

L'énergie noire

Sébastien Renaux-Petel

Institut d'Astrophysique de Paris. CNRS



IHP - 29 octobre 2015
pour l'association Science Ouverte



Energie noire = nom donné à un phénomène mal compris : le fait que l'univers est actuellement en phase d'expansion accélérée

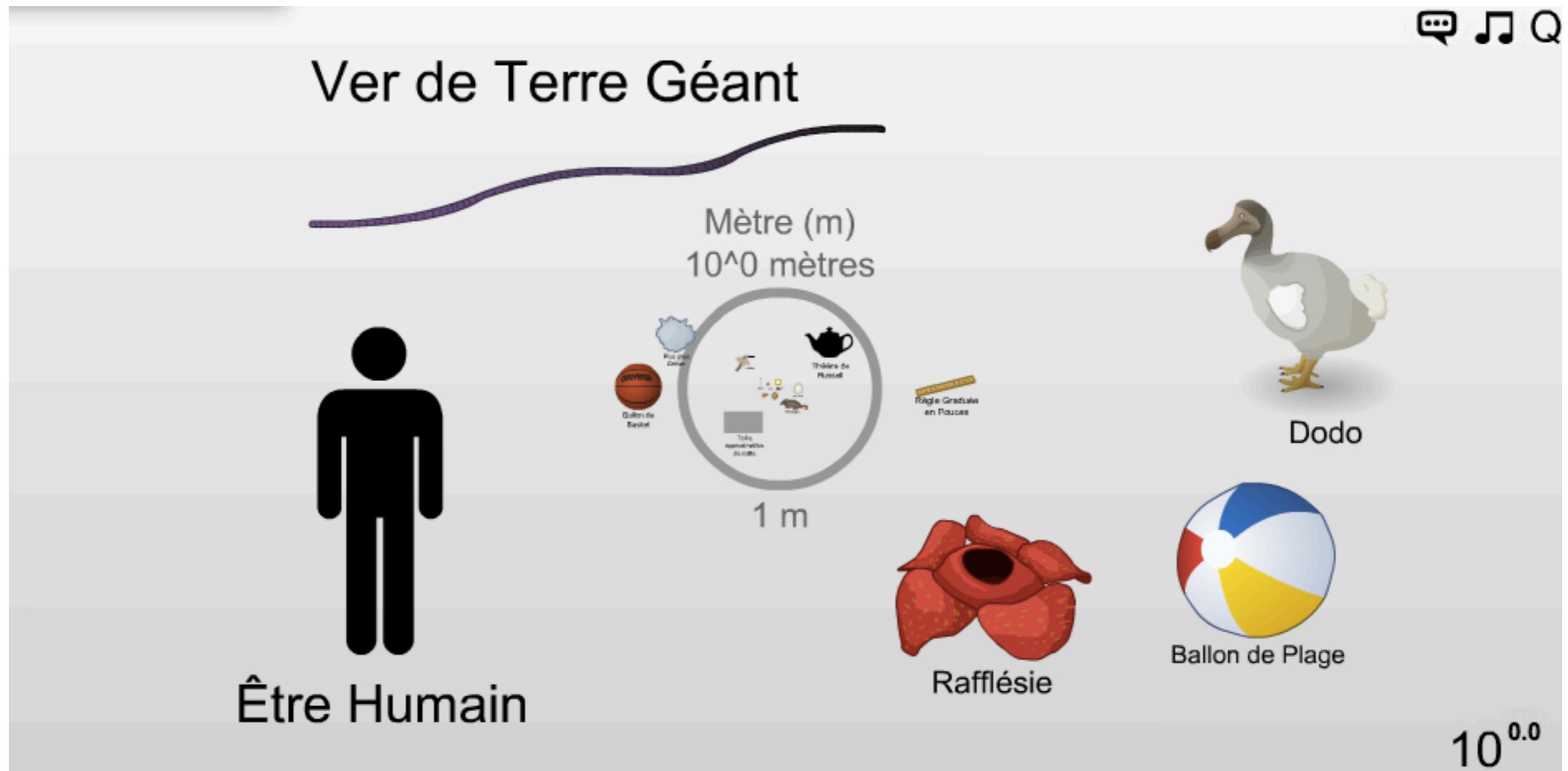
- Qu'est-ce que ça veut dire ? Qu'est-ce que l'expansion de l'univers ?
- Comment en est-on certain ?
- Comment l'accélération de l'univers est-elle détectée ?
- Pourquoi est-ce mal compris ? Quels problèmes cela pose-t-il ?
- Comment en savoir plus ?

