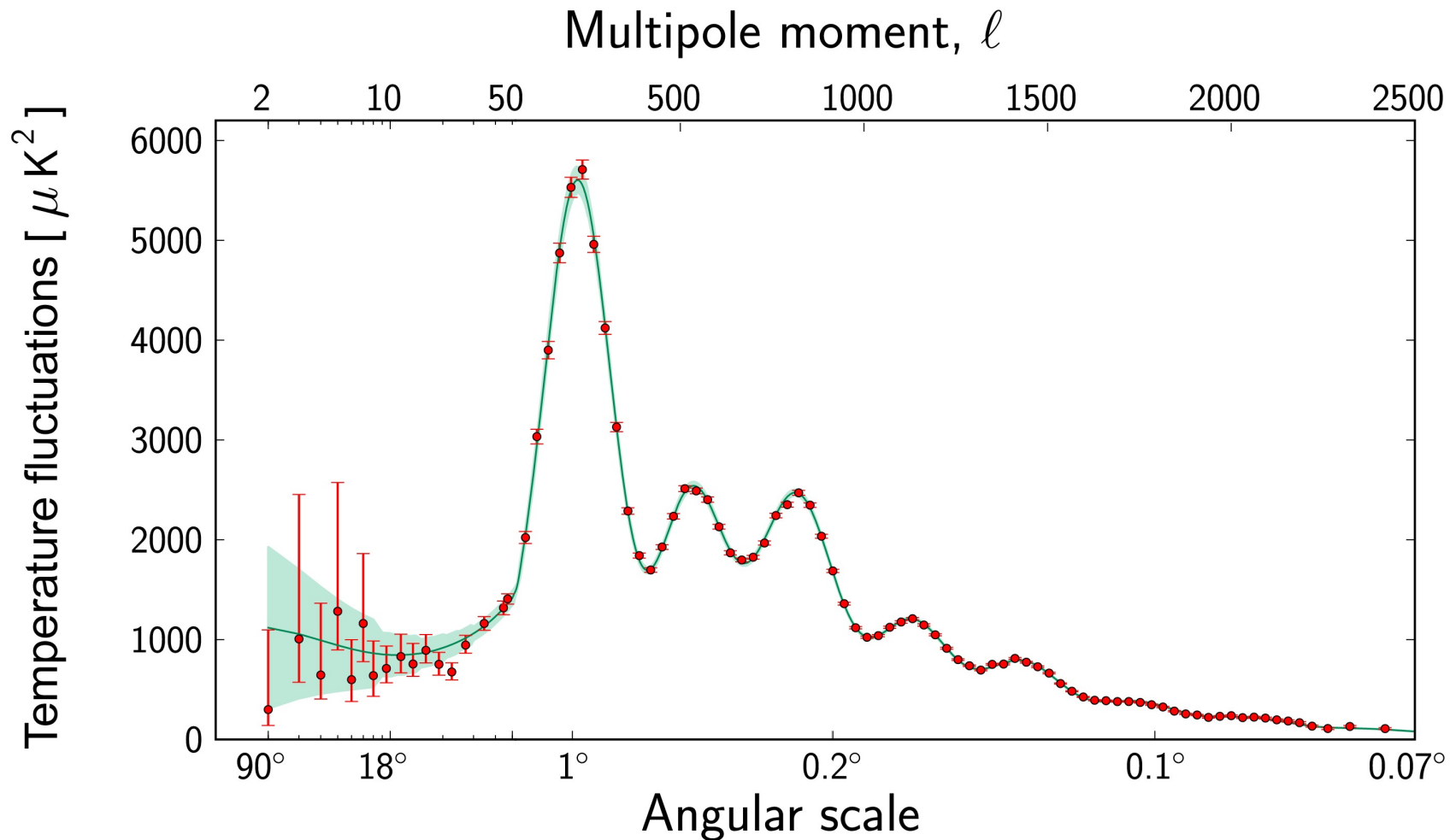


Wilkinson Microwave
Anisotropy Probe,
(Spergel et al. 2008)

Oscillation « acoustiques »
Du fond cosmologique

Le Big-bang est le seul modèle
à expliquer les oscillations
observées

Derniers résultats de Planck (2016)



Cosmologie

L'Univers est en expansion: Loi de Hubble-Lemaître, 1929



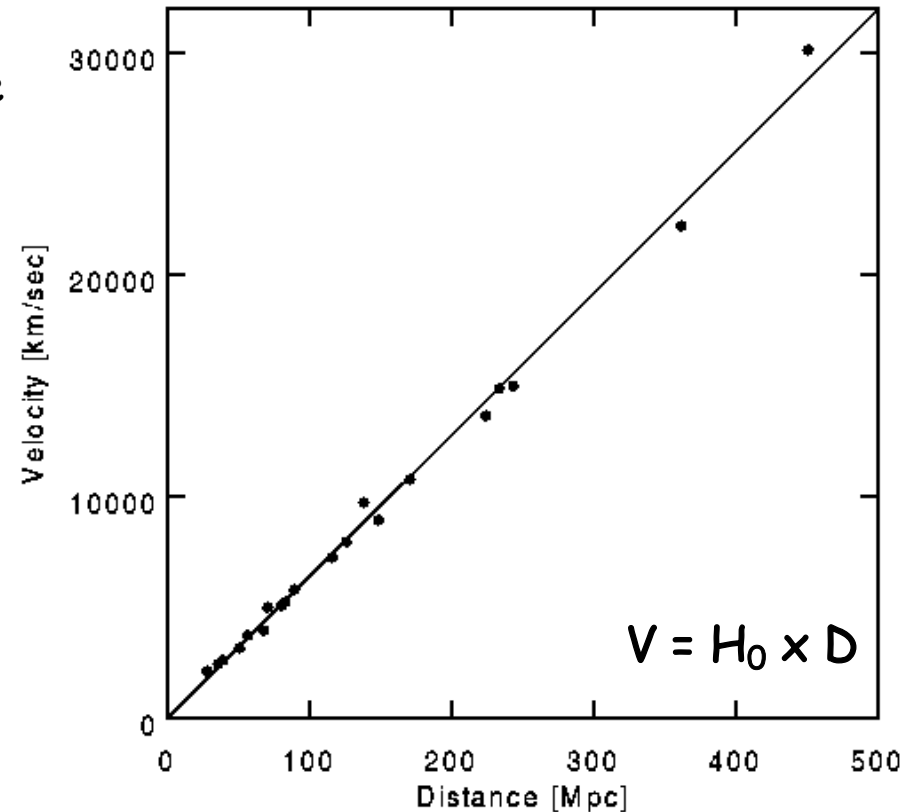
Edwin Hubble (1889-1953)

