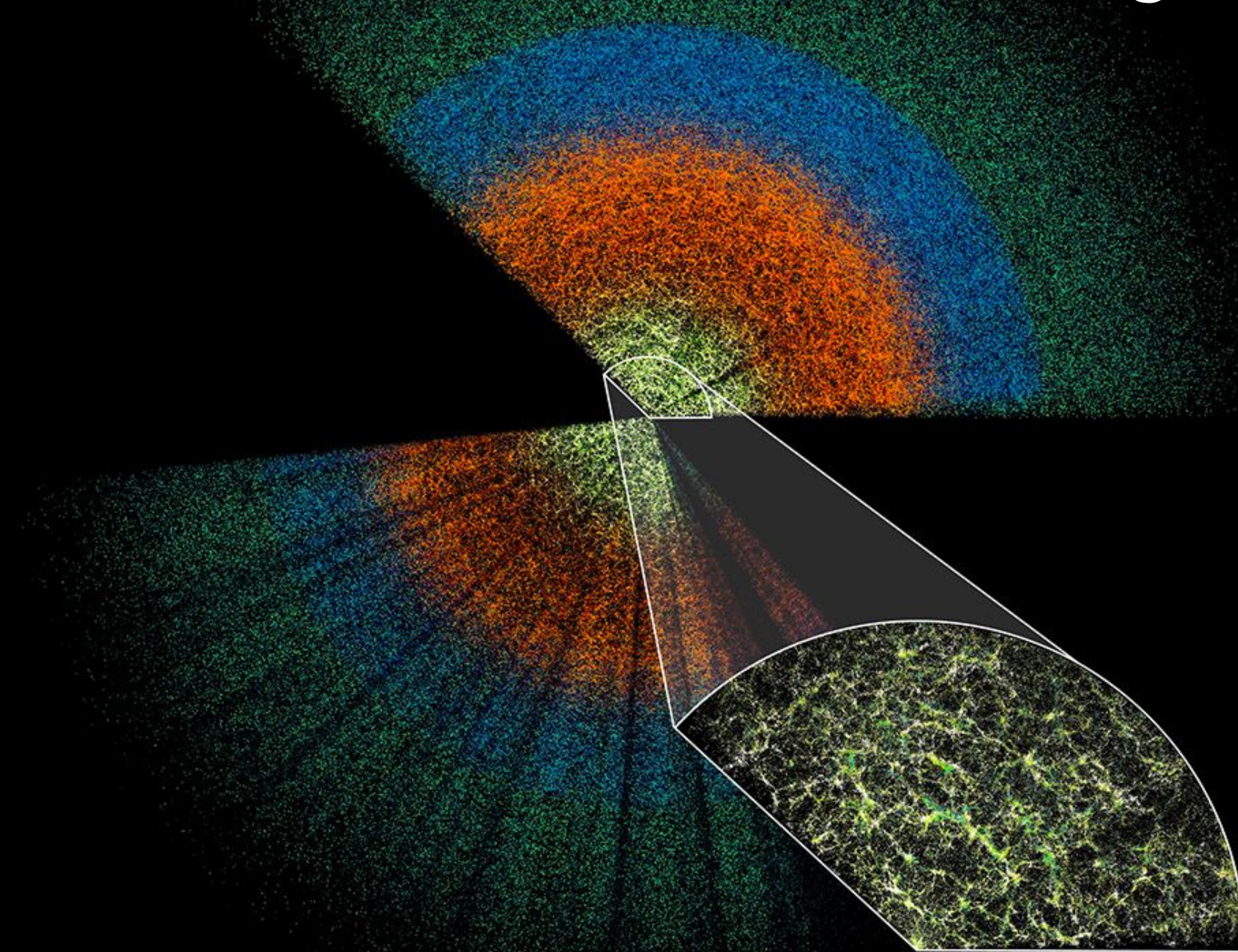


Chapitre 13:

Introduction à la Cosmologie



(Credit: Claire Lamman/DESI collaboration)

Cosmologie kesako

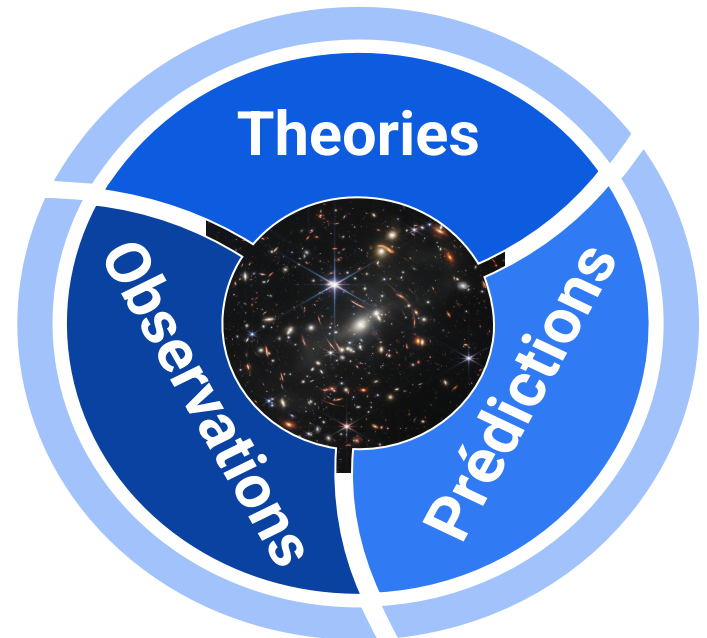
kosmos: Universe et logos: theory

- **Etude de l'origine et de l'évolution de l'Univers dans son ensemble**

Comment a commencé l'Univers ?

L'Univers est-t-il fini ?

Quel est le futur de l'Univers?



Paradoxe d'Olbers

Pourquoi la nuit est noire ?

- Univers Statique
- Taille Infini
- Infinité d'étoiles



Paradoxe d'Olbers

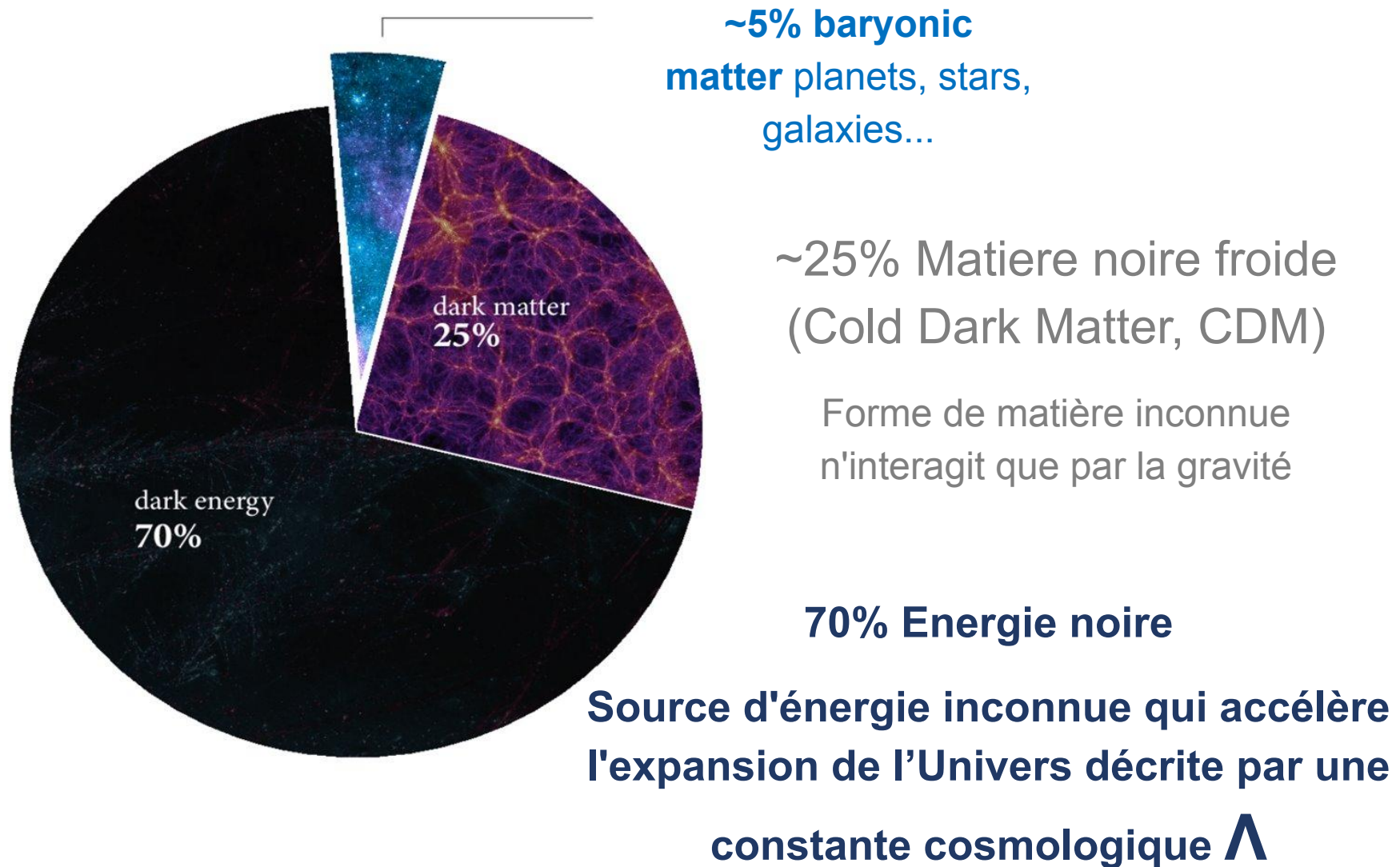
Pourquoi la nuit est noire ?

- Univers Statique
- Taille Infini
- Infinité d'étoiles
- 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



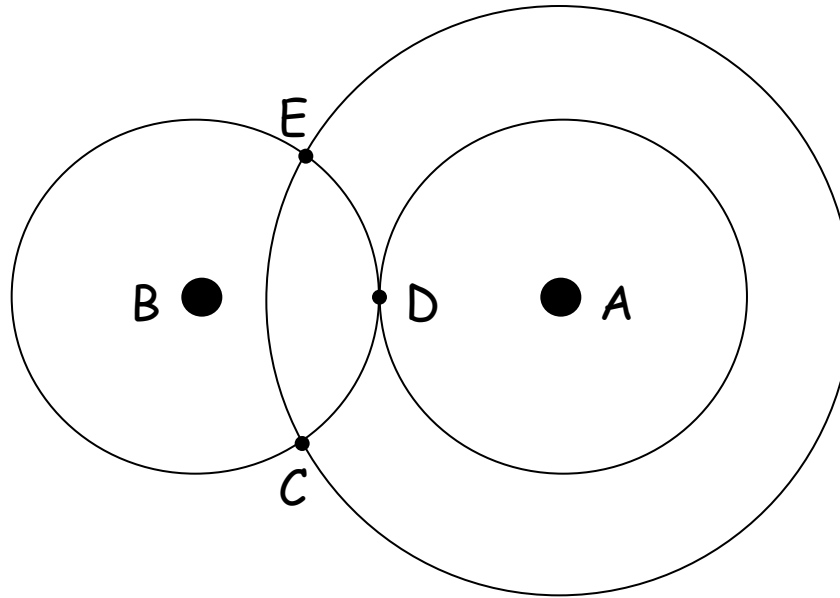
Modèle cosmologique standard Λ CDM:

Composition de l'Univers



Le Principe Cosmologique

L'Univers est isotrope en tout point, et de ce fait, homogène



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**.

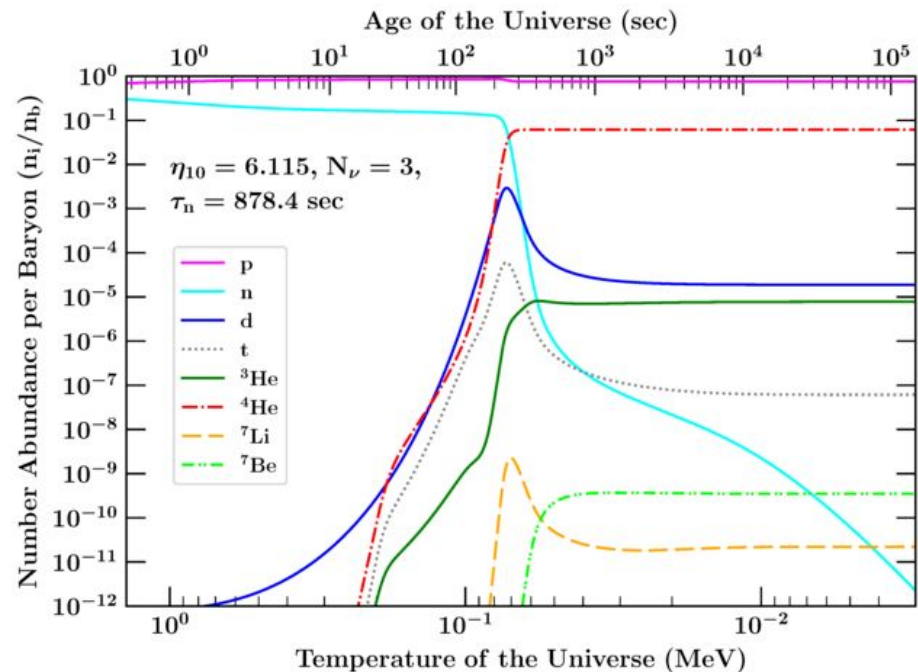
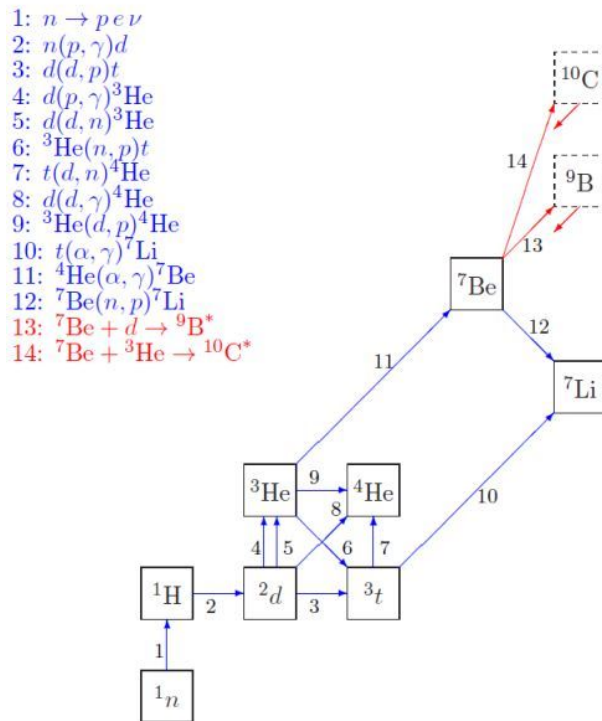
Modèle cosmologique standard Λ CDM:

3 piliers observationnels:

- Nucléosynthèse primordiale:

- Formation des premiers éléments chimique qui explique la composition chimique observée de l'Univers

(Alpher, Bethe & Gamov 1948, $\alpha\beta\gamma$ paper)

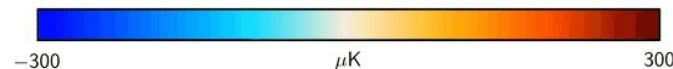
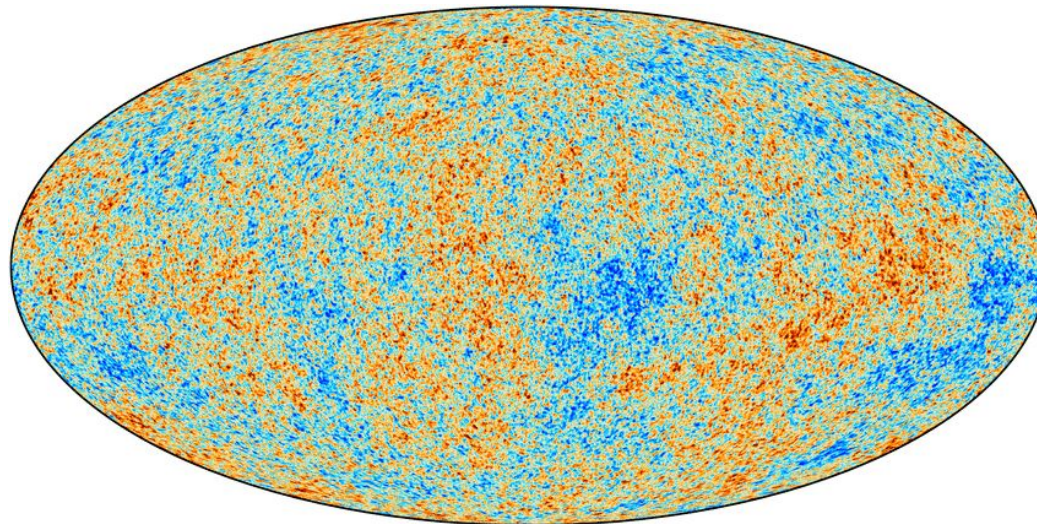


- Composition chimique de l'Univers: 75% ^1H , 24% ^4He + le reste

Modèle cosmologique standard Λ CDM:

3 piliers observationnels:

- **Nucléosynthèse primordiale:**
 - Formation des premiers éléments chimiques qui explique la composition chimique observée de l'Univers ($\alpha\beta\gamma$ paper 1948)
- **Fond diffus cosmologique:** (Penzias & Wilson, 1965)
 - première lumière de l'Univers, un rayonnement fossile à $T=2,73$ K, isotrope, avec de faibles oscillations $\Delta T/T \sim 10^{-5}$,