Introduction et plan

- 1) La cosmologie
- 2) Le modèle du Big-Bang
- 3) L'énergie noire

La cosmologie

Observations et ordres de grandeur



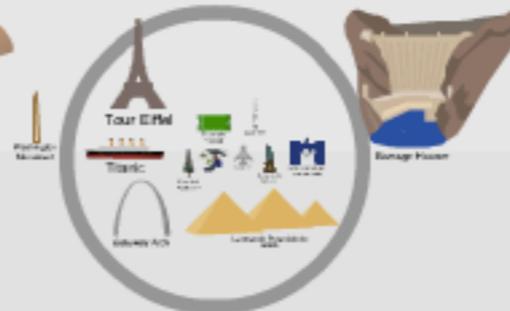
<http://htwins.net/scale2/lang.html>

Observations et ordres de grandeur



Demi Dôme

Kilomètre (km)
 10^3 mètres



1,000 m



Burj Khalifa



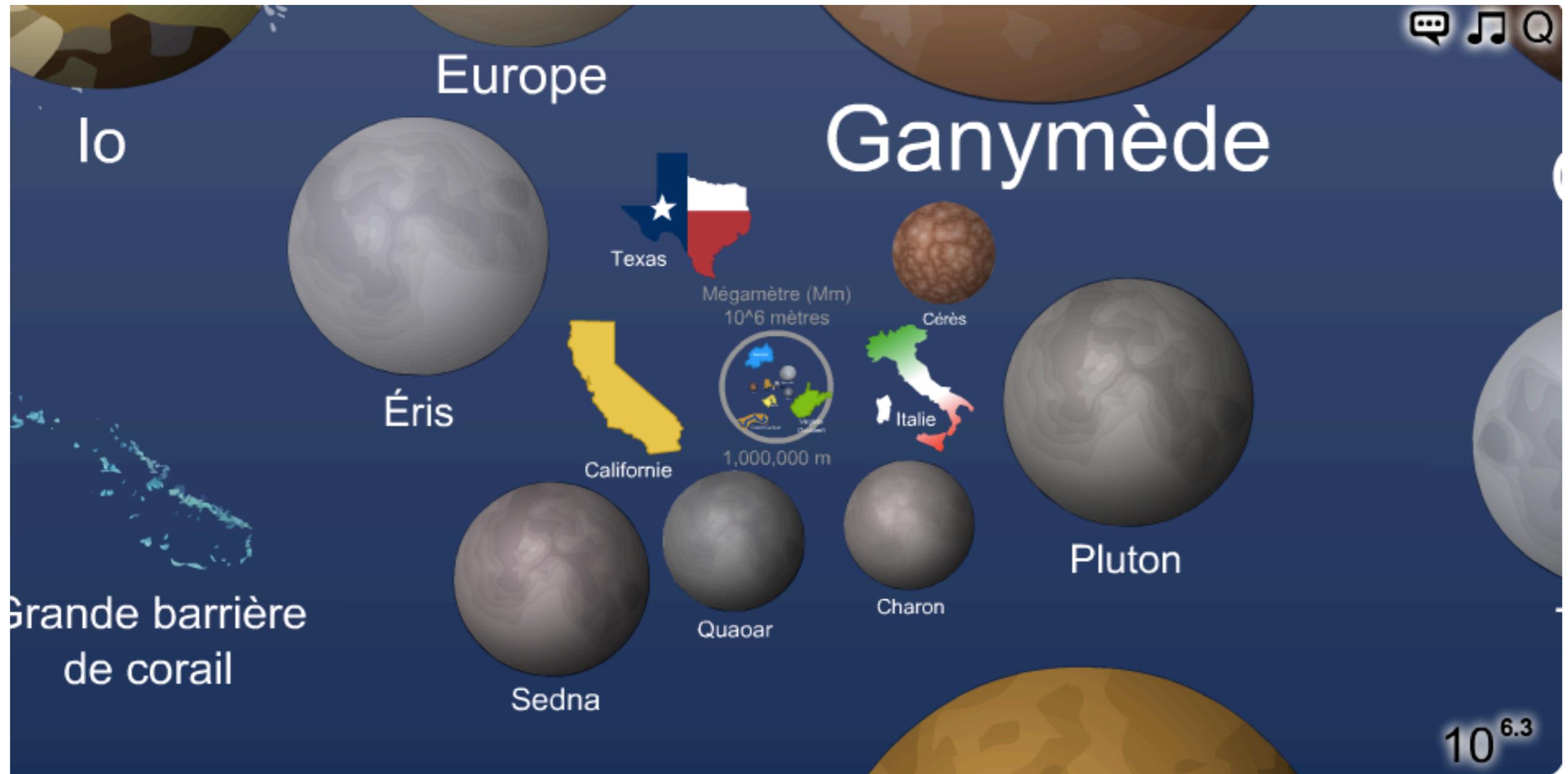
Cascade du Saut de l'Ange



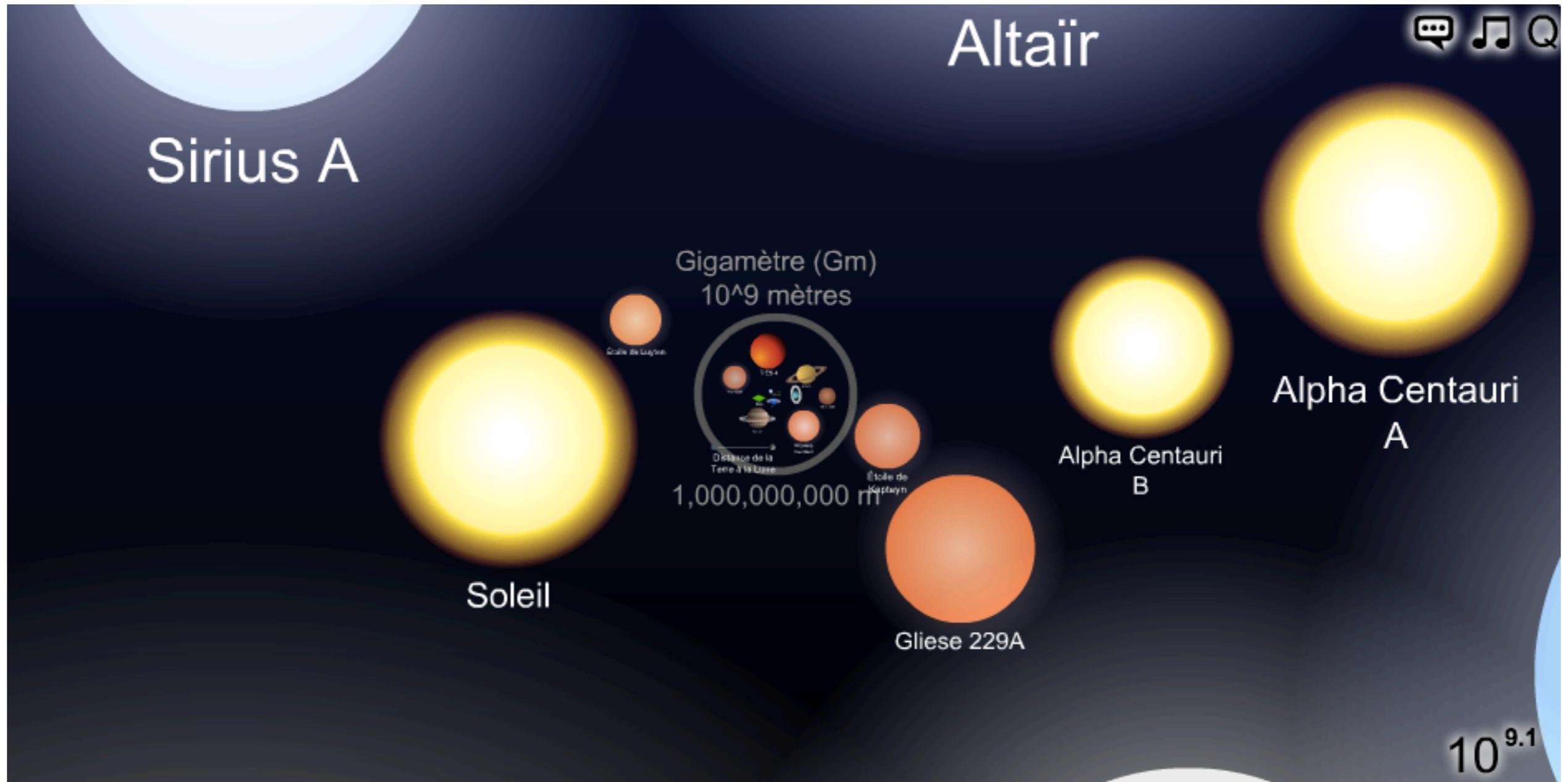
Usine Boeing de Everett

$10^{3.1}$

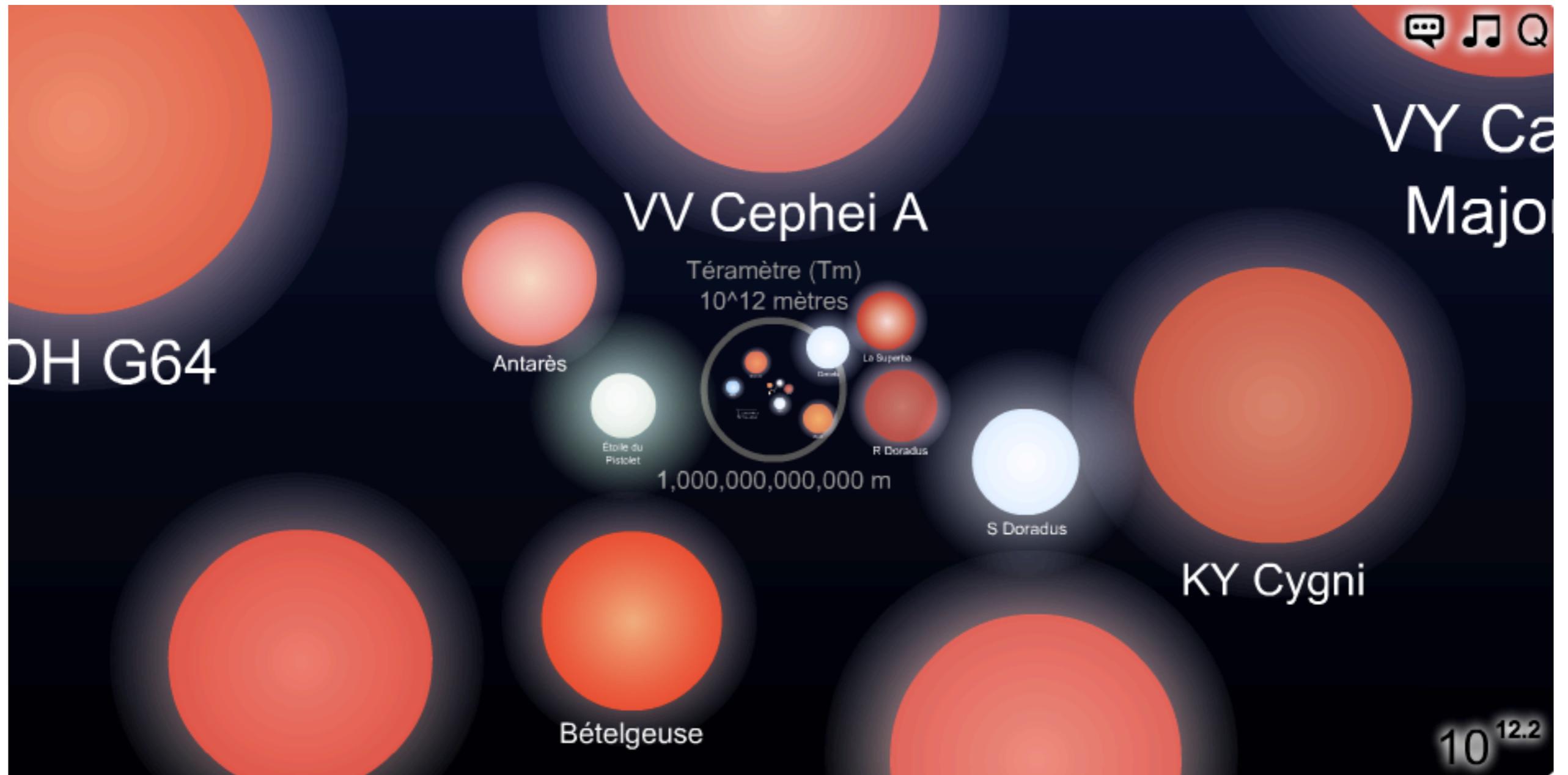
Observations et ordres de grandeur



Observations et ordres de grandeur



Observations et ordres de grandeur



Observations et ordres de grandeur

Année-Lumière

Distance de la Proxima du Centaure à Alpha Centauri

Pézomètre (Pm)
 10^{15} mètres
1,000,000,000,000,000 m

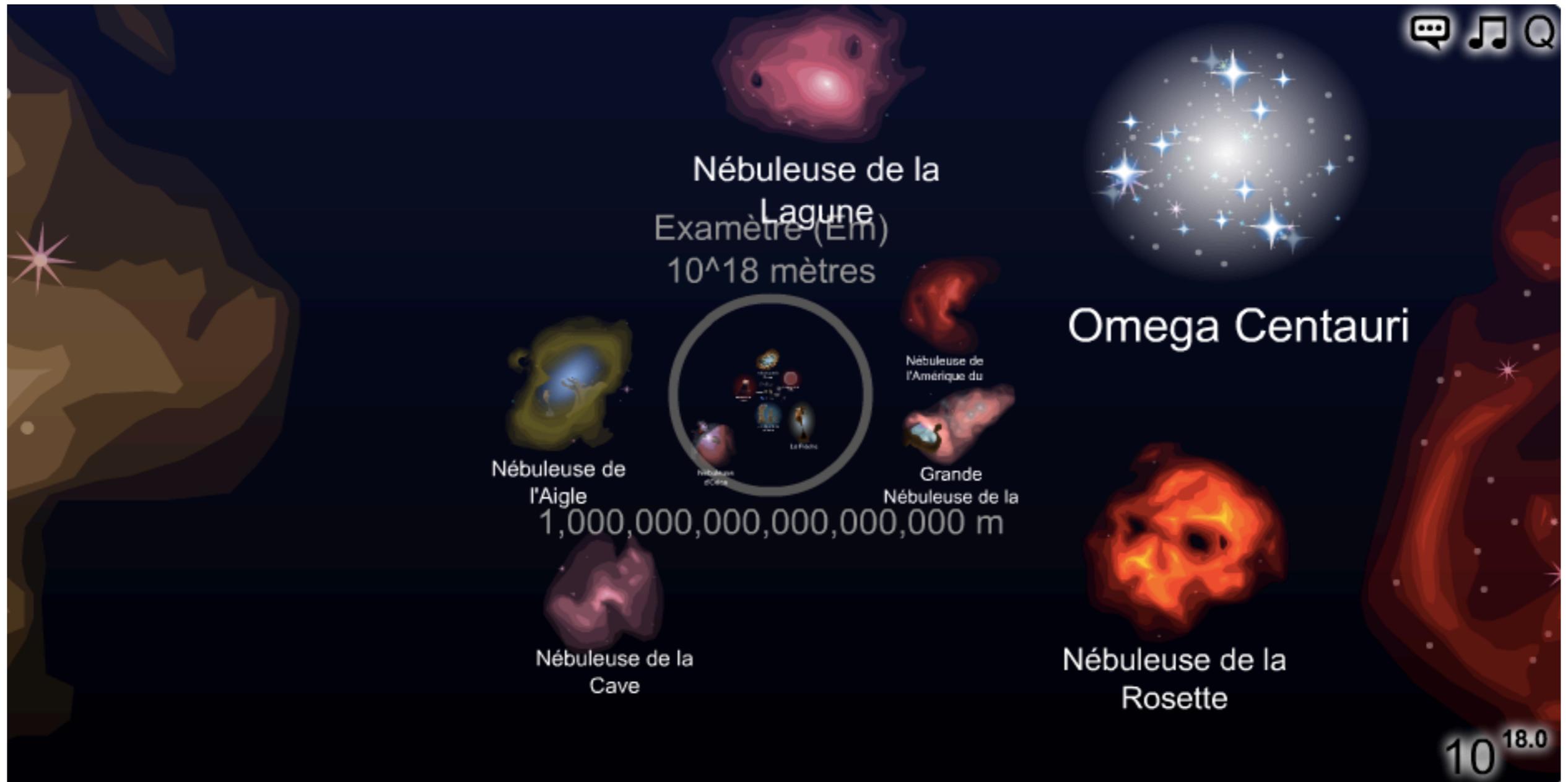
Nébuleuse de l'Oeil de Chat

Le Hamburger de Gomez

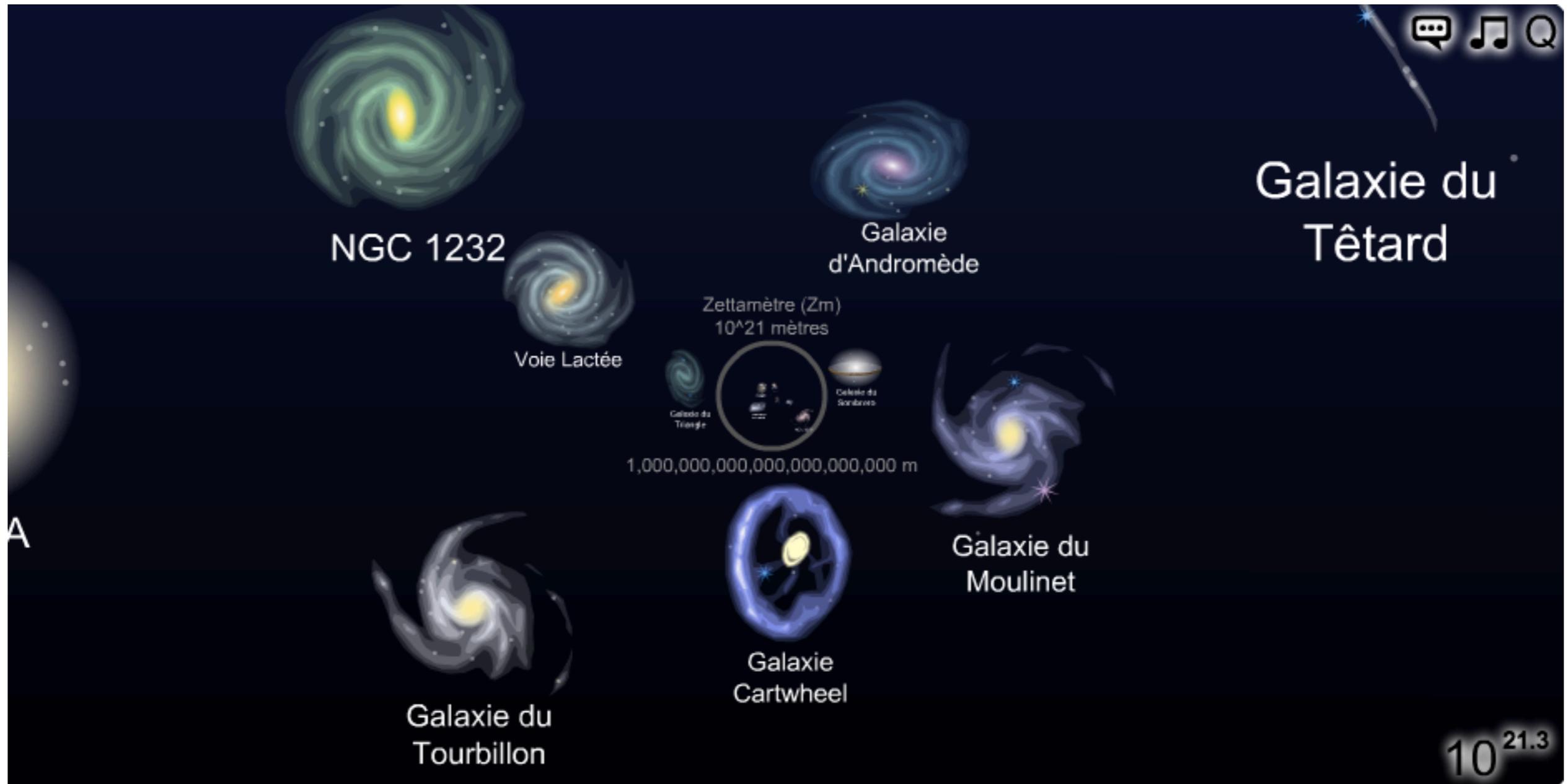
Nébuleuse du Sablier

$10^{15.6}$

Observations et ordres de grandeur



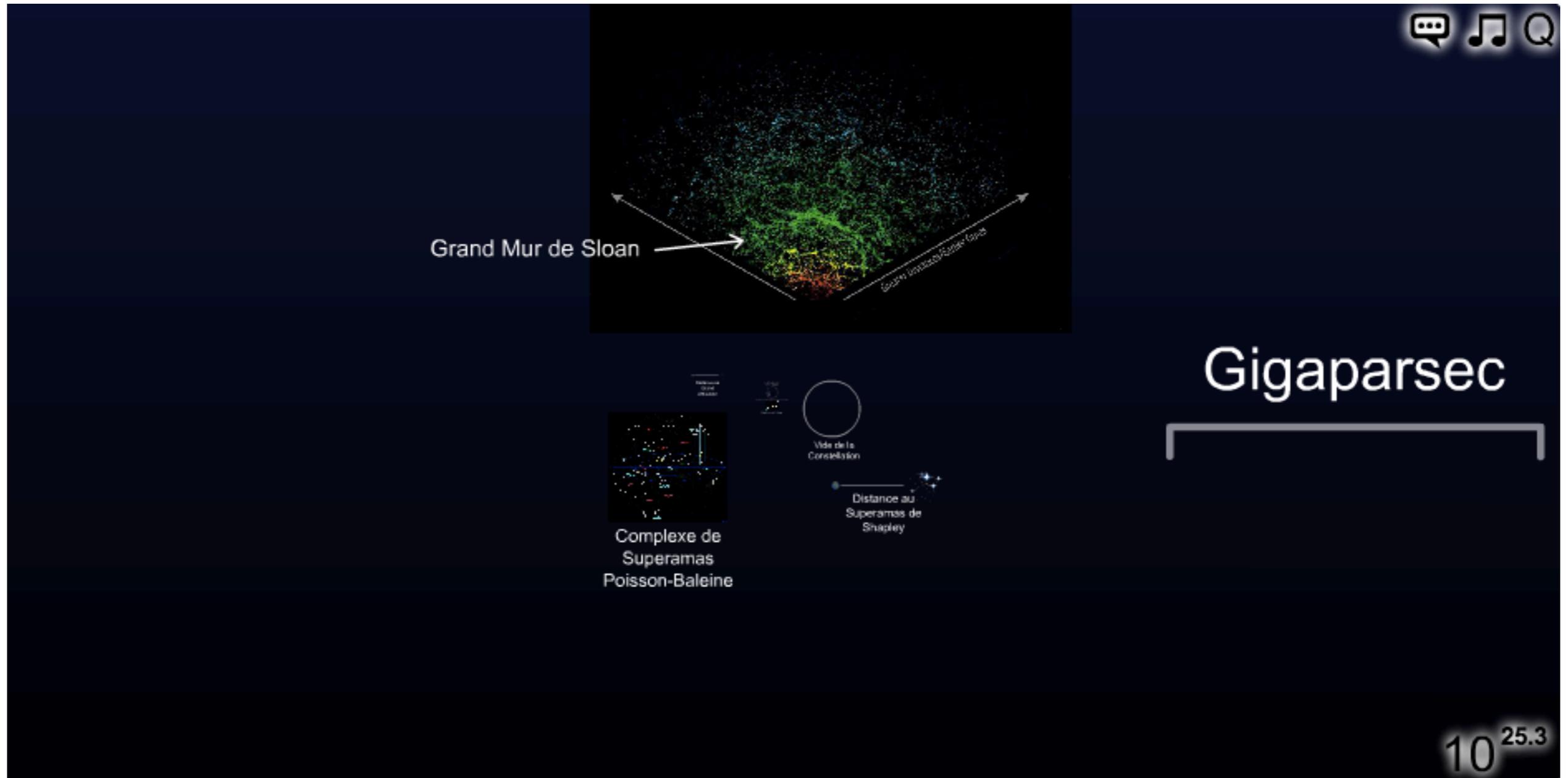
Observations et ordres de grandeur



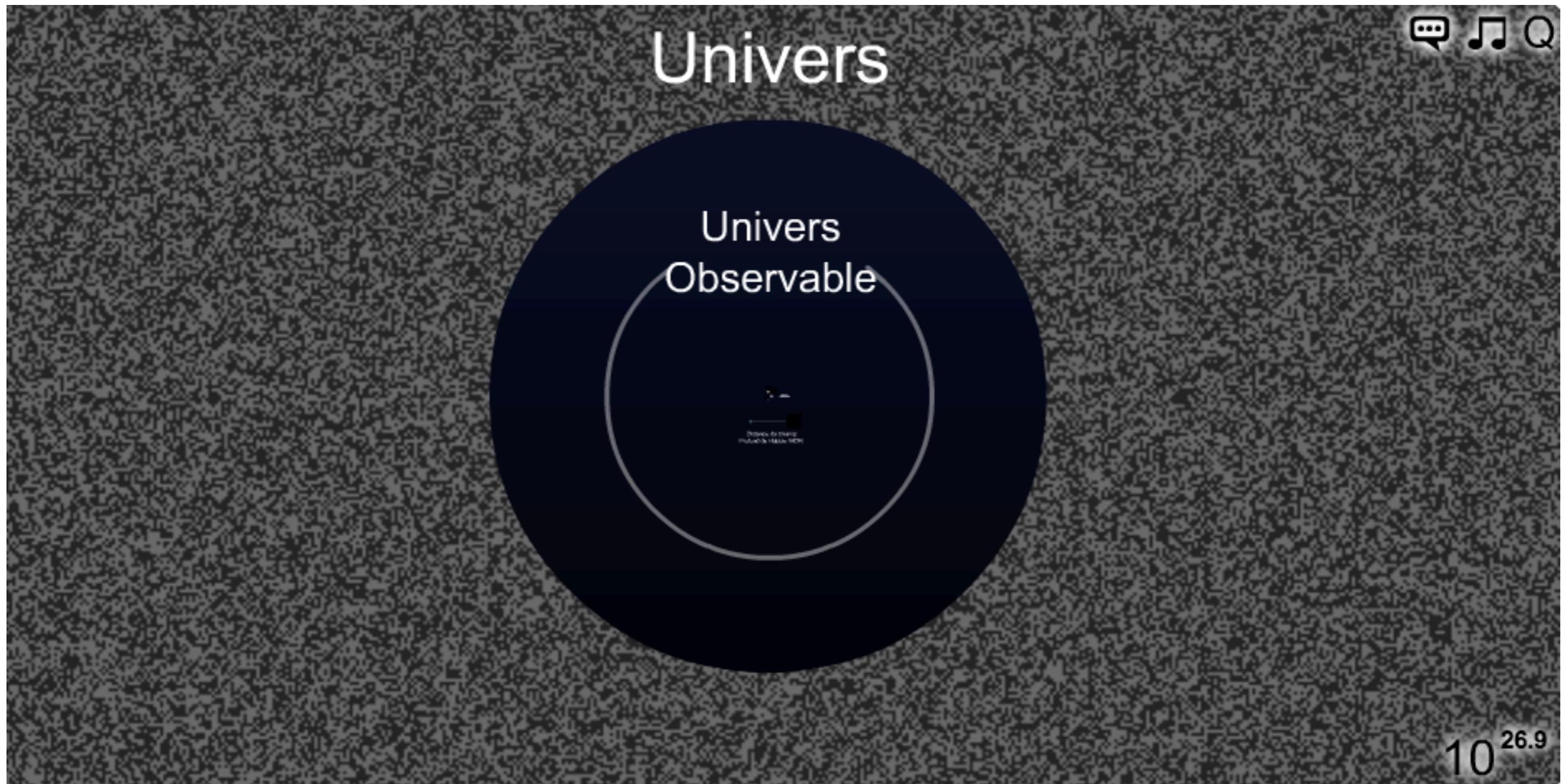
Observations et ordres de grandeur



Observations et ordres de grandeur



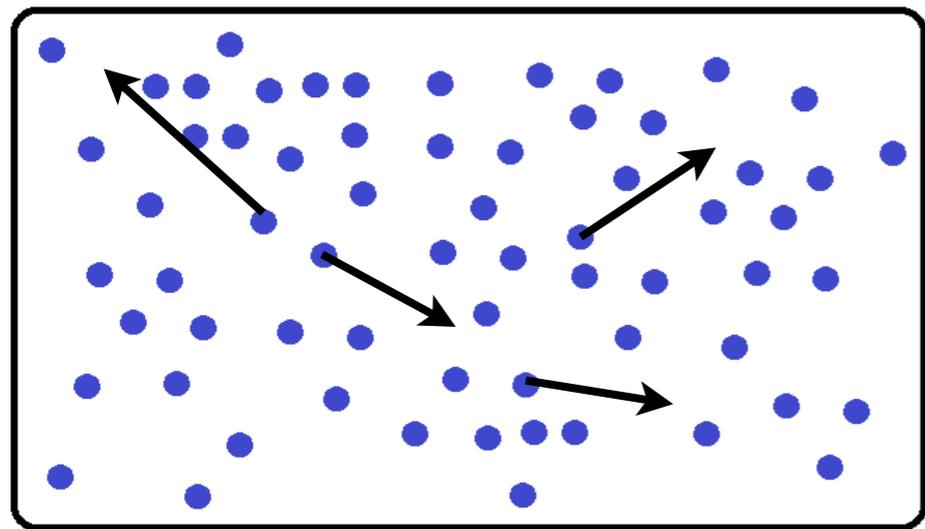
Observations et ordres de grandeur



Qu'est-ce que la cosmologie ?

- La cosmologie est l'étude de l'univers **dans son ensemble**

cf. l'air dans une pièce

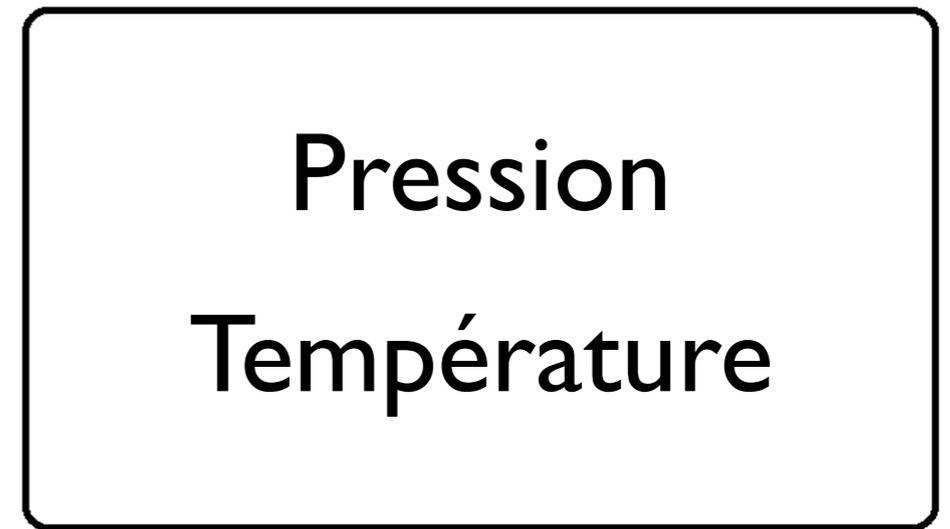


$$(m_i, \vec{r}_i, \vec{v}_i)$$

Description **microscopique**



Description
statistique



Description **macroscopique**

- Description cohérente prenant en compte :
 - ★ connaissance des lois de la nature
 - ★ observations astronomiques

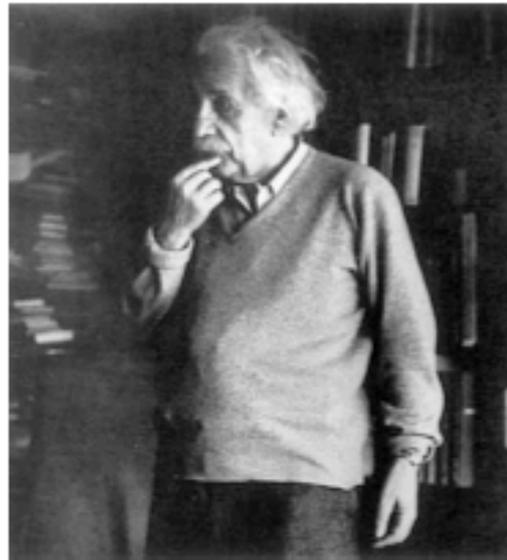
Spécificités de la science cosmologie

- Nous n'observons **qu'une partie de l'univers**, depuis un point particulier.
- Nous n'observons **qu'un seul univers**.



- La cosmologie ne fonctionne pas selon le modèle classique (fantasmé) « Hypothèses, Expériences, Résultats ».
- Plus proche de l'archéologie : **construction d'un consensus par accumulation d'observations**.
- Nous partons des théories fondamentales vérifiées en laboratoire.
- Ces théories sont extrapolées à de plus hautes énergies :
 On peut contraindre les extensions proposées à ces théories et construire les extensions les plus fructueuses.