Loi linéaire entre la distance et la vitesse de fuite des galaxies



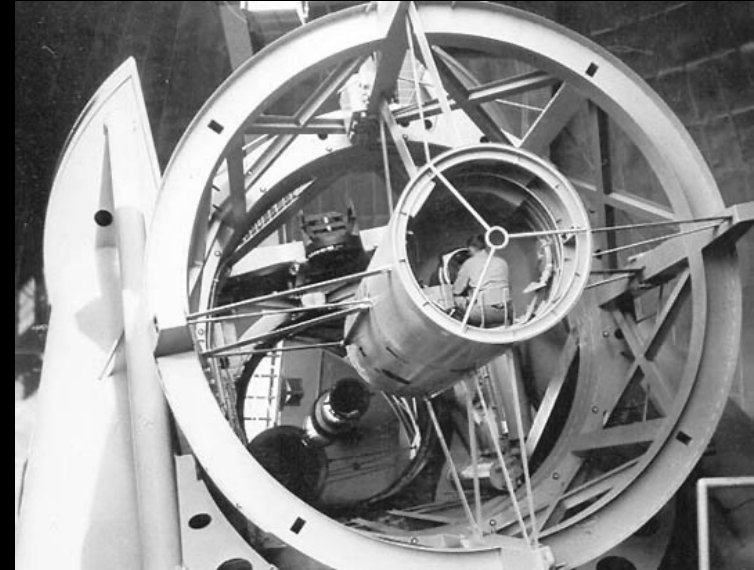
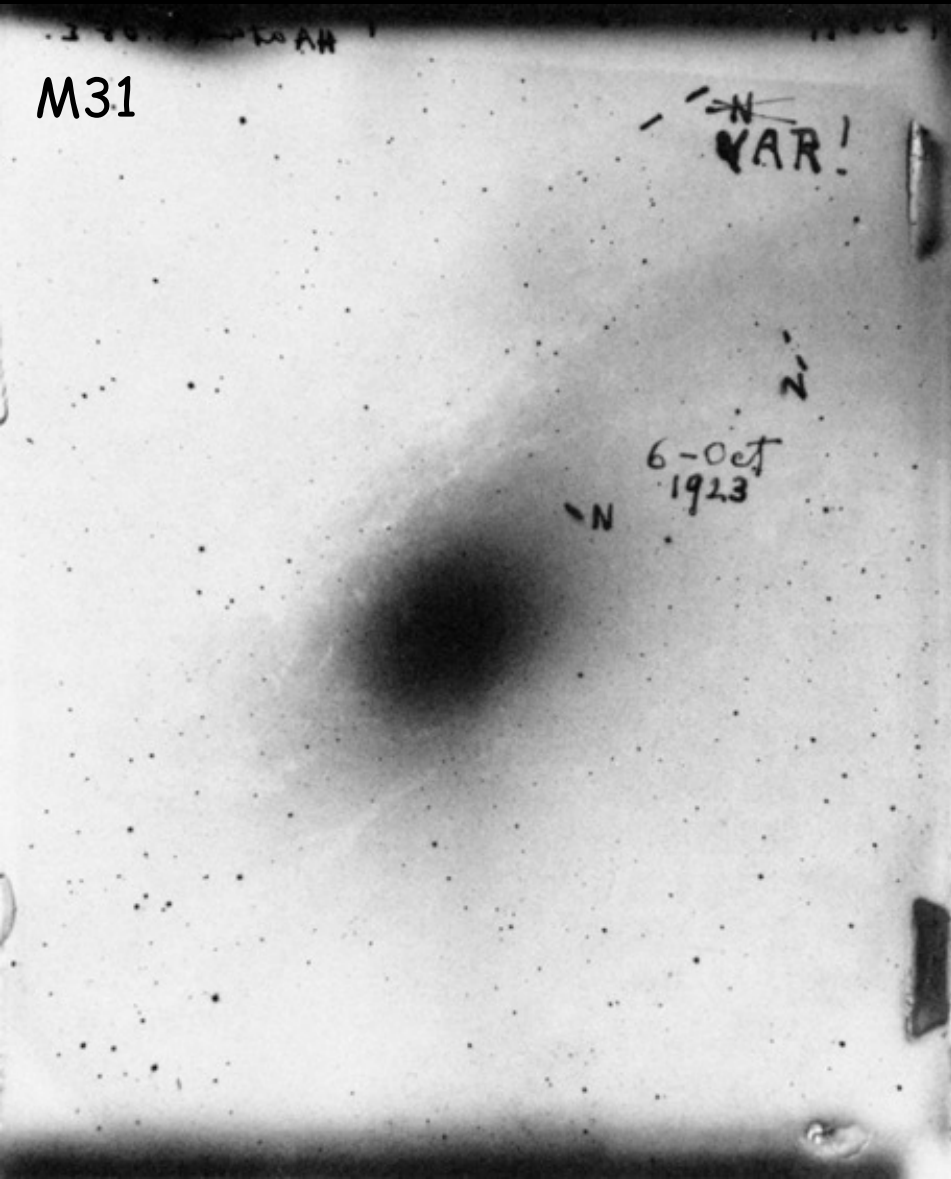
Henrietta Leavitt (1868-1921)

