

A visualization of the cosmic web, showing a complex network of filaments and nodes of dark matter and gas. The filaments are colored in shades of orange, red, and purple, set against a dark background filled with stars.

L'inflation cosmologique

**(Des fluctuations quantiques
primordiales aux galaxies)**

Sébastien Renaux-Petel

LPTHE - IAP - ILP

Fleurance - 3 août 2014

Introduction et plan

- Le modèle du Big-Bang a évolué, expérimentalement et théoriquement
- Progrès théoriques, observationnels, et des simulations.

1) La cosmologie

2) Le modèle du Big-Bang

3) L'inflation :

- ★ les problèmes du Big-Bang résolus
- ★ l'origine des grandes structures
- ★ la situation observationnelle

VERT

Cosmologie et grandes questions

- L'univers a-t-il un début ?
- Comment les galaxies sont-elles apparues ?
- De quoi l'univers est-il fait ?
- Quelles sont les propriétés de la matière noire ?
- Quelles sont les propriétés de l'énergie noire ?
- L'univers a-t-il une fin ?
- ...

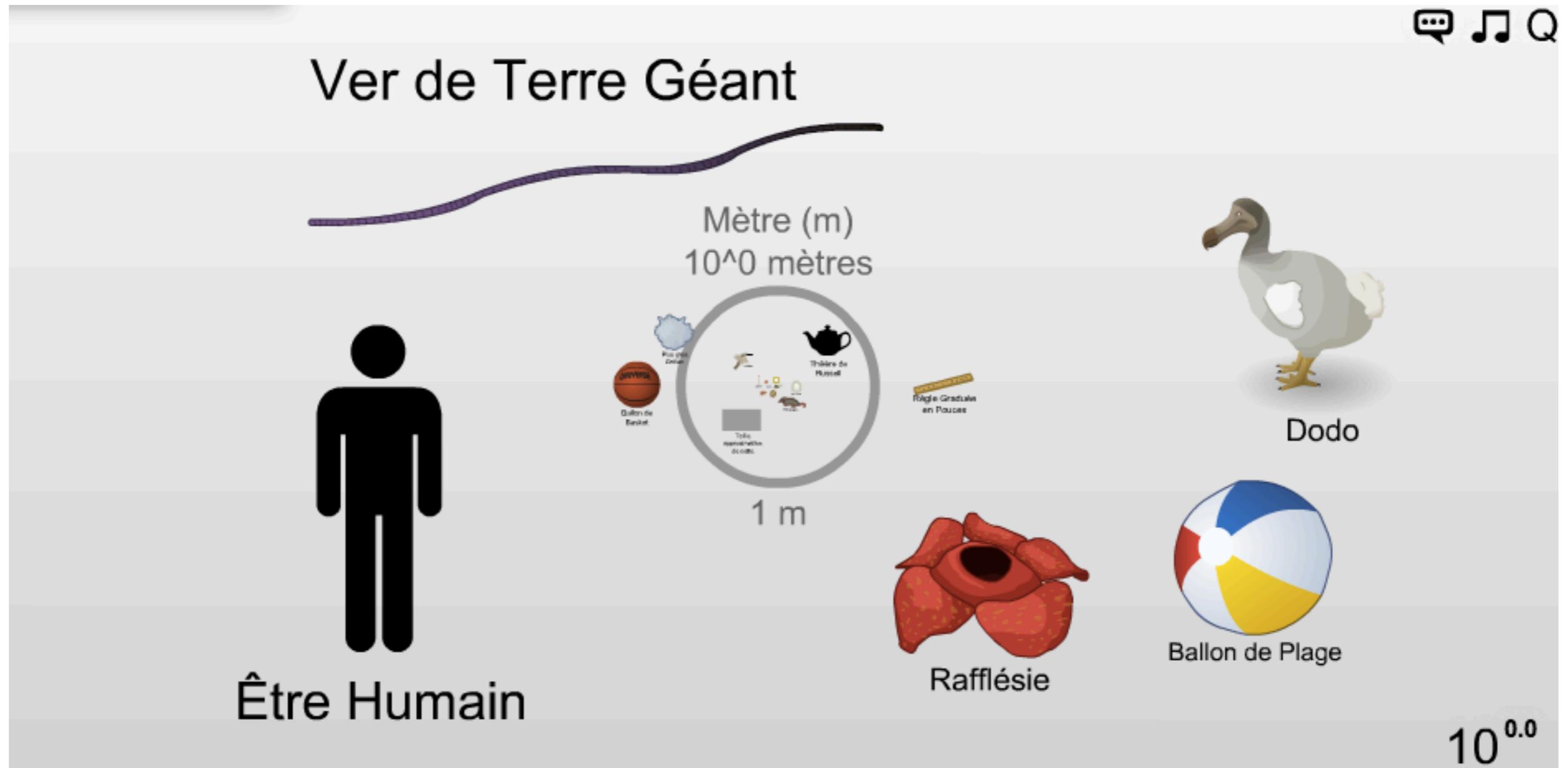
Observations et ordres de grandeur

Animation sur le site The Scale of the Universe :

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

Sinon, des captures d'écran suivent.