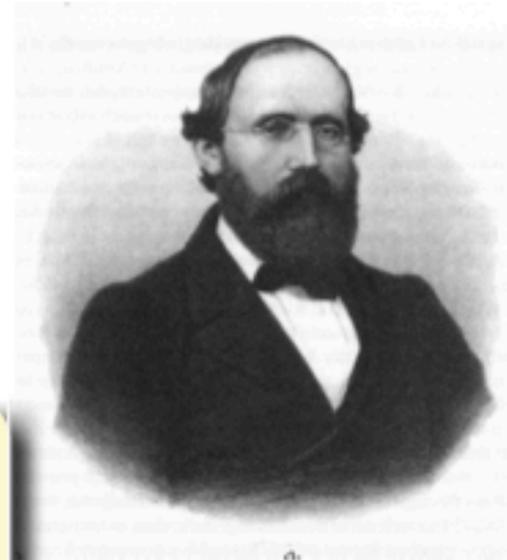
Cadre conceptuel de la cosmologie moderne



Physique : Einstein
Géométrie : Riemann

Formulation de la relativité générale (1915)

Premiers modèles cosmologiques (1917-1927)



Développement de la physique dans un espace en expansion (>1948)

Modèle du Big-Bang

Liens avec la physique des hautes énergies (>1981)

Inflation, cosmologie des cordes



Le modèle du Big-Bang

Hypothèses du modèle du Big-Bang chaud



- Gravitation décrite par la relativité générale
- Les lois physiques sont universelles (valables à tout endroit et à tout temps)
- Nous n'occupons pas une position particulière dans l'univers (principe cosmologique)
- La matière contient :
 - ★ radiation (lumière)
 - ★ poussière (fluide de galaxies sans pression)

Hypothèses très conservatrices

Observations

La vitesse de propagation de la lumière est finie



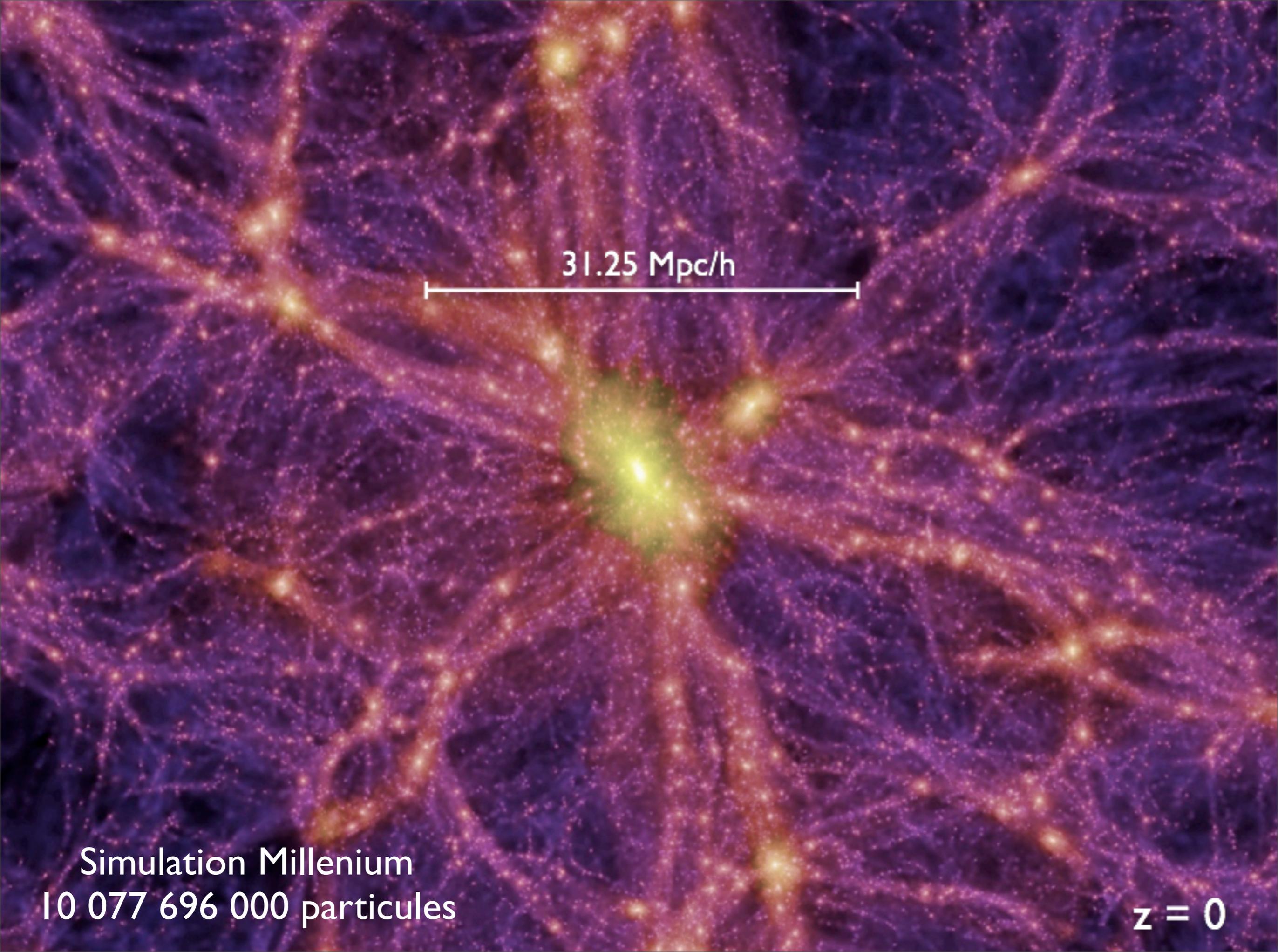
Voir loin, c'est voir dans le passé.

- ★ Soleil : 8 minutes-lumière
- ★ Jupiter : 41 minutes-lumière
- ★ Etoile la plus proche : 4 années-lumière
- ★ Centre de notre galaxie (Voie Lactée) : 28 000 ans
- ★ Galaxie d'Andromède : 2,5 millions d'années
- ★ En cosmologie : utilisation du parsec (3.3 années-lumière).





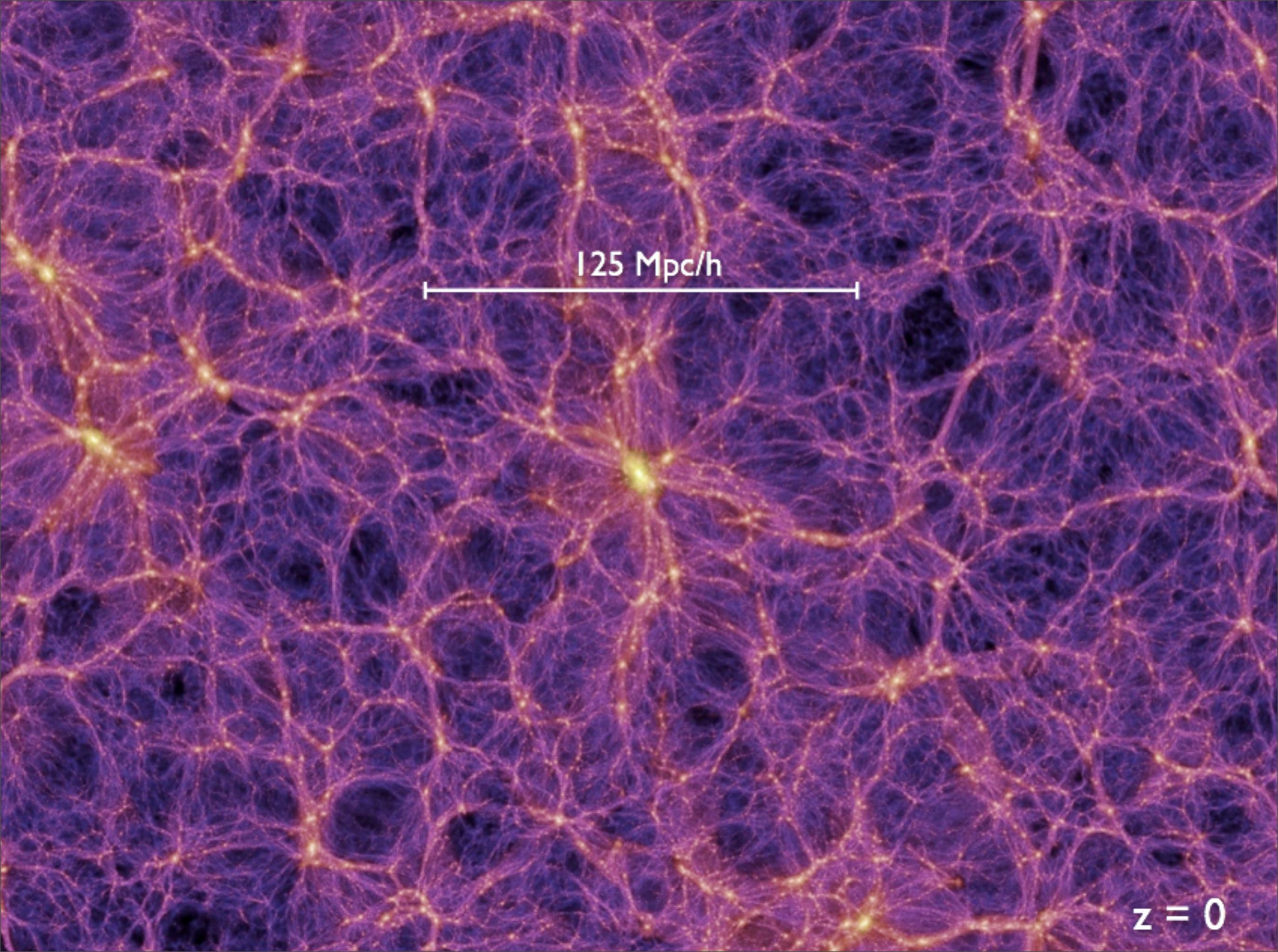
Sloan Digital Sky Survey



31.25 Mpc/h

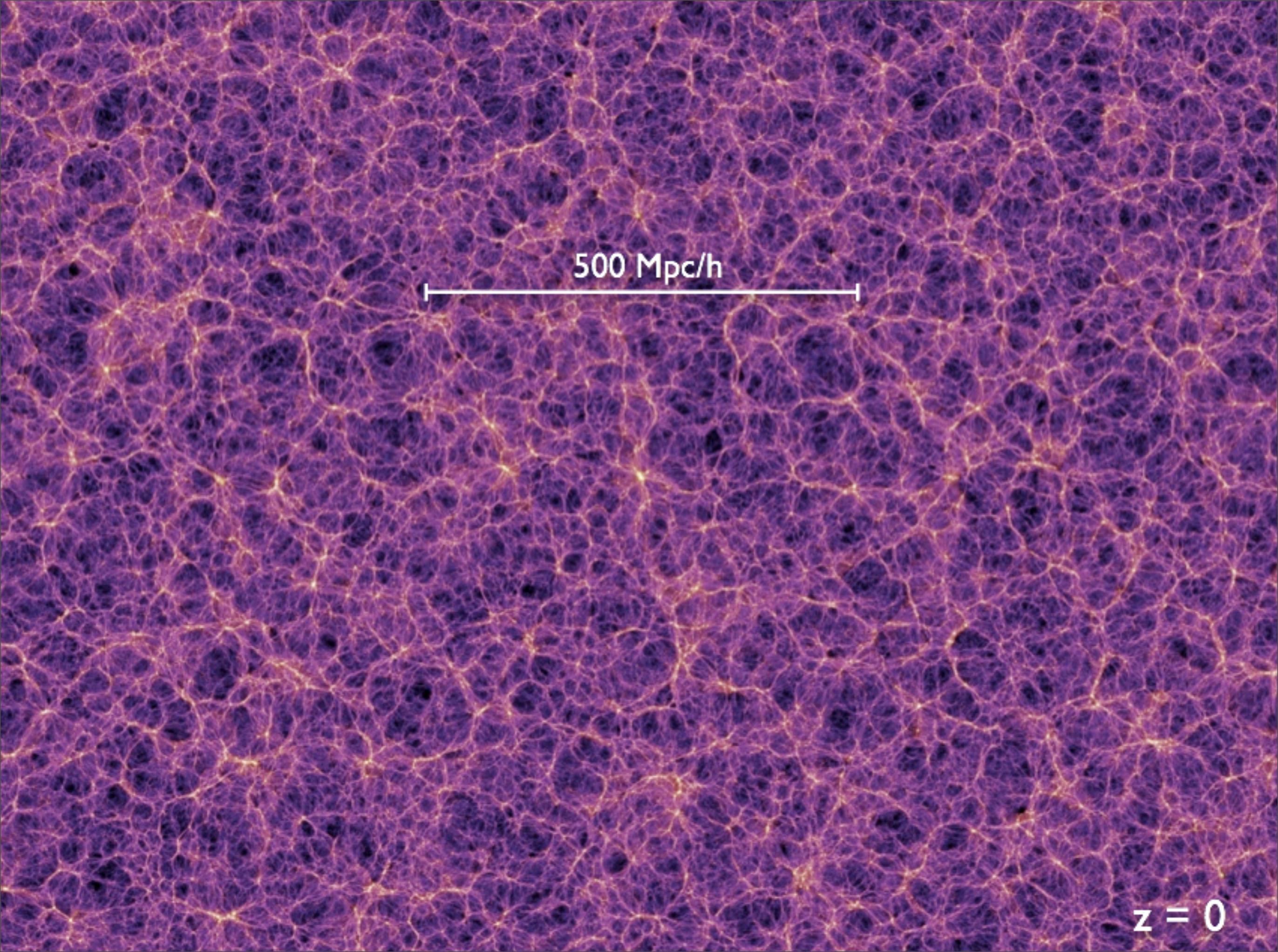
Simulation Millenium
10 077 696 000 particules