Relation
Période-luminosité
Pour les Chépheides

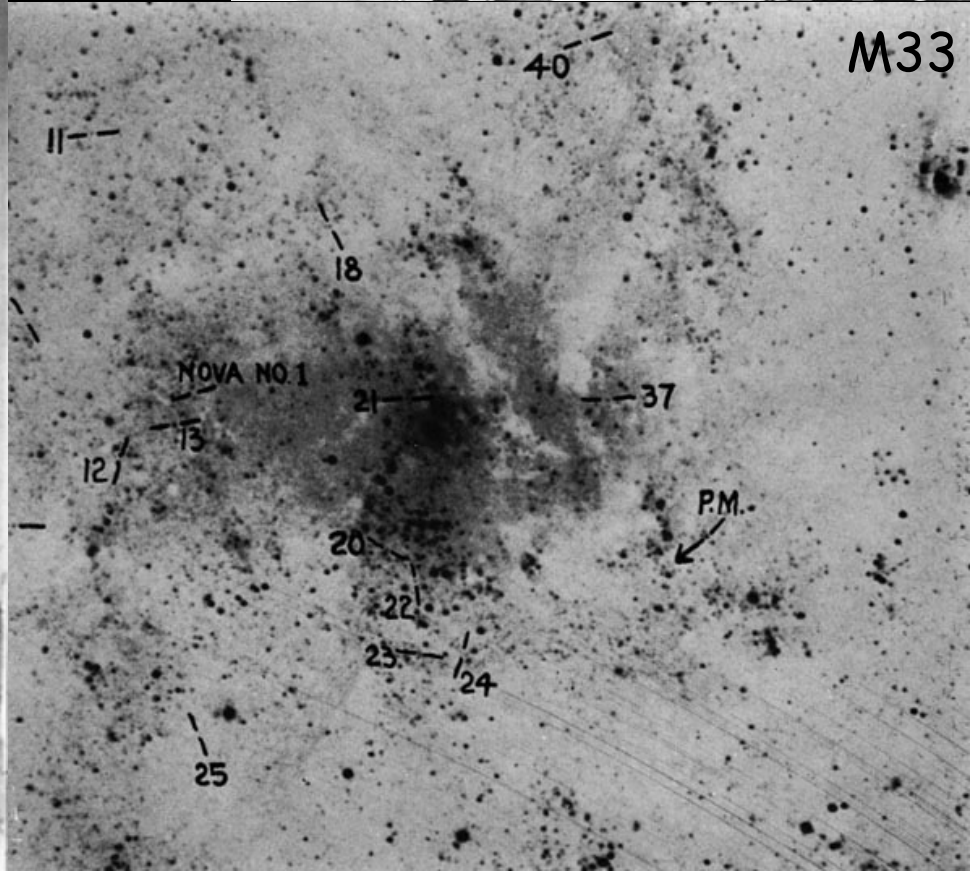


Etoiles Cépheides dans M31 et M33 (plaques photos prises par Hubble)