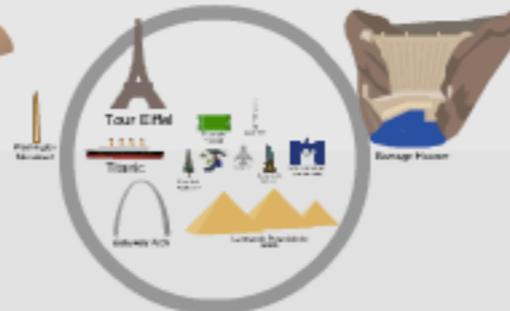
Observations et ordres de grandeur



Observations et ordres de grandeur



Kilomètre (km)
 10^3 mètres



1,000 m



Burj Khalifa



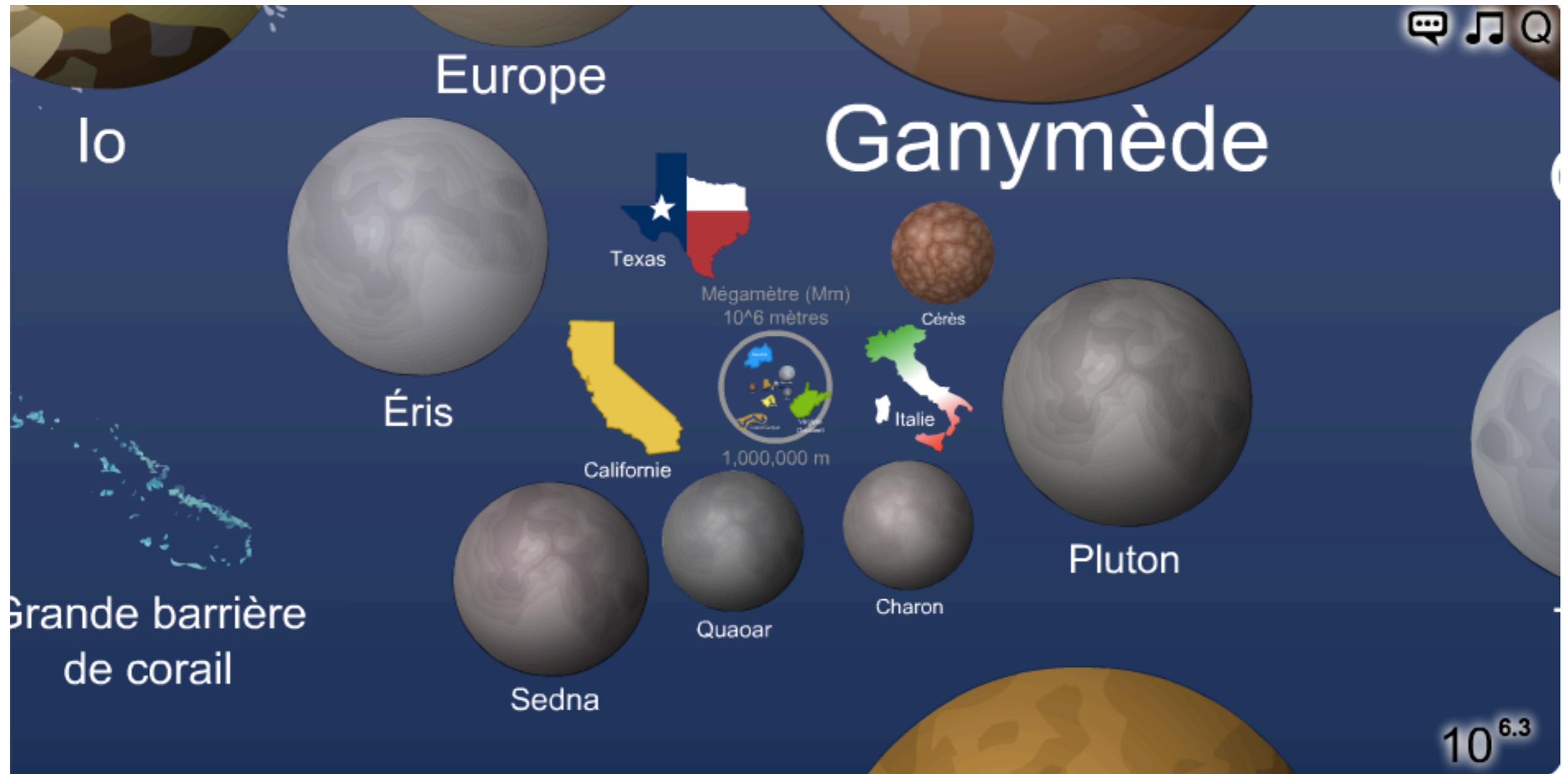
Cascade du Saut de l'Ange



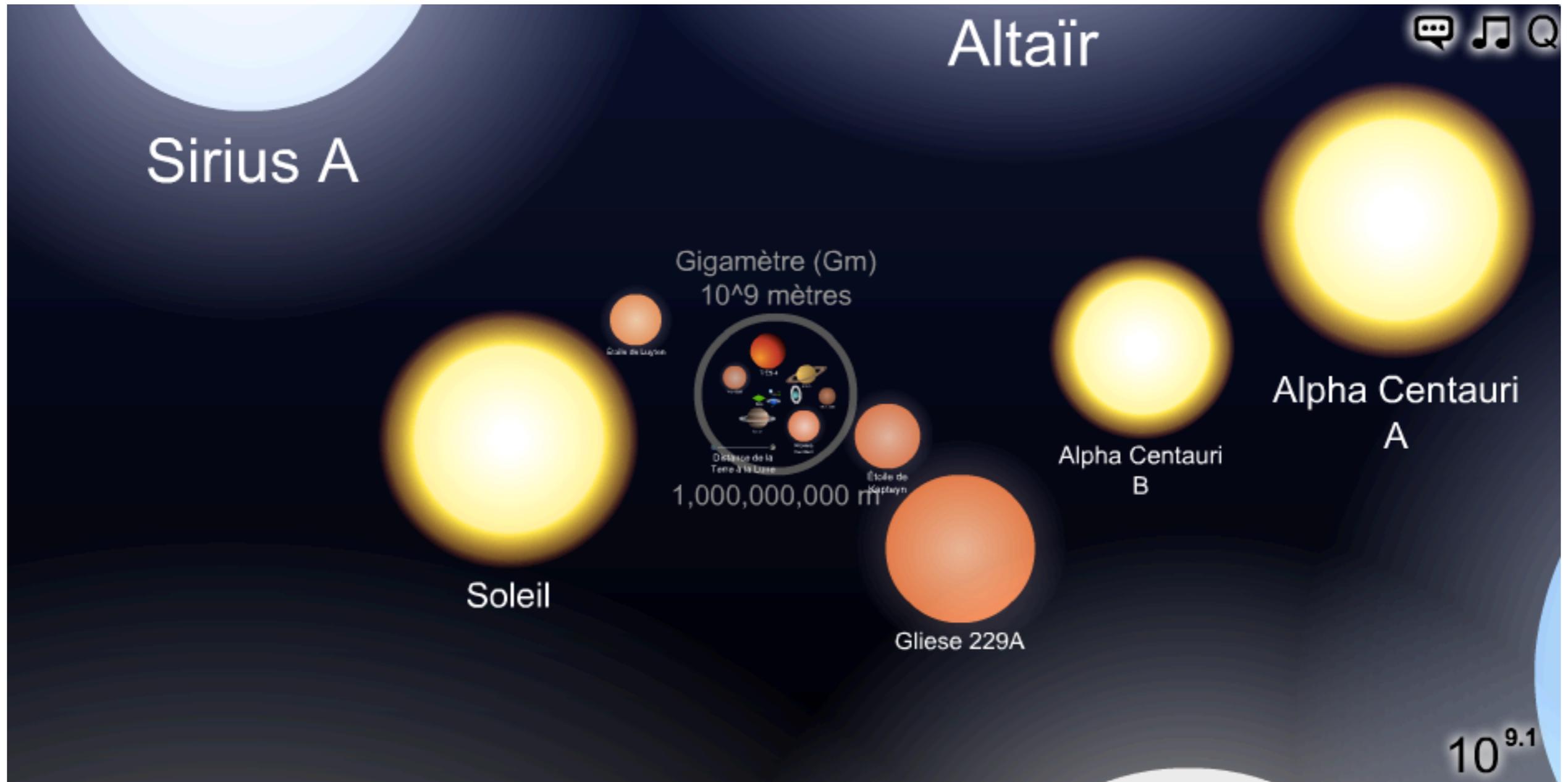
Usine Boeing de Everett

$10^{3.1}$

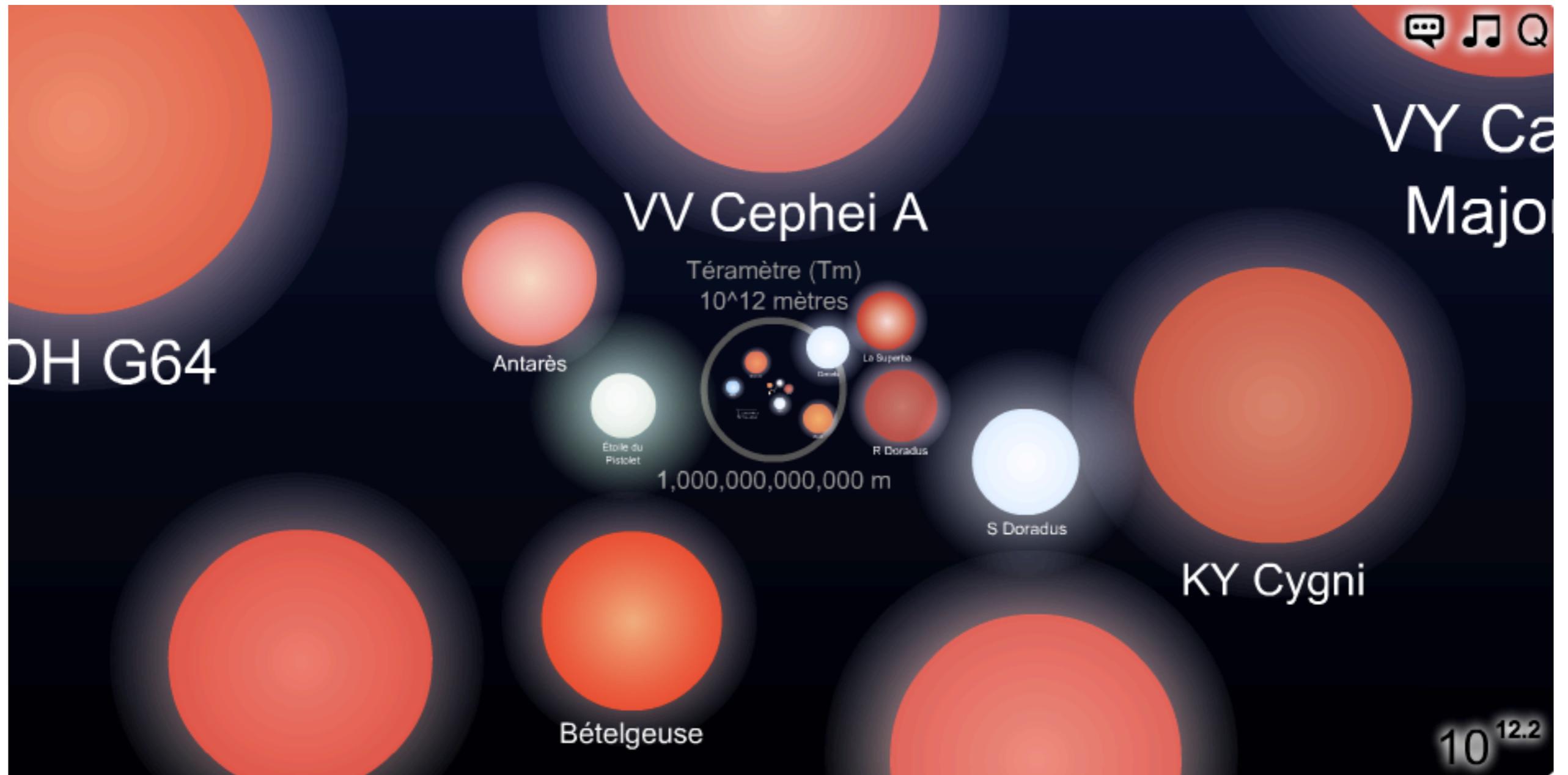
Observations et ordres de grandeur



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

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

Nébuleuse du Sablier

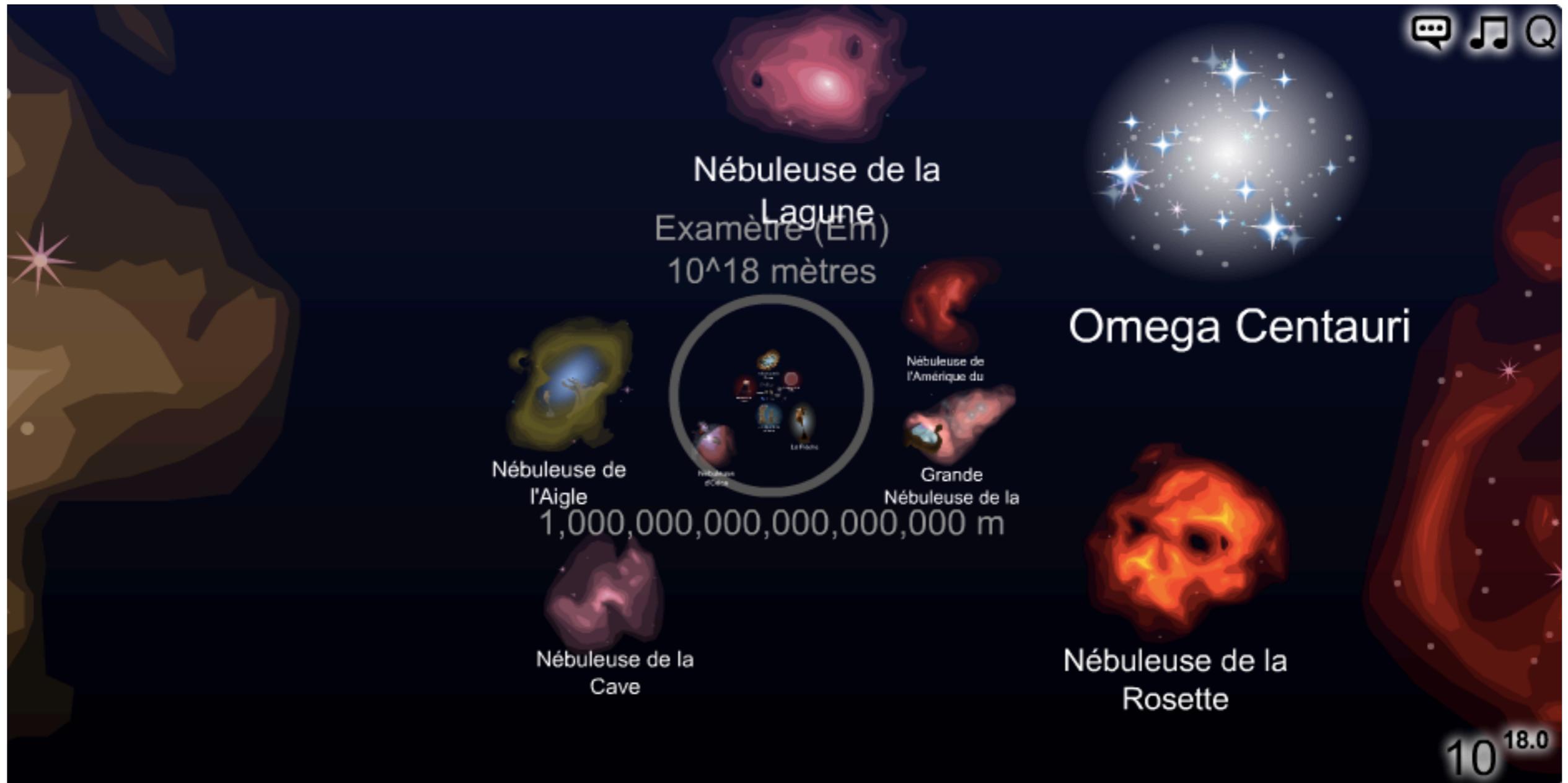
Le Hamburger de Gomez