$z = 0$



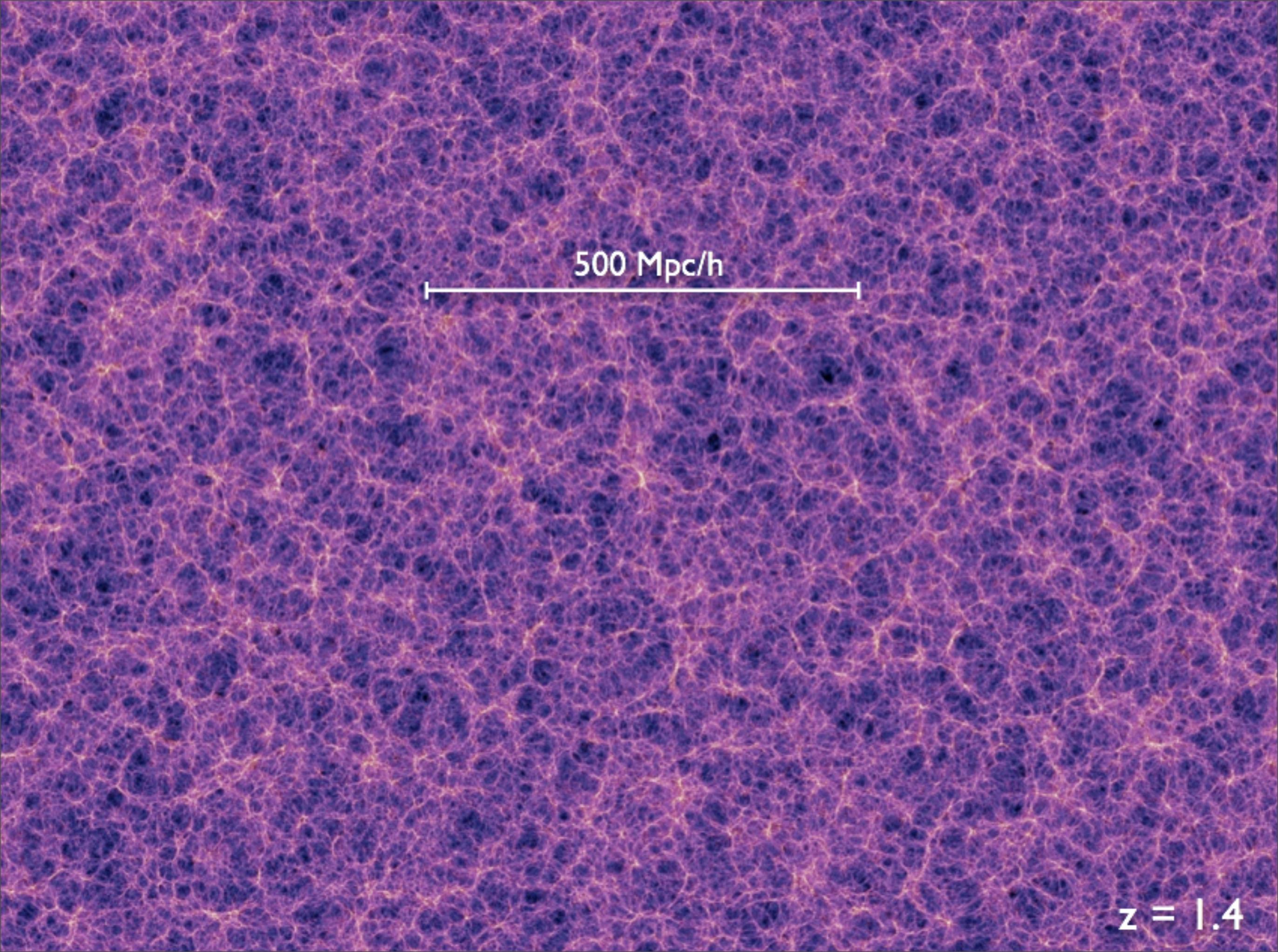
125 Mpc/h

$z = 0$



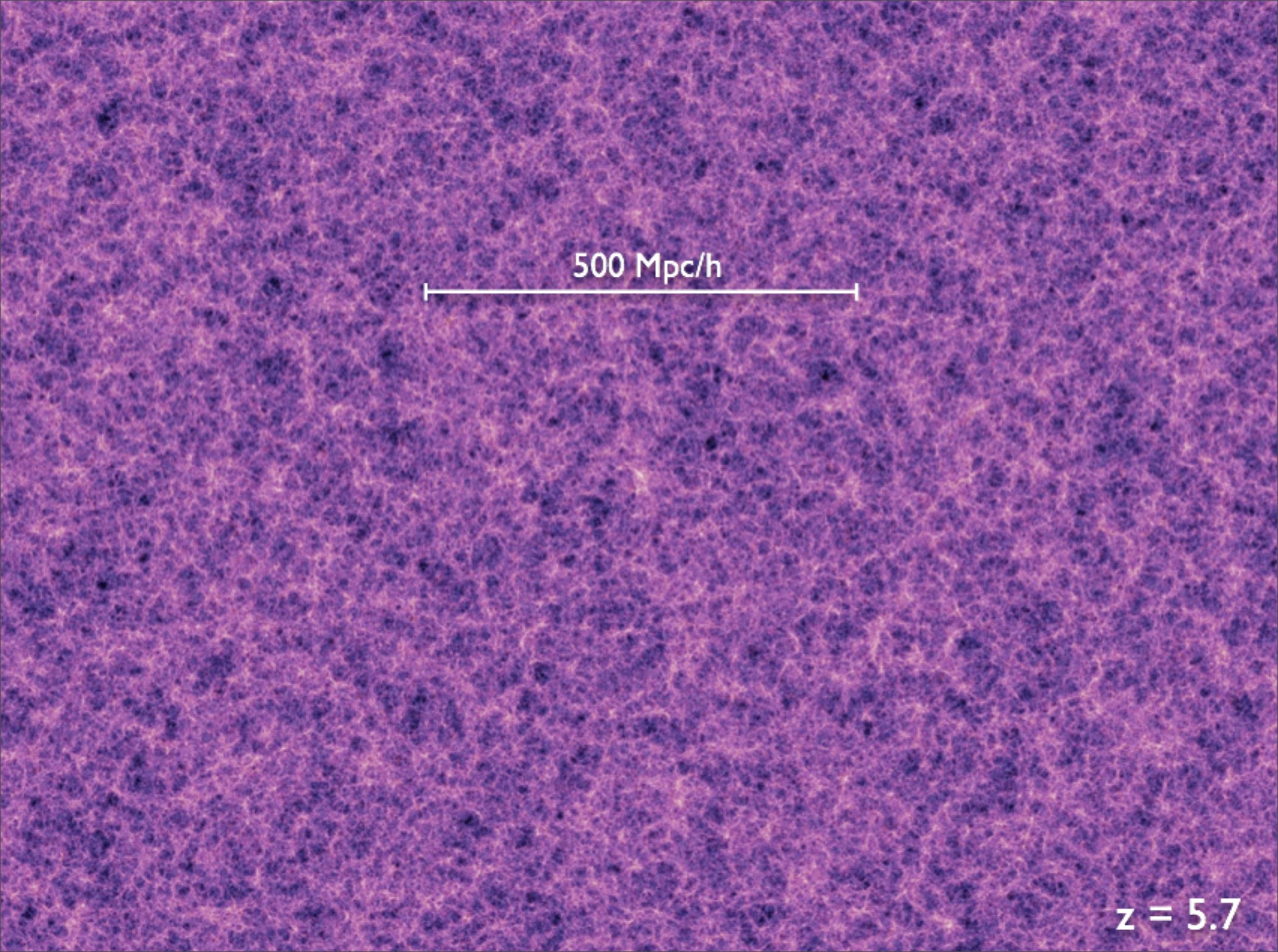
500 Mpc/h

$z = 0$



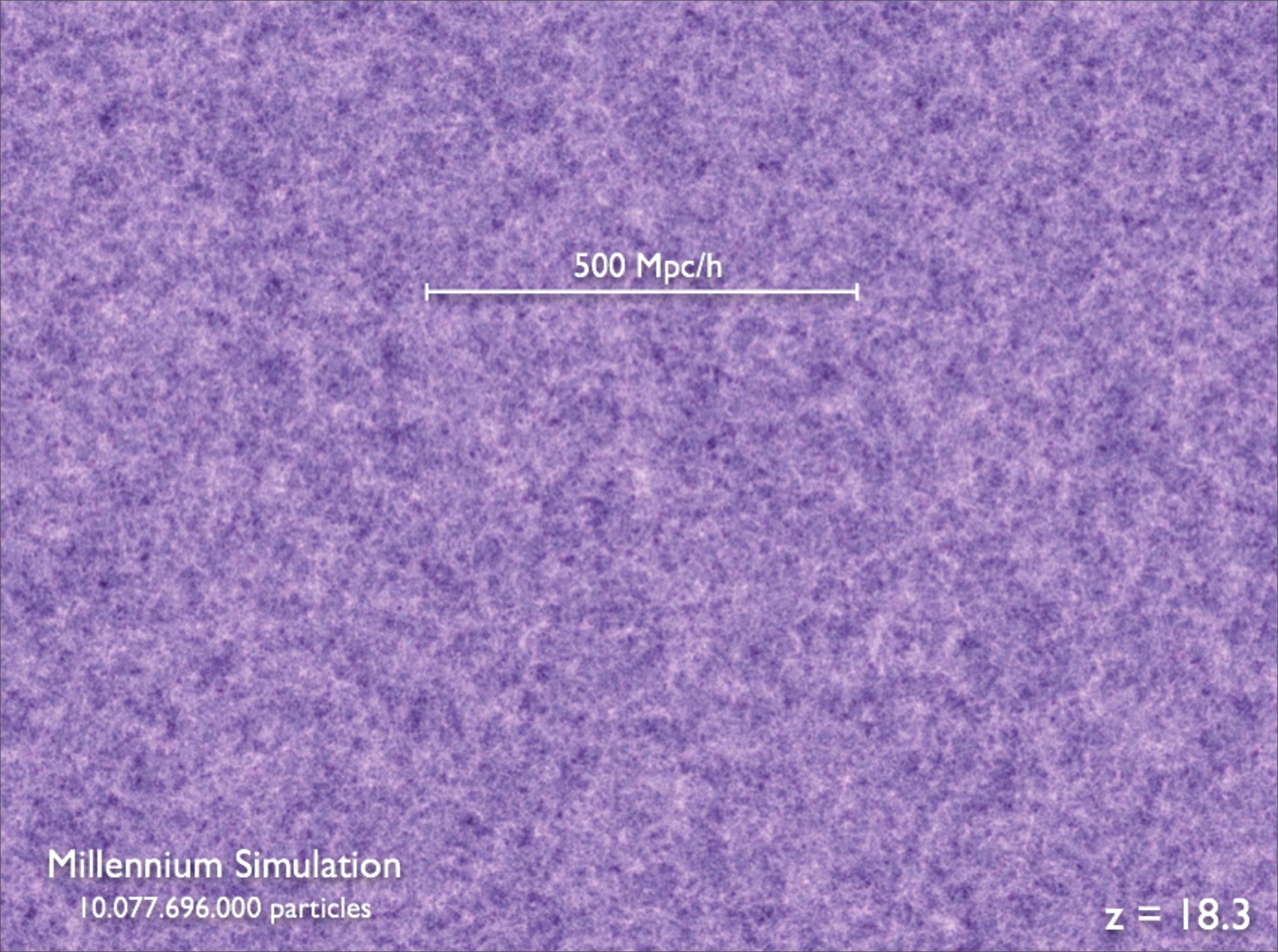
500 Mpc/h

$z = 1.4$



500 Mpc/h

$z = 5.7$

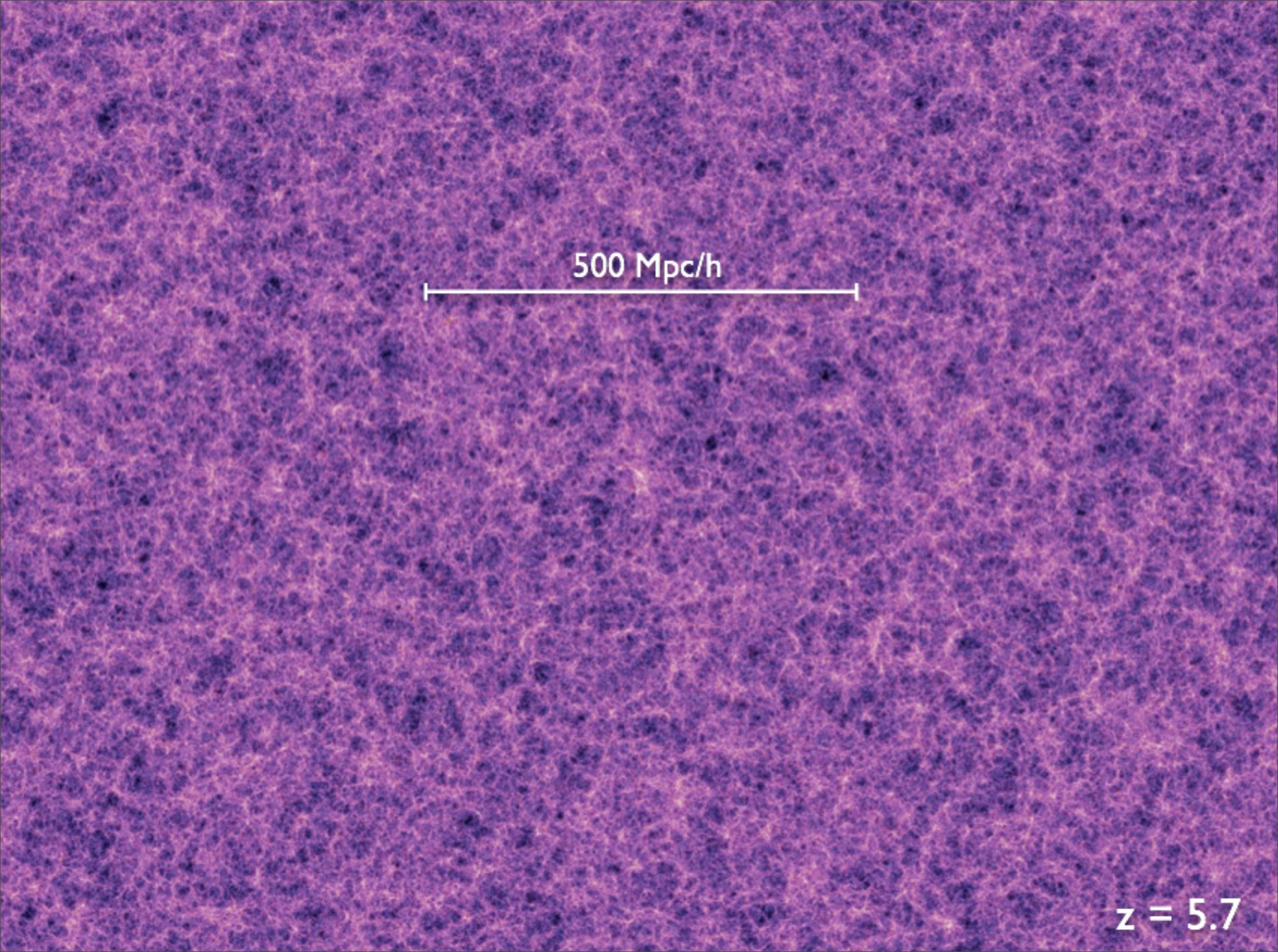
A snapshot from the Millennium Simulation showing a dense field of particles at redshift z=18.3. The particles are represented as small blue dots, forming a complex, interconnected network. A horizontal scale bar is located in the upper-middle part of the image, consisting of a white line with vertical end caps, labeled "500 Mpc/h".

500 Mpc/h

Millennium Simulation

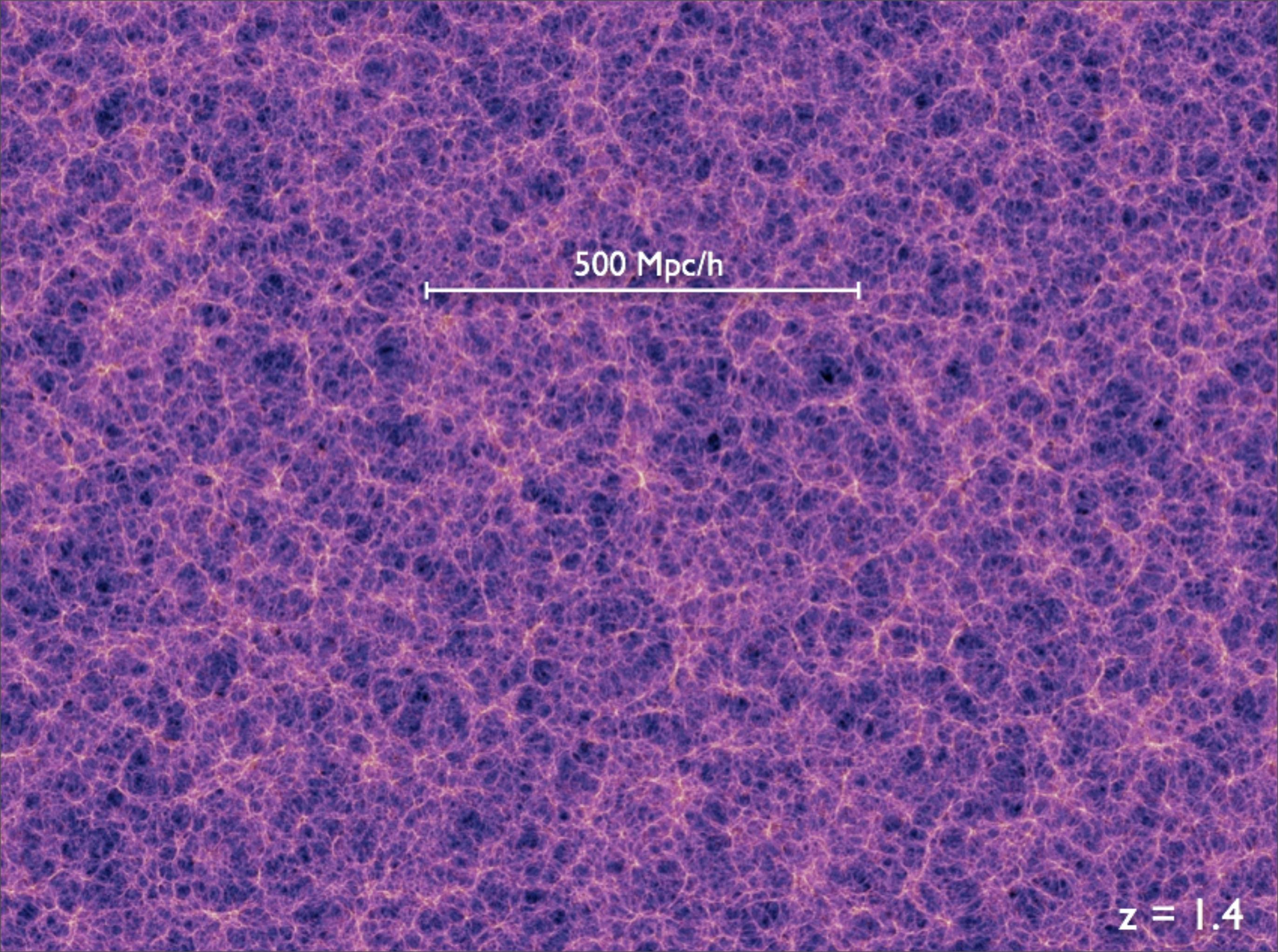
10,077,696,000 particles

$z = 18.3$



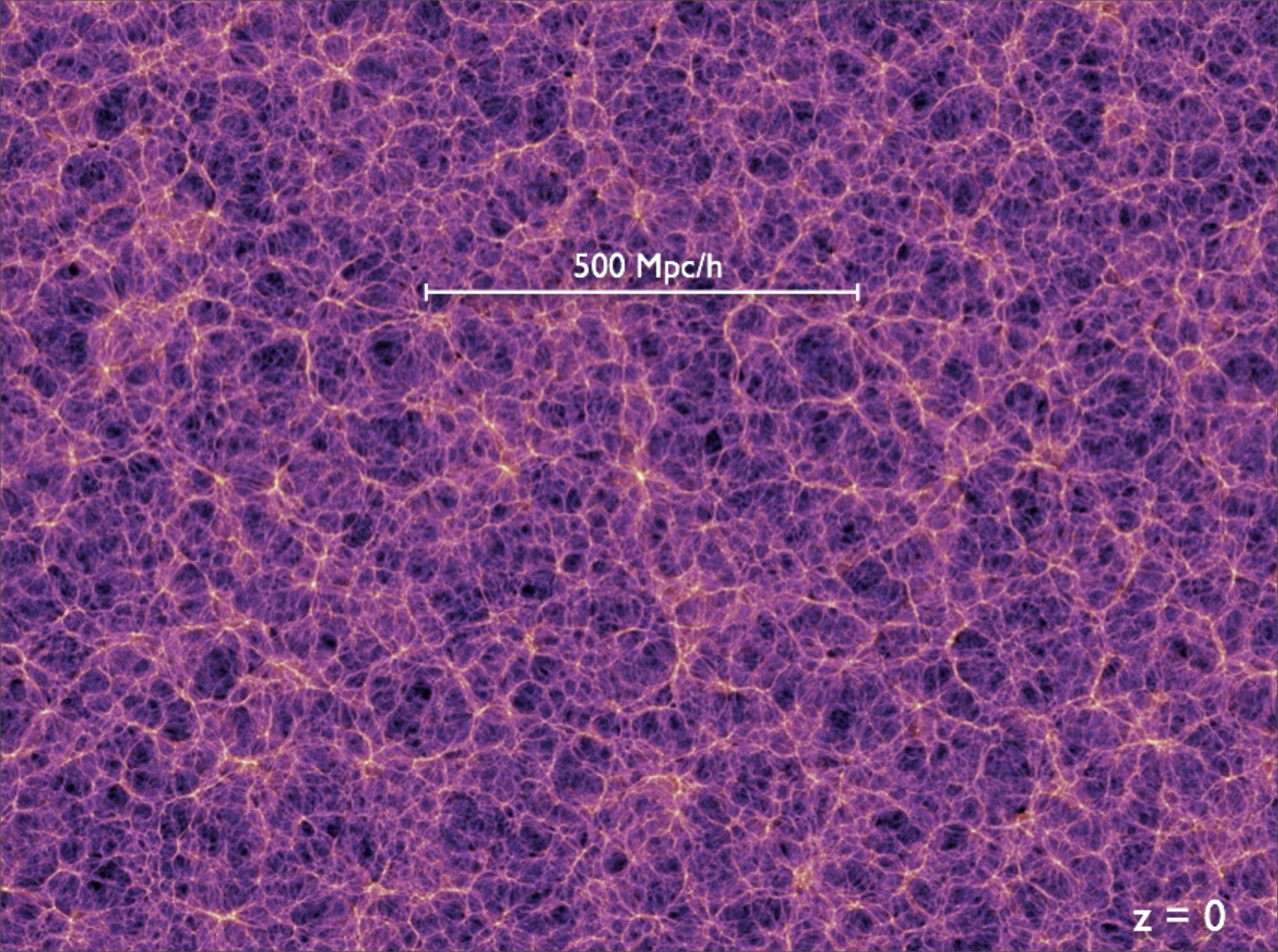
500 Mpc/h

$z = 5.7$



500 Mpc/h

$z = 1.4$



500 Mpc/h

$z = 0$

Plus on remonte dans le passé, moins il y a de galaxies, de structures, plus l'univers est uniforme.



L'univers a une histoire !

Rien d'évident a priori.
Einstein lui-même croyait initialement au caractère statique de l'univers

Modélisation

Aux distances cosmologiques (100 Mpc), l'univers semble homogène et isotrope (approximation d'autant meilleure qu'on remonte dans le temps)

Hypothèse simplificatrice :

niveau 0 de description : l'univers est homogène et isotrope, seulement décrit par une poignée de fonctions du temps : température moyenne, densité moyenne ...