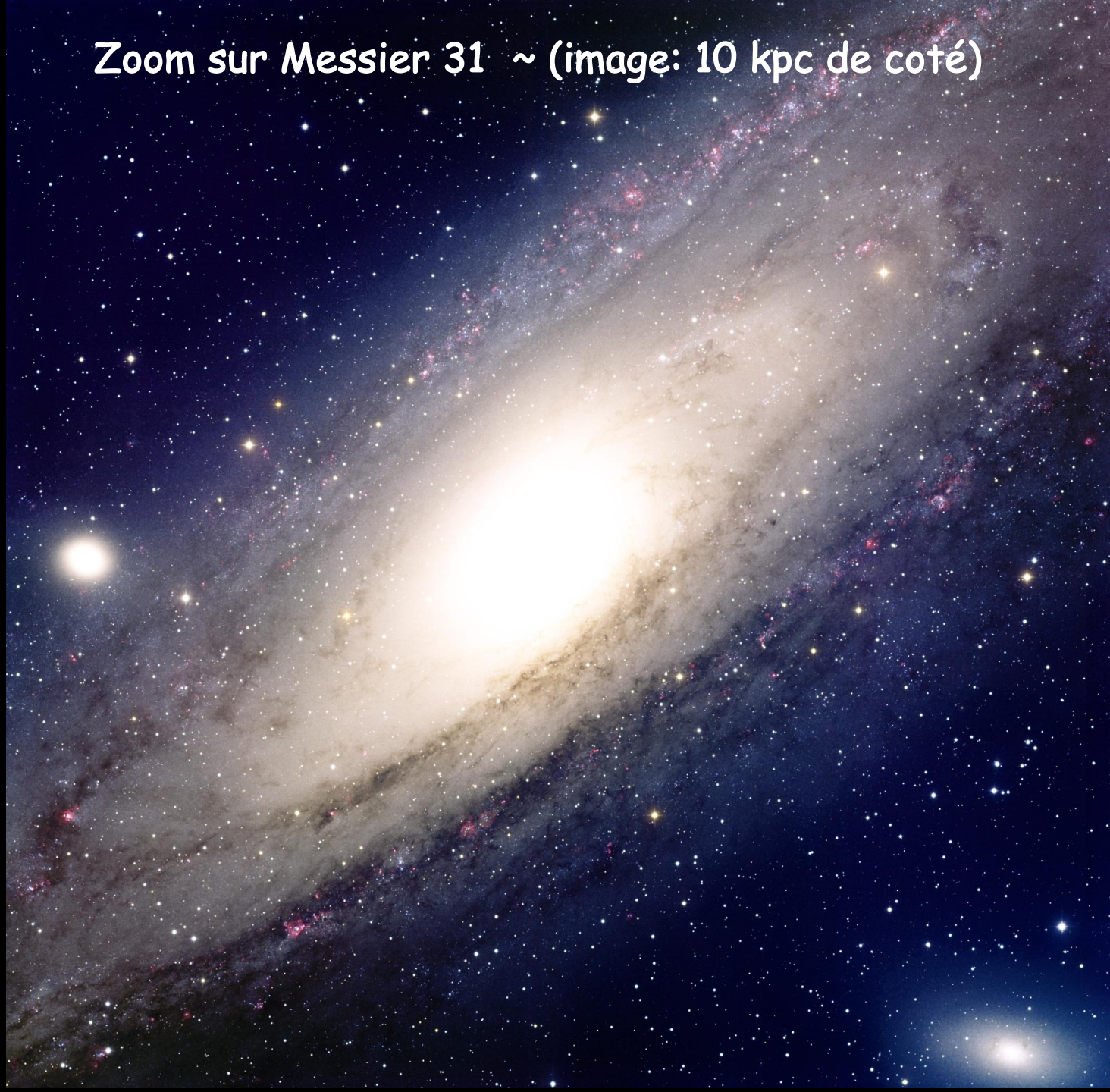
M31



M33

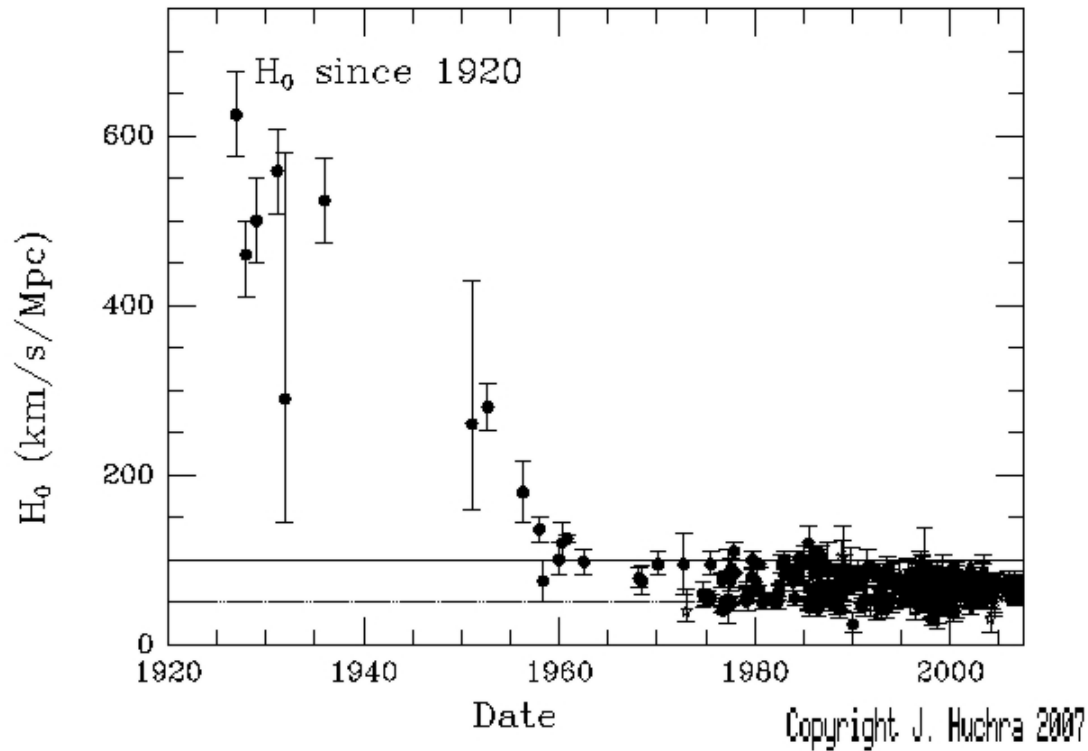


Zoom sur Messier 31 ~ (image: 10 kpc de côté)