Nébuleuse de l'Oeil de Chat

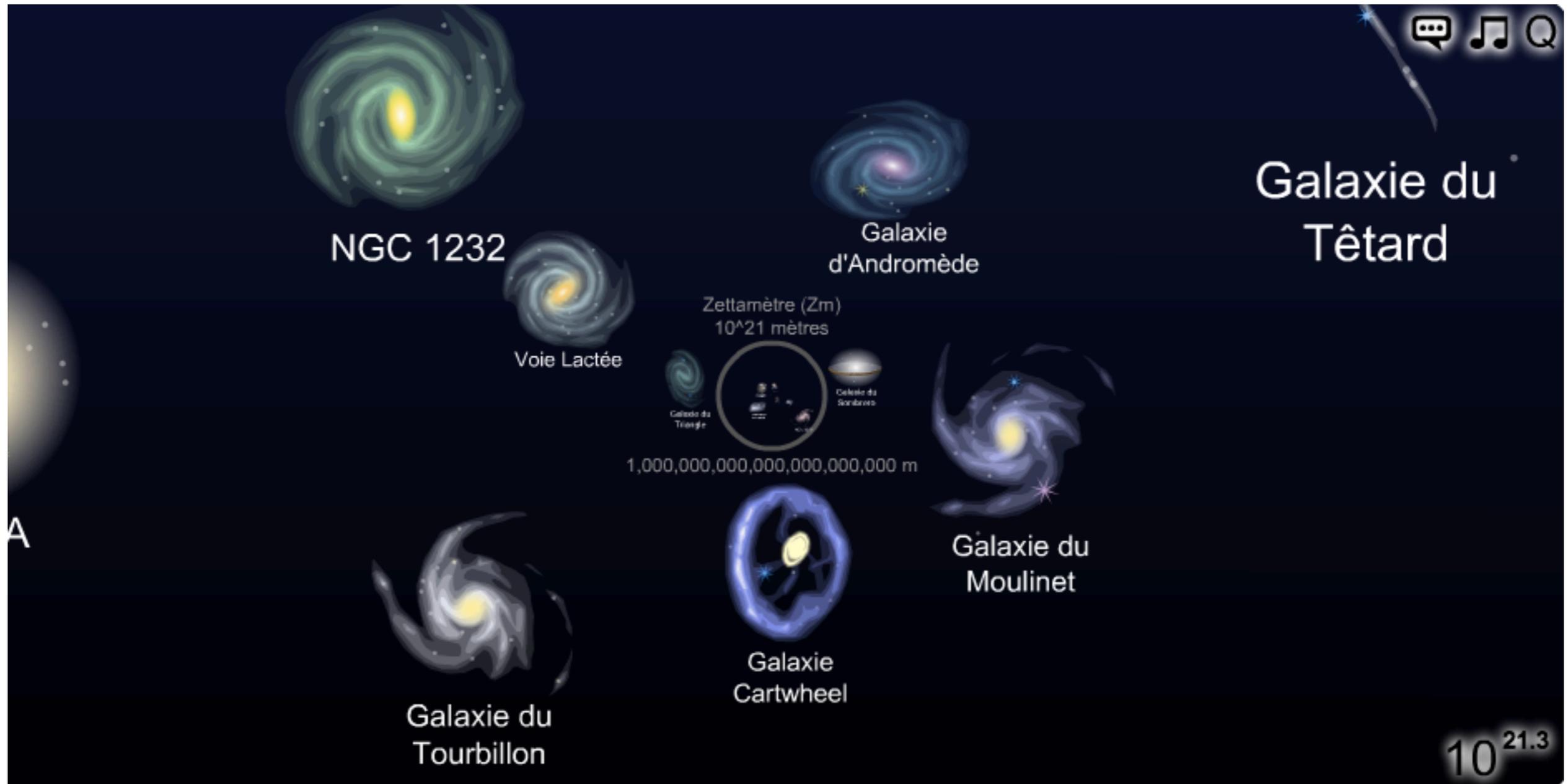
$10^{15.6}$

The infographic features a central title 'Année-Lumière' with a light beam graphic above it. It includes several astronomical illustrations: a red, hourglass-shaped nebula (Nébuleuse du Sablier), a blue and orange nebula (Nébuleuse de l'Oeil de Chat), a green nebula with a bright center (Le Hamburger de Gomez), and a small diagram of the Proxima Centauri system with a scale of 10^{15} meters. A large number $10^{15.6}$ is shown in the bottom right corner. Navigation icons for chat, music, and search are visible in the top right.