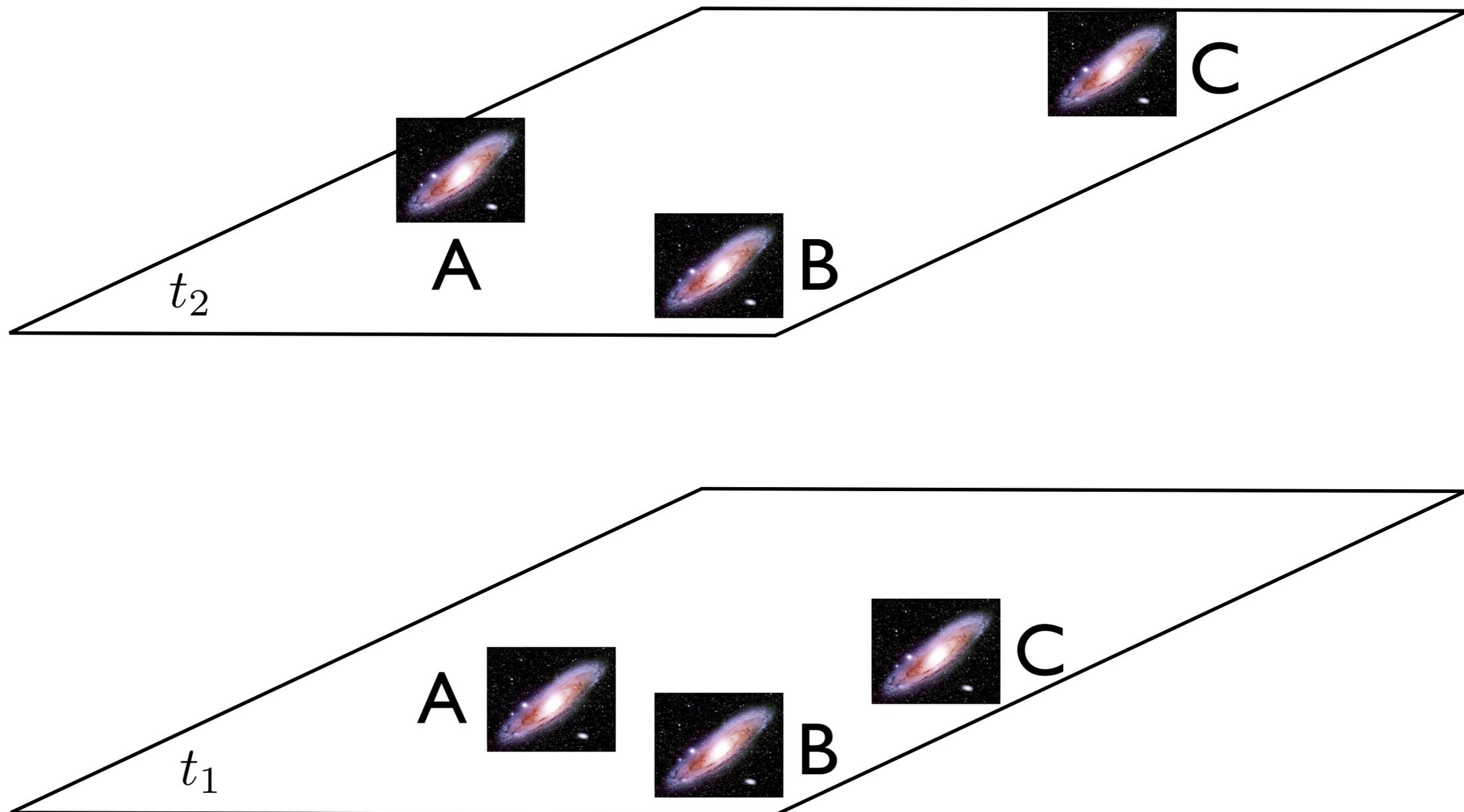


Dans le passé, l'univers était plus chaud et plus dense qu'actuellement.

Le message principal du modèle du Big-Bang

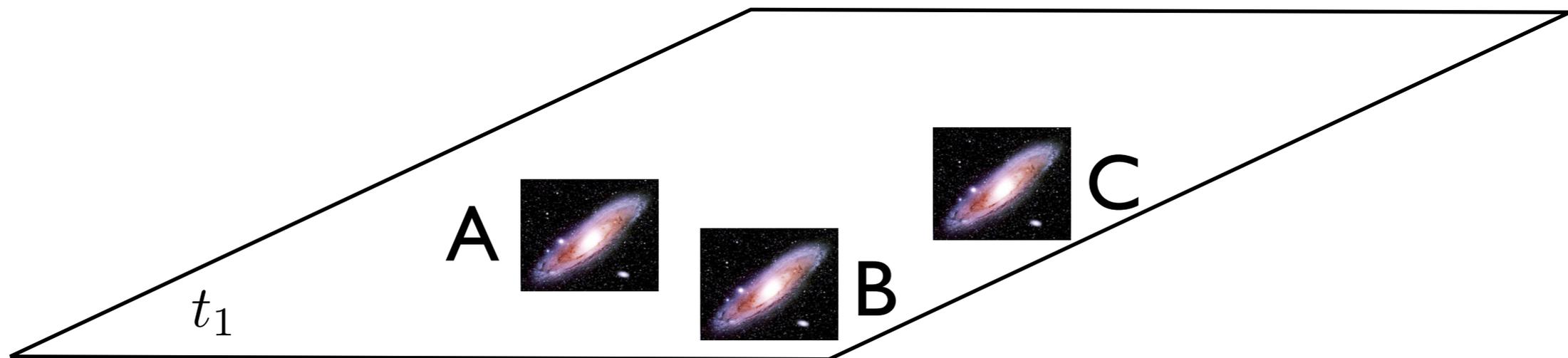
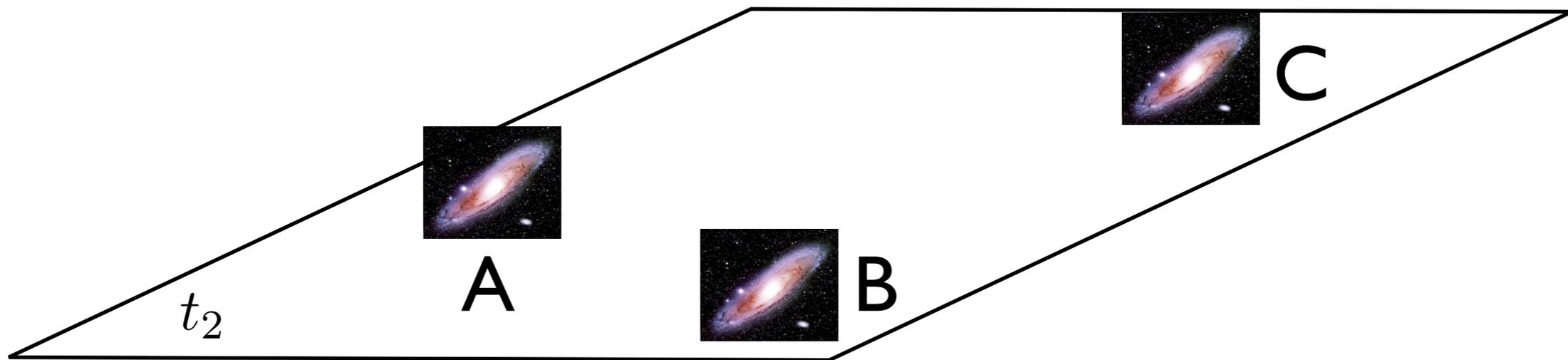
Dilatation de l'espace (expansion de l'espace-temps)

On décrit l'évolution de l'univers aux distances cosmologiques par une dilatation de l'espace lui-même



Dilatation de l'espace (expansion de l'espace-temps)

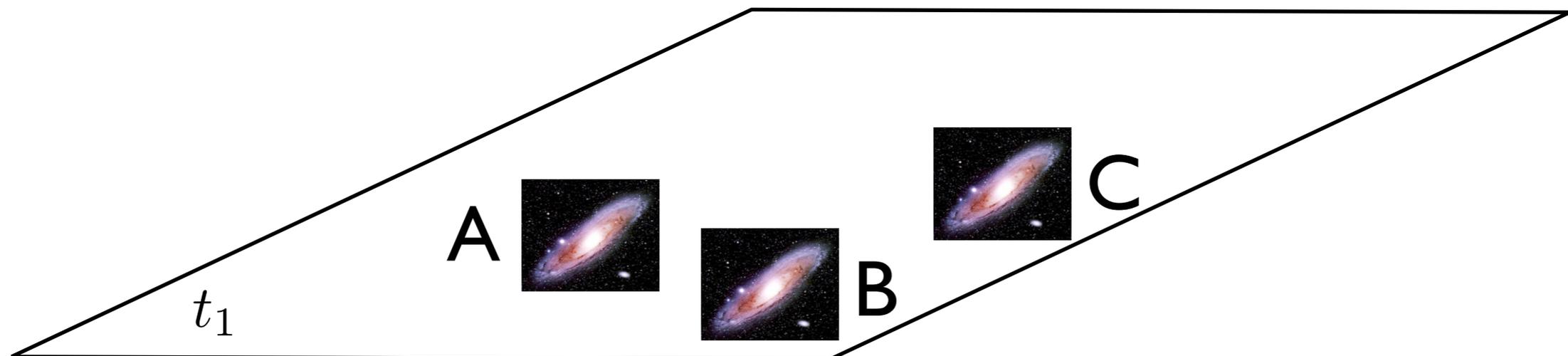
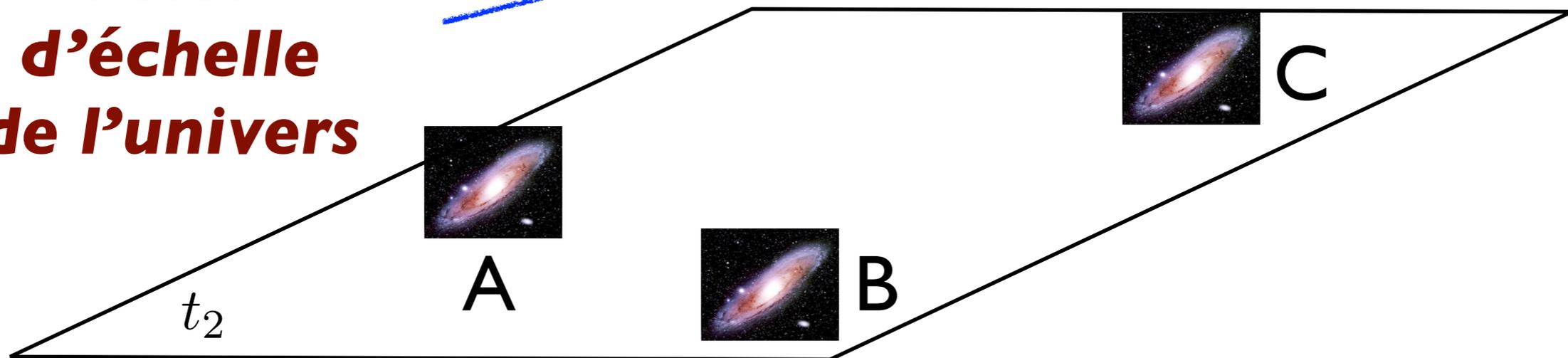
$$\frac{\|\vec{r}_A - \vec{r}_B\|_{t_2}}{\|\vec{r}_A - \vec{r}_B\|_{t_1}} = \frac{\|\vec{r}_C - \vec{r}_B\|_{t_2}}{\|\vec{r}_C - \vec{r}_B\|_{t_1}} = \frac{\|\vec{r}_A - \vec{r}_C\|_{t_2}}{\|\vec{r}_A - \vec{r}_C\|_{t_1}}$$



Dilatation de l'espace (expansion de l'espace-temps)

$$l_{\text{physique}} = a(t)l_{\text{comobile}}$$

**Facteur
d'échelle
de l'univers**



Dilatation de l'espace (expansion de l'espace-temps)

$$l_{\text{physique}} = a(t)l_{\text{comobile}}$$

**Facteur
d'échelle
de l'univers**

$$\mathbf{r} = a(t)\mathbf{x}$$

$$\mathbf{v}_{ij} = \dot{a}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) = H\mathbf{r}_{ij}$$

**Vitesse proportionnelle
aux distances :
plus un objet est loin,
plus il s'éloigne vite !**

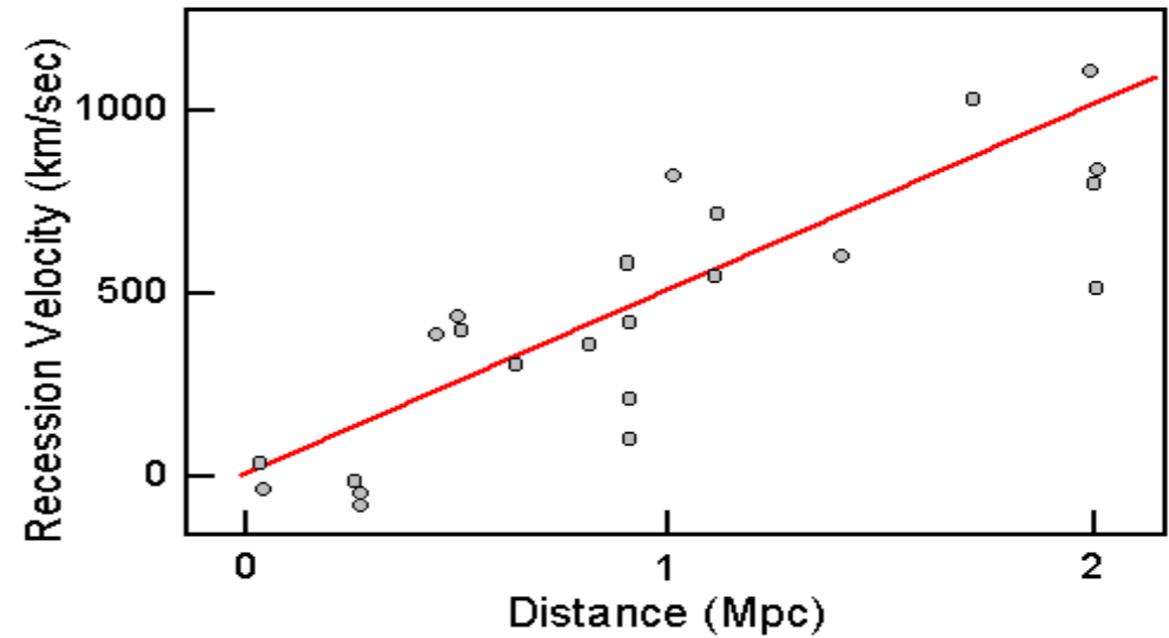
$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

'Paramètre' de
Hubble

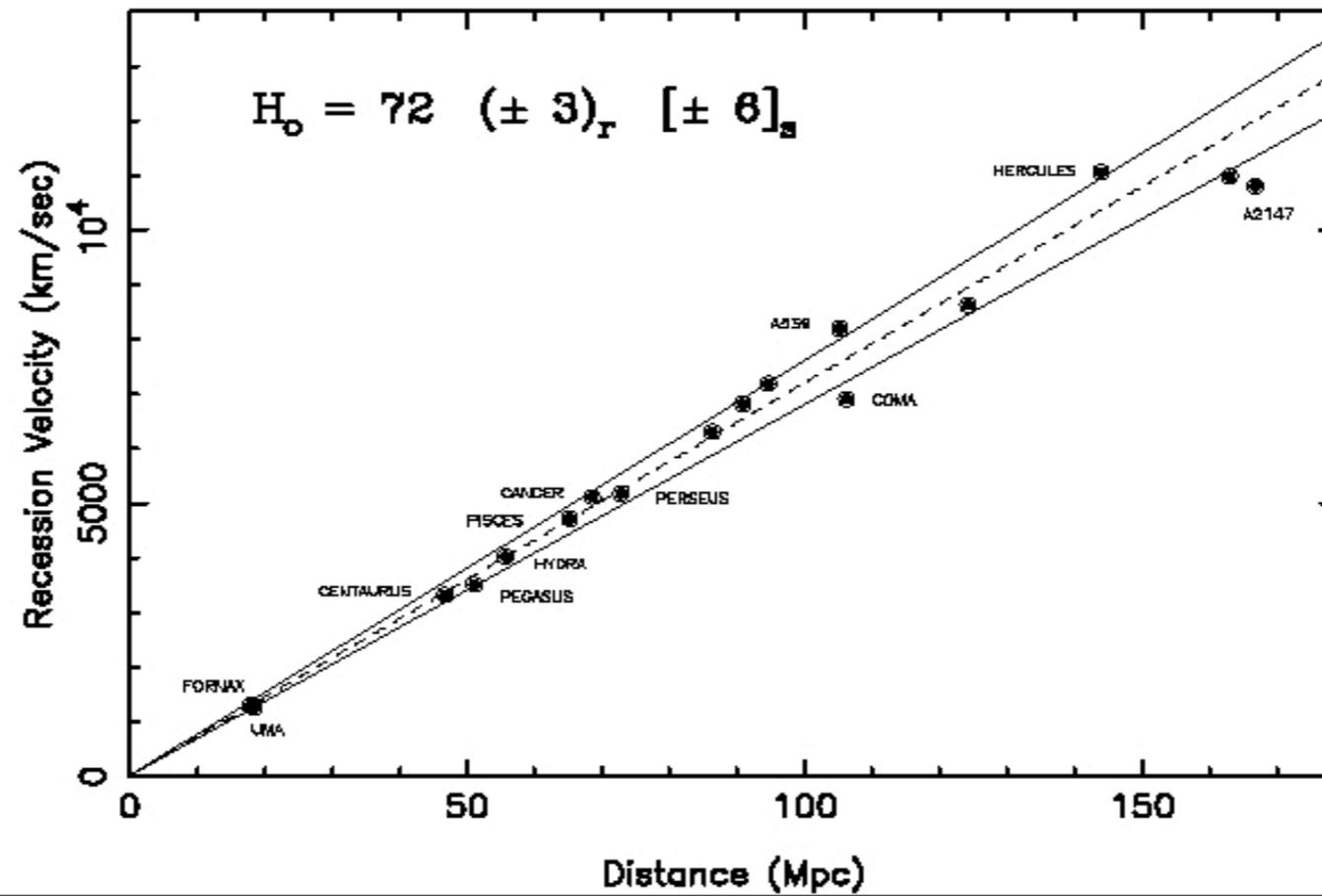
Observations



Données de Hubble (1929)