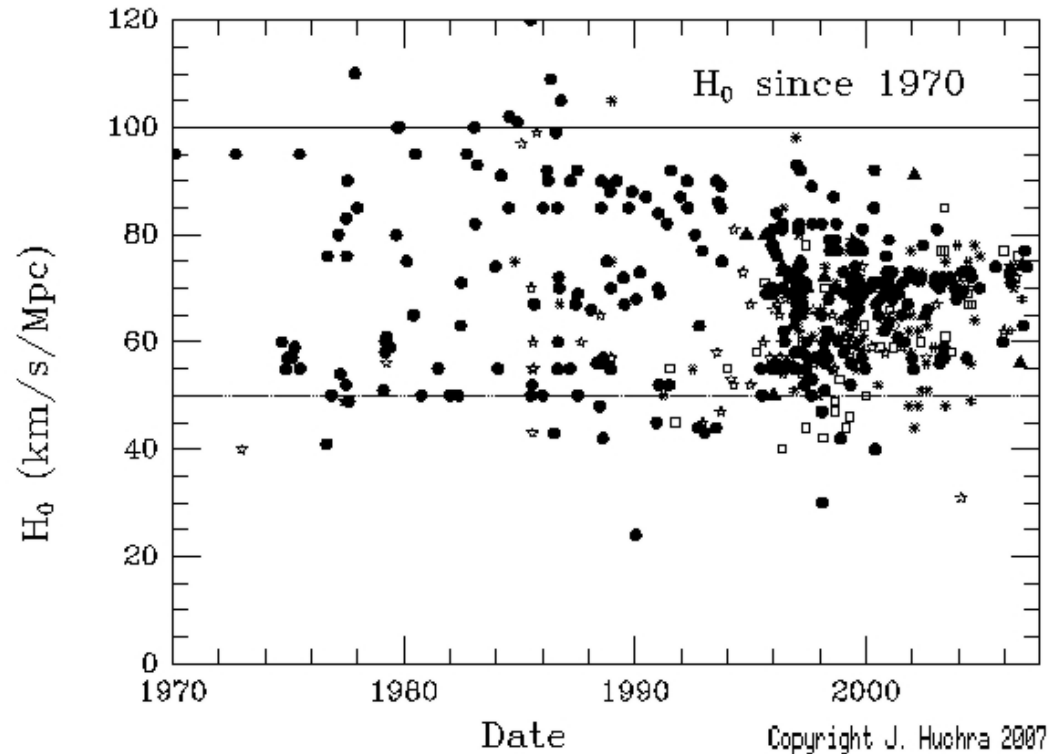
Cosmologie

Détermination problématique de H_0 et donc des distances !



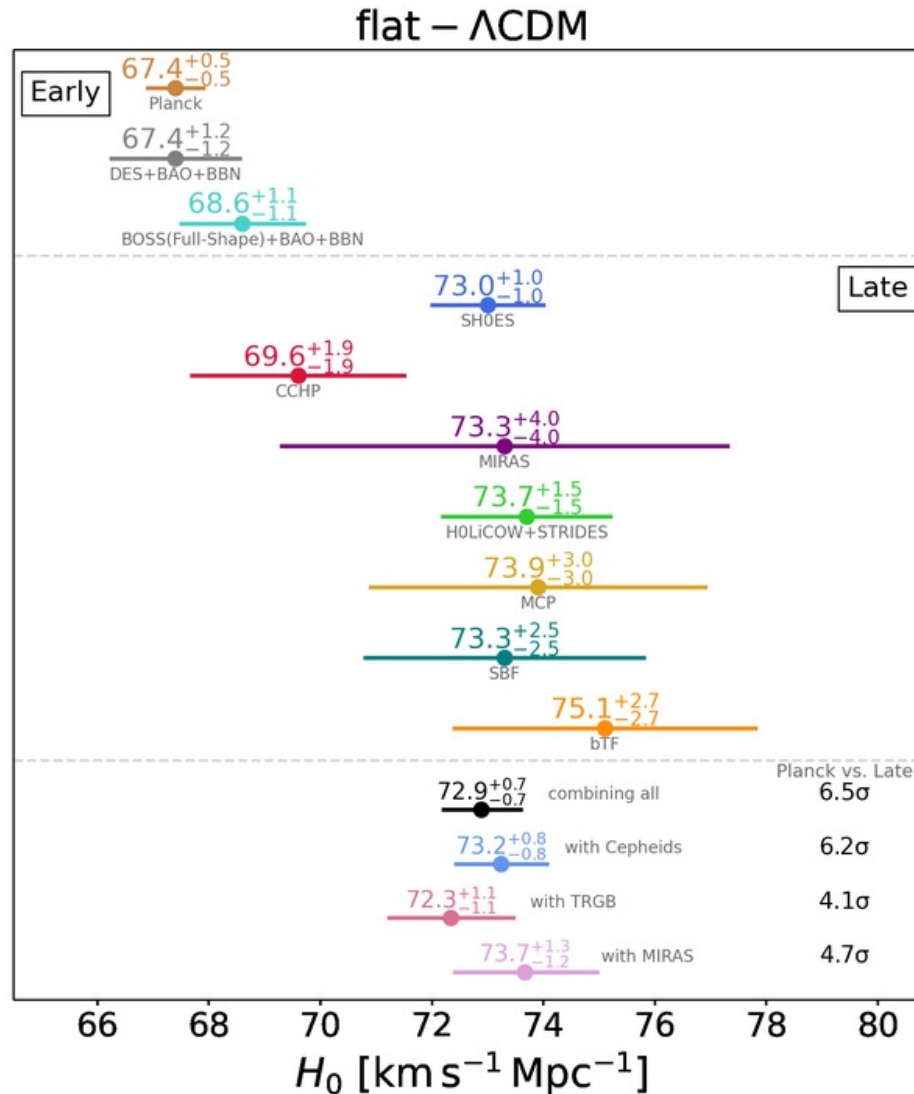
Cosmologie

Détermination problématique de H_0 et donc des distances !