Observations et ordres de grandeur



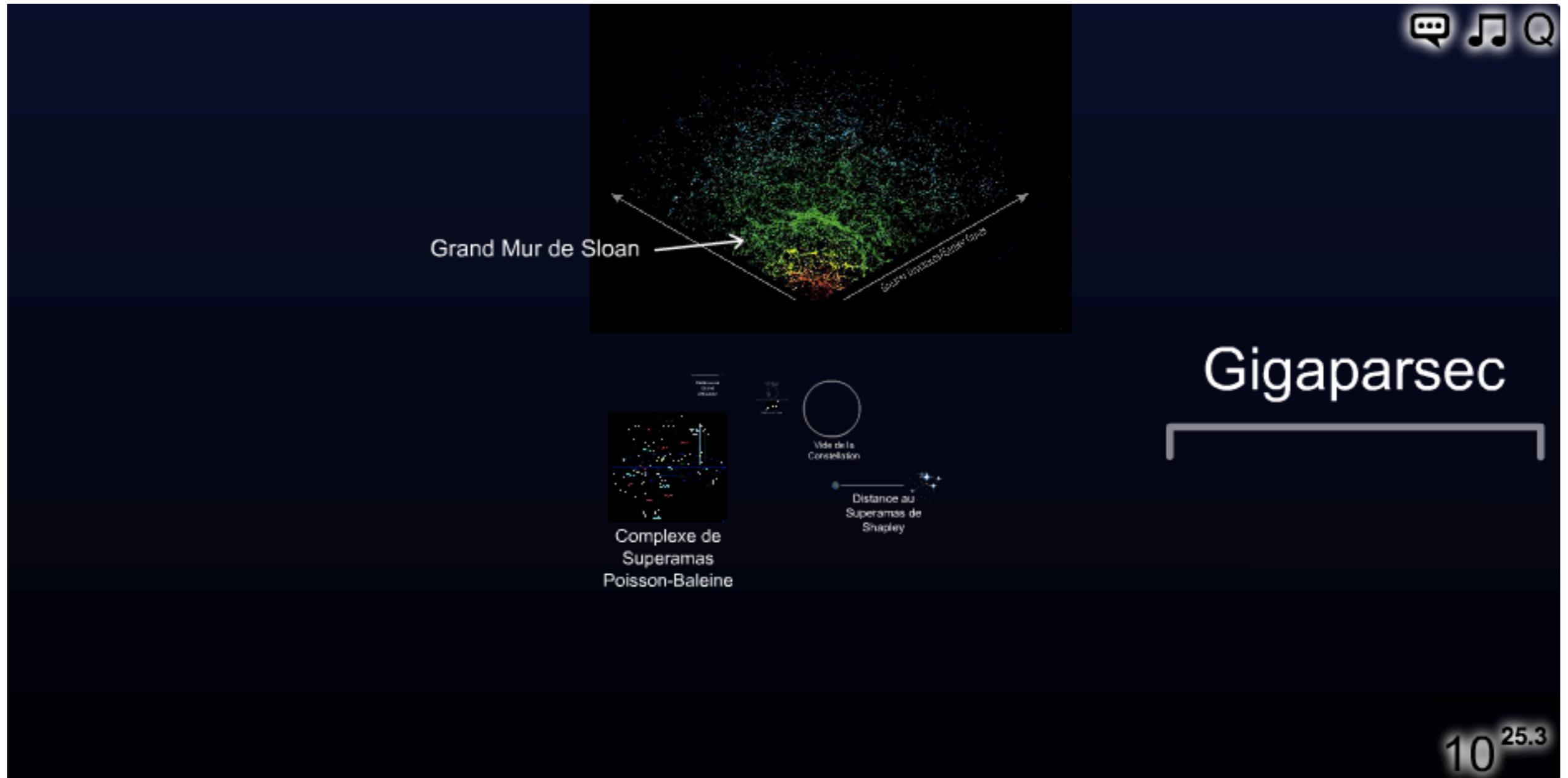
Observations et ordres de grandeur



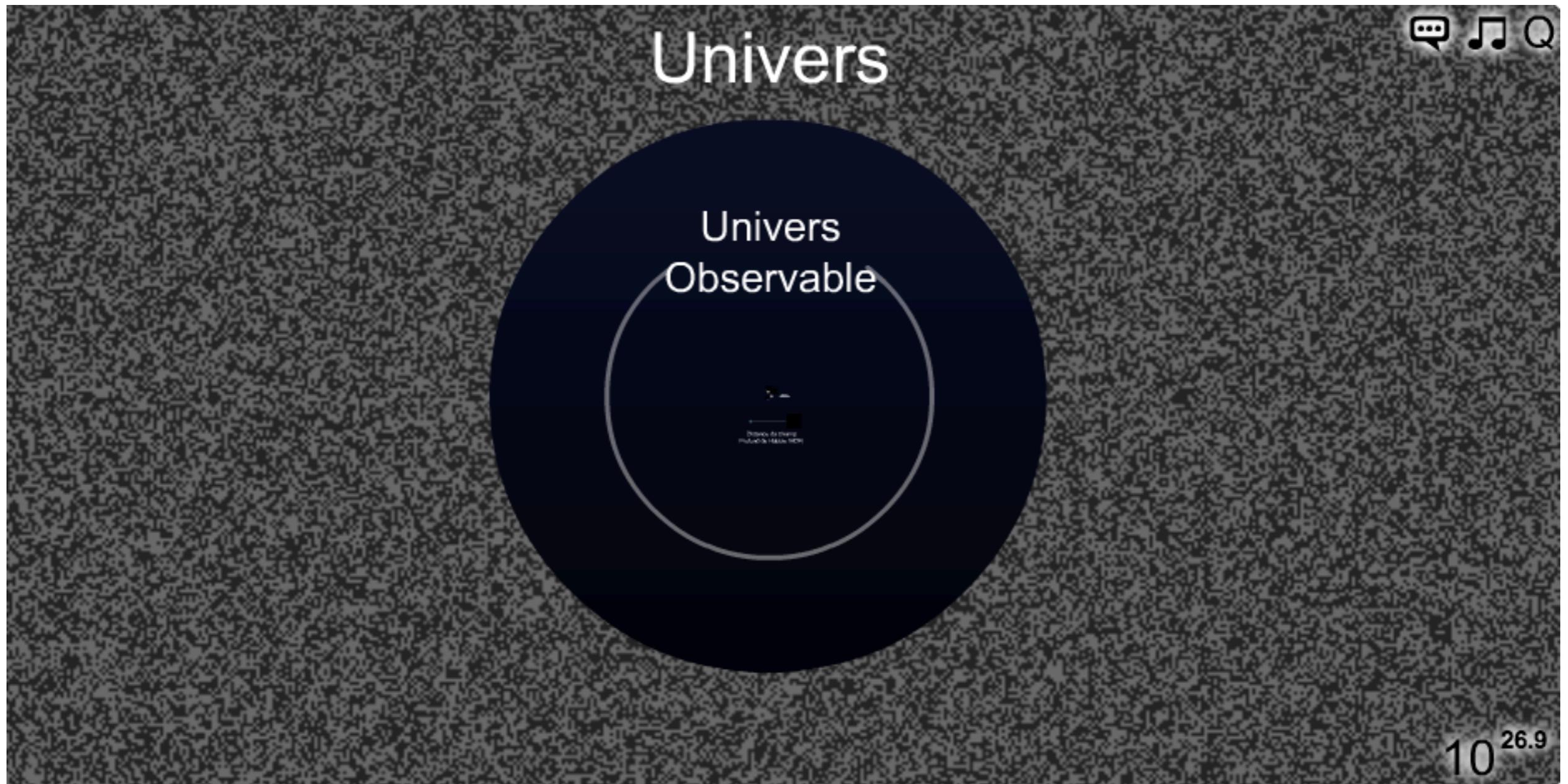
Observations et ordres de grandeur



Observations et ordres de grandeur



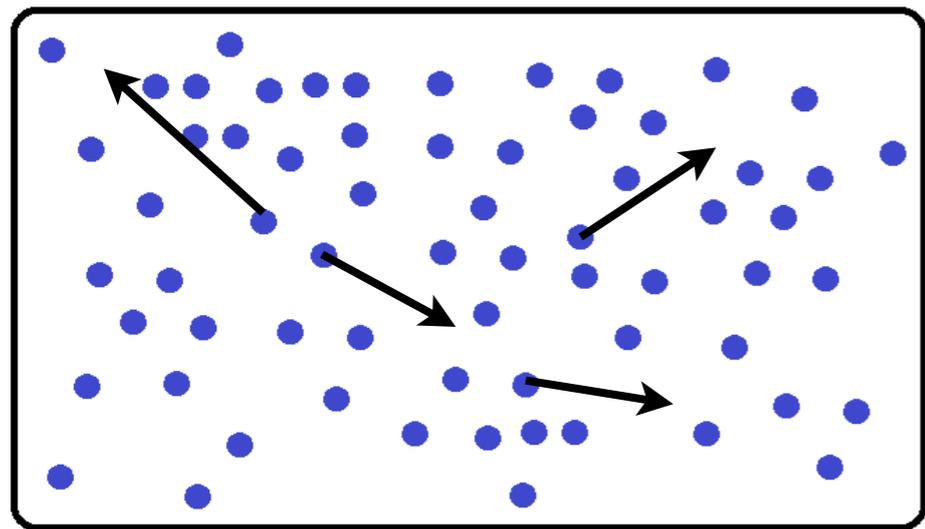
Observations et ordres de grandeur



Qu'est-ce que la cosmologie ?