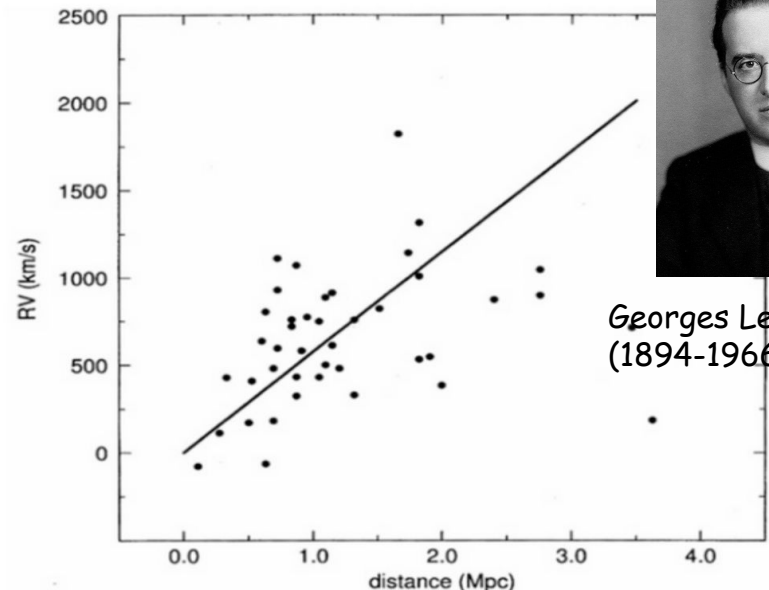
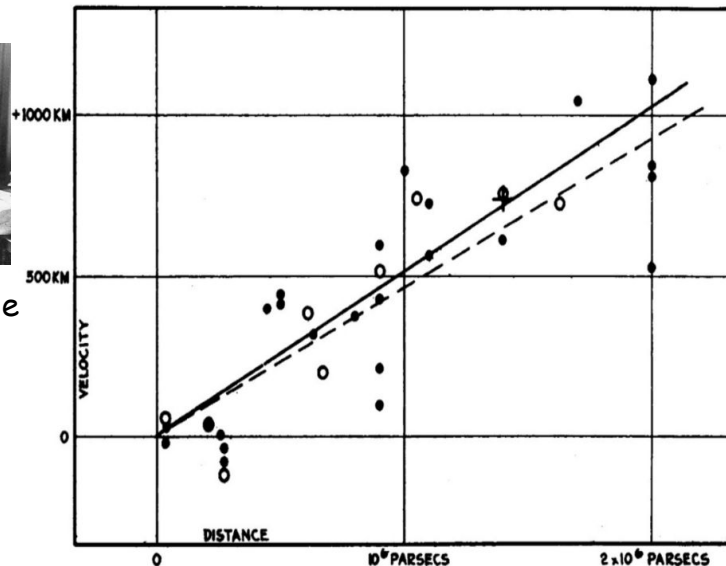
Modèle cosmologique standard Λ CDM:

3 piliers observationnels:

- **Nucléosynthèse primordiale:**
 - Formation des premiers éléments chimiques qui explique la composition chimique observée de l'Univers ($\alpha\beta\gamma$ paper 1948)
- **Fond diffus cosmologique:** Première lumière de l'Univers (Penzias & Wilson, 1965)
- **L'expansion de l'univers: Loi de Hubble-Lemaître**
 - La quasi-totalité des galaxies s'éloigne de nous



Edwin Hubble
(1889-1953)



Georges Lemaître
(1894-1966)

Modèle cosmologique standard Λ CDM:

3 piliers observationnels:

- **Nucléosynthèse primordiale:**
 - Formation des premiers éléments chimiques qui explique la composition chimique observée de l'Univers ($\alpha\beta\gamma$ paper 1948)
- **Fond diffus cosmologique:** Première lumière de l'Univers (Penzias & Wilson, 1965)
- **L'expansion de l'univers: Loi de Hubble-Lemaître**
 - La quasi-totalité des galaxies s'éloigne de nous
- **La Gravité est régie par les équations de la relativité générale**

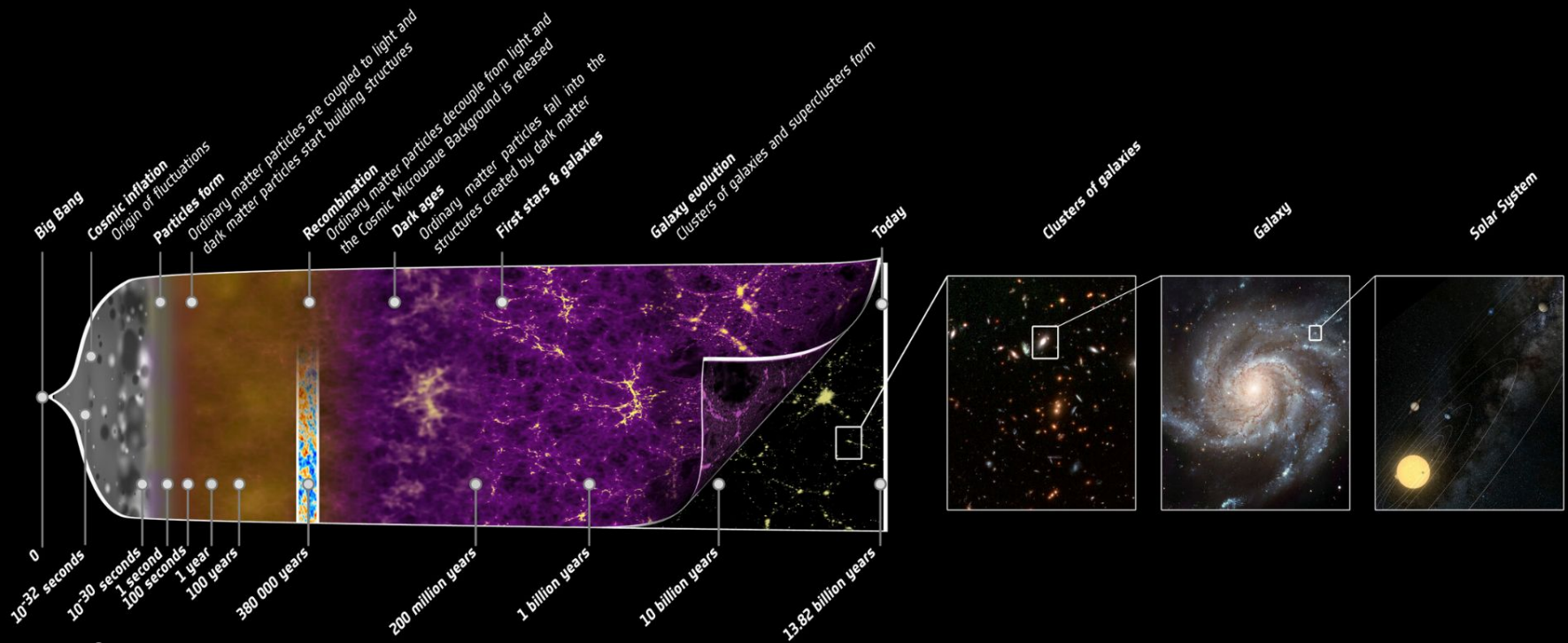
Décrit la
géométrie de
l'espace-temps

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

La composition
énergétique de
l'univers

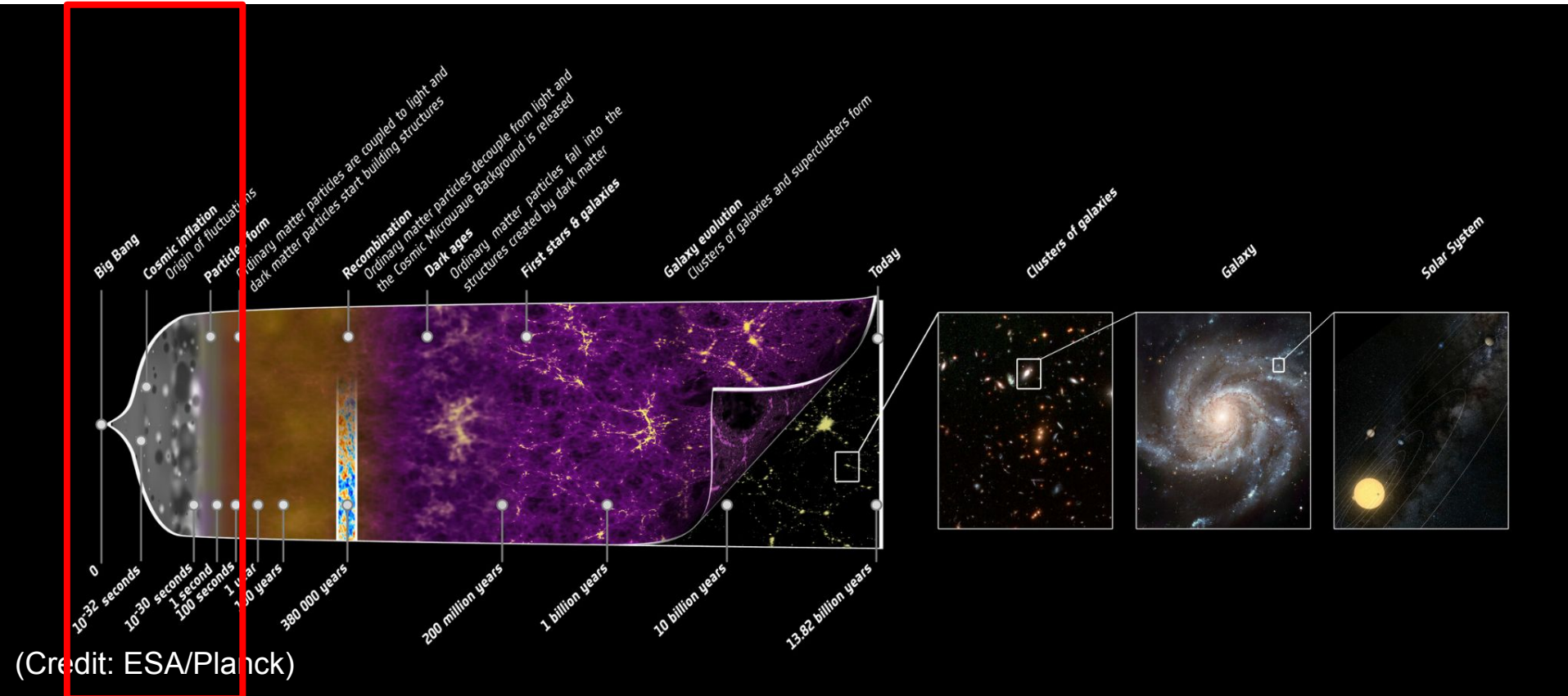
Modèle cosmologique standard:

Chronologie de l'Univers

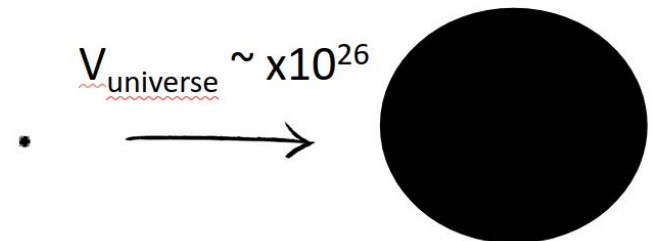


(Credit: ESA/Planck)

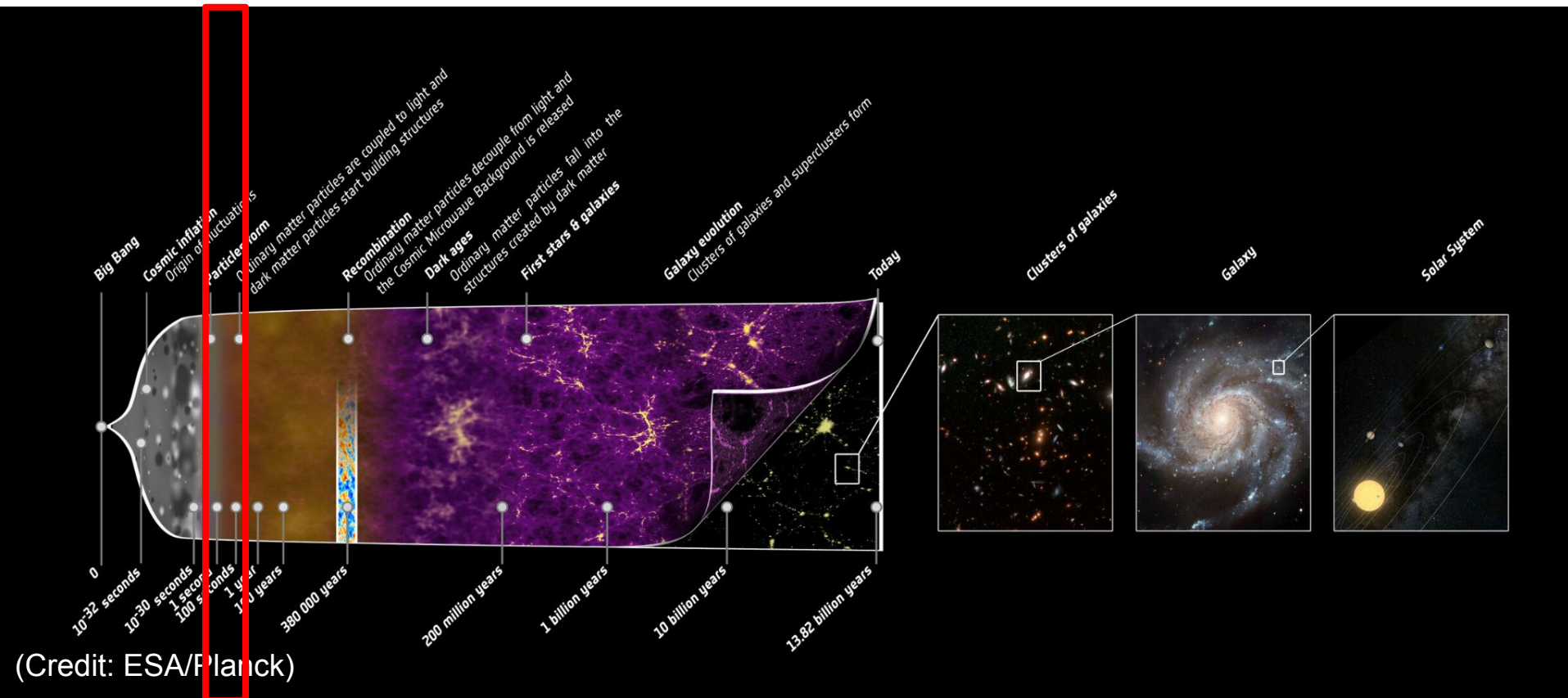
Modèle cosmologique standard: Chronologie de l'Univers



Phase d'inflation cosmique $t \sim 10^{-32}$ sec



Modèle cosmologique standard: Chronologie de l'Univers

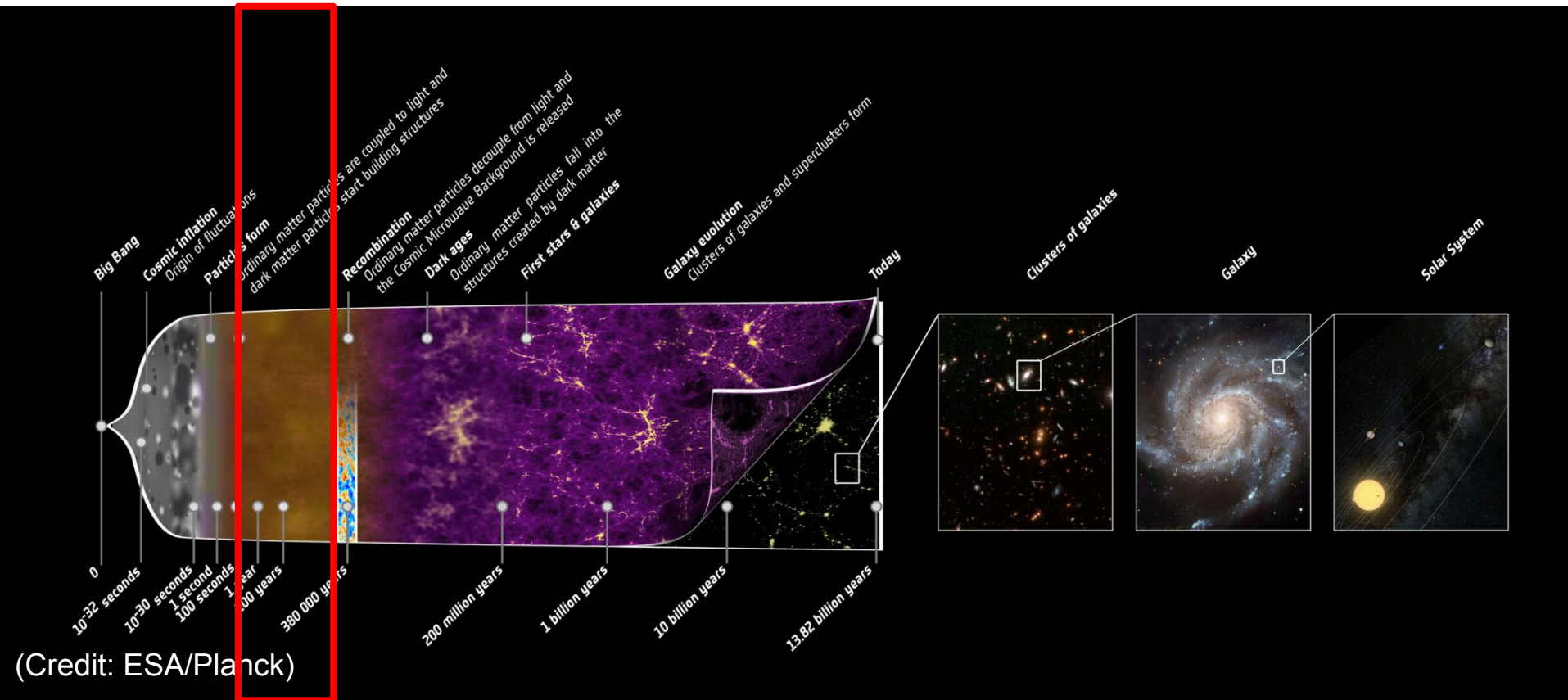


t ~ 1-1000 sec: Nucléosynthèse primordiale

Réactions en chaînes qui forment les premiers éléments légers (H, He, Li, Be)

Modèle cosmologique standard:

Chronologie de l'Univers



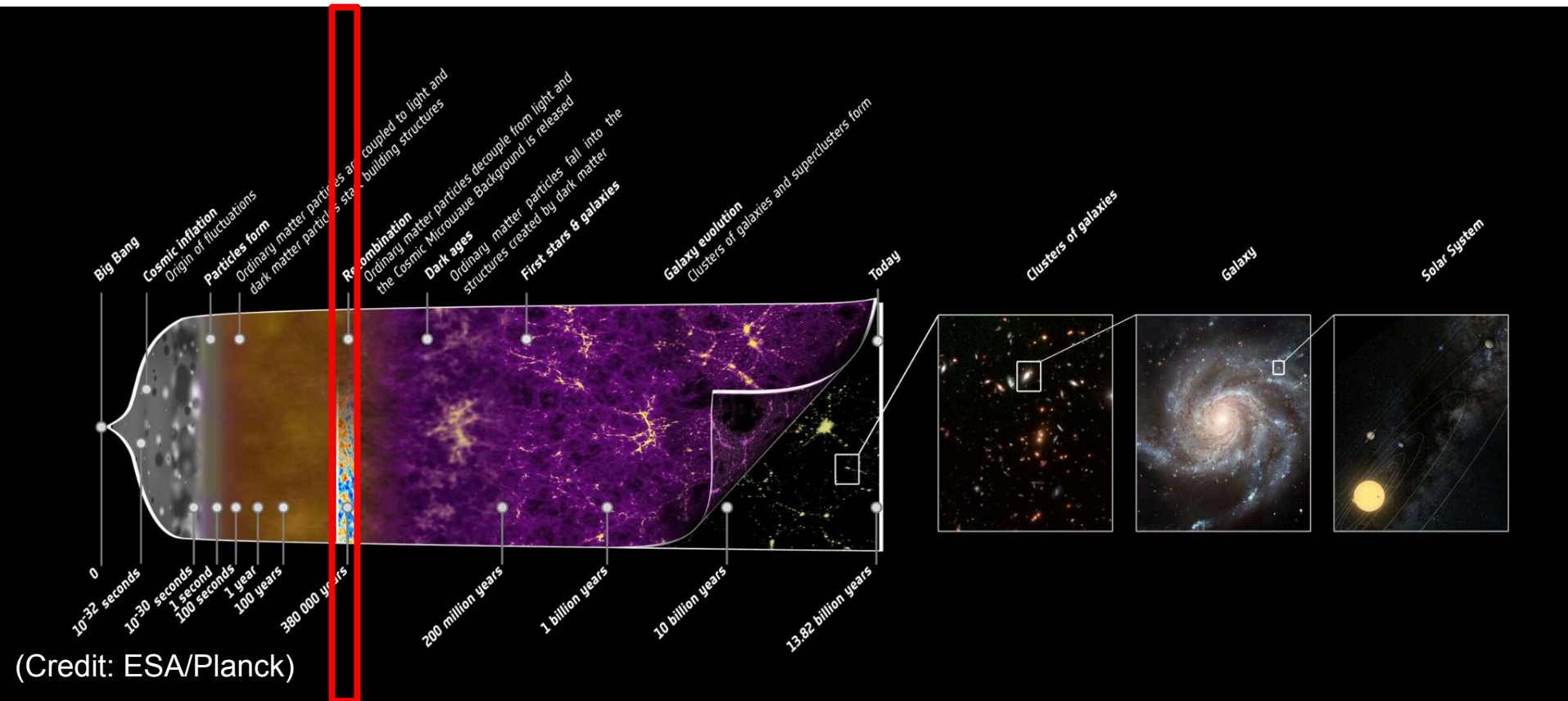
$t \sim 1000 \text{ sec} - 380\,000 \text{ ans}$

Univers opaque (couplage lumière-matière) s'expand et se refroidi

Univers complètement ionisé, aucun photon ne peut sortir

Modèle cosmologique standard:

Chronologie de l'Univers



t ~380 000 ans: Emission du Fond Diffus Cosmologique

Première lumière de l'Univers

L'Univers n'est plus assez chaud les photons peuvent voyager librement

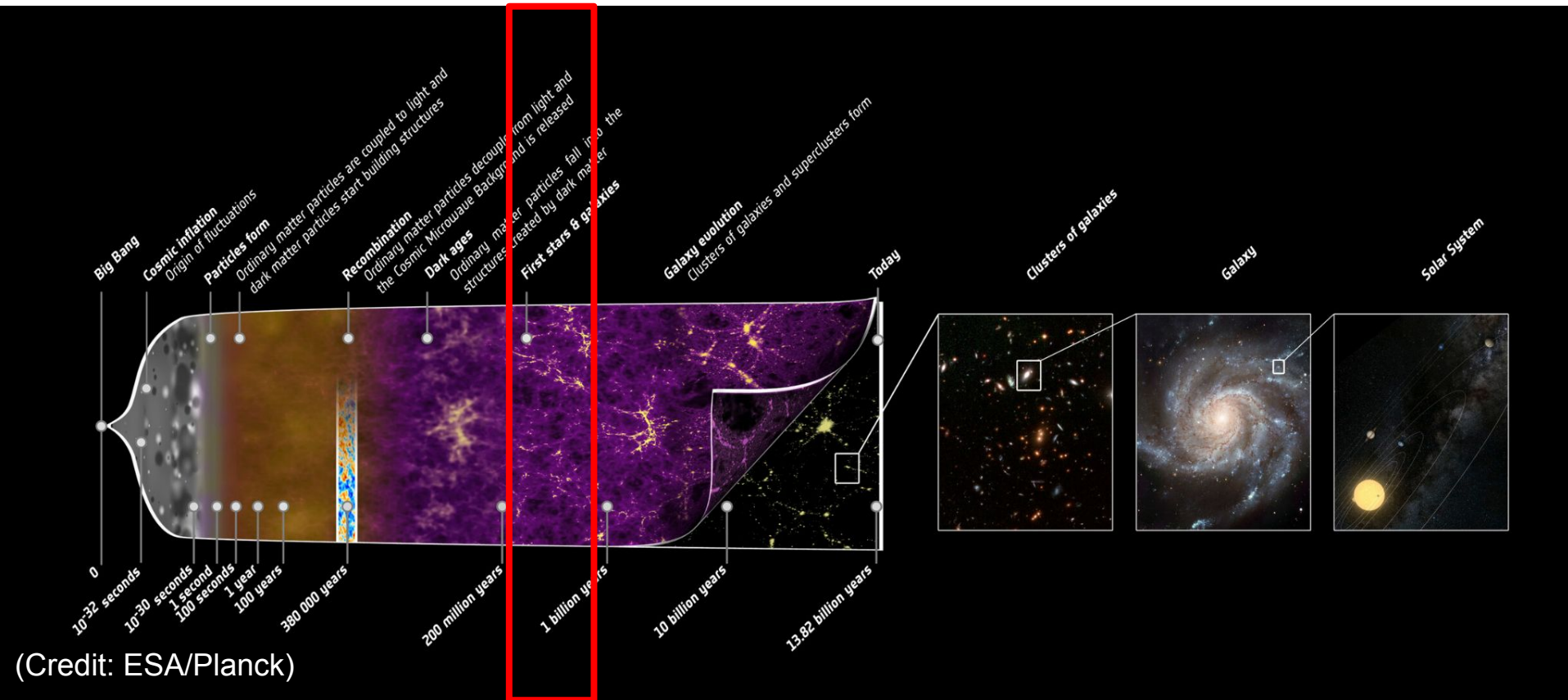
Modèle cosmologique standard: Chronologie de l'Univers



t ~ 380 000 ans - 200 millions d'année: Âges sombre

Formation des premières étoiles, galaxies dans l'Univers

Modèle cosmologique standard: Chronologie de l'Univers

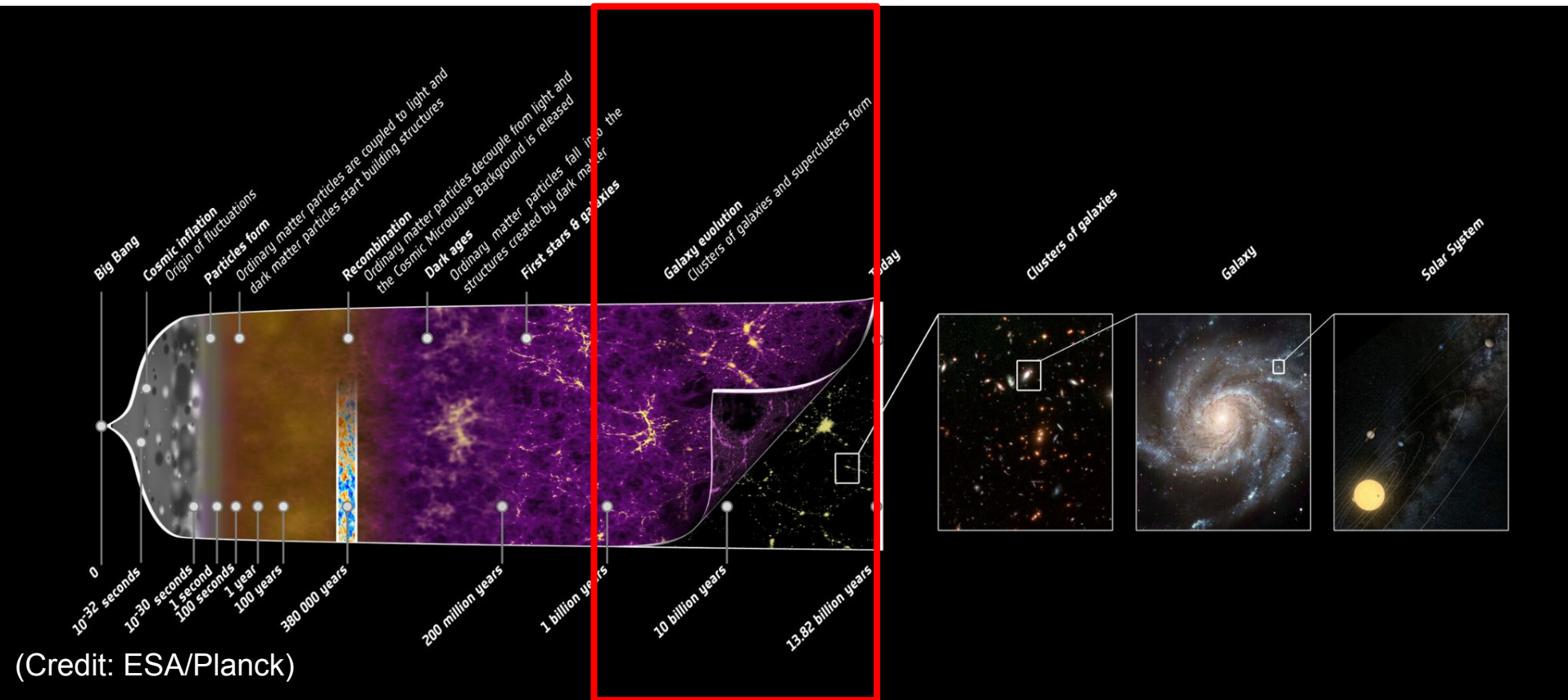


t ~ 400 millions - 1 milliard d'années: Ré-ionisation

Le rayonnement intense des premières étoiles et galaxies ionise les atomes d'Hydrogène
=> l'Univers presque complètement ré-ionisé (opaque) durant cette époque

Modèle cosmologique standard:

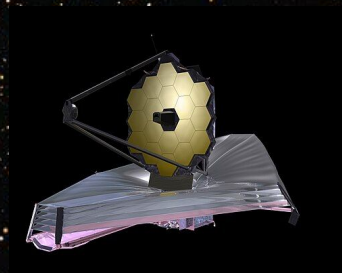
Chronologie de l'Univers

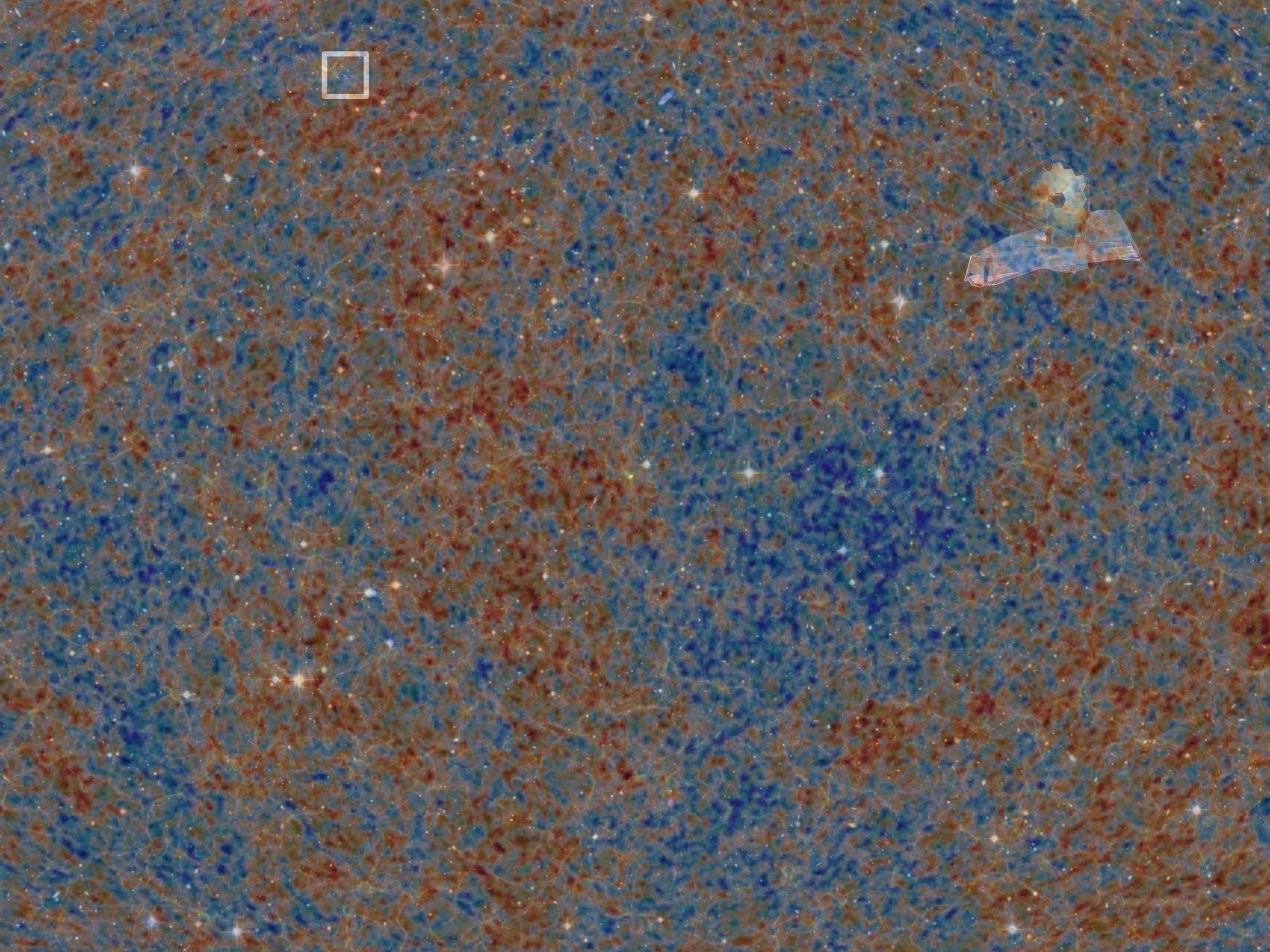


$t > 1$ milliard d'années

Evolution des galaxies et des amas de galaxies, formation des grandes structures de l'Univers







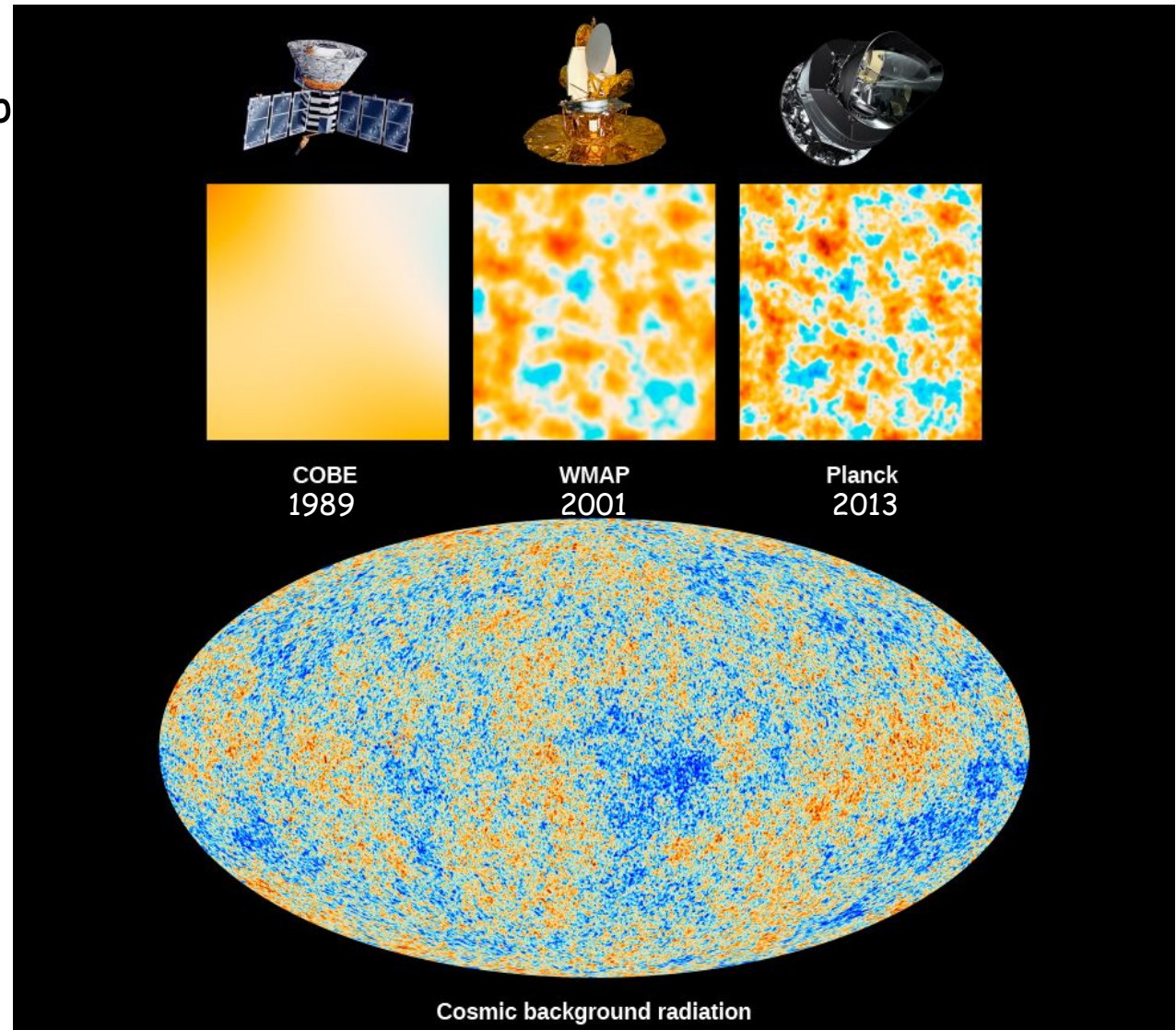
Fond de rayonnement cosmologique

Cosmic microwave background (CMB)