Cosmologie

Situation actuelle: la « tension de Hubble »



Cosmologie

Un Univers en expansion



Signification de la constant de Hubble (H_0)

Cosmologie

Signification de la constante Hubble

H_0 a la dimension de l'inverse d'un temps: [km/s/Mpc]:

$1/H_0$ est le temps mis pour que tous les points de l'Univers soient en contact:

$$\begin{aligned} 1/H_0 &= 9,78 \times 10^9 \text{ ans, si } H_0 = 100 \text{ km/s/Mpc} \\ &= 13,7 \times 10^9 \text{ ans, si } H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc} \end{aligned}$$

De la même façon, « la taille de l'Univers » est donnée par

$$c = H_0 \times R_H$$

$$R_H = c/H_0 = 2997 \text{ Mpc (si } H_0 = 100)$$

$$R_H = c/H_0 = 4262 \text{ Mpc (si } H_0 = 72)$$

Cosmologie

Signification de la constante Hubble

Univers (simplifié) sphérique en expansion radiale. Si x est le rayon à un temps t_0 choisi tel qu'il corresponde à l'époque actuelle, on exprime le rayon de la sphère à un temps t comme

$$r(t) = a(t) X$$

où $a(t)$ est le facteur d'expansion.

Par définition $a(t_0)=1$ puisque $r(t_0)=x$

Les coordonnées X sont les coordonnées comobiles.

Cosmologie

Signification de la constante Hubble

Quand le temps s'écoule les coordonnées changent et la vitesse d'un point s'obtient en dérivant par rapport au temps:

$$V(r,t) = \frac{d}{dt} r(t) = \frac{da}{dt} X$$

$$V(r,t) = \frac{\dot{a}}{a} r(t) = H(t) r(t)$$

La vitesse de fuite vue par un observateur « actuel », dans son temps t_0 est simplement

$$V(r,t_0) = H(t_0) r$$

$$V = H_0 D$$

Décalage vers le rouge cosmologique

Cosmologie

Expansion et décalage vers le rouge

Les photons sont aussi affectés par l'expansion de l'Univers:

Considérons deux observateurs séparés de dr , ce qui correspond à une différence de vitesse $dv = H(t) dr$

Cette différence de vitesse se traduit par un décalage vers le rouge

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = dz \qquad \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{dV}{c} = \frac{H(t)}{c} dr$$

$$\text{Et } dt = dr/c$$

$$\frac{H(t)}{c} dr = H(t) dt$$

Cosmologie

Expansion et décalage vers le rouge

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{H(t)}{c} dr = H(t) dt$$

D'après la définition de $H(t)$, on a aussi $H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$

$$\text{D'où } \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{da}{a} \quad \text{et donc} \quad \lambda_e(a) = K a$$

A $t=t_0$ (ou $a=1$) la longueur d'onde du photon est celle observée sur Terre, donc

$$\lambda_e(a) = a \times \lambda_{obs}$$

$$\lambda_{obs} = \lambda_e(1) = 1 \times \lambda_e(1)$$

$$\text{d'où } \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_e} = \frac{1}{a} = 1 + z$$

Cosmologie

Expansion et décalage vers le rouge

Relation fondamentale en cosmologie

$$\lambda_{obs} = (1 + z) \lambda_e$$

Cosmologie

Conversion des redshifts en distances fait intervenir la relativité générale

Distance **diamètre angulaire**: $D_A(z) = \sqrt{\frac{\pi R^2}{\omega}}$

Distance **luminosité**: $D_L(z) = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$

R: rayon physique de l'objet

ω : angle solide sous-tendu par l'objet

L: luminosité

F: flux reçu par l'observateur

Les deux distances ne sont pas égales !

$$D_L(z) = (1+z)^2 \times D_A(z)$$

Cosmologie

Densité et devenir de l'Univers

Pour un système lié $E_T < 0$

Pour une particule de masse m située à une distance R du reste de l'univers

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{R}$$

$$H_0^2 R^2 = \frac{2GM}{R}$$

Si la densité de l'Univers est constante on obtient

$$H_0^2 R^2 = \frac{2G}{R} \times \frac{4}{3}\pi R^3 \rho \quad \Rightarrow \quad \rho_{crit} = \frac{3}{8} \times \frac{H_0^2}{G\pi} \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3$$

Cosmologie

L'avenir de l'Univers dépend de son contenu

Si $\rho > \rho_{\text{crit}}$ l'Univers va se contracter -> « big crunch »