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

cf. l'air dans une pièce

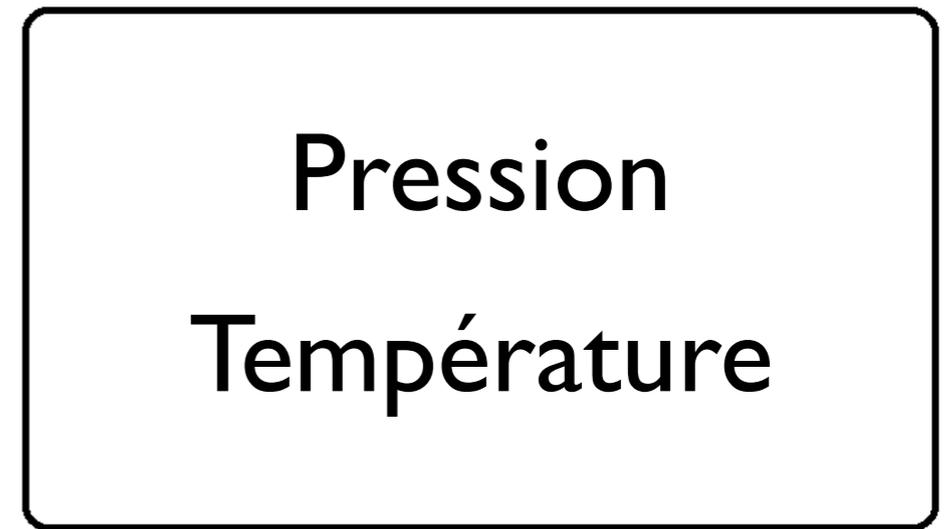


$$(m_i, \vec{r}_i, \vec{v}_i)$$

Description **microscopique**



Description
statistique



Description **macroscopique**

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

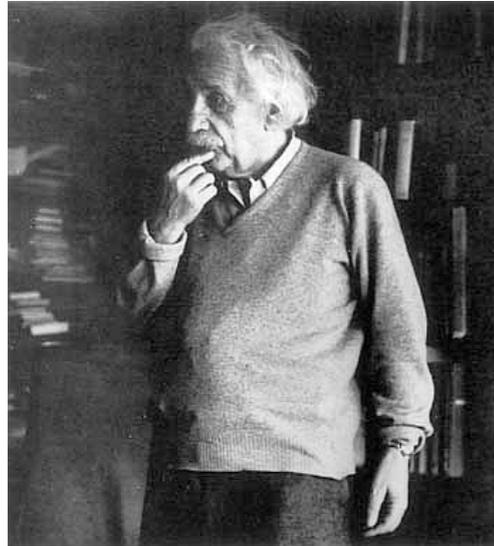
Spécificités de la science cosmologie

- 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



BLEU

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
 - ★ poussière (fluide de galaxies sans pression)

Hypothèses très conservatrices

Observations

La vitesse de propagation de la lumière est finie



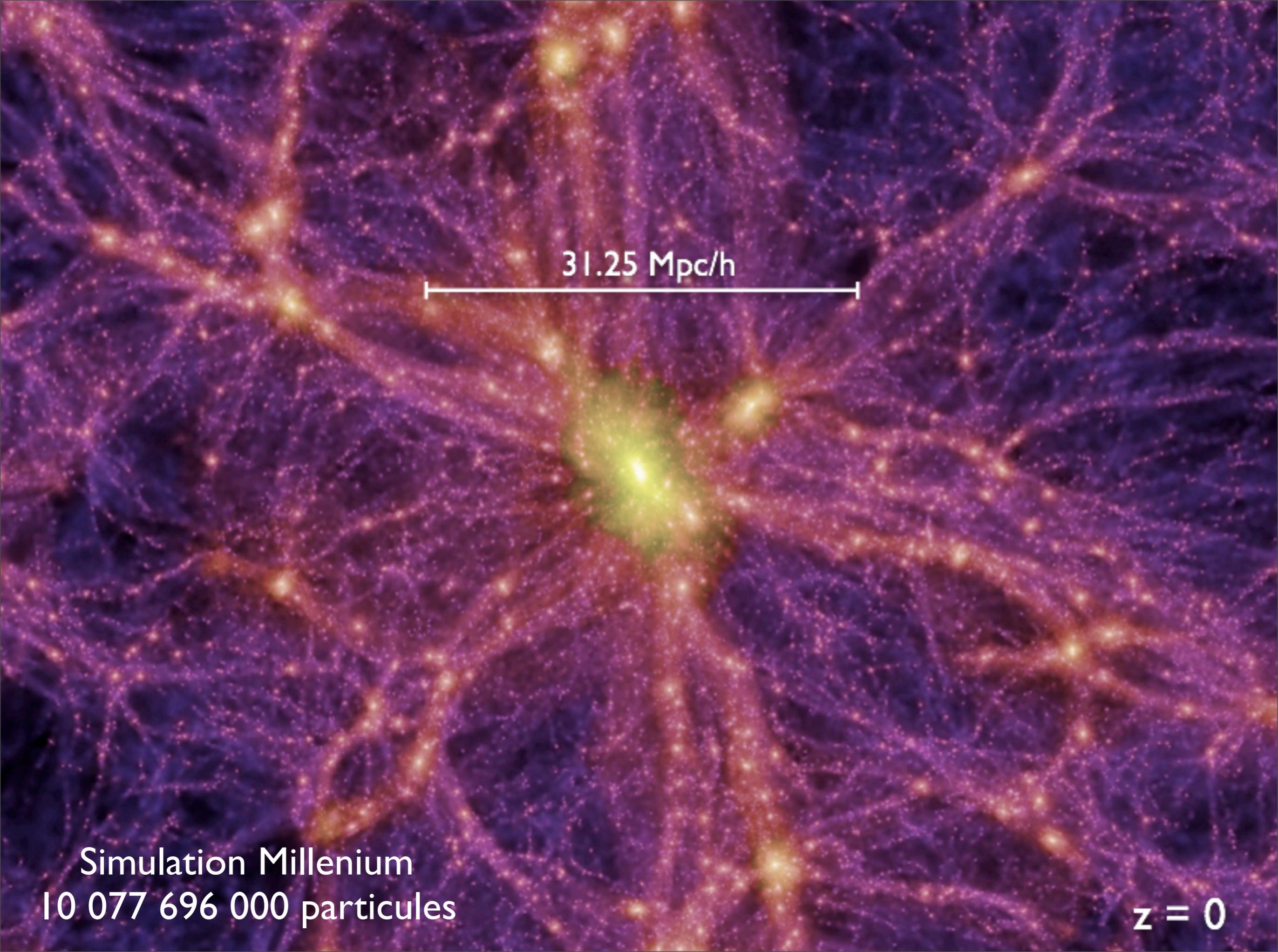
Voir loin, c'est voir dans le passé.

- ★ 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).