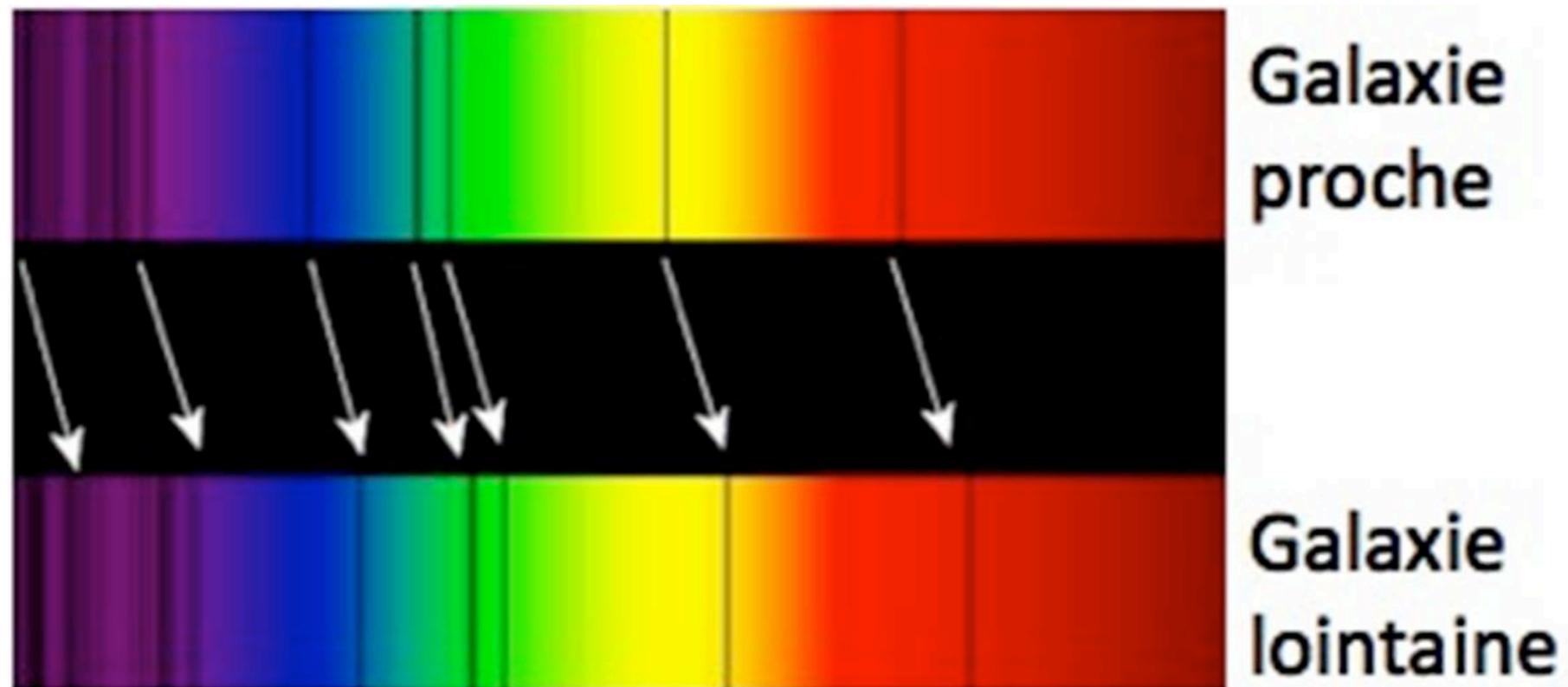


Données
actuelles



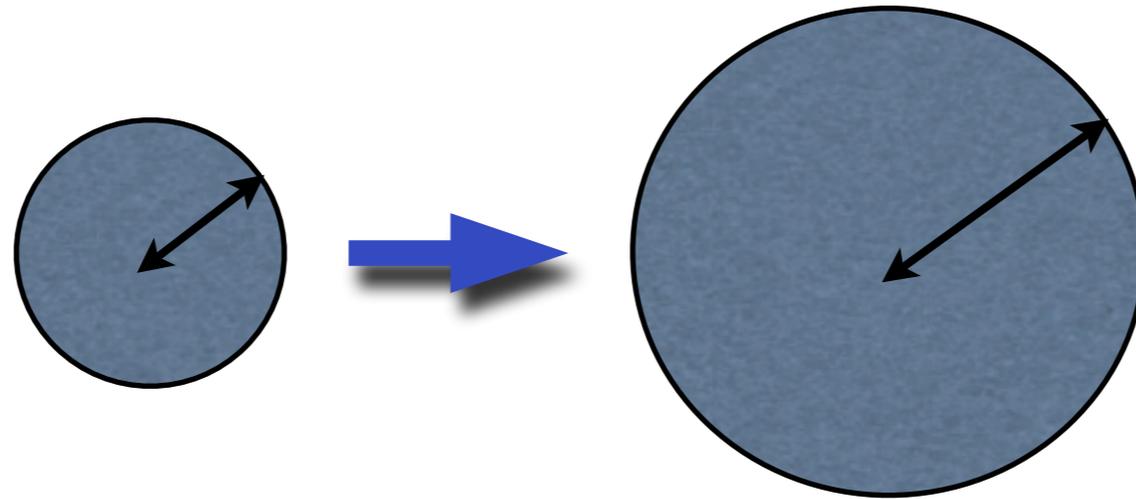
Observations

Décalage vers le rouge (redshift)



Conservation de la matière

La quantité de matière dans une boule physique de rayon comobile x est constante



$$r_1 = a(t_1)x$$

$$r_2 = a(t_2)x$$



$$\rho_{\text{mat}}(t)a^3(t) = \text{constante}$$

$$\dot{\rho}_{\text{mat}} + 3H\rho_{\text{mat}} = 0$$

Corrections relativistes

$$\dot{\rho}_{\text{mat}} + 3H\rho_{\text{mat}} = 0$$

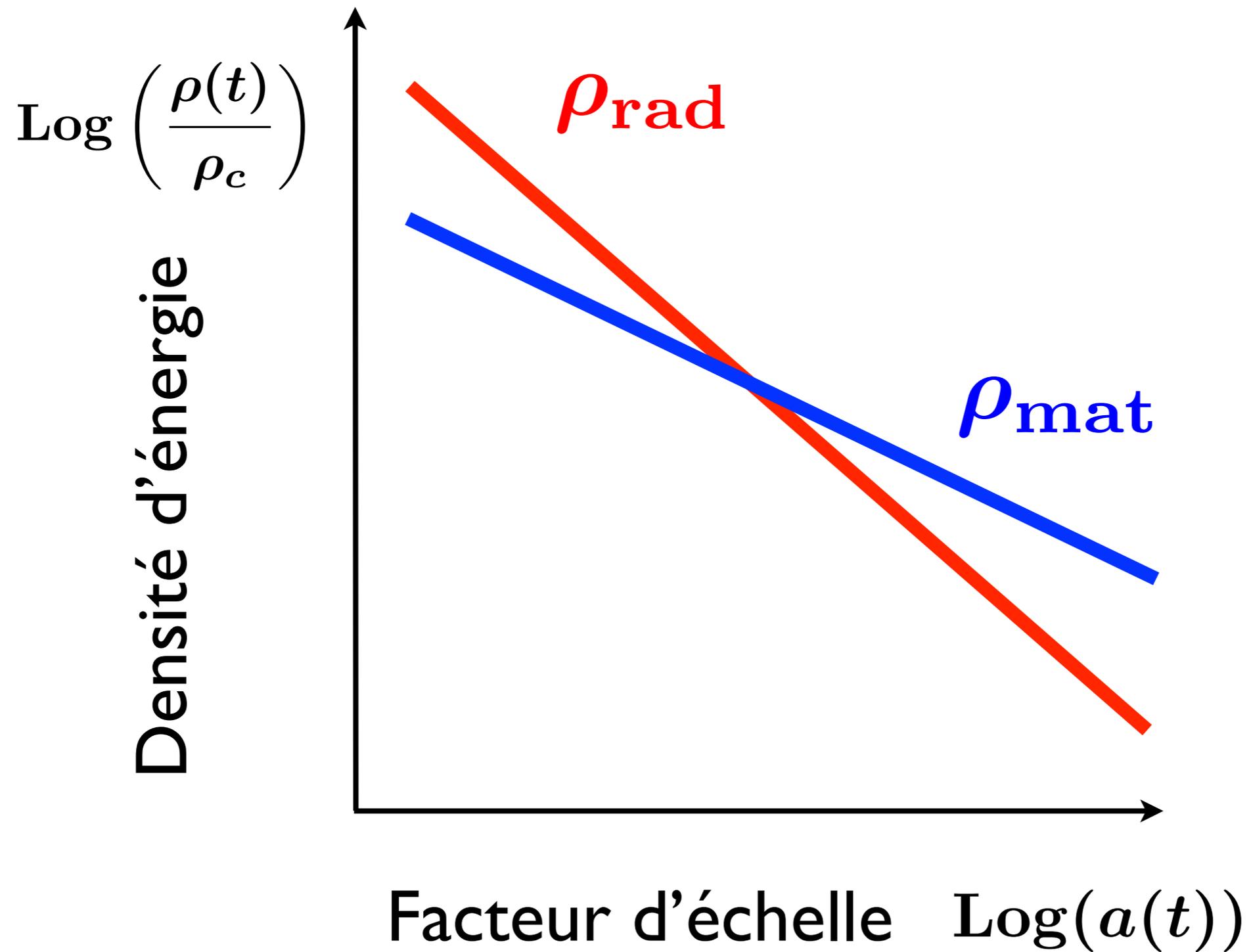
En général,
densité d'énergie

$$\dot{\rho} + 3H \left(\rho + \frac{p}{c^2} \right) = 0$$

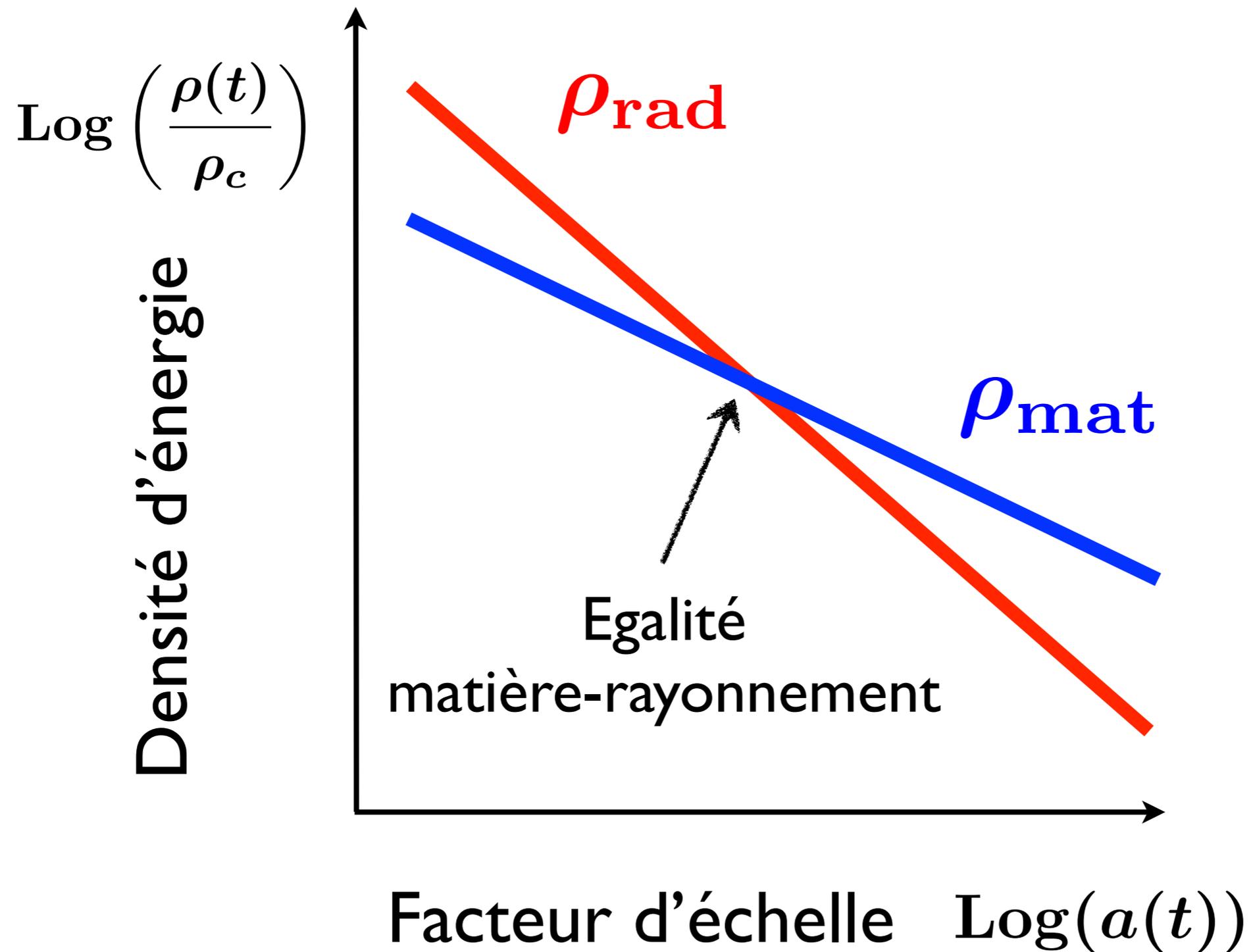
Pour de la radiation (lumière) : $\frac{p_{\text{rad}}}{c^2} = \frac{\rho_{\text{rad}}}{3}$ (Eddington)

$$\dot{\rho}_{\text{rad}} + 4H\rho_{\text{rad}} = 0 \quad \rightarrow \quad \rho_{\text{rad}} \propto \frac{1}{a^4(t)}$$

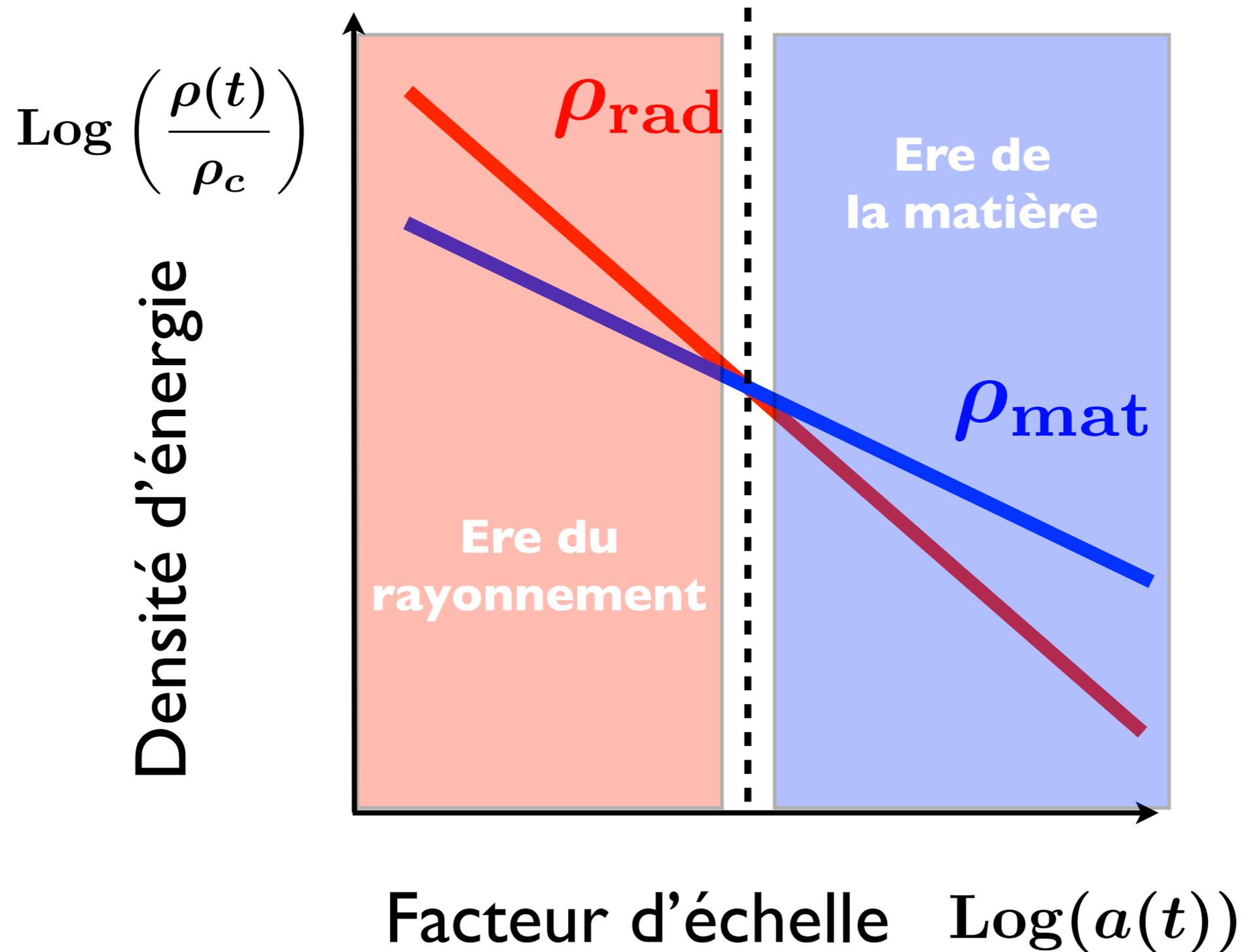
Evolution de l'univers



Evolution de l'univers



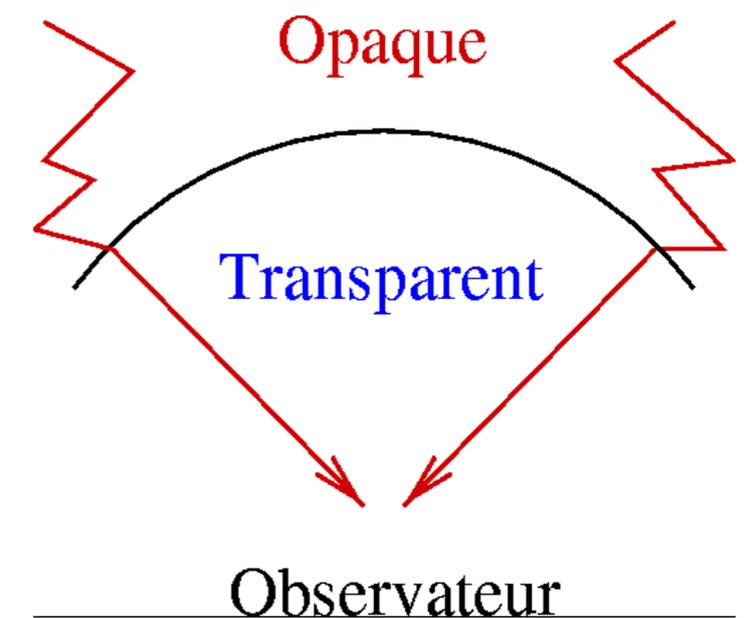
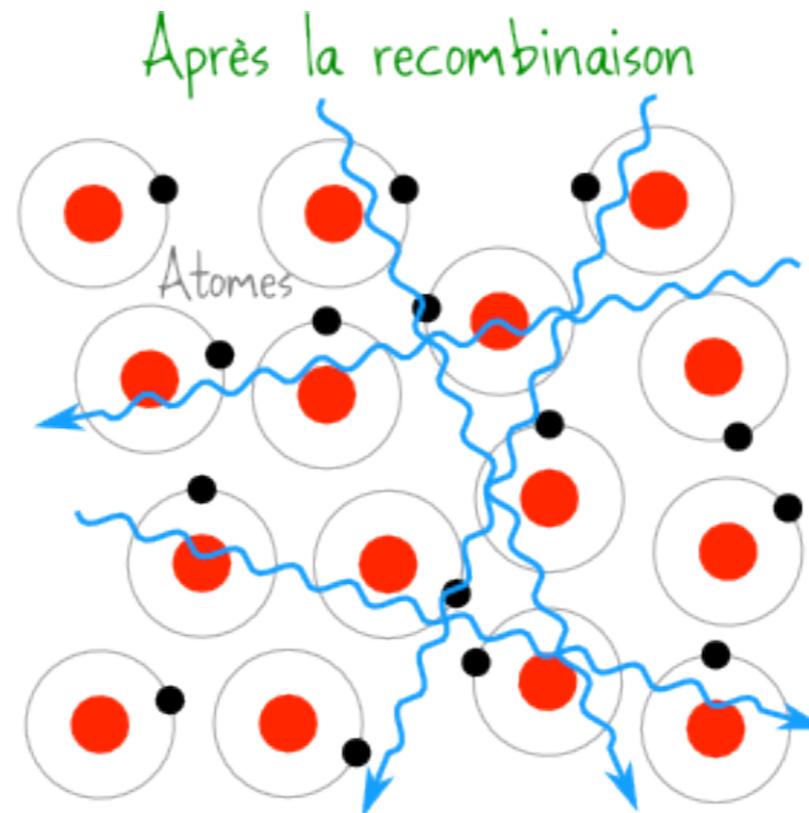
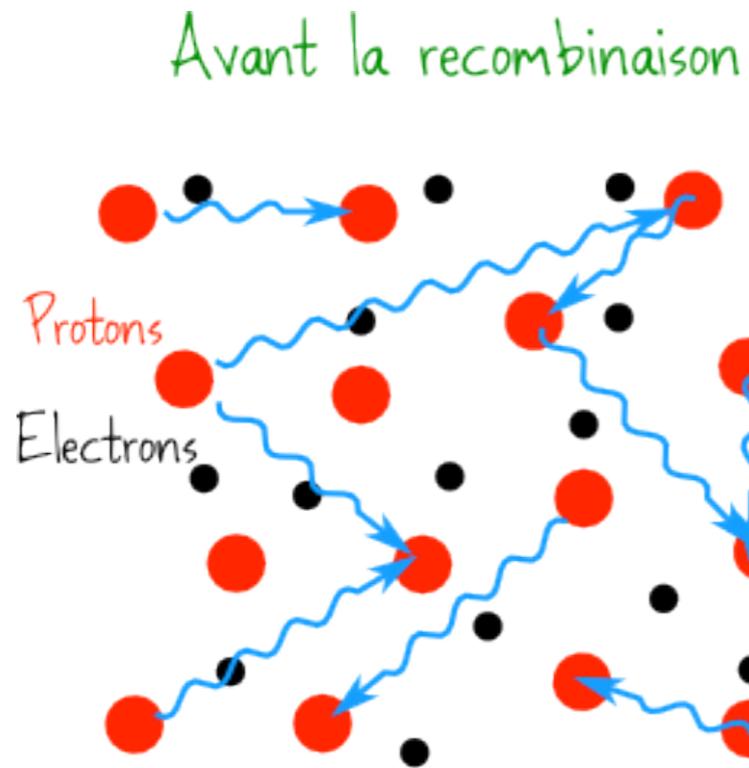
Evolution de l'univers