Rayonnement résiduel
datant de 380000 ans ap
le Big-Bang

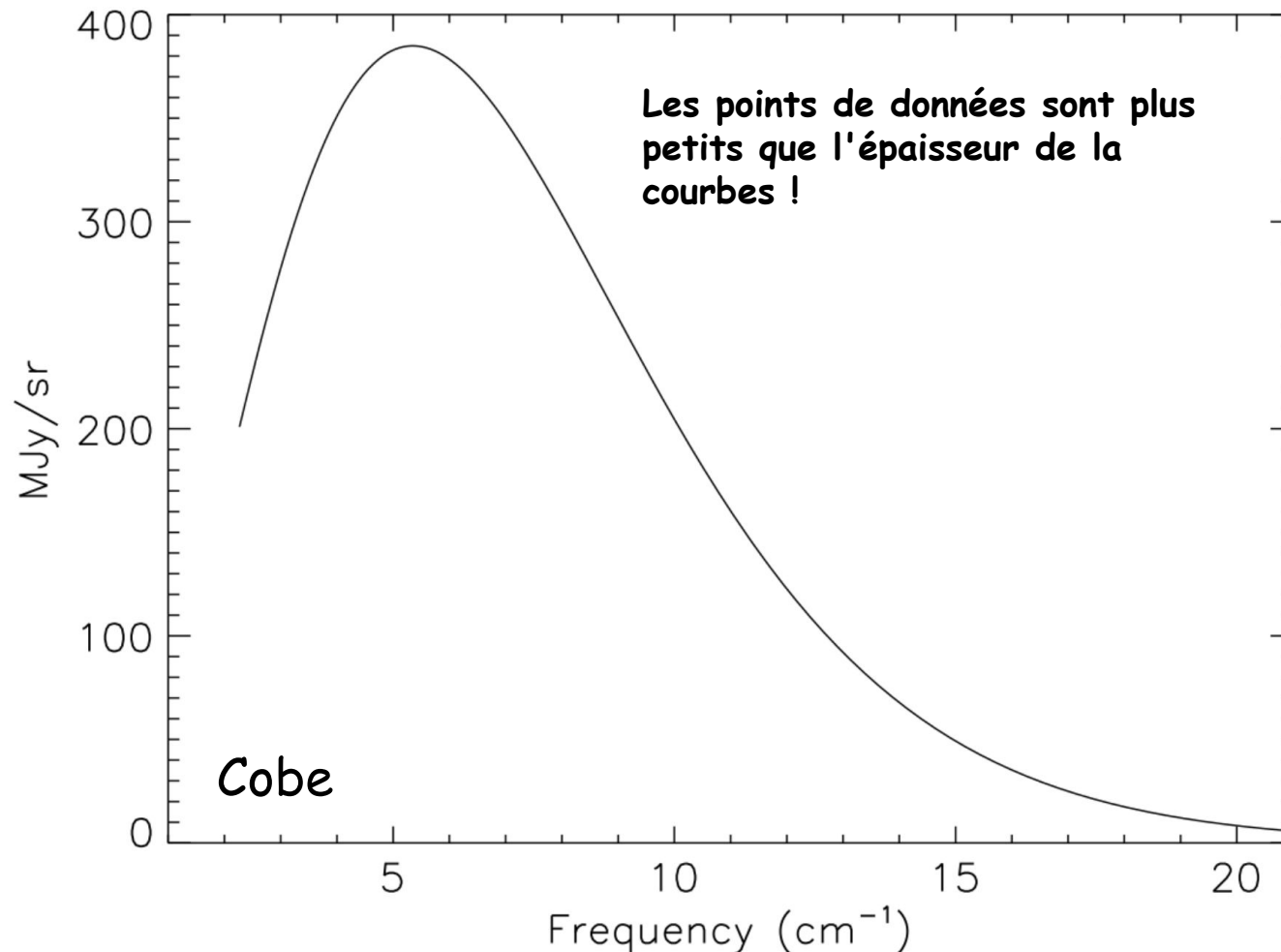
Mesure des
fluctuations
de température
 $\Delta T/T \sim 10^{-5}$

=> Univers homogène
et isotrope



Fond de rayonnement cosmologique

Le spectre du rayonnement du CMB est un corps noir (presque parfait) a une temperature de $\sim 2.73\text{K}$ est en parfait accord avec la théorie (du Big Bang)

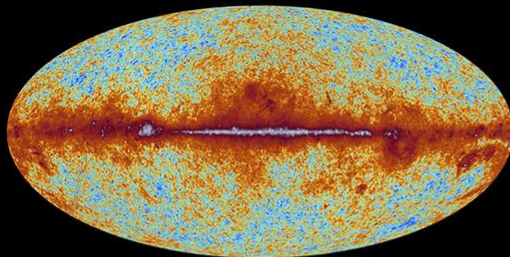


Fond de rayonnement cosmologique

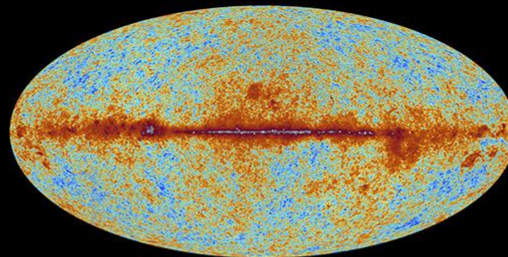


planck

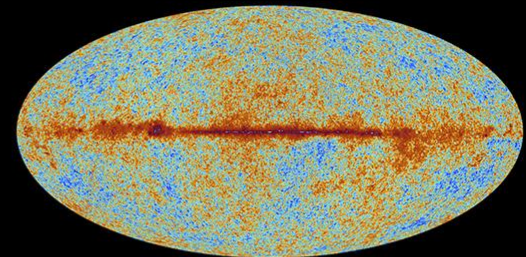
The sky as seen by Planck



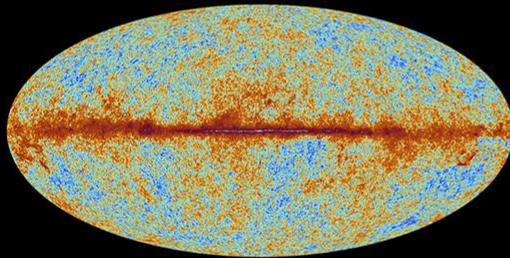
30 GHz



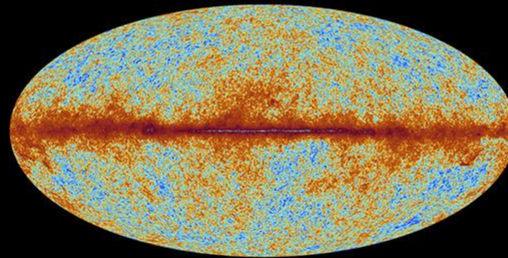
44 GHz



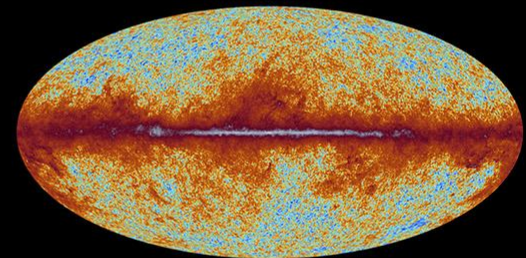
70 GHz



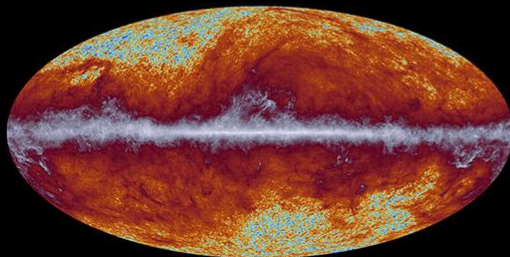
100 GHz



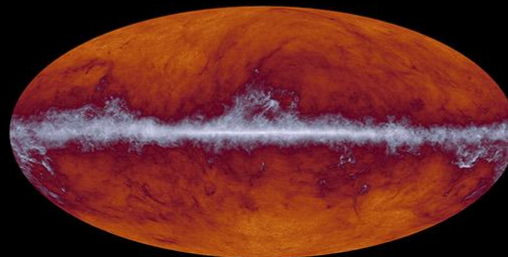
143 GHz



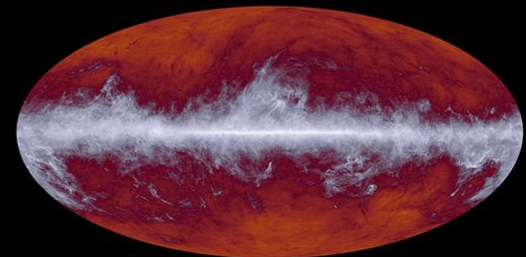
217 GHz



353 GHz



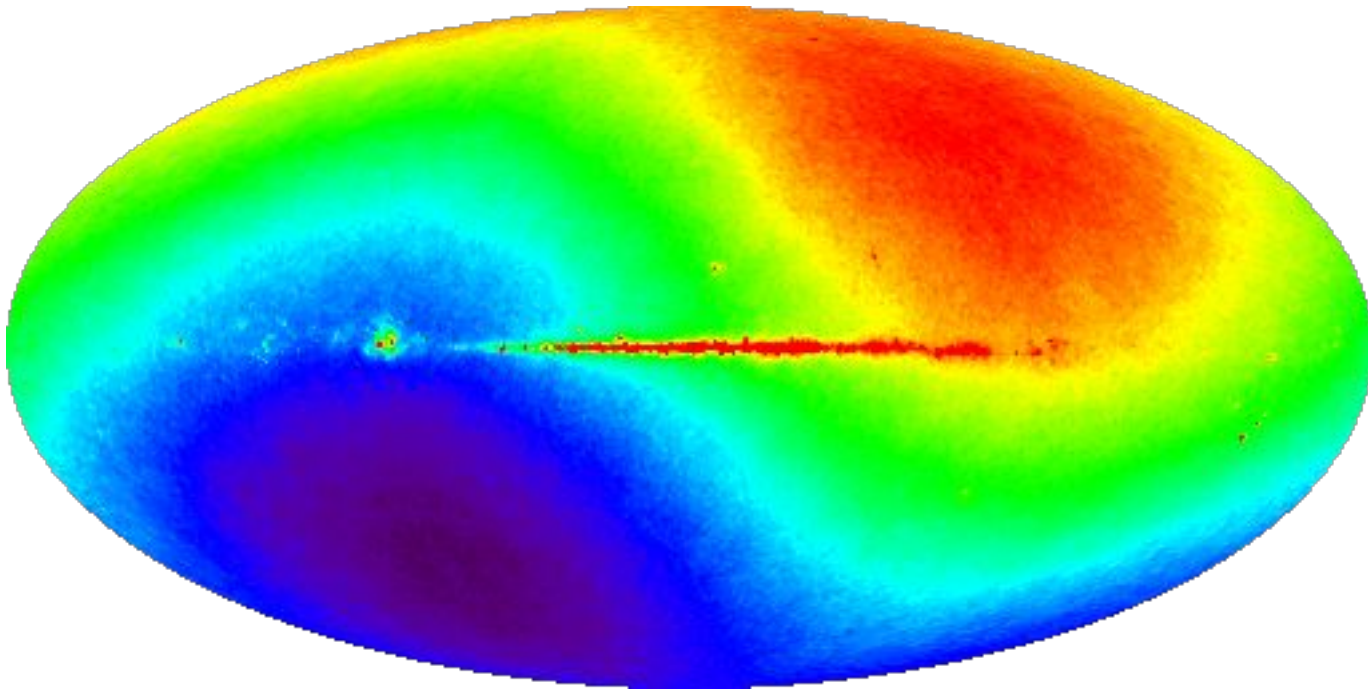
545 GHz



857 GHz

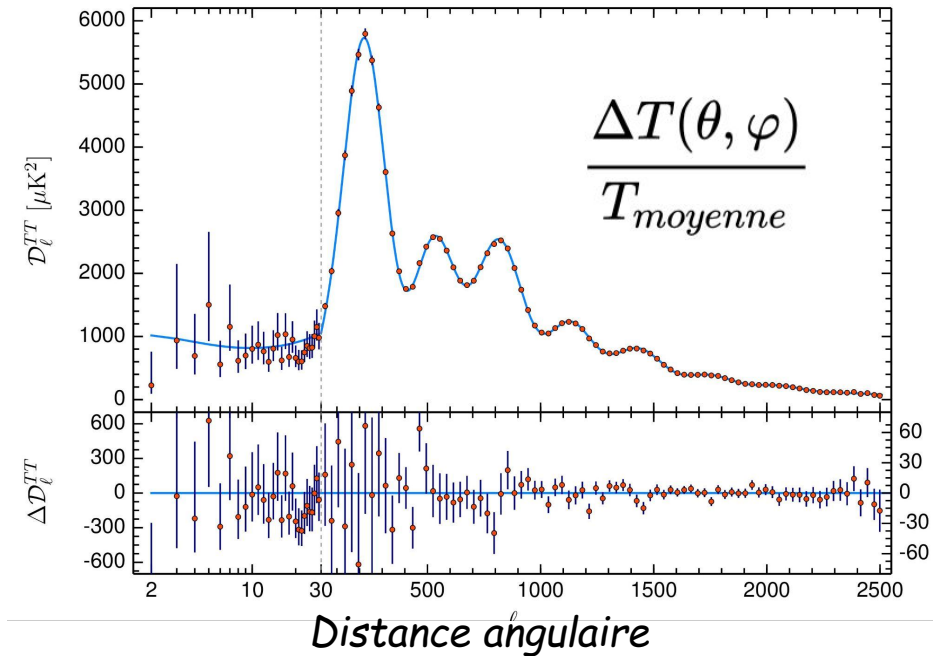
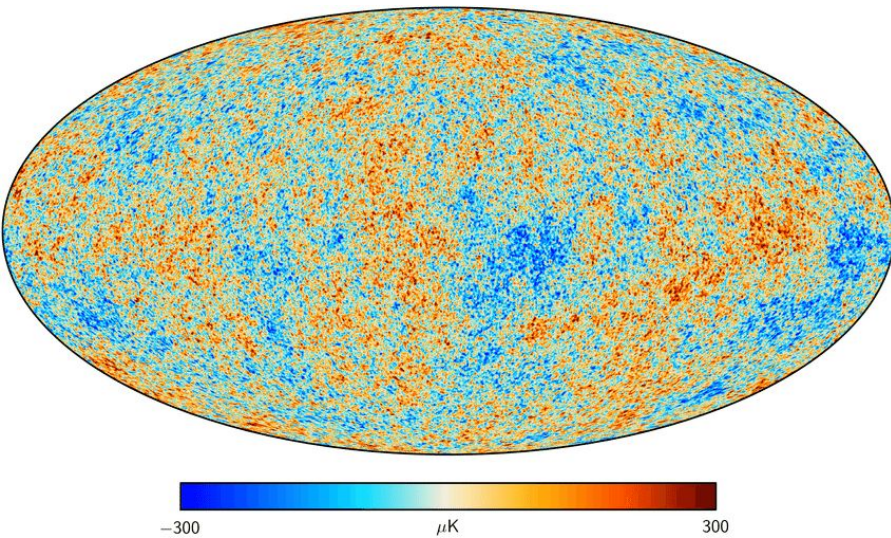
Dipôle cosmologique reflétant le mouvement de la Voie Lactée

Effet Doppler visible sur la carte du CMB



Carte du satellite Planck

Spectre de puissance du fond diffus

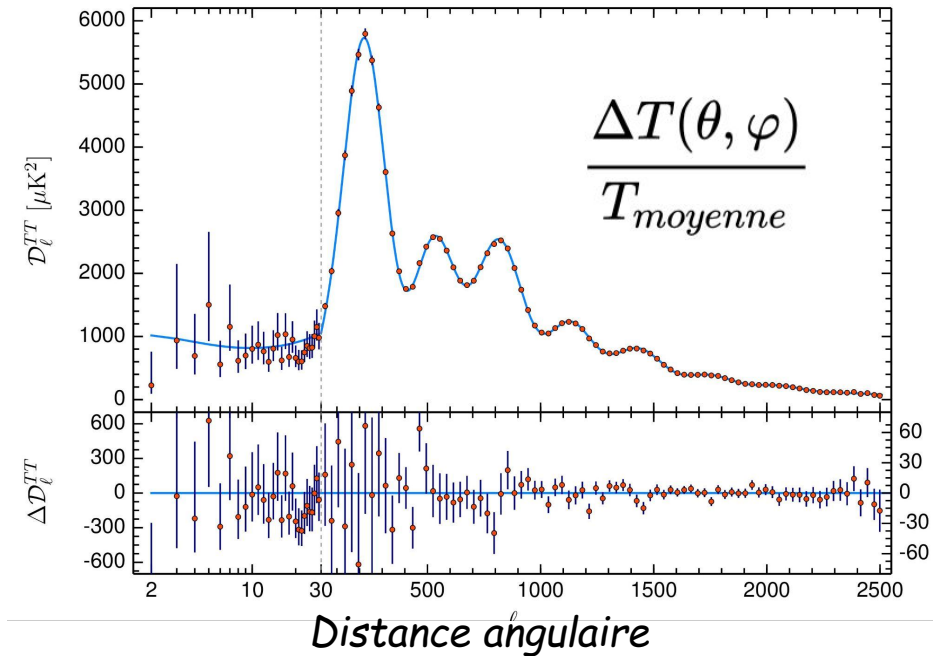
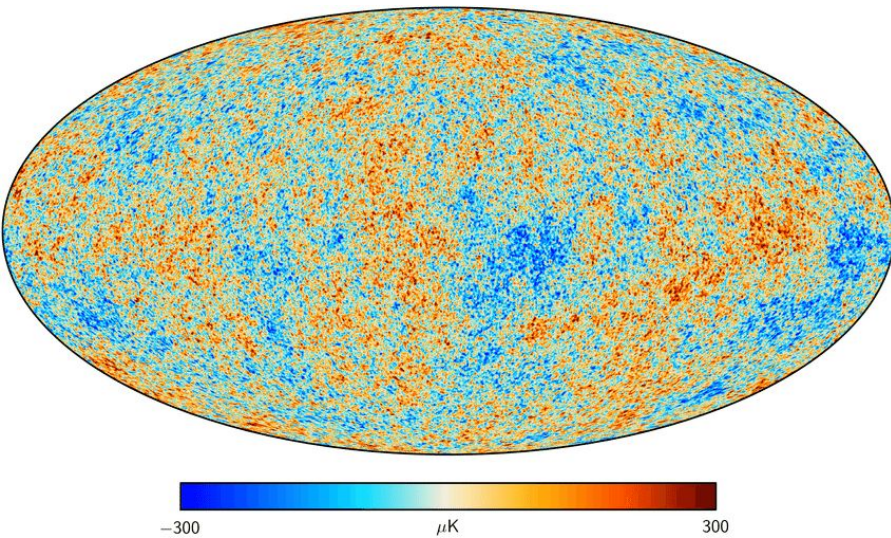