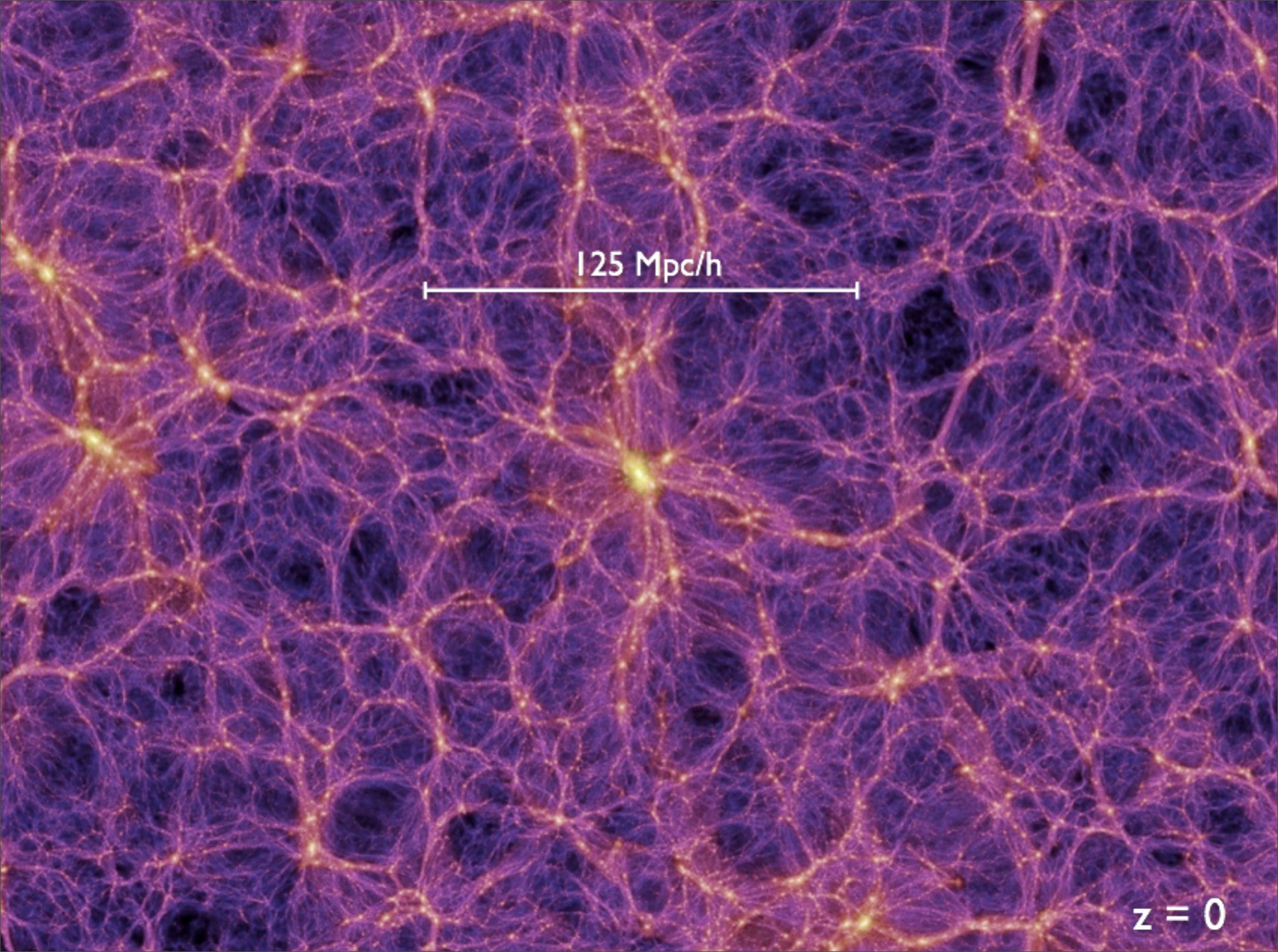
Sloan Digital Sky Survey



31.25 Mpc/h

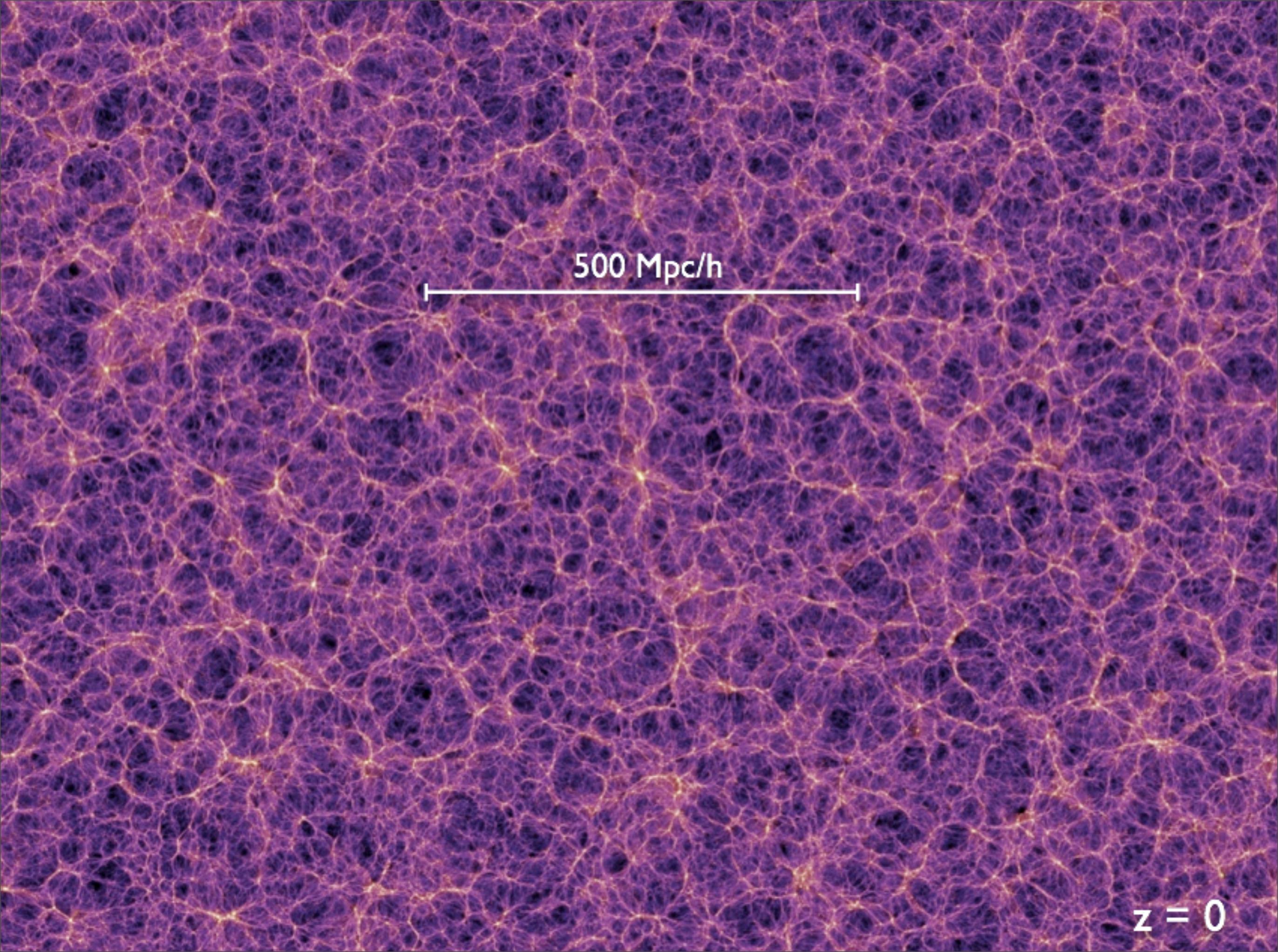
Simulation Millenium
10 077 696 000 particules