Il y a 13,7 milliards d'années :

$$T \sim 1 \text{ eV} \sim 3000 \text{ K}$$

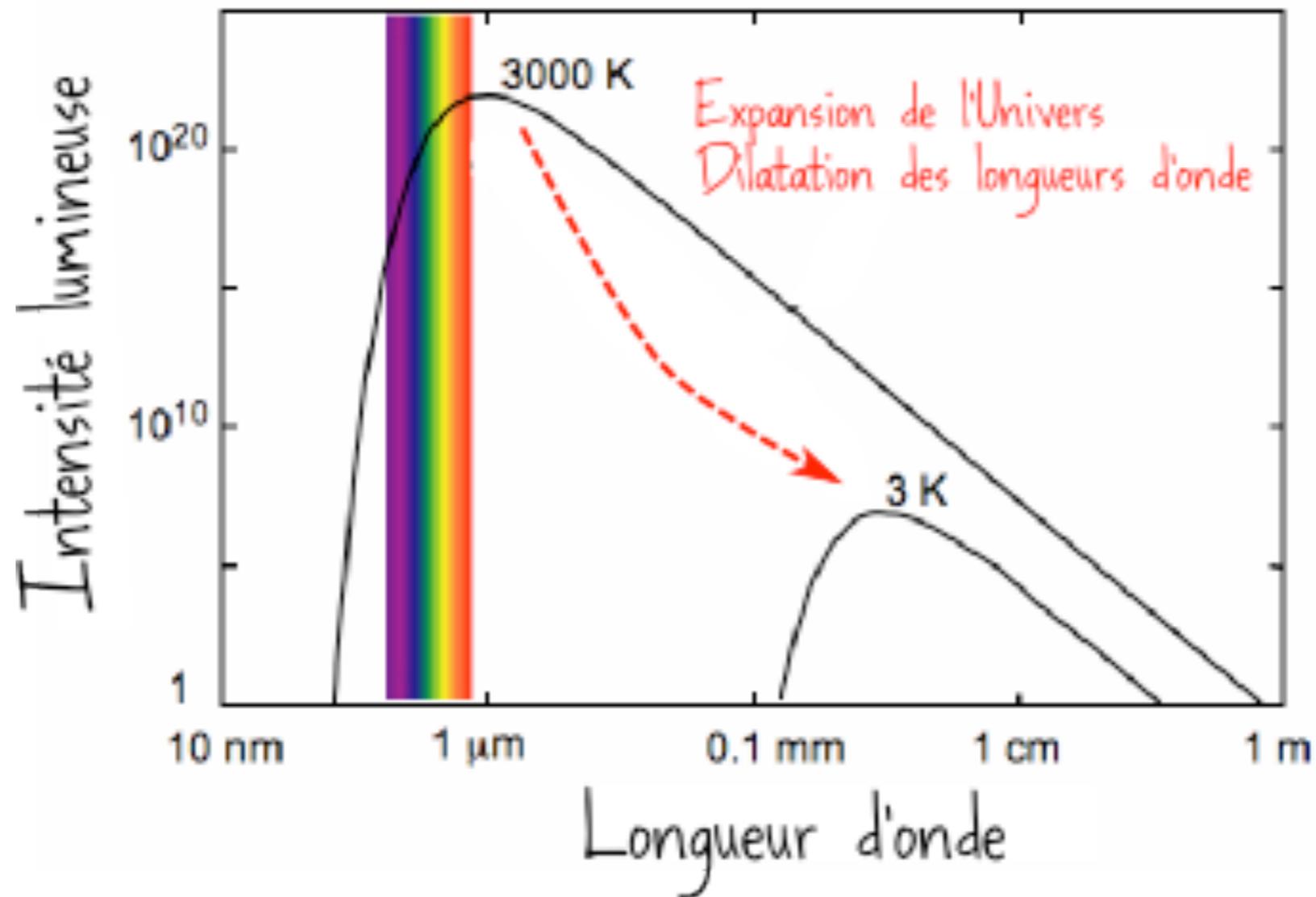
Gamow, 1948



- Dans le passé, la matière était ionisée et l'univers opaque.
- Recombinaison : $e+p \rightarrow H$
- Ensuite, les photons se propagent en ligne droite, l'univers devient transparent, **émission de la « première lumière de l'univers »**.

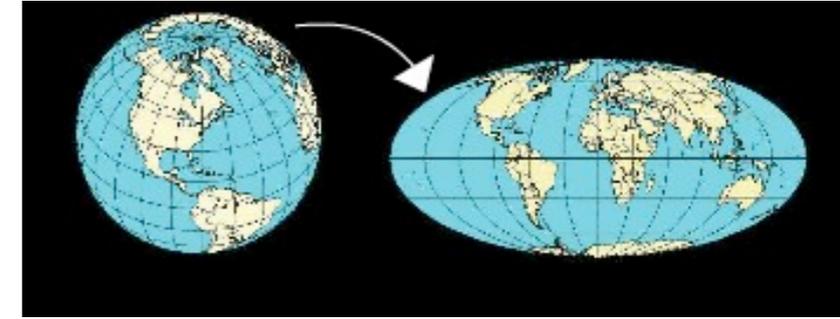
Fond diffus cosmologique

- Emission d'un fond de photons avec un spectre de corps noir à une température de 2.73 K aujourd'hui, 411 photons/cm^3



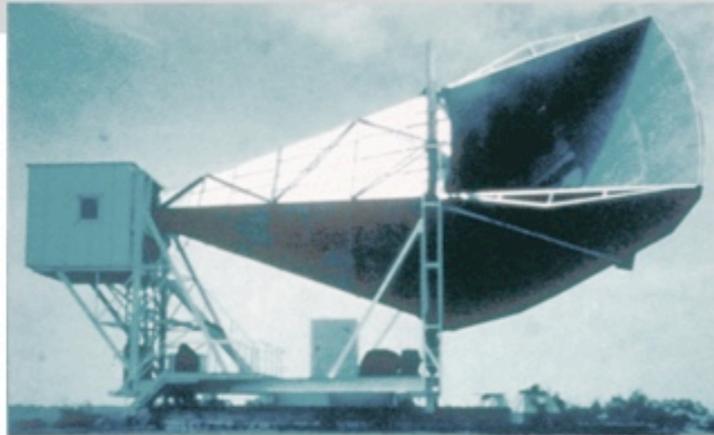
Observations du CMB!

Clef de voute de la cosmologie contemporaine



1965

Penzias and Wilson



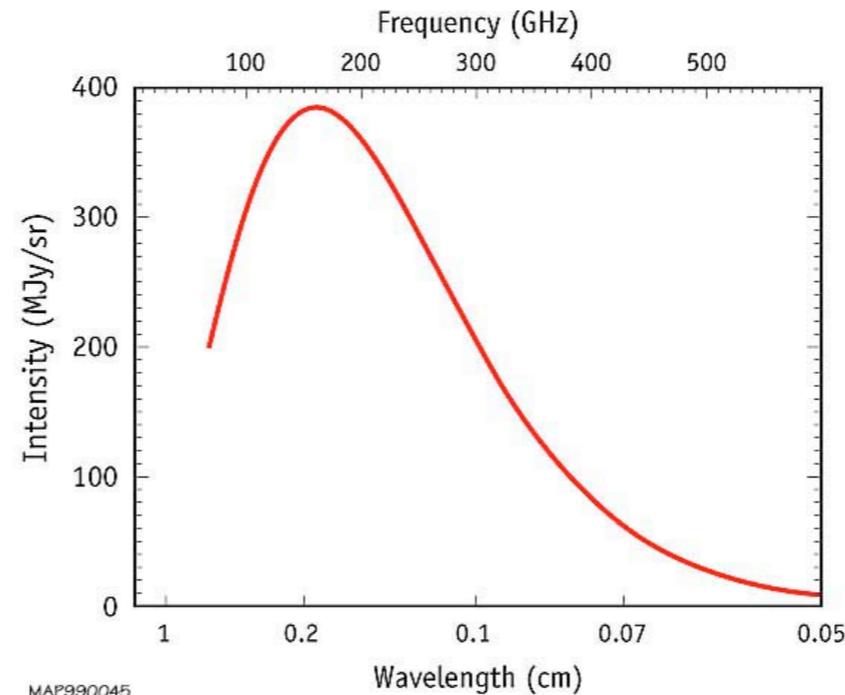
2,73 K
-270,42 °C



1992, COBE/FIRAS



SPECTRUM OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND



Importance du CMB unanimentement reconnue



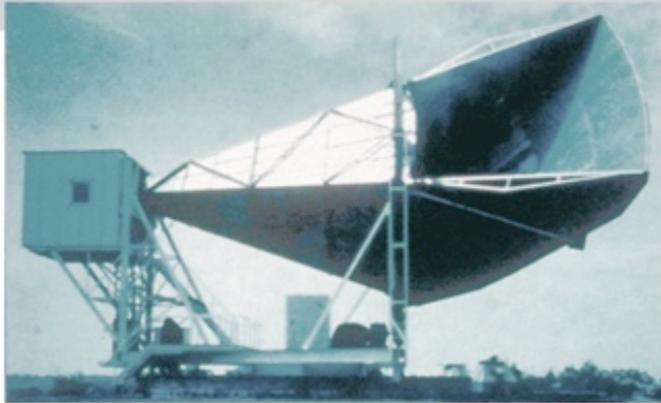
**Crédit  Mutuel
de Bretagne**
LA *banque à qui parler*

Les 3 piliers historiques

- Le modèle du Big-Bang chaud a convaincu la communauté scientifique par l'explication de :
 - ★ l'expansion de l'univers
 - ★ l'existence d'un fond diffus électromagnétique
 - ★ la nucléosynthèse primordiale (abondance des éléments légers, ${}^7\text{Li}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, D)
- Depuis, de nombreuses autres observations et tests de cohérence nous ont donné confiance dans ce modèle (lentillage gravitationnel etc).

Progrès observationnels

1965



Penzias and
Wilson

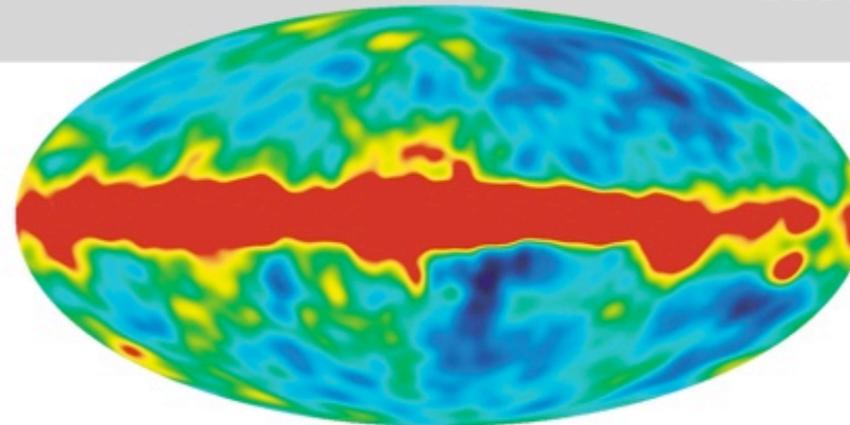
2,73 K
-270,42 °C



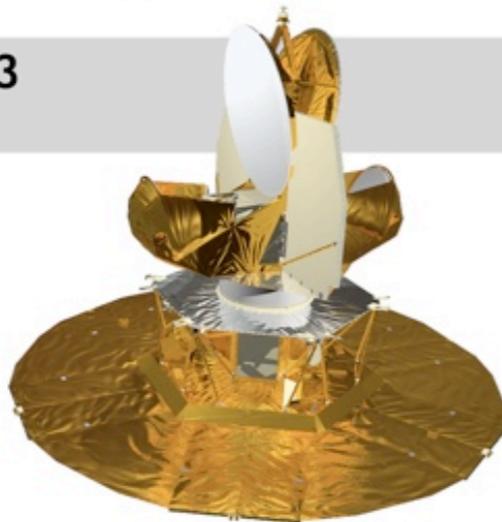
1992



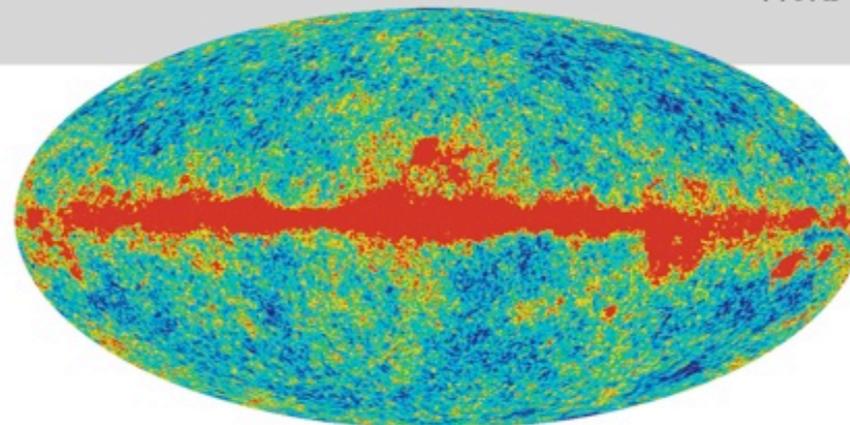
COBE



2003



WMAP



Progrès observationnels

**Planck
2015**

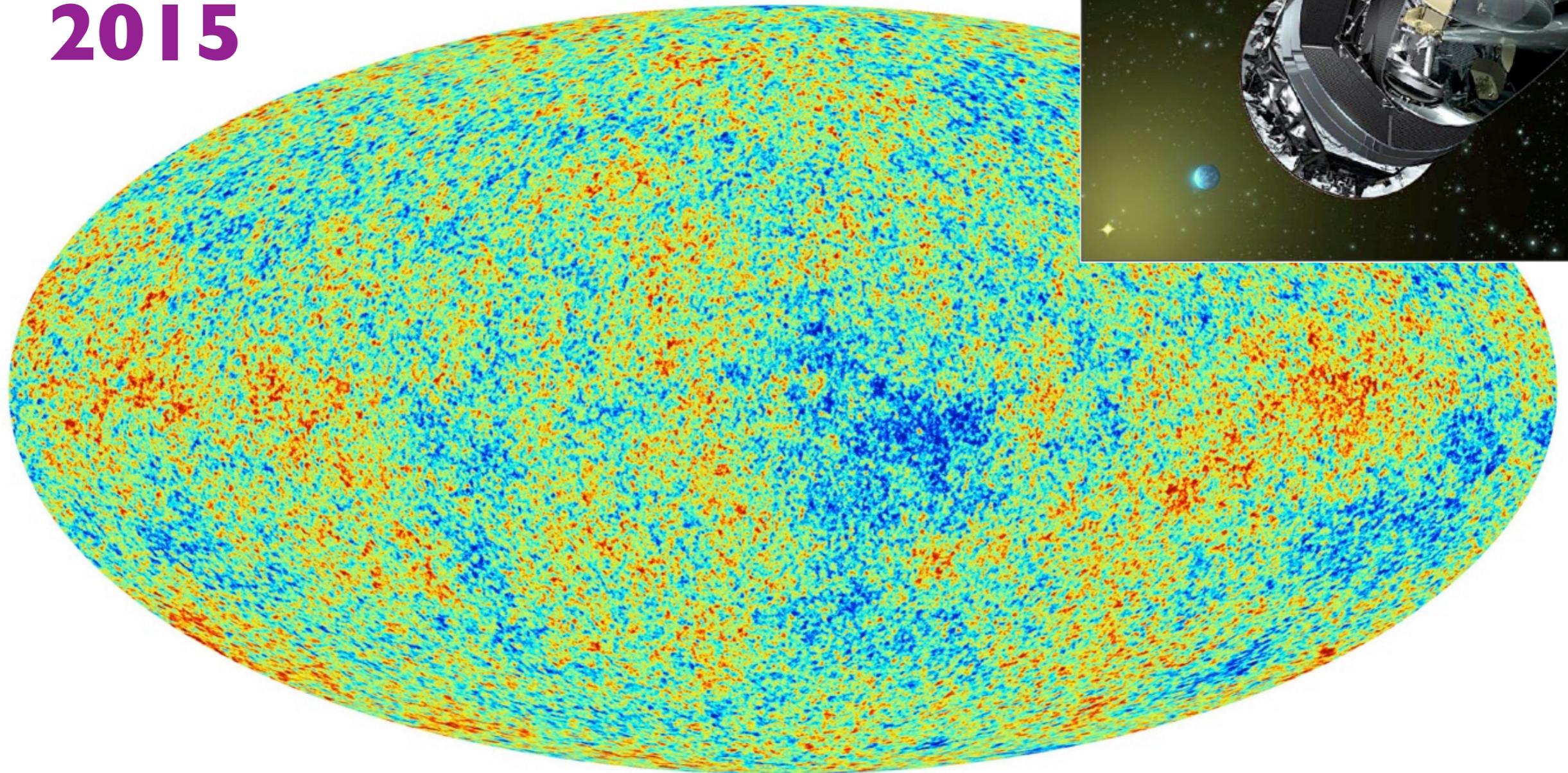


Image des « grumeaux » primordiaux,
germes des grandes structures

Différentes sondes de l'univers

- Fond diffus cosmologique
- Relevé de galaxies (millions de galaxies)
- Observations de supernovae à des distances cosmologiques
- Lentilles gravitationnelles
- ...