Mesure l'intensité du CMB en fonction de la distance angulaire en chaque point par rapport à la moyenne du fond diffus

Les différences de température correspondent a des différences de densité de matière

On observe des oscillation « acoustiques » dans le fond cosmologique

Spectre de puissance du fond diffus

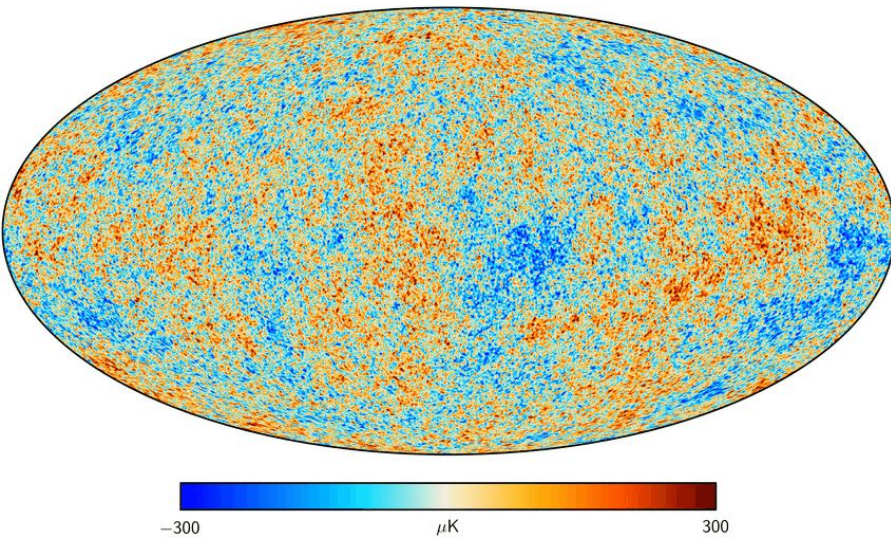


Mesure l'intensité du CMB en fonction de la distance angulaire en chaque point par rapport à la moyenne du fond diffus

Les différences de température correspondent a des différences de densité de matière

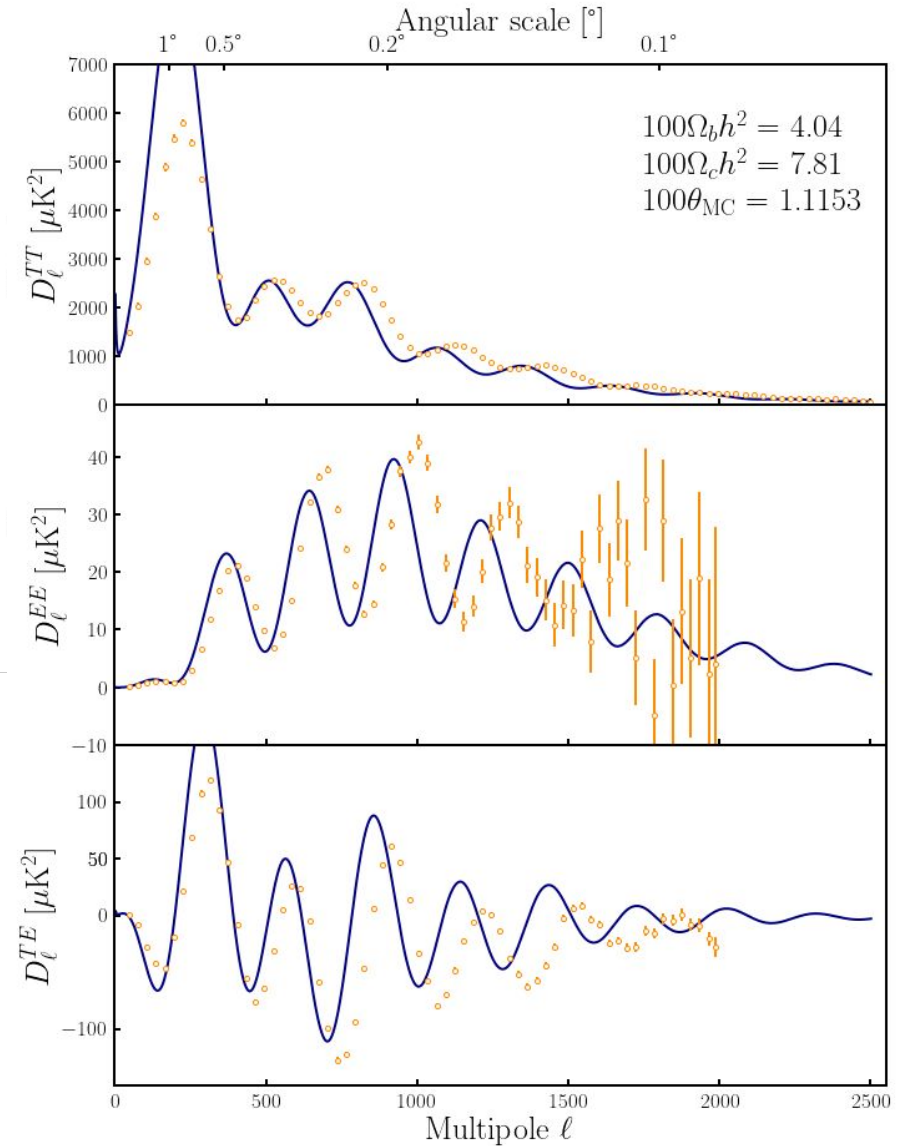
On observe des oscillation « acoustiques » dans le fond cosmologique

Spectre de puissance du fond diffus

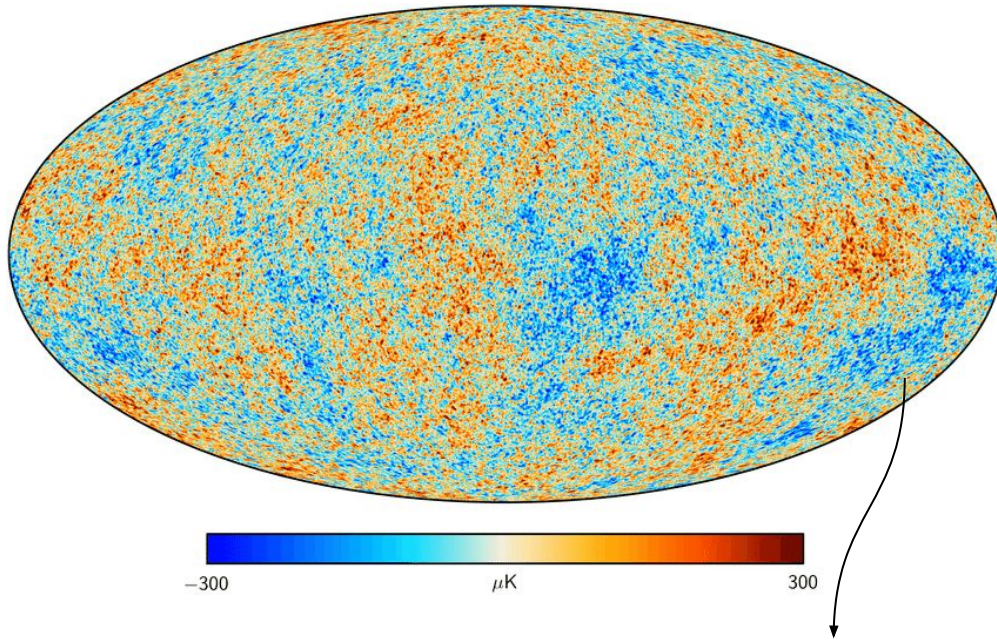


Ces mesures nous permettent de contraindre la composition de l'Univers

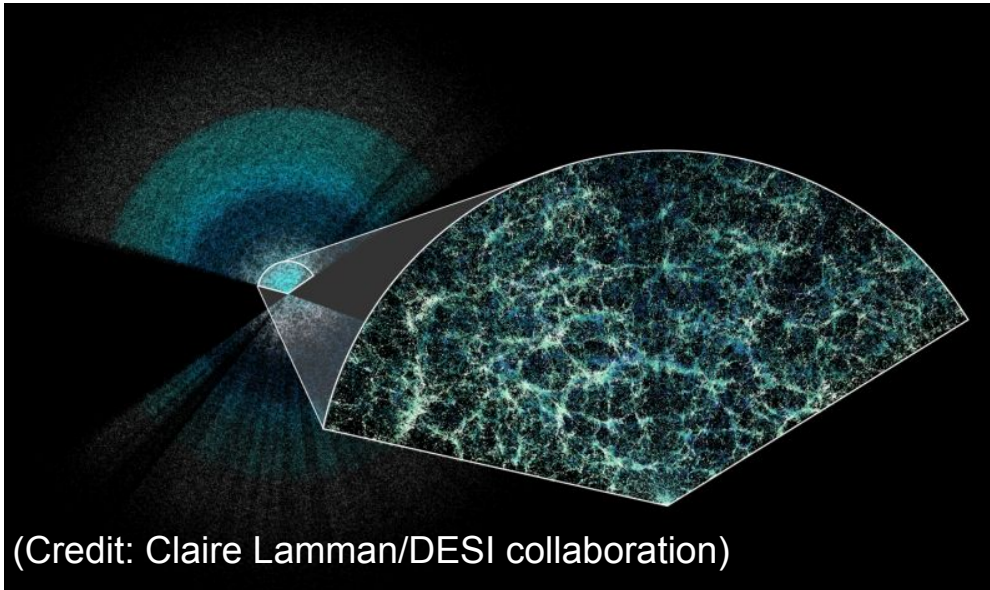
=> Notamment le CMB est une preuve très robuste que l'univers est composé principalement de matière noire et d'énergie noire



Evolution des anisotropies



Les anisotropies de densité (Matière noire + baryons) croissent sous l'influence de la gravité et forme les structures grandes structures de l'Univers qu'on observe aujourd'hui



(Credit: Claire Lamman/DESI collaboration)

La loi de Hubble-Lemaître

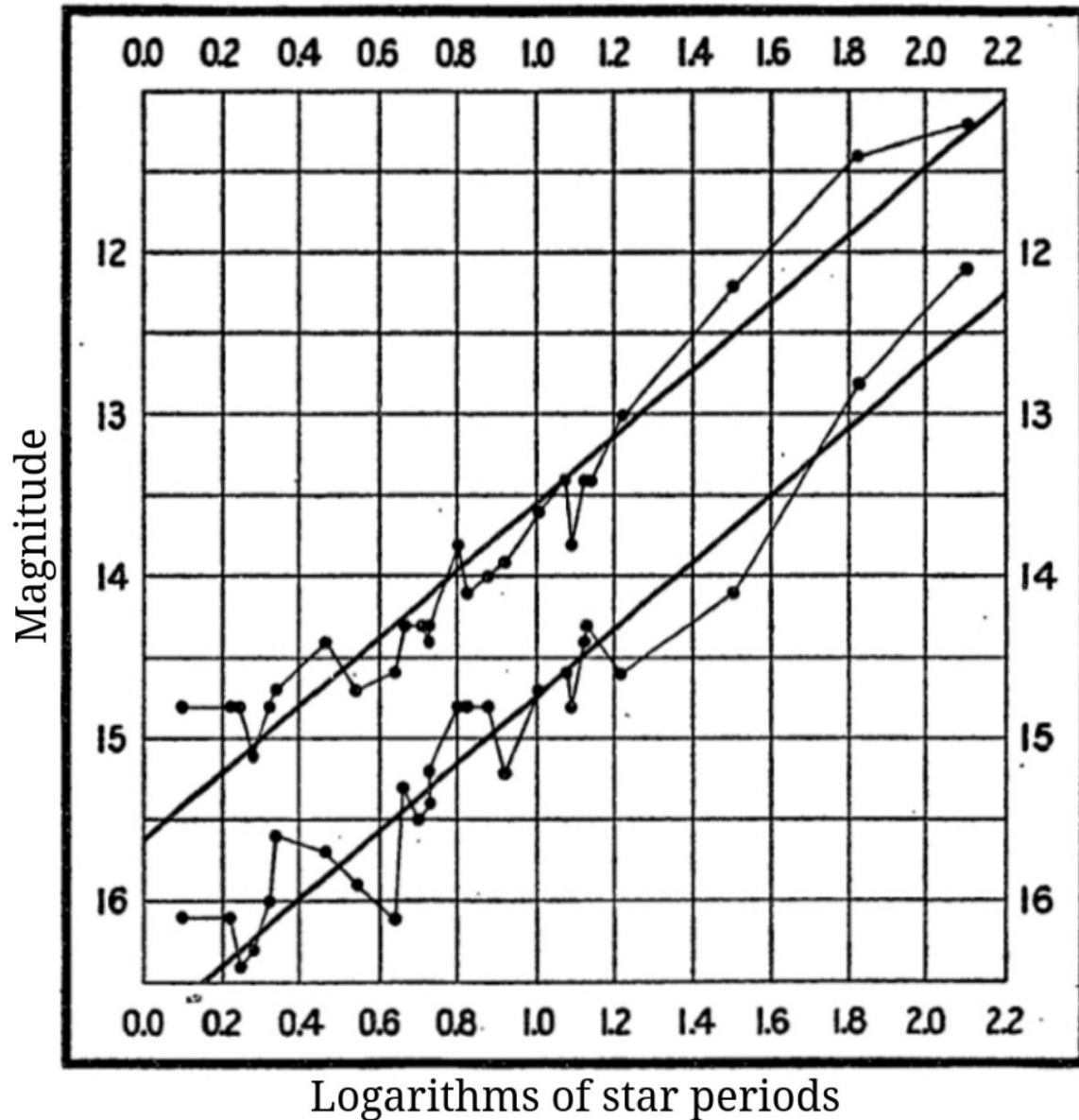
La loi de Hubble-Lemaître



Henrietta Leavitt (1868-1921)

Relation
Période-luminosité
Pour les Céphéides

Mesures à la base de la
découverte de
l'expansion de l'Univers

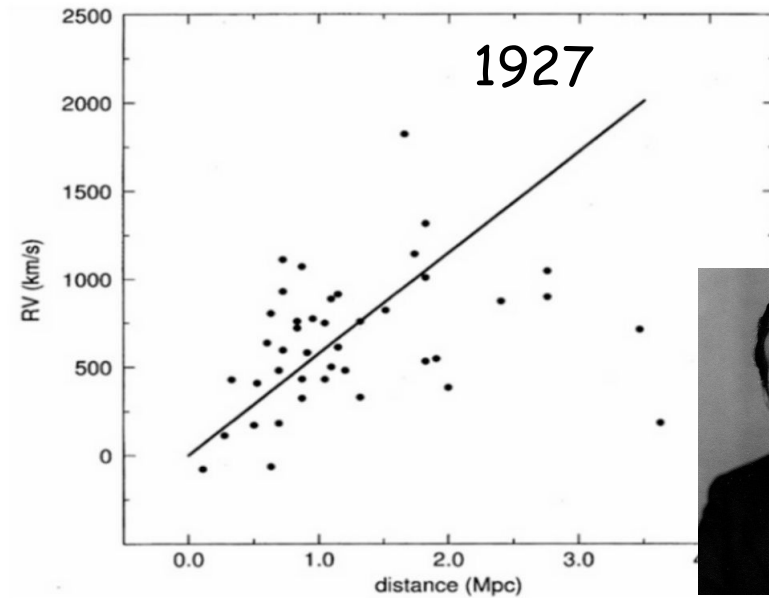
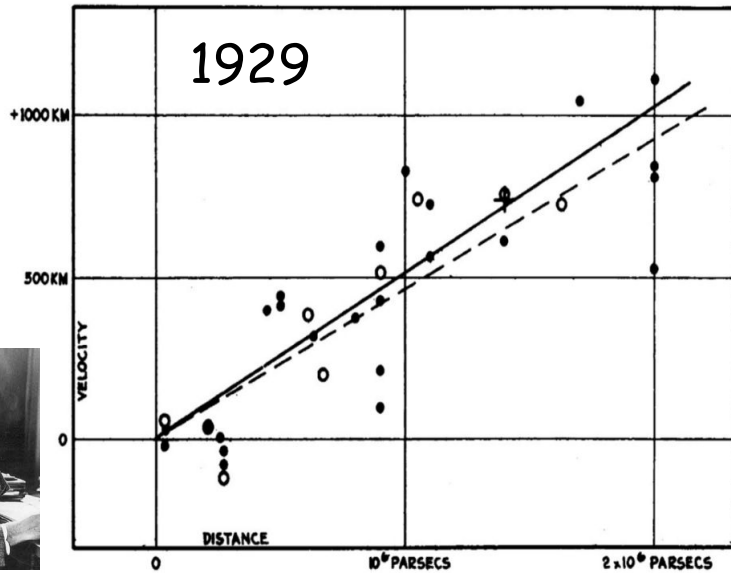


La loi de Hubble-Lemaître

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



Edwin Hubble
(1889-1953)