$z = 0$



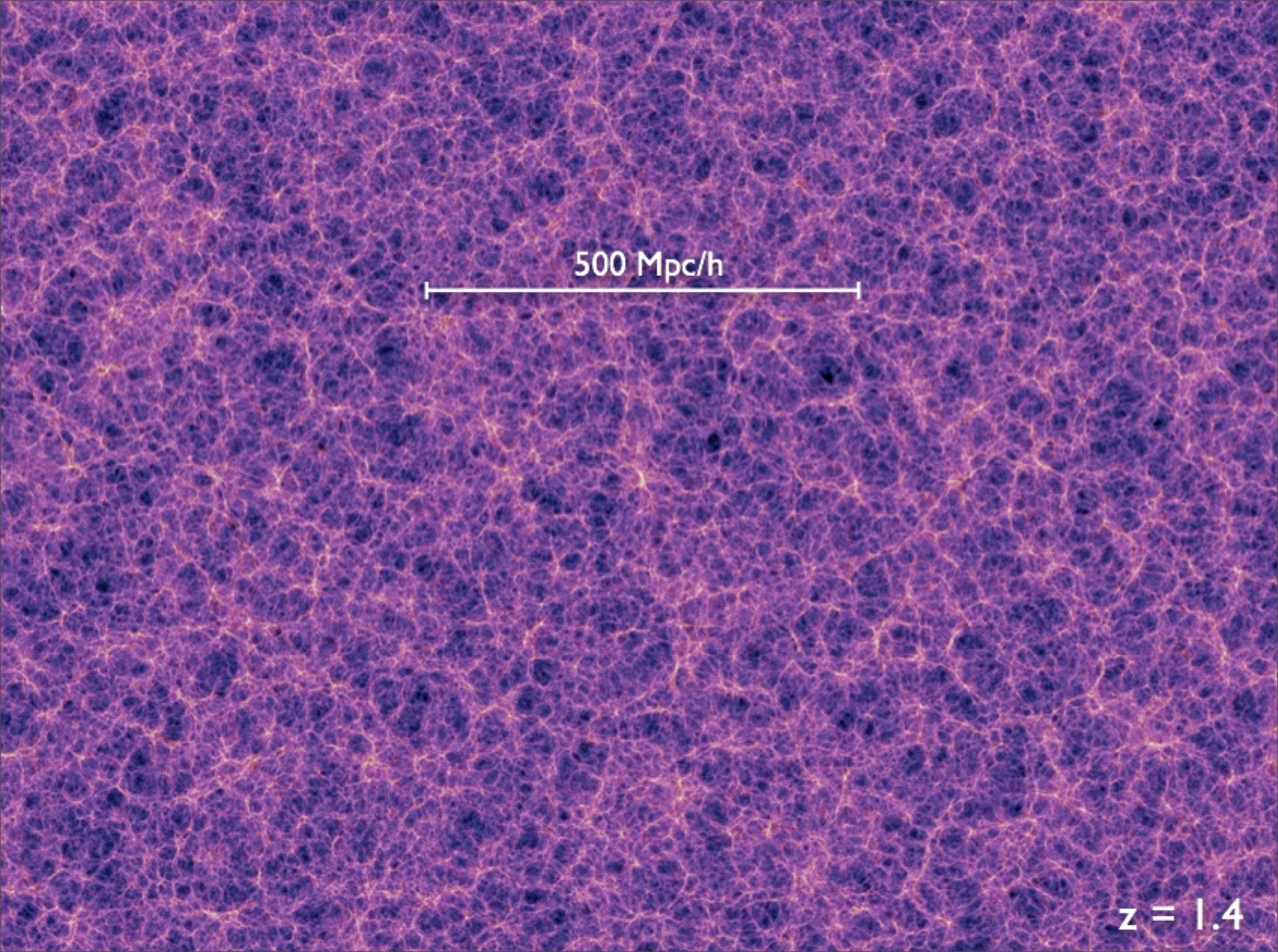
125 Mpc/h

$z = 0$



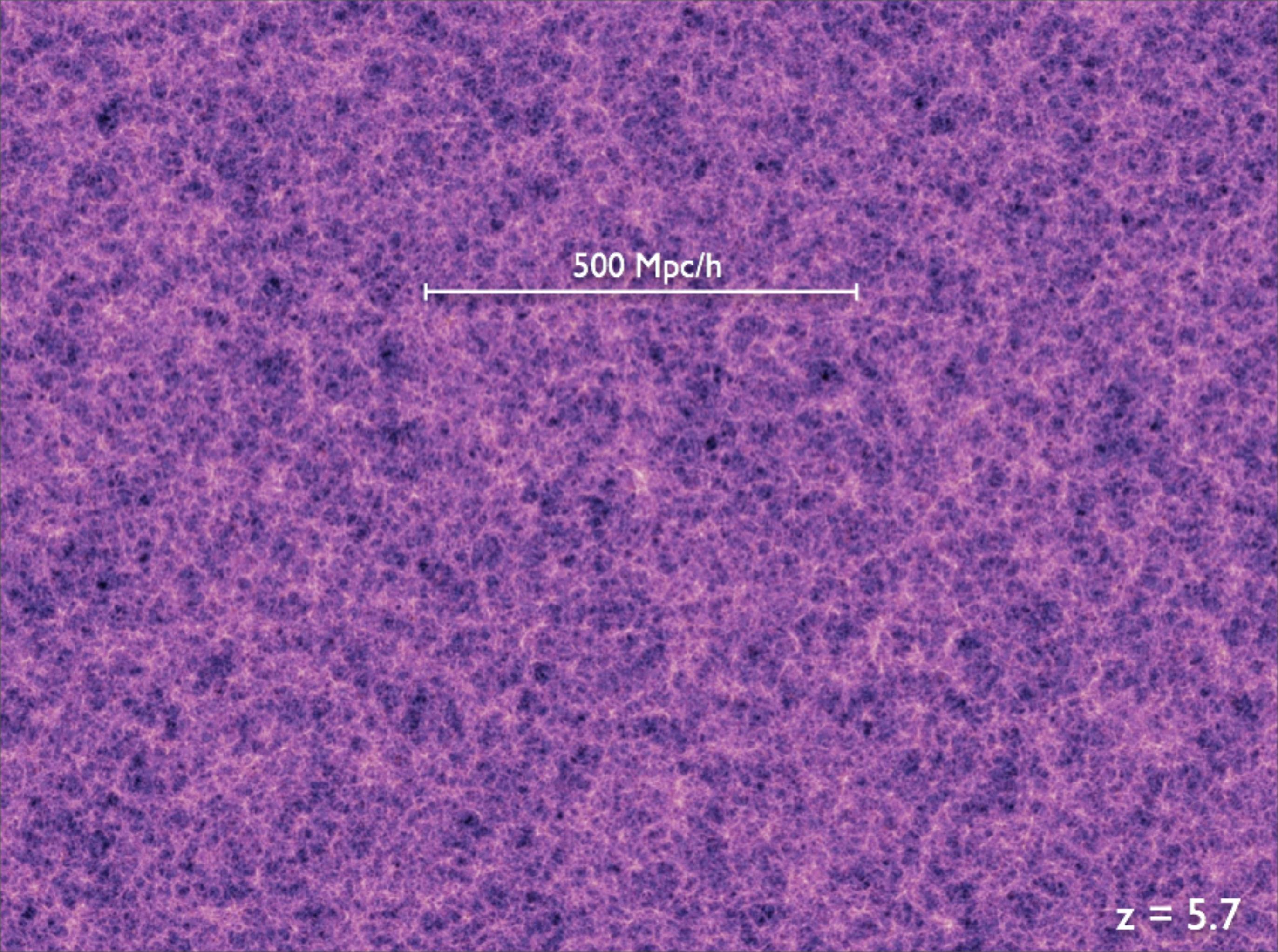
500 Mpc/h

$z = 0$



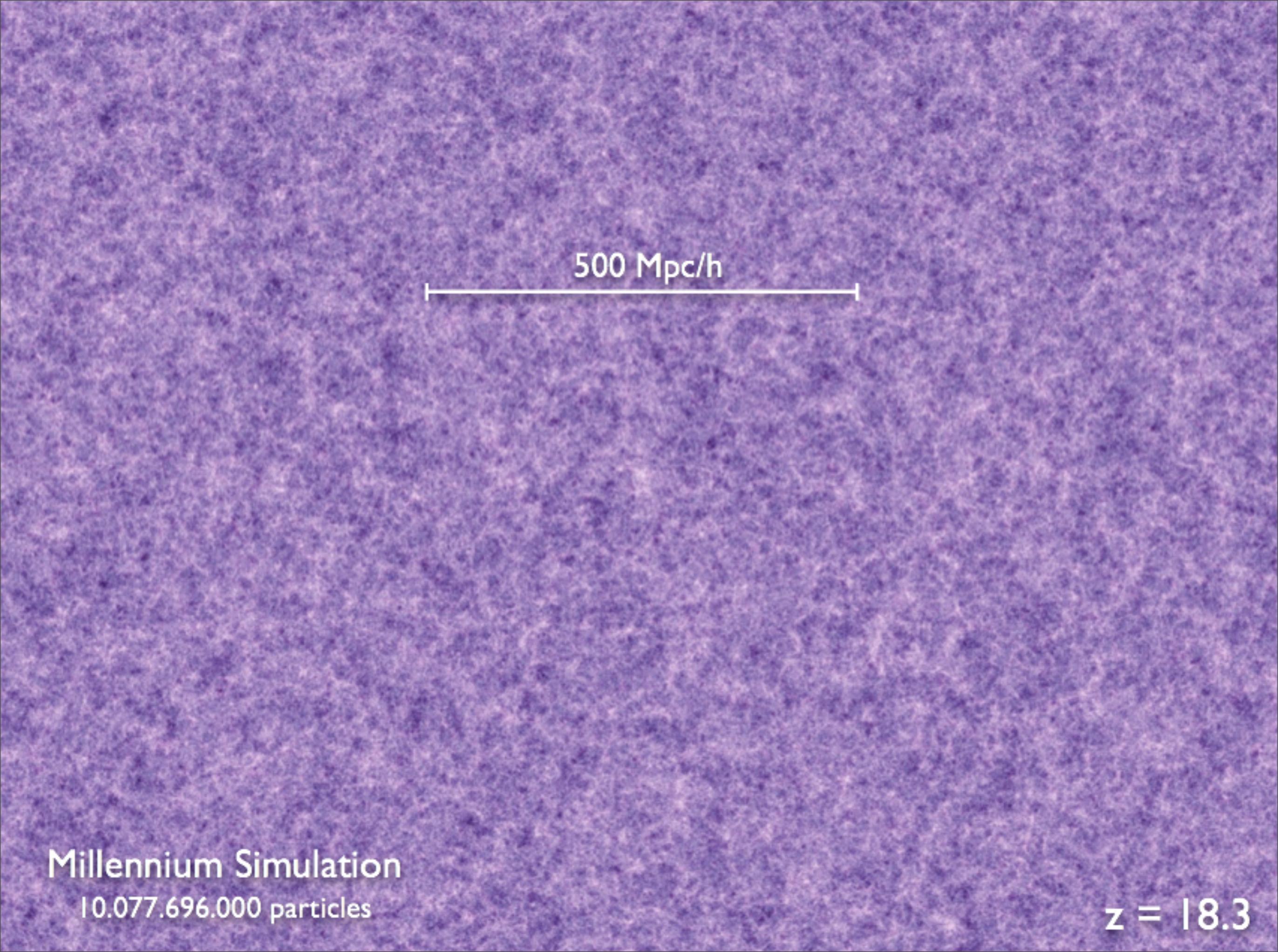
500 Mpc/h

$z = 1.4$



500 Mpc/h

$z = 5.7$



500 Mpc/h

Millennium Simulation

10,077,696,000 particles

$z = 18.3$

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.
cf. univers statique d'Einstein

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 ...