L'energie noire

Quelques détails

Les différents types de fluide
sont caractérisés en cosmologie
par leur **équation d'état**

$$w_i \equiv \frac{p_i}{\rho_i c^2}$$

Exemples :

Matière ordinaire : $w_{\text{mat}} = 0$

Radiation (lumière) $w_{\text{rad}} = 1/3$

Quelques détails

L'essence des équations d'Einstein (relativité générale) :

Géométrie de
l'univers



Contenu énergétique
dans l'univers

$$3H^2 M_{\text{Pl}}^2 = \sum_i \rho_i$$

$$\Omega_i \equiv \frac{\rho_0^i}{3H_0^2 M_{\text{Pl}}^2} \quad \sum_i \Omega_i = 1$$

et

$$\frac{1}{a_0 H_0^2} \frac{d^2 a_0}{dt^2} = -\frac{1}{2} \sum_i \Omega_i (1 + 3w_i)$$

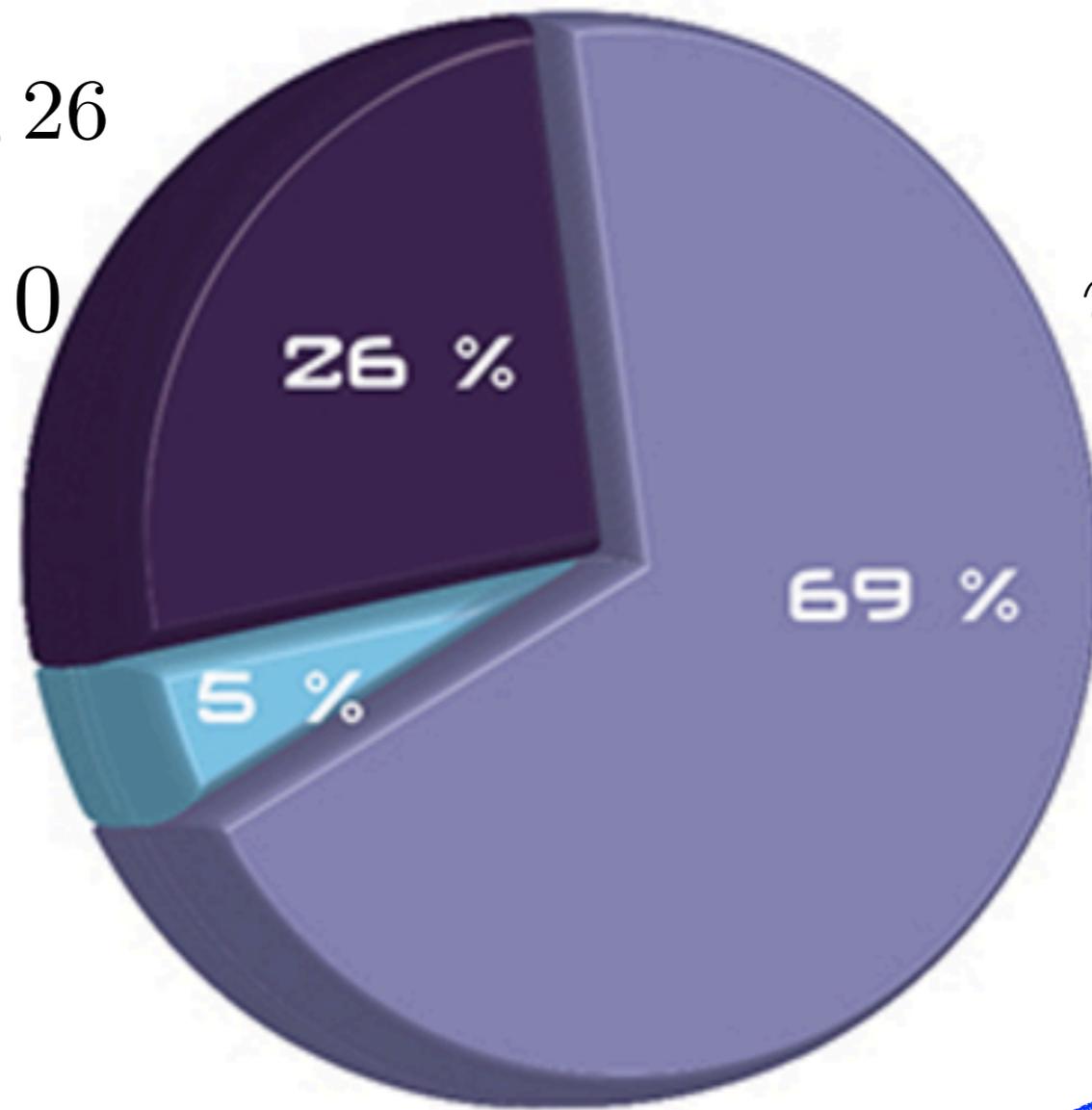
Composition de l'univers

$$\Omega_{\text{matiere noire}} = 0,26$$

$$w_{\text{matiere noire}} = 0$$

$$\Omega_{\text{energie noire}} = 0,69$$

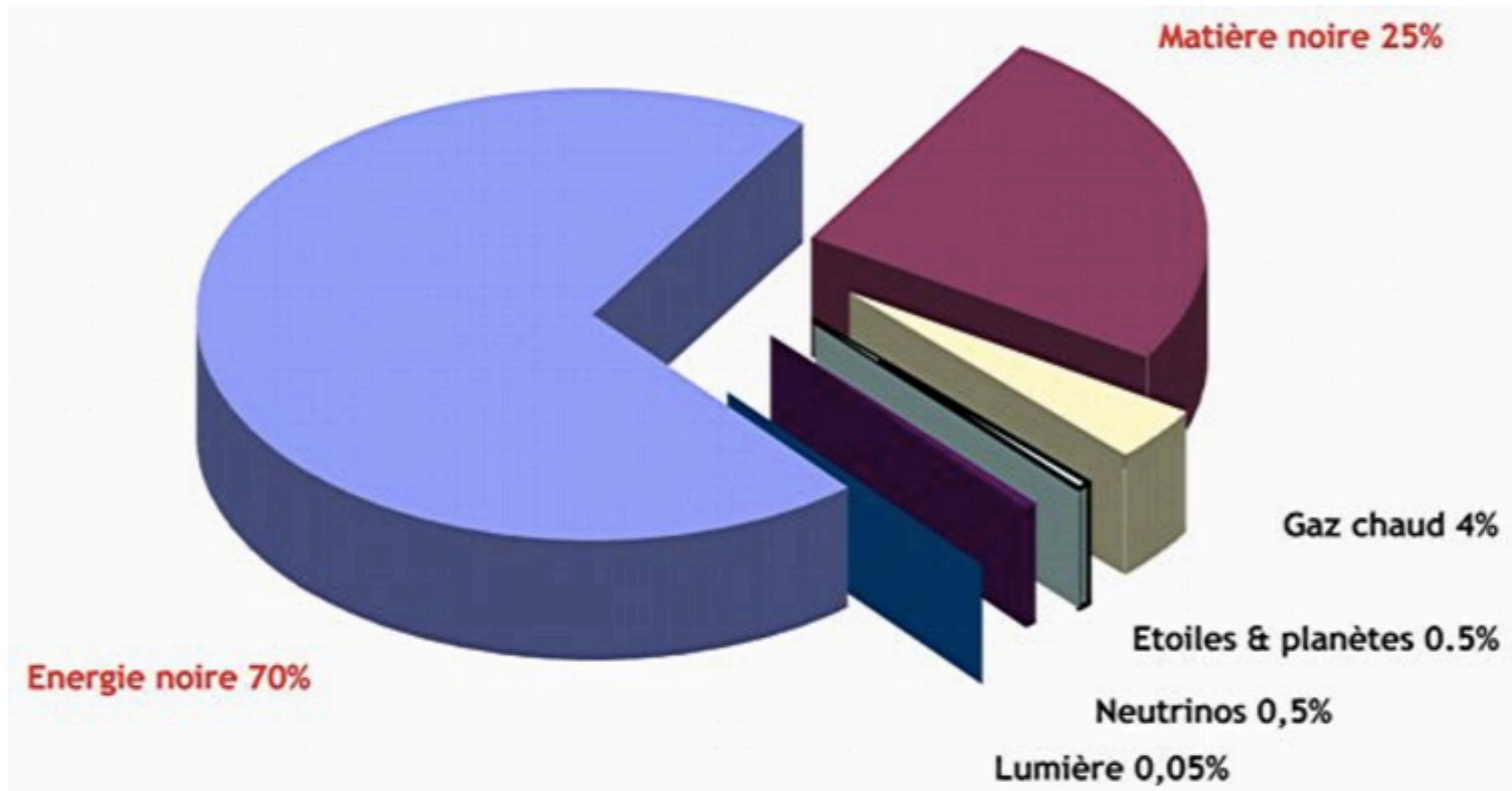
$$w_{\text{energie noire}} \simeq -1$$



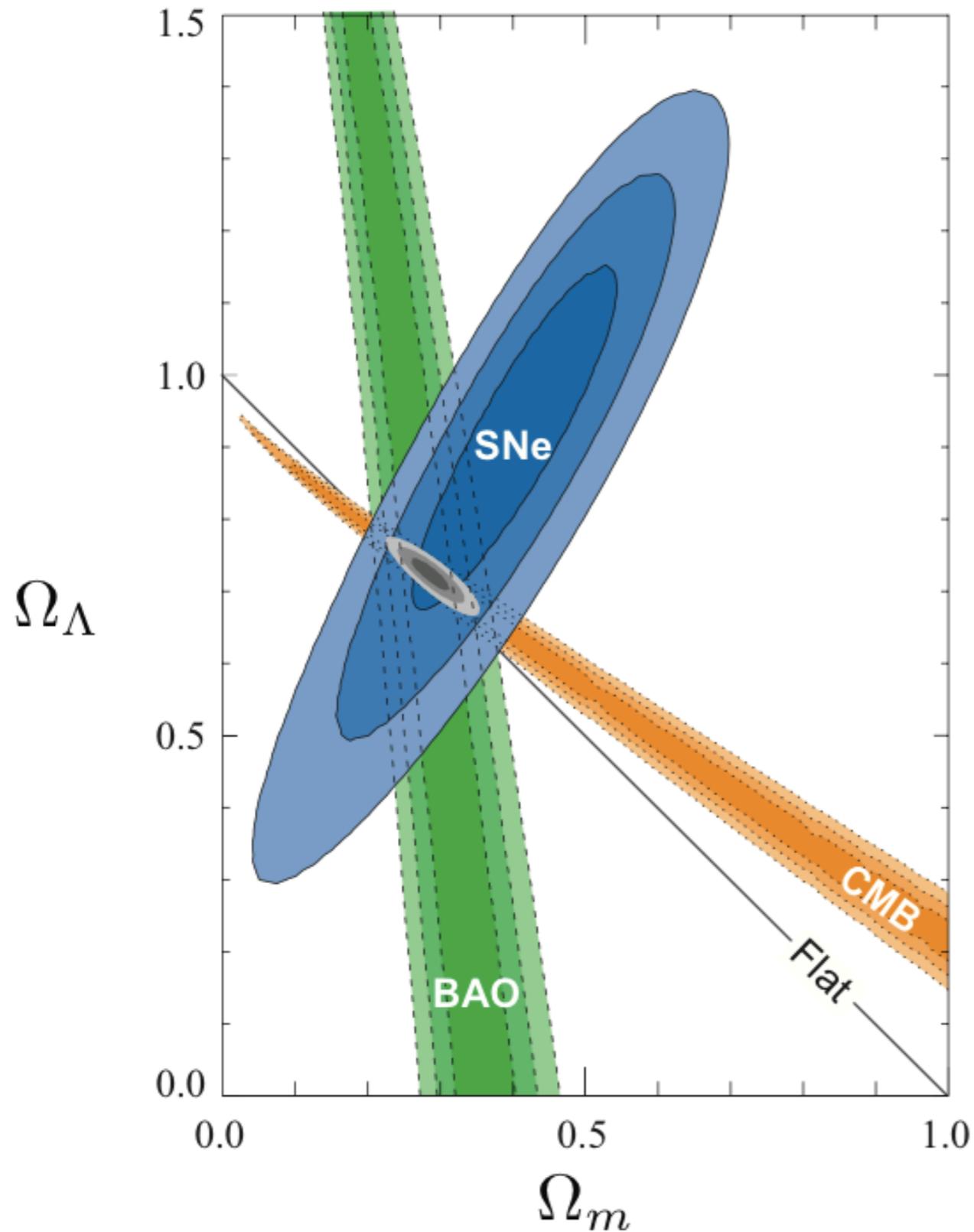
**Matière
ordinaire: 5%
seulement !**

■ Matière noire ■ Baryons ■ Energie noire

Composition de l'univers

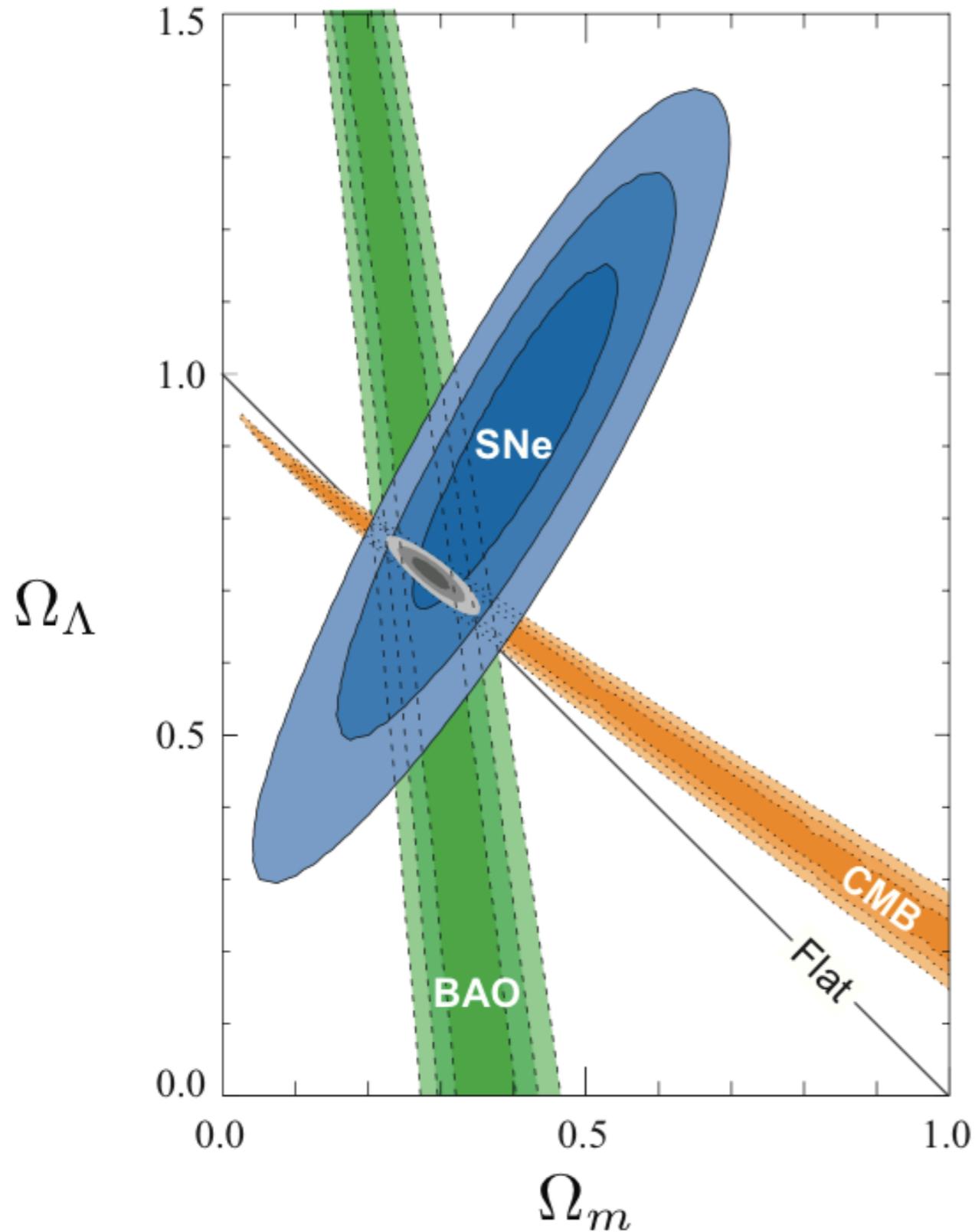


Composition de l'univers



Le modèle de concordance de la cosmologie rend compte de toutes les observations cosmologiques avec une poignée de paramètres !

Composition de l'univers



Mais **tout n'est pas compris !**
Matière noire,
Energie noire
...

Les problèmes de l'énergie noire

- La densité d'énergie de l'univers est dominée par un fluide de pression négative : **pas de la matière ordinaire.**
- **L'explication la plus économe : la constante cosmologique.** Une constante qu'on peut rajouter aux équations d'Einstein.
- En fait, **au niveau quantique, le vide possède une énergie, qui se comporte aux échelles macroscopiques comme la constante cosmologique.** La relativité générale est sensible au niveau absolu des densités d'énergie.

Les problèmes de l'énergie noire

- Si on tente de calculer l'énergie du vide avec les degrés de liberté des champs connus, on a

$$\langle \rho \rangle_{\text{vide}}^{\text{EW}} \sim (200 \text{ GeV})^4 \quad \text{ou} \quad \langle \rho \rangle_{\text{vide}}^{\text{Planck}} \sim (10^{18} \text{ GeV})^4$$

- Cela veut dire que la constante cosmologique mesurée serait

i.e.
$$\Lambda_{\text{mesure}} = \Lambda_{\text{Einstein}} + \Lambda_{\text{quantique}}$$


$$10^{-60} \Lambda_{\text{quantique}} = \Lambda_{\text{Einstein}} + \Lambda_{\text{quantique}}$$

Réglage très fin entre deux quantités qui a priori n'ont pas une origine commune. **Pas satisfaisant !**

Les problèmes de l'énergie noire

- Cela veut dire que la constante cosmologique mesurée serait

i.e.
$$\Lambda_{\text{mesure}} = \Lambda_{\text{Einstein}} + \Lambda_{\text{quantique}}$$


$$10^{-60} \Lambda_{\text{quantique}} = \Lambda_{\text{Einstein}} + \Lambda_{\text{quantique}}$$

Réglage très fin entre deux quantités qui a priori n'ont pas une origine commune. **Pas satisfaisant !**

- Et sans une telle quasi-annulation, l'expansion de l'univers serait entrée dans une phase accélérée bien avant la formation des galaxies, en forte contradiction avec leur existence ... !

Tentatives de résolution

- **Principe anthropique** (Weinberg, 1987) : résidu accidentel.
Difficilement falsifiable ...
- Hypothèse : une théorie quantique de la gravitation permettrait de comprendre l'annulation exacte entre énergie du vide quantique et constante cosmologique, et l'accélération cosmologique observée serait l'effet d'une nouvelle composante du fluide cosmique.



- **Nombreuses difficultés conceptuelles** (problème de coïncidence) mais ces modèles ont le mérite de **pouvoir être testés observationnellement** (équation d'état)

Tentatives de résolution

- **Modifications de la relativité générale** aux échelles cosmologiques.
- Remise en cause du principe copernicien.
- ...
- Ces diverses tentatives de résolution de ce problème fondamental de la physique sont testables, en particulier avec les futurs grands relevés de galaxies, e.g. **Euclid 2020**

MERCI !