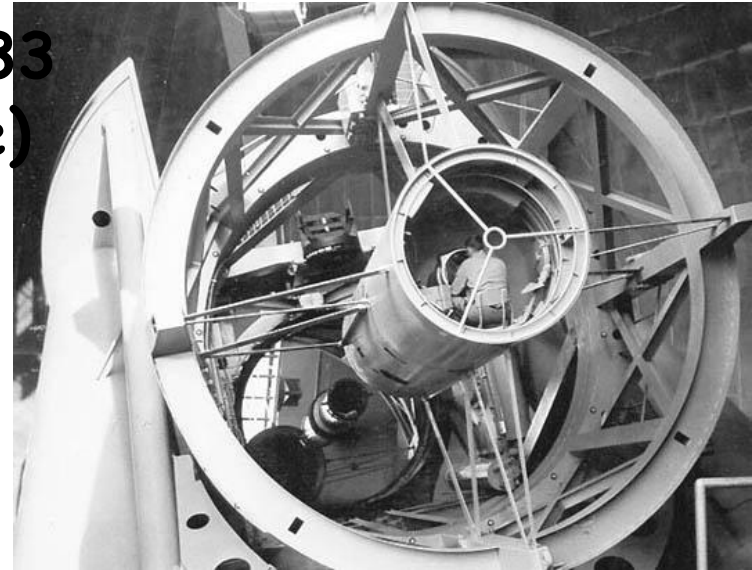
Georges Lemaître
(1894-1966)

Loi linéaire entre la vitesse d'éloignement des galaxies et leur distance

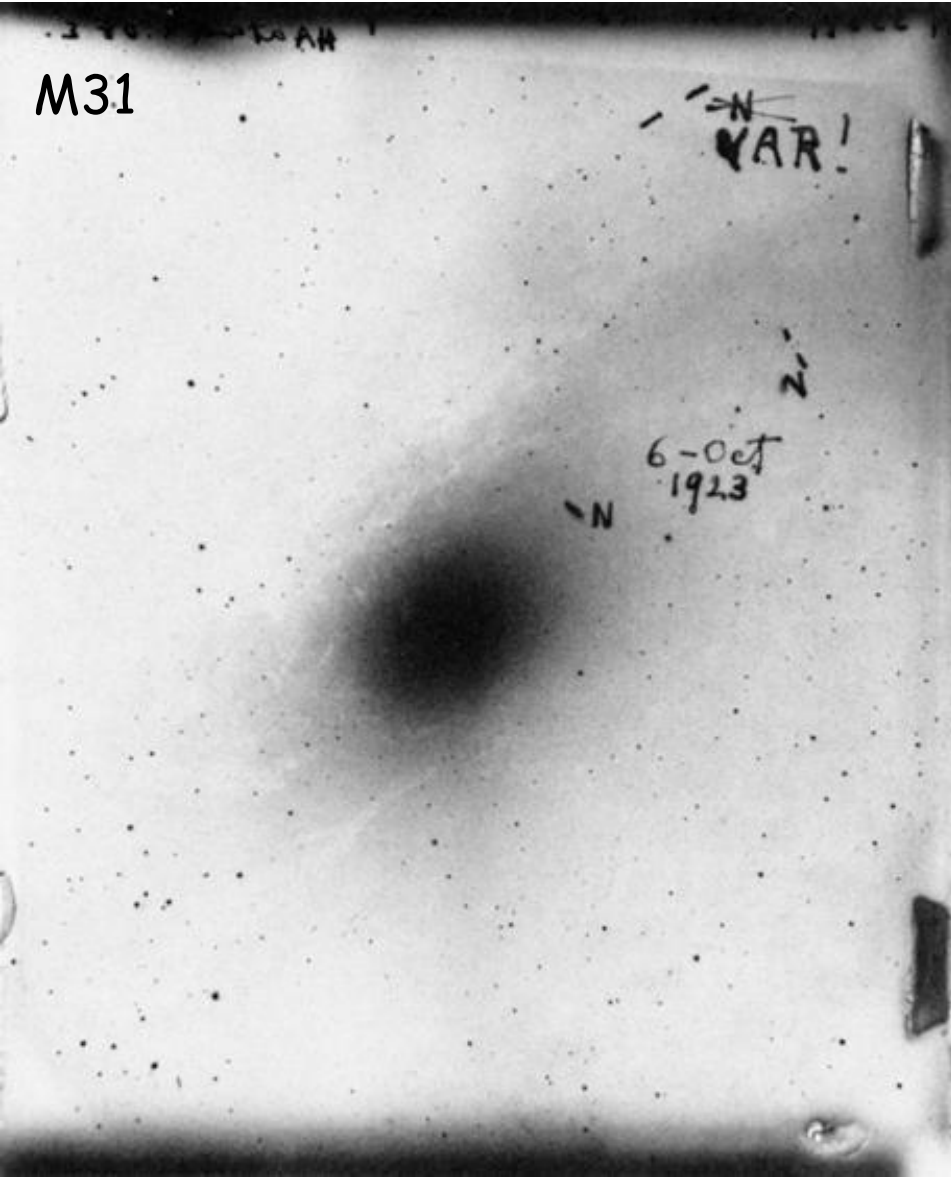
$$v = H_0 D$$

Ils trouvent une valeur de la constante de Hubble $H_0 \sim 530$ and 570 km/s/Mpc

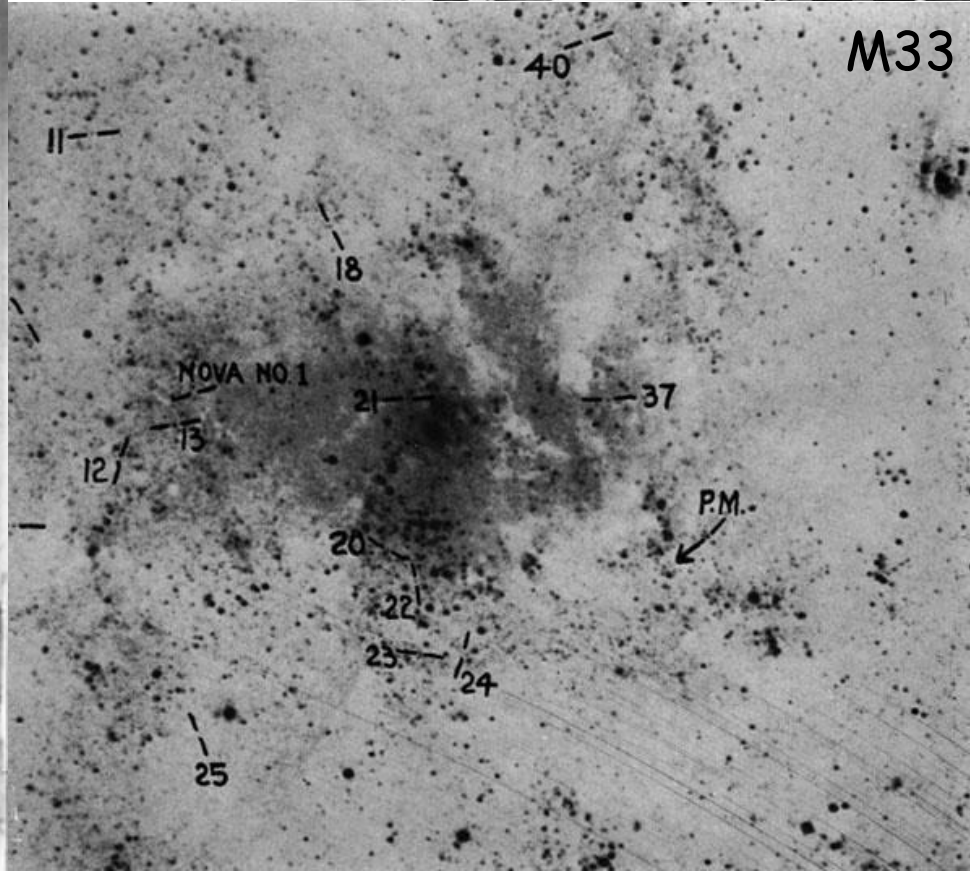
Etoiles Céphéides dans M31 et M33 (plaques photos prises par Hubble)



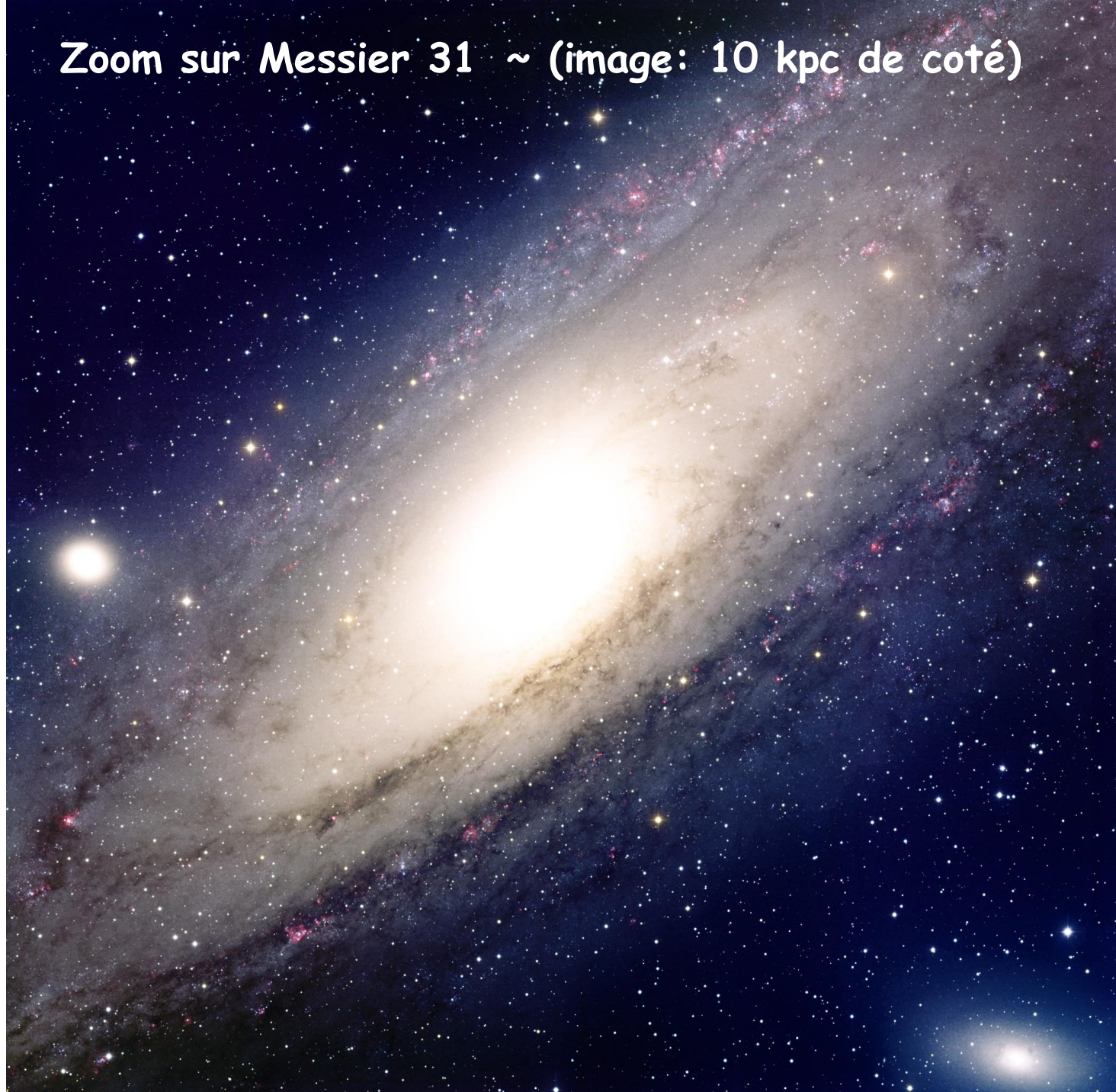
M31



M33

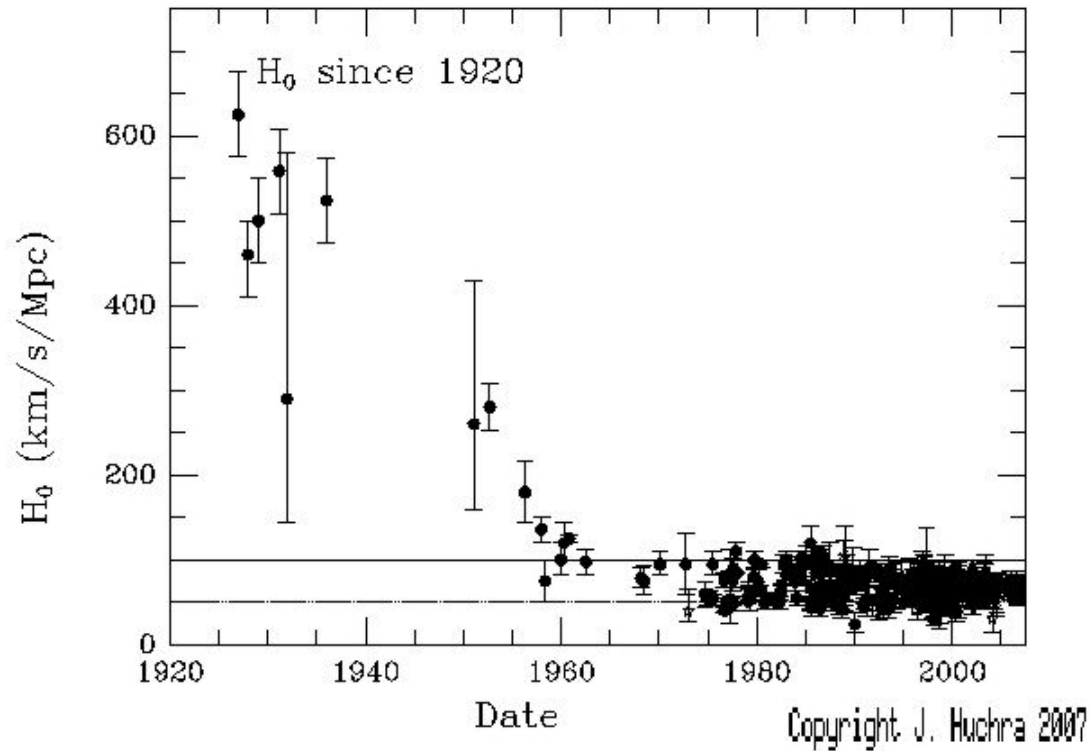


Zoom sur Messier 31 ~ (image: 10 kpc de côté)



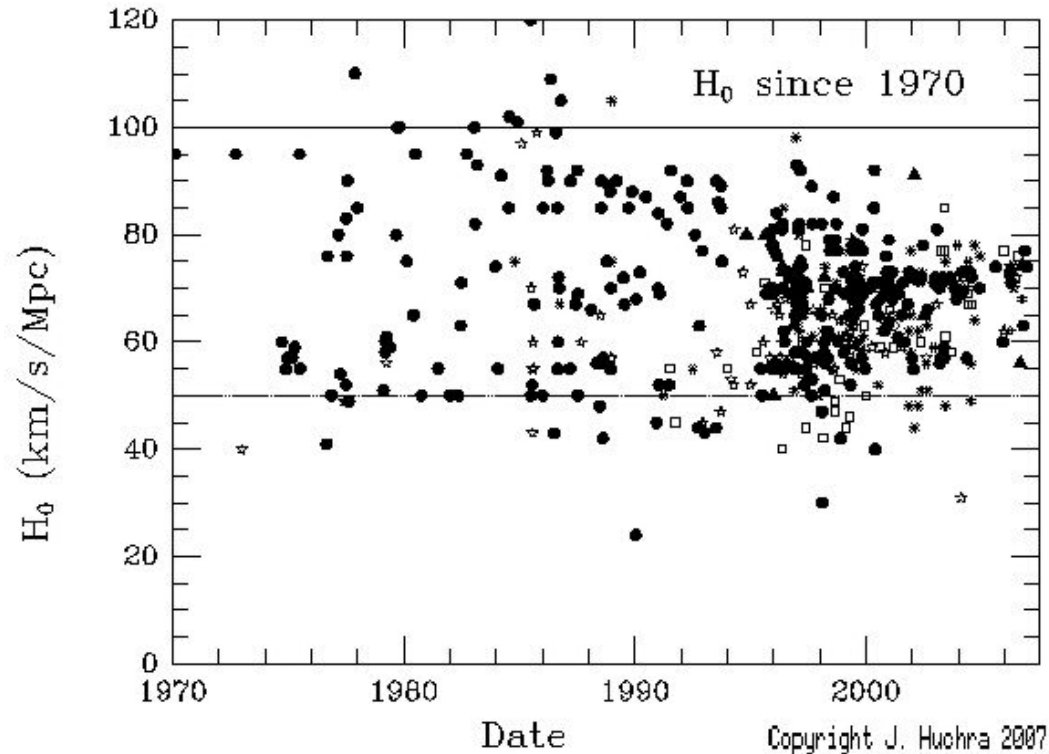
La loi de Hubble-Lemaître

Détermination problématique de H_0 et donc des distances !