Si $\rho = \rho_{\text{crit}}$ l'Univers est en expansion infinie

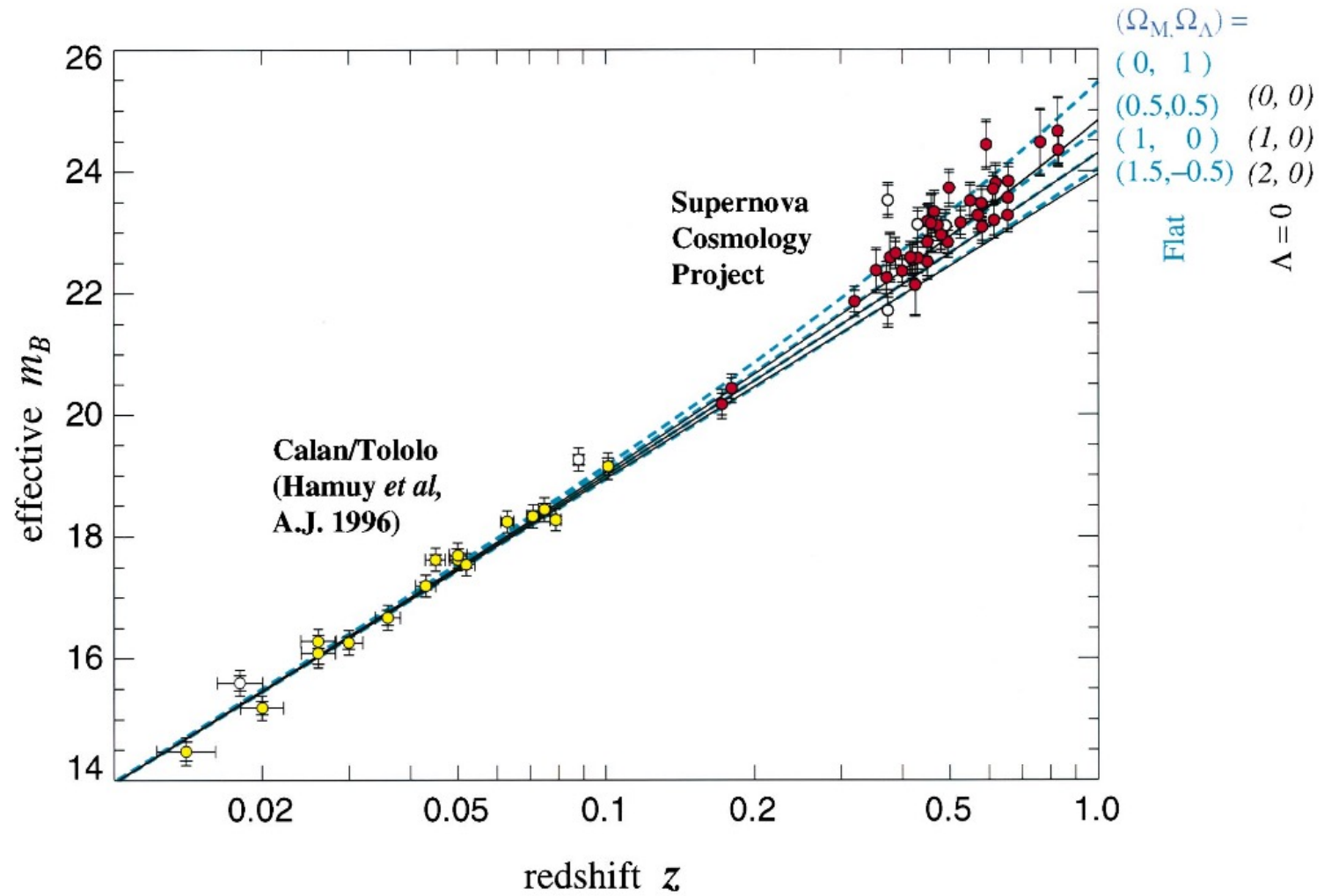
Si $\rho < \rho_{\text{crit}}$ l'Univers est en expansion infinie accélérée

On donne le plus souvent les densités de matière baryonique, matière noire, et d'énergie en unité de la masse critique.

Par exemple
$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_{\text{crit}}} \sim 0,3 \qquad \Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_{\text{crit}}} \sim 0,7$$