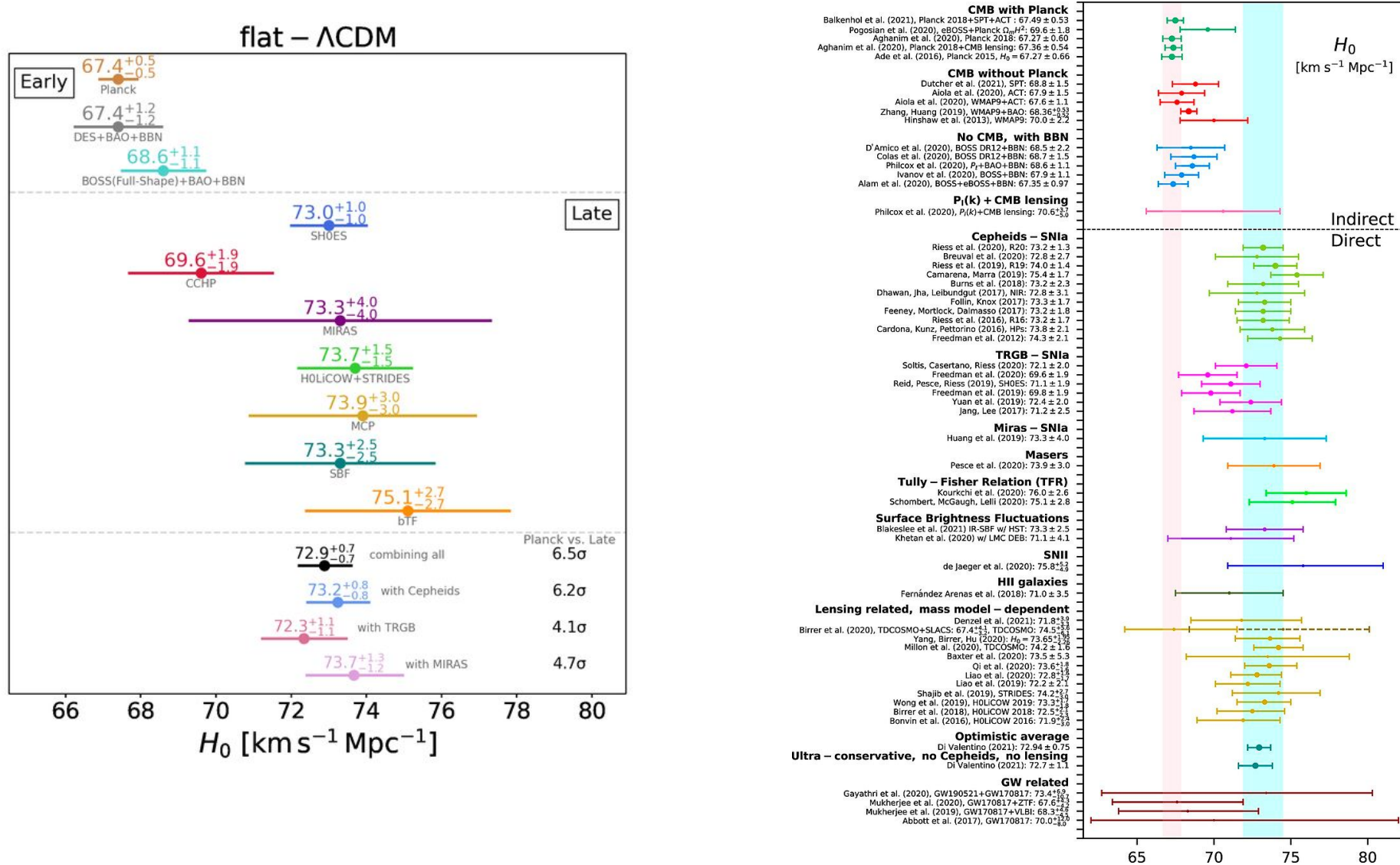
La loi de Hubble-Lemaître

Détermination problématique de H_0 et donc des distances !



La loi de Hubble-Lemaître

Situation actuelle: la « tension de Hubble »



Signification de la constant de Hubble (H_0)

H_0 a la dimension de l'inverse d'un temps:

$$[\text{km/s/Mpc}]$$

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

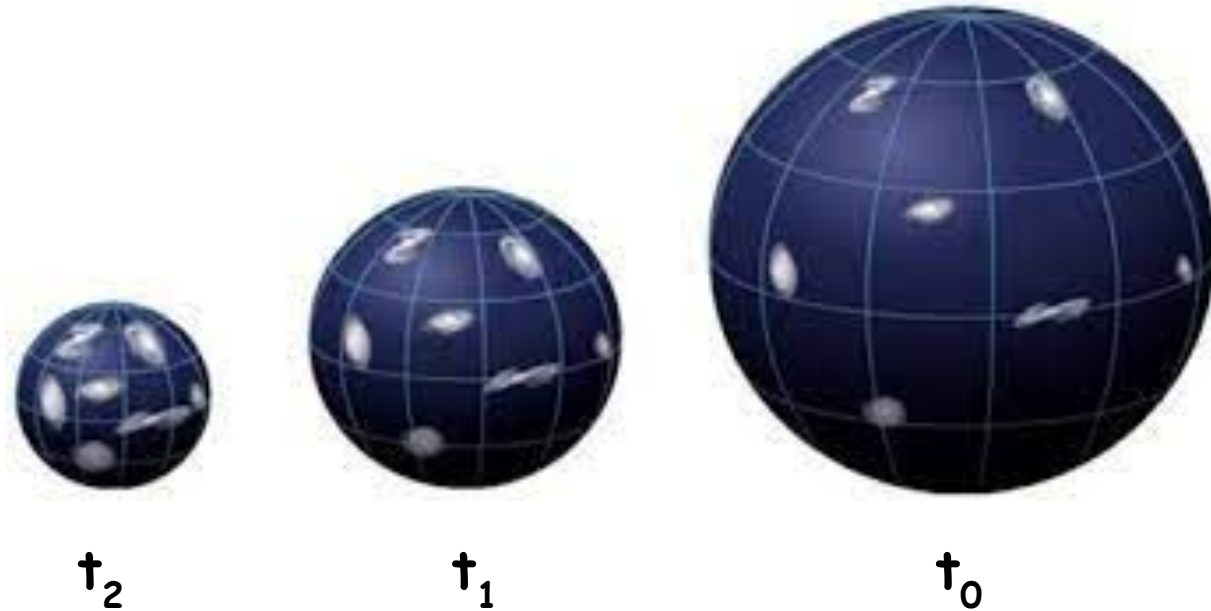
$$\begin{aligned} 1/H_0 &= 9,78 \times 10^9 \text{ ans, si } H_0 = 100 \text{ km/s/Mpc} \\ &= 13,7 \times 10^9 \text{ ans, si } H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc} \end{aligned}$$

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

$$c = H_0 \times R_H$$

$$\begin{aligned} R_H &= c/H_0 = 2997 \text{ Mpc (si } H_0 = 100) \\ R_H &= c/H_0 = 4262 \text{ Mpc (si } H_0 = 72) \end{aligned}$$

Signification de la constant de Hubble (H_0)



Univers (simplifié) sphérique en expansion **radiale**.
 x est le rayon à un temps t_0 aujourd'hui

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**.

Signification de la constant de Hubble (H_0)

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

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

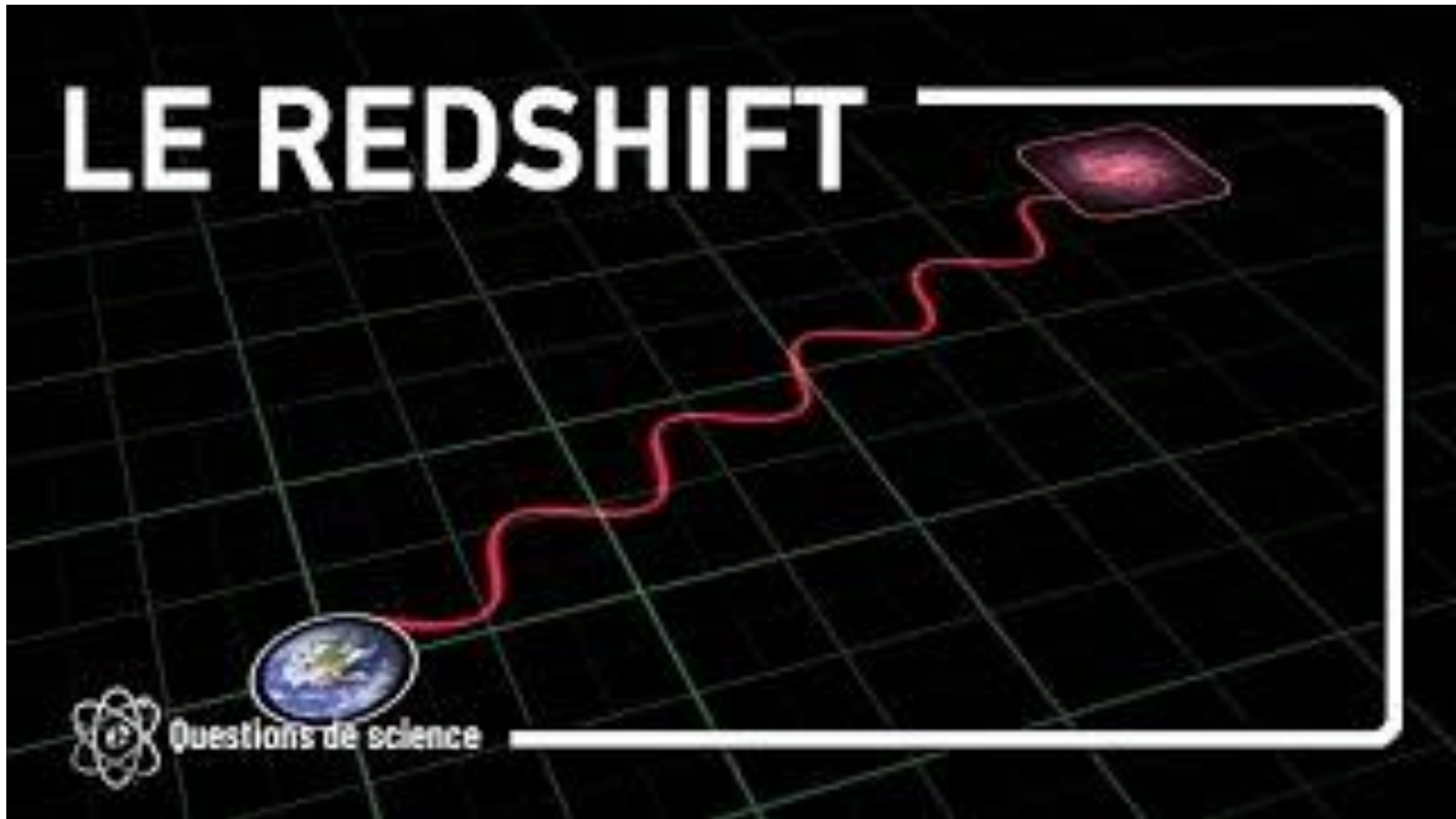
$$V(r,t) = \frac{\dot{a}}{a} r(t) = H(t) r(t)$$

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

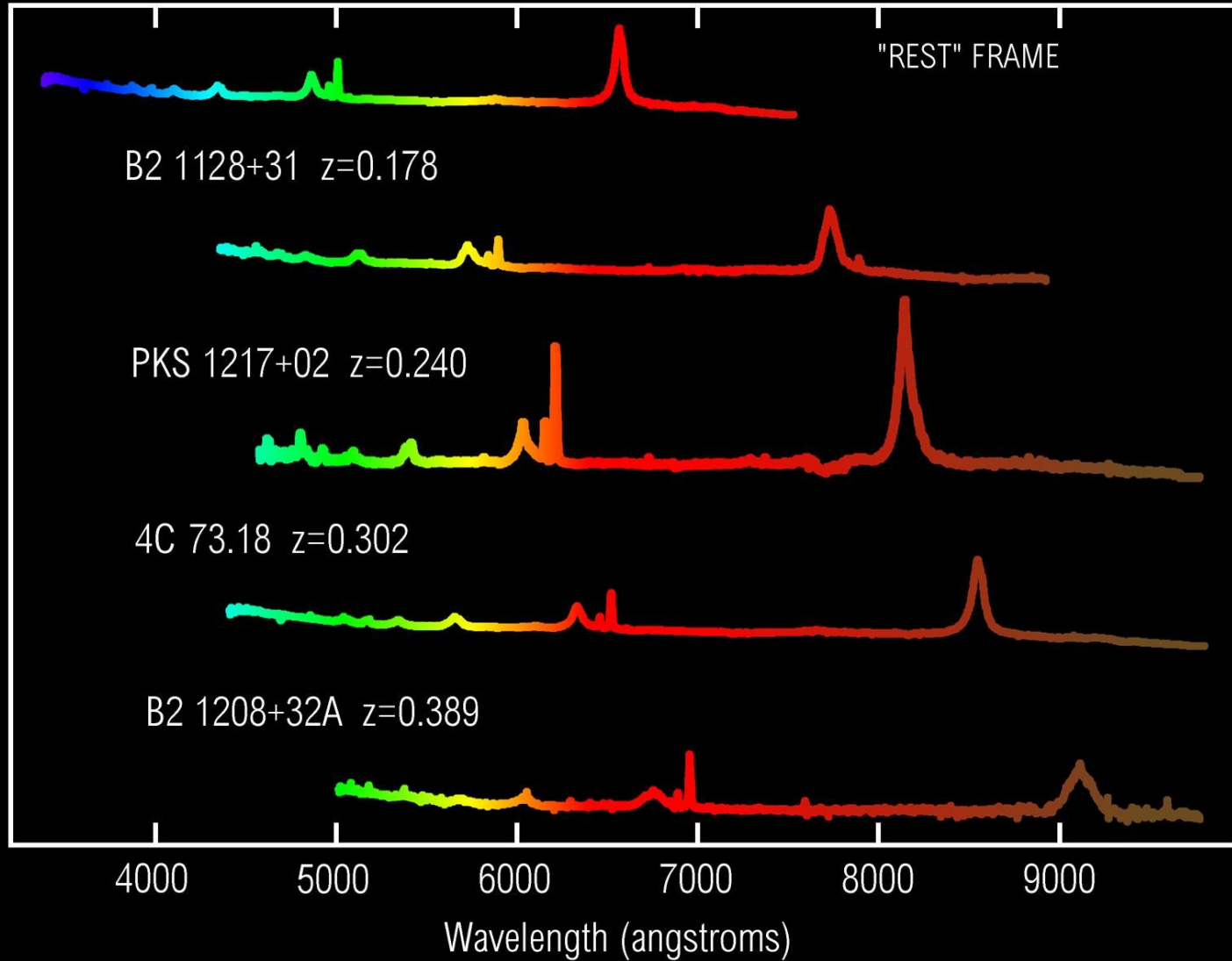
$$V(r,t_0) = H(t_0) r$$

$$V = H_0 D$$

Décalage vers le rouge cosmologique



Décalage vers le rouge cosmologique



Décalage vers le rouge cosmologique

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

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_0} - 1$$

$$\lambda_e(a) = a \times \lambda_{\text{obs}} \qquad \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_e} = \frac{1}{a} = 1 + z$$

Décalage vers le rouge cosmologique

Relation fondamentale en cosmologie

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

z est le décalage vers le rouge (redshift) est est
lié directement à la distance de l'objet et au
temps où les photons ont été émis

Distances cosmologiques

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

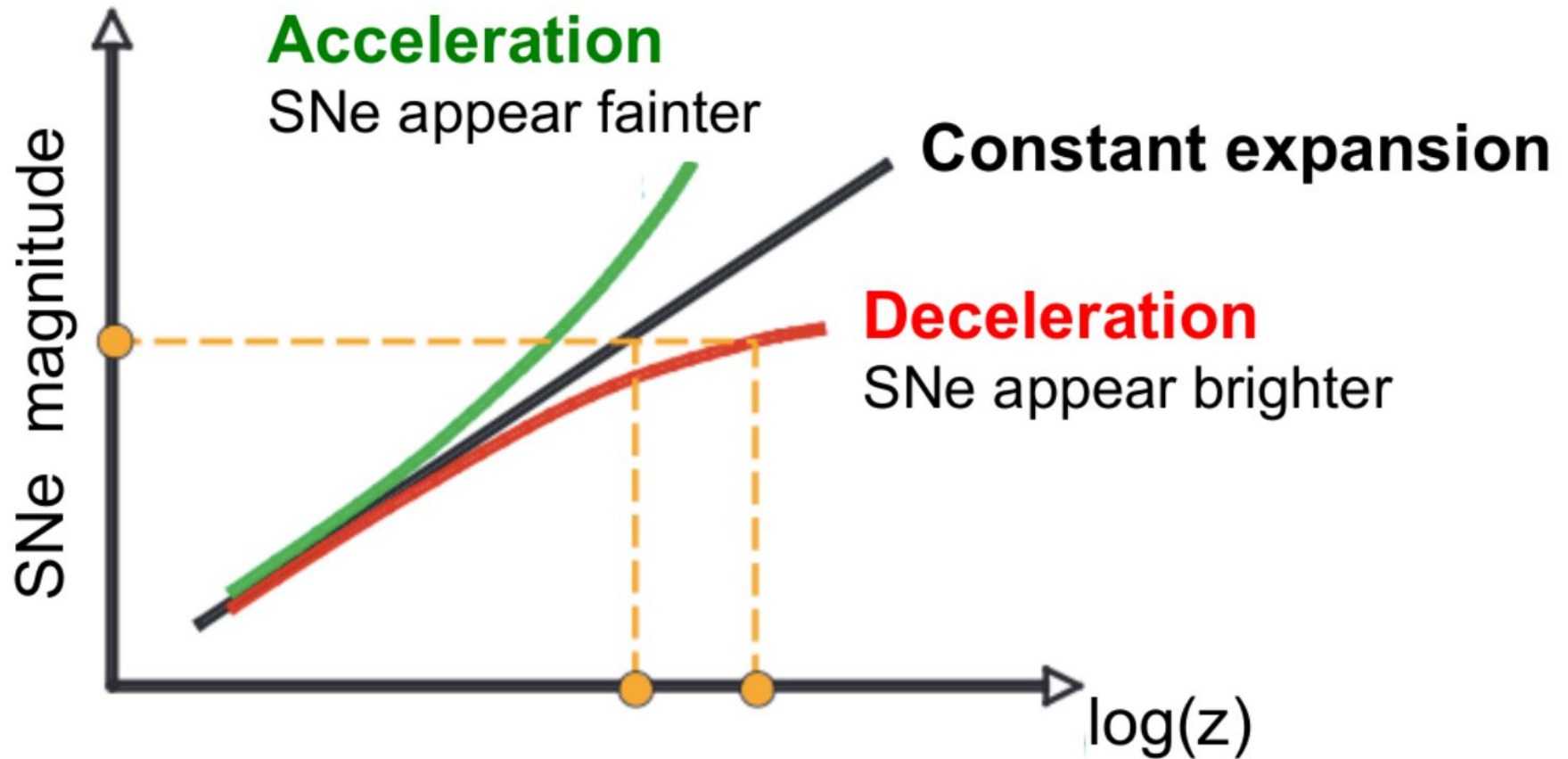
L: luminosité

F: flux reçu par l'observateur

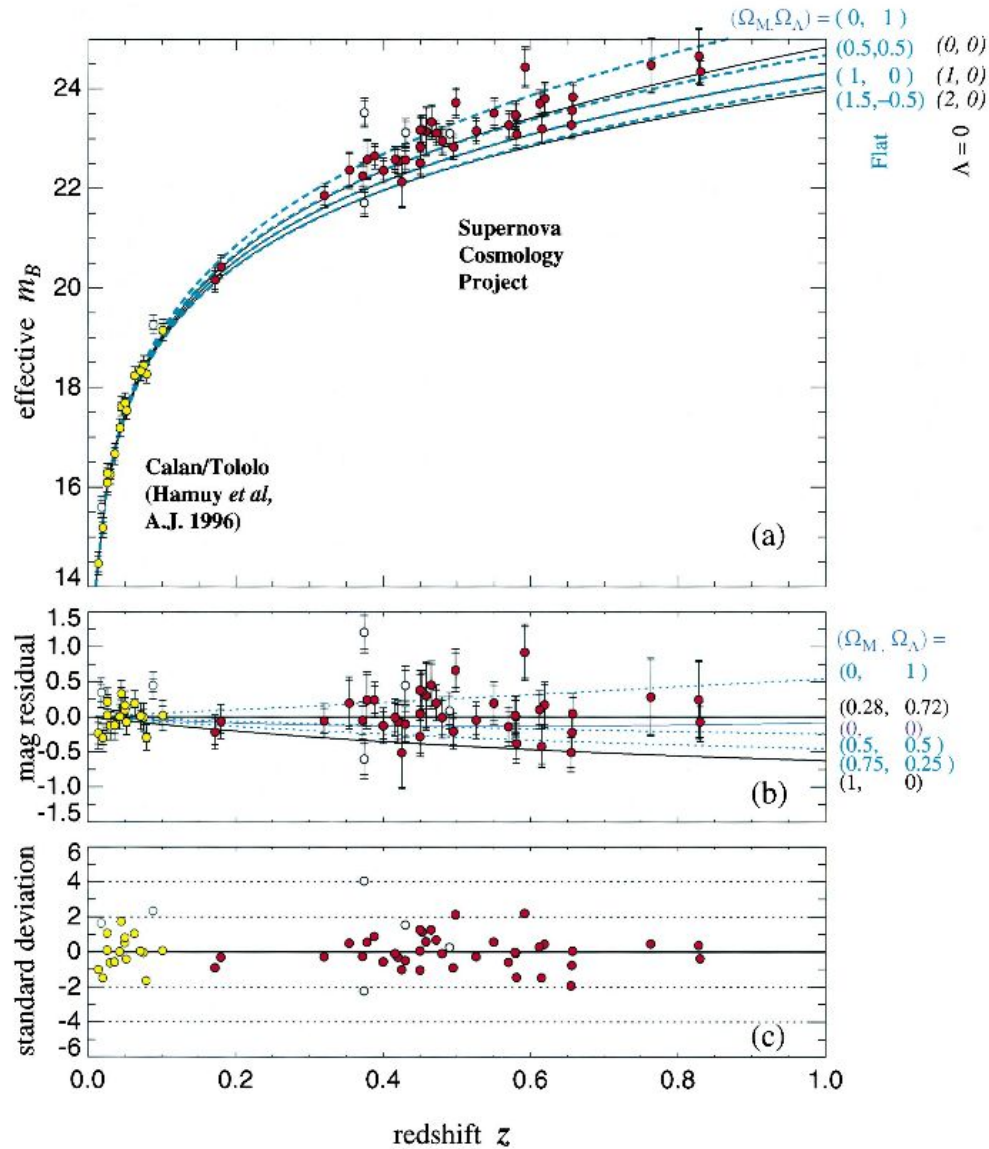
Les deux distances ne sont pas égales !

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

Expansion accélérée



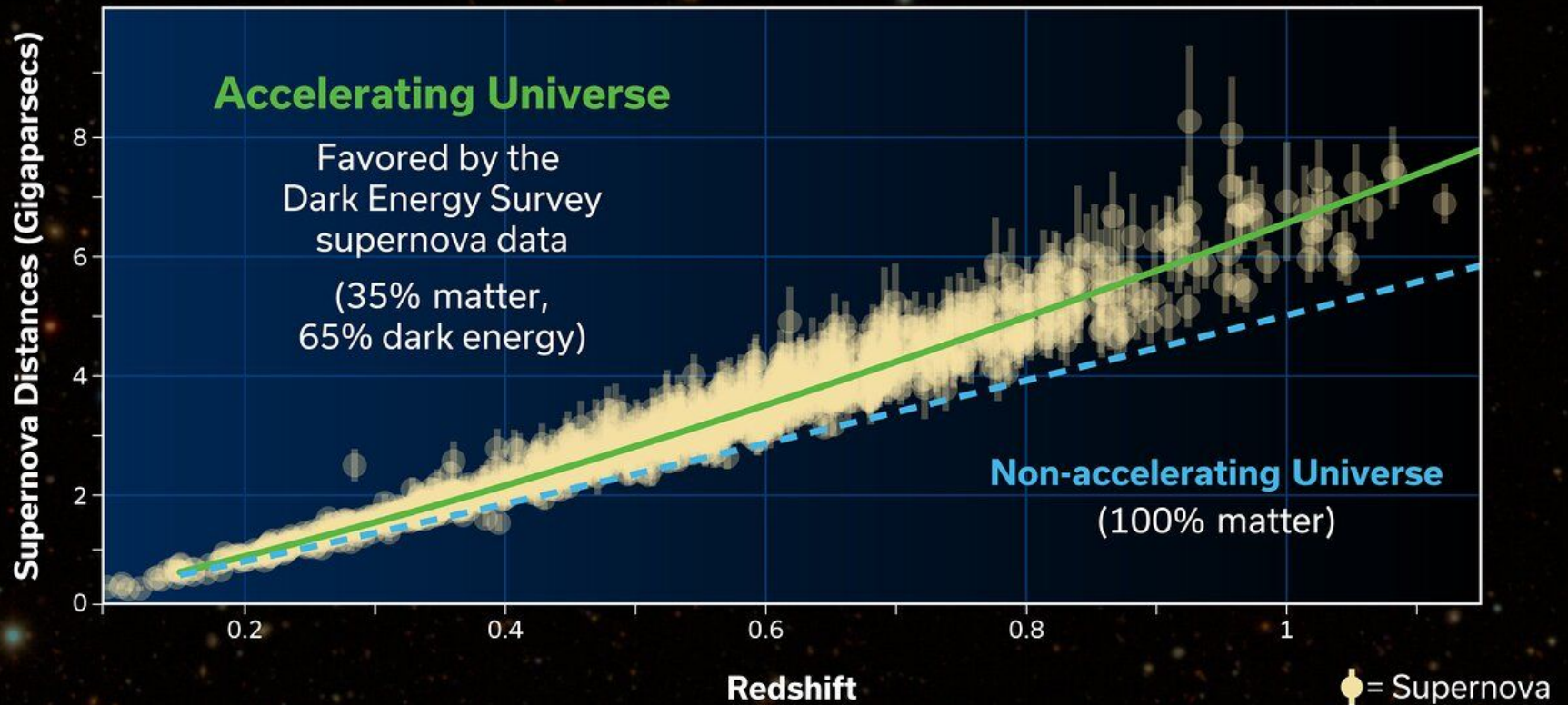
Expansion accélérée



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

Expansion accélérée

SUPERNOVA HUBBLE DIAGRAM



Dark energy survey (2024)

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

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

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

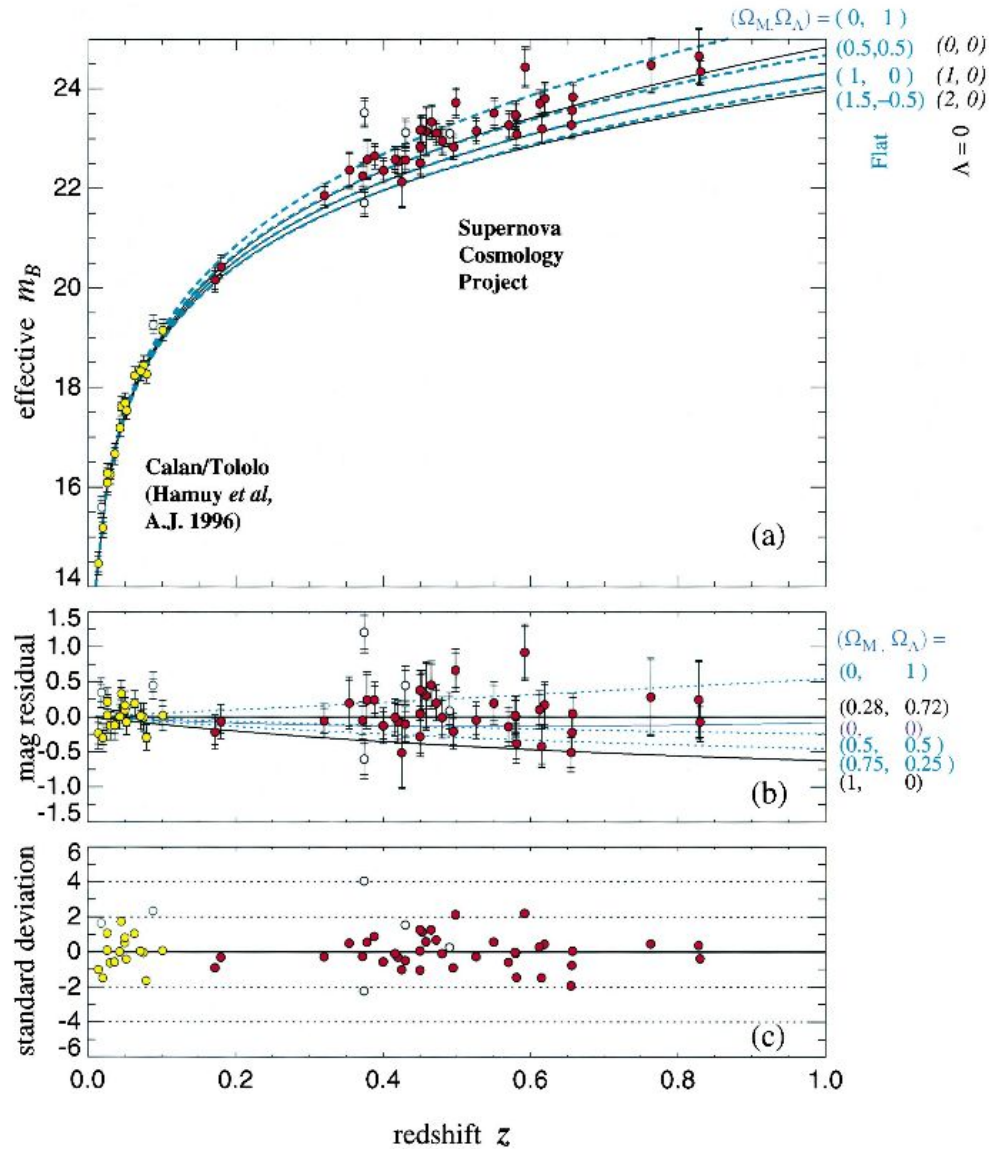
On donne le plus souvent les densités de matière baryonique, matière noire, et d'énergie en unité de la masse critique.

Par exemple

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

Qui sont des nombres sans dimension

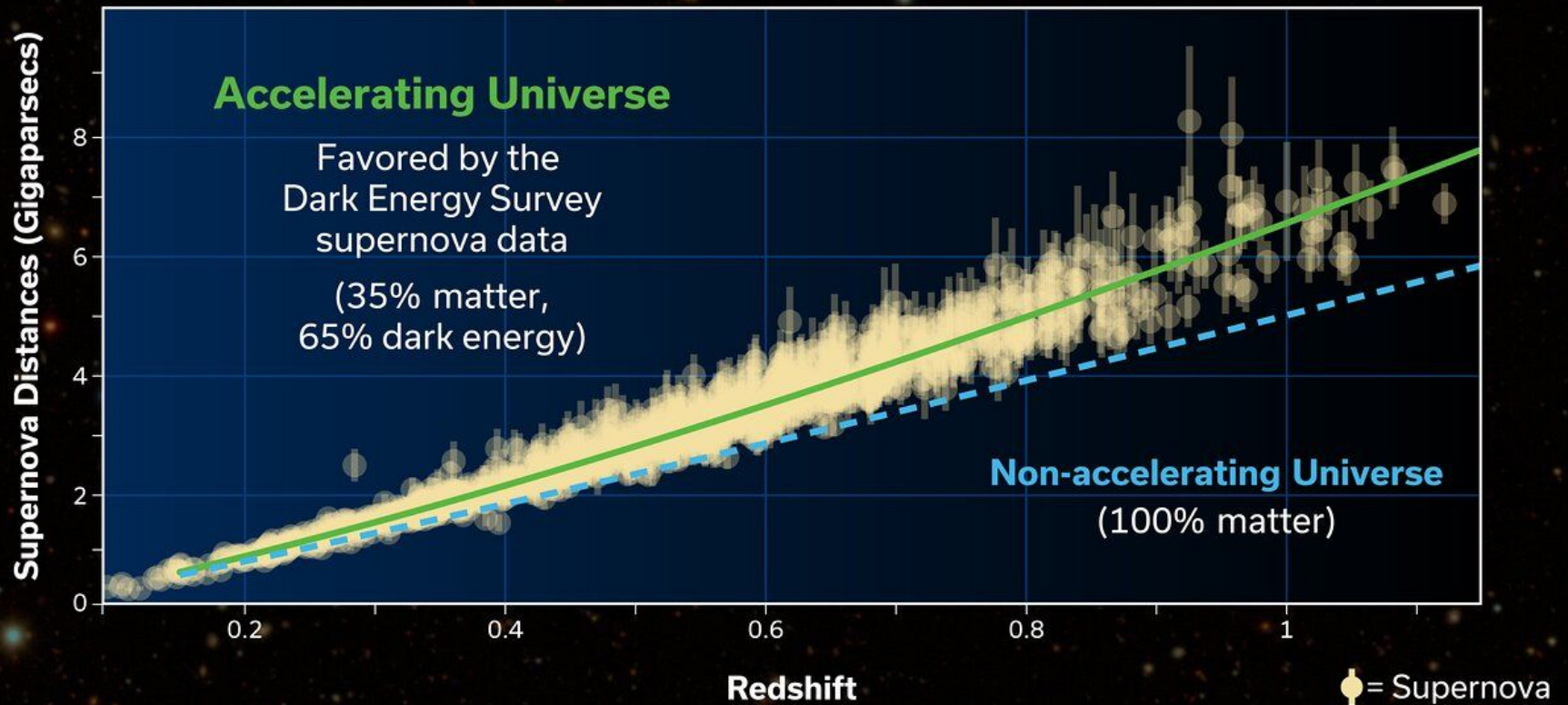
Expansion accélérée



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

Expansion accélérée

SUPERNOVA HUBBLE DIAGRAM



Dark energy survey (2024)

Machines cosmologiques de la prochaine décennie



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



Roman: grand champ IR +
spectro integrale de champ
(Lancement en 2027 ?)

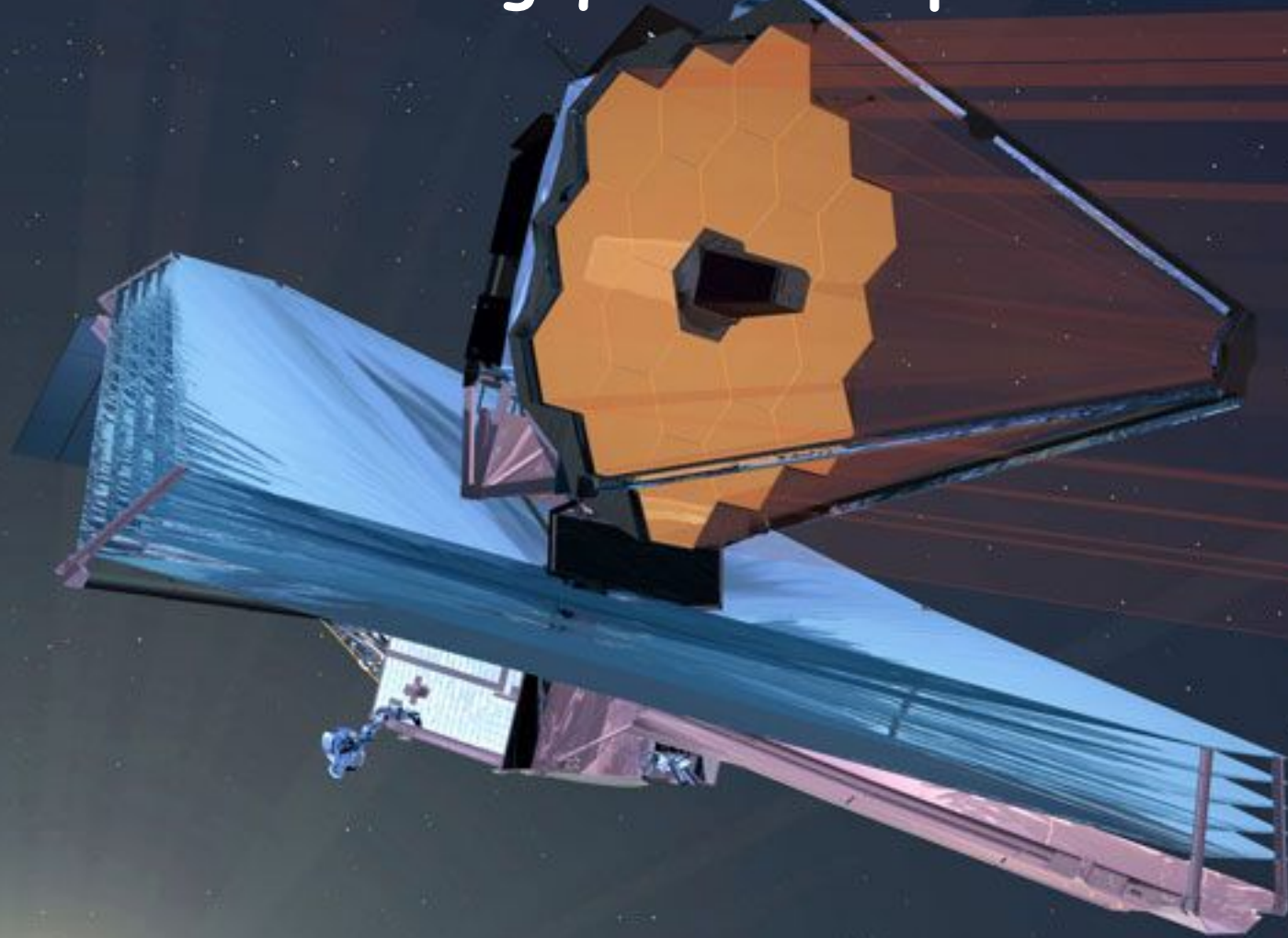


LSST: 8m grand champ optique. 5 filtres.
Tout le ciel toute les semaine (début en
2026)



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
prévu pour 2029

Machines cosmologiques de la prochaine décennie

120 m

100 m

80 m

60 m

40 m

20 m

E-ELT (39m de diamètre) au Chili. En construction
prévu pour 2029