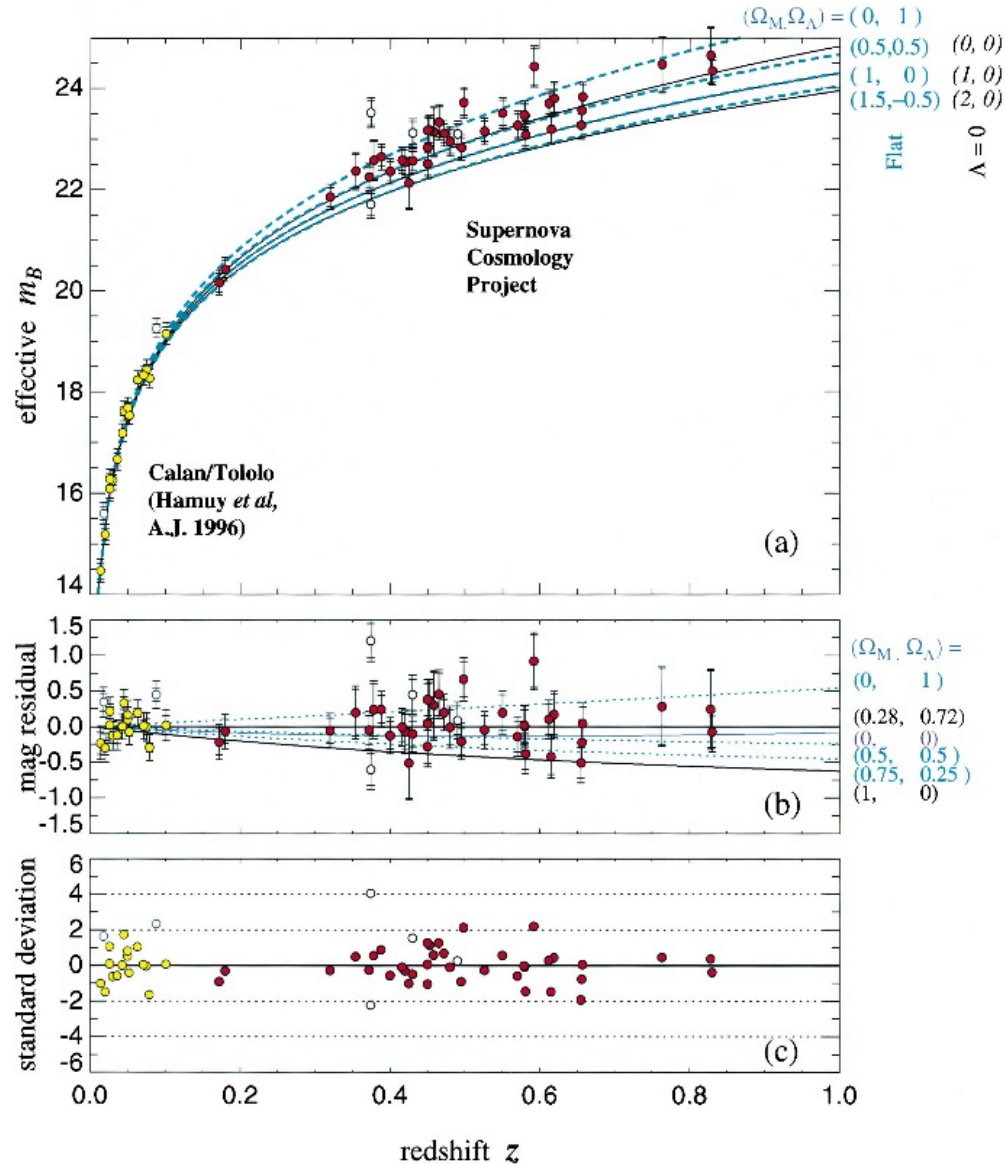
Qui sont des nombres sans dimension

Expansion accélérée



(Perlmutter et al. 1999, ApJ, 517, 565)

Expansion accélérée



(Perlmutter et al. 1999, ApJ, 517, 565)

Machines cosmologiques de la prochaine décennie



Euclid: grand champ ESA
Optique et IR + spectro
Lancement en 2023



WFIRST: grand champ IR +
spectro integrale de champ
(Lancement en 2025 ?)



LSST: 8m grand champ optique.
5 filtres. Tout le ciel toute les
semaine (début en 2024)

Machines cosmologiques de la prochaine décennie



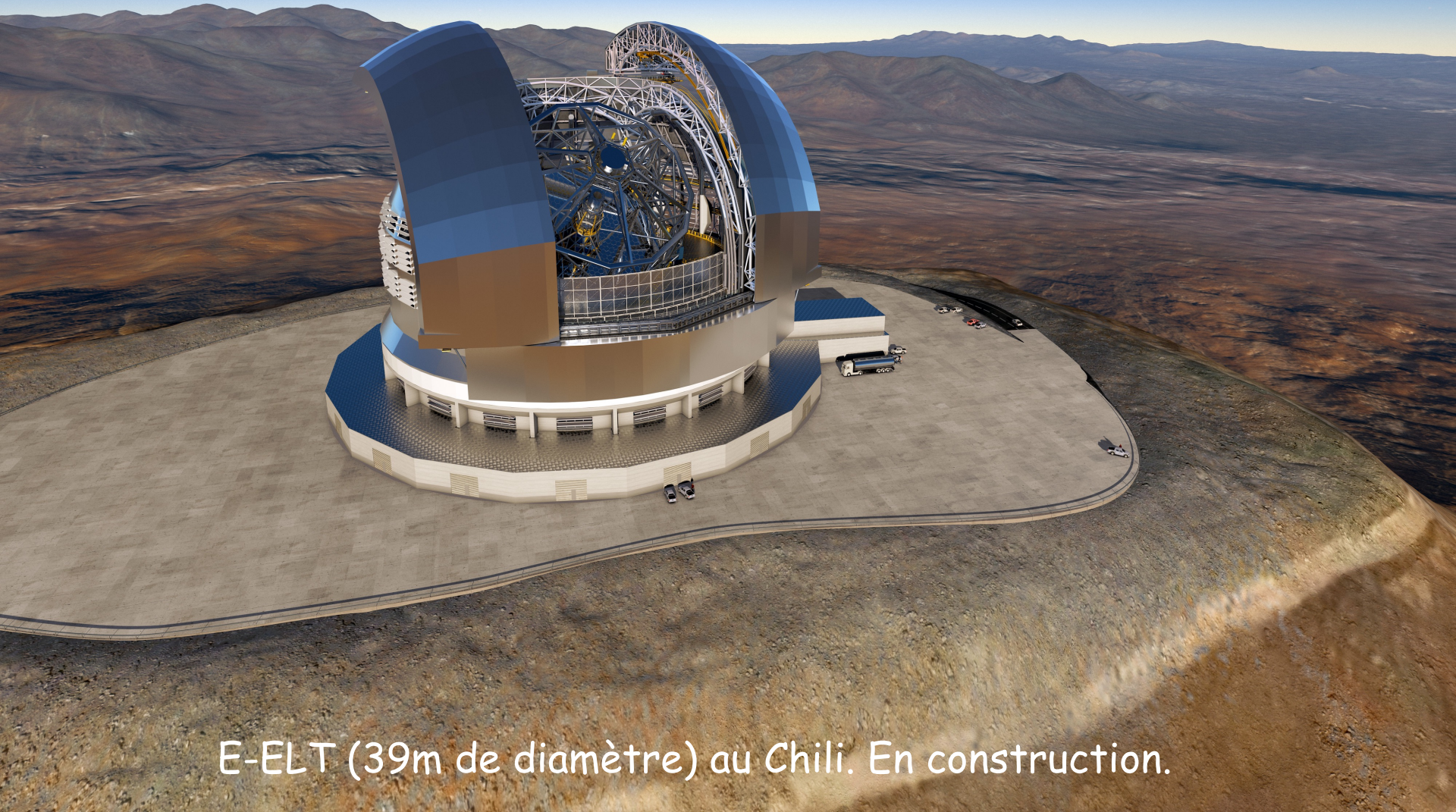
JWST: 6.5m, imagerie et spectro IR

Machines cosmologiques de la prochaine décennie



JWST: 6.5m, imagerie et spectro IR

Machines cosmologiques de la prochaine décennie



E-ELT (39m de diamètre) au Chili. En construction.