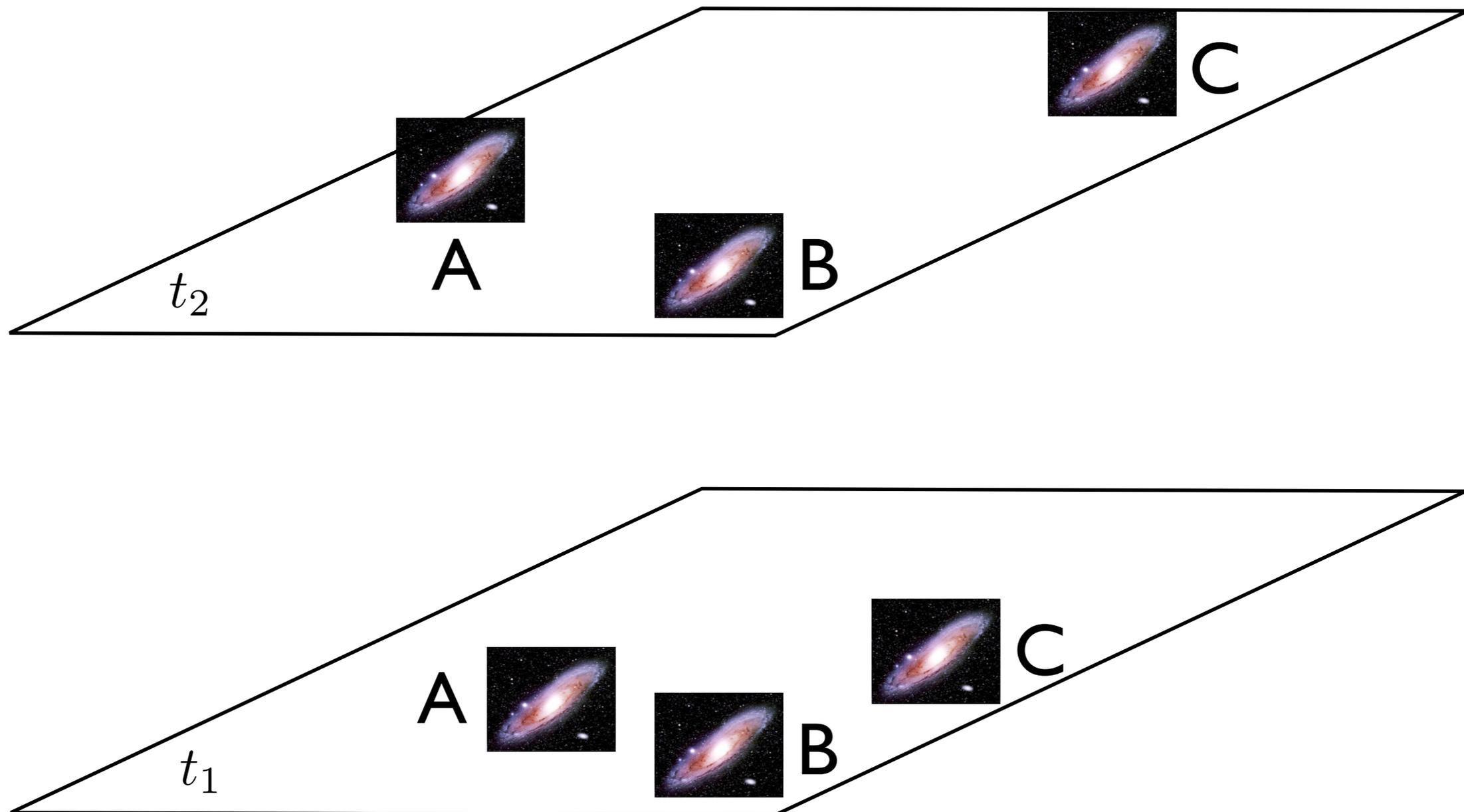


Dans le passé, l'univers était plus chaud et plus dense qu'actuellement.

Le message principal du modèle du Big-Bang

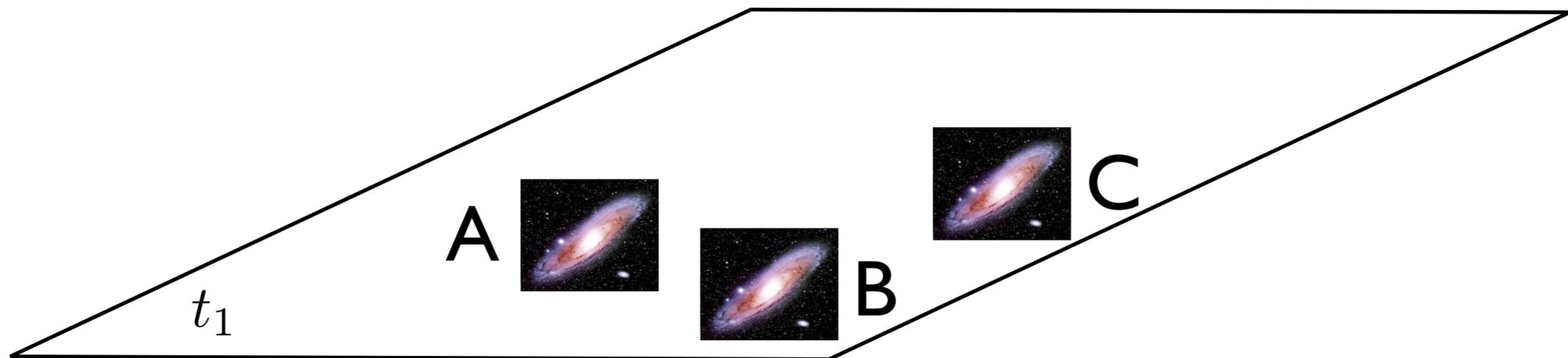
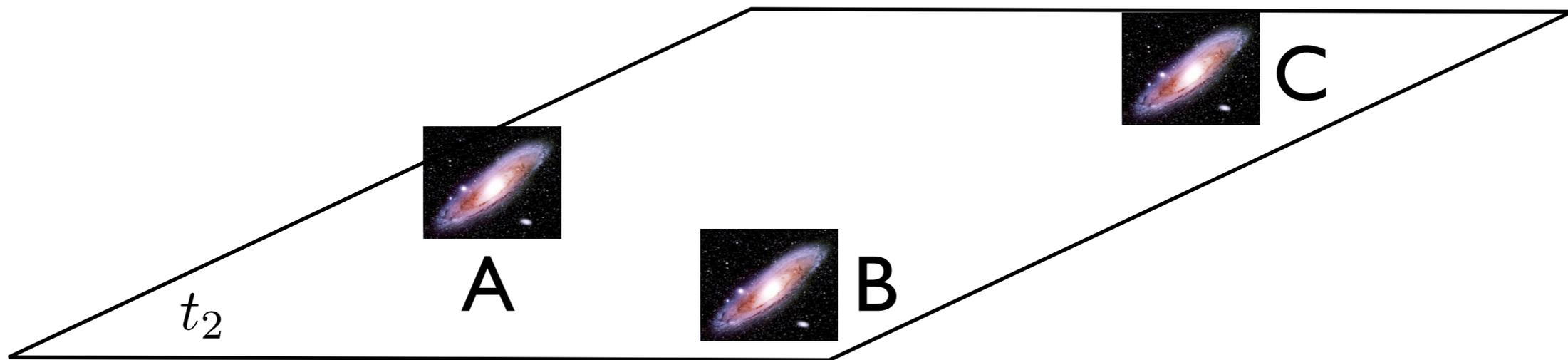
Dilatation de l'espace (expansion de l'espace-temps)

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)

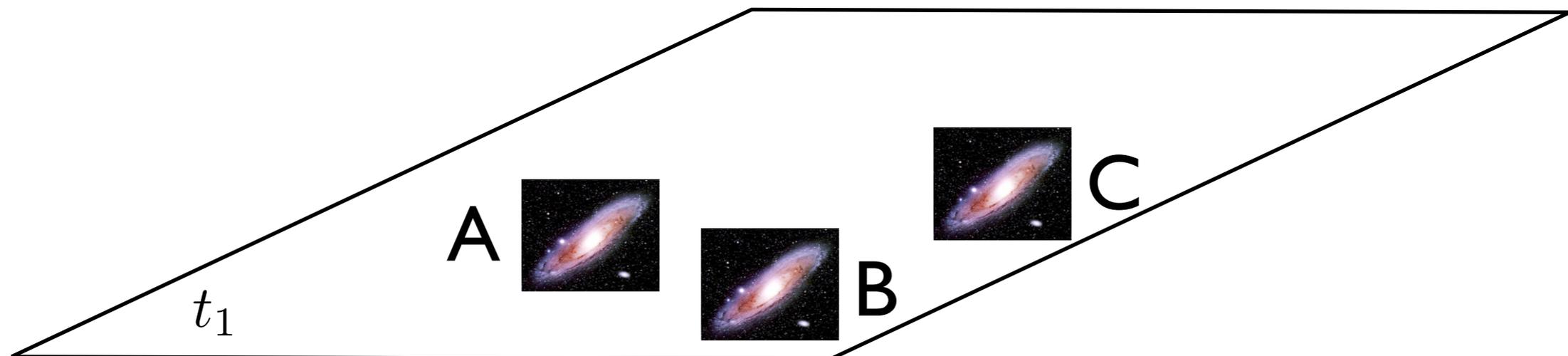
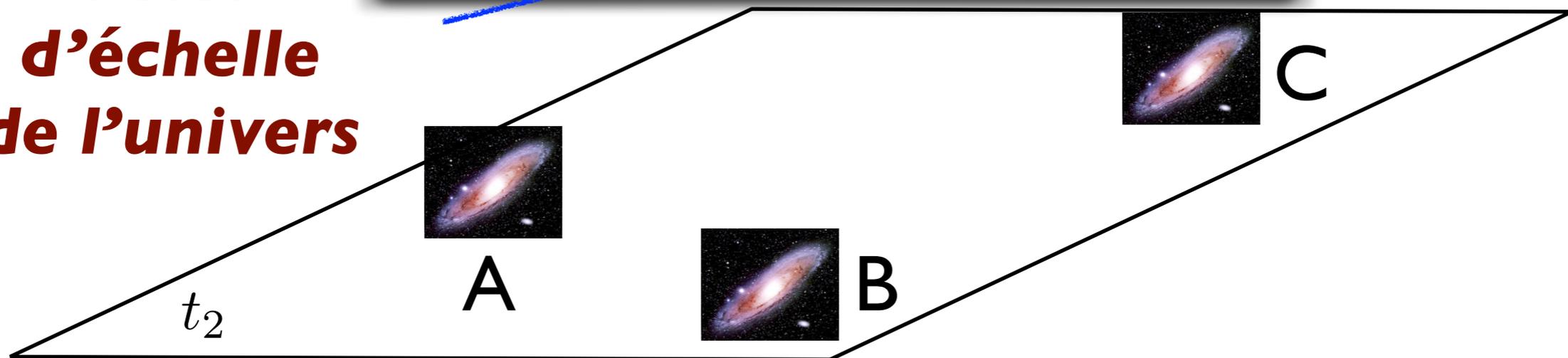
$$\frac{\|\vec{r}_A - \vec{r}_B\|_{t_2}}{\|\vec{r}_A - \vec{r}_B\|_{t_1}} = \frac{\|\vec{r}_C - \vec{r}_B\|_{t_2}}{\|\vec{r}_C - \vec{r}_B\|_{t_1}} = \frac{\|\vec{r}_A - \vec{r}_C\|_{t_2}}{\|\vec{r}_A - \vec{r}_C\|_{t_1}}$$



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***

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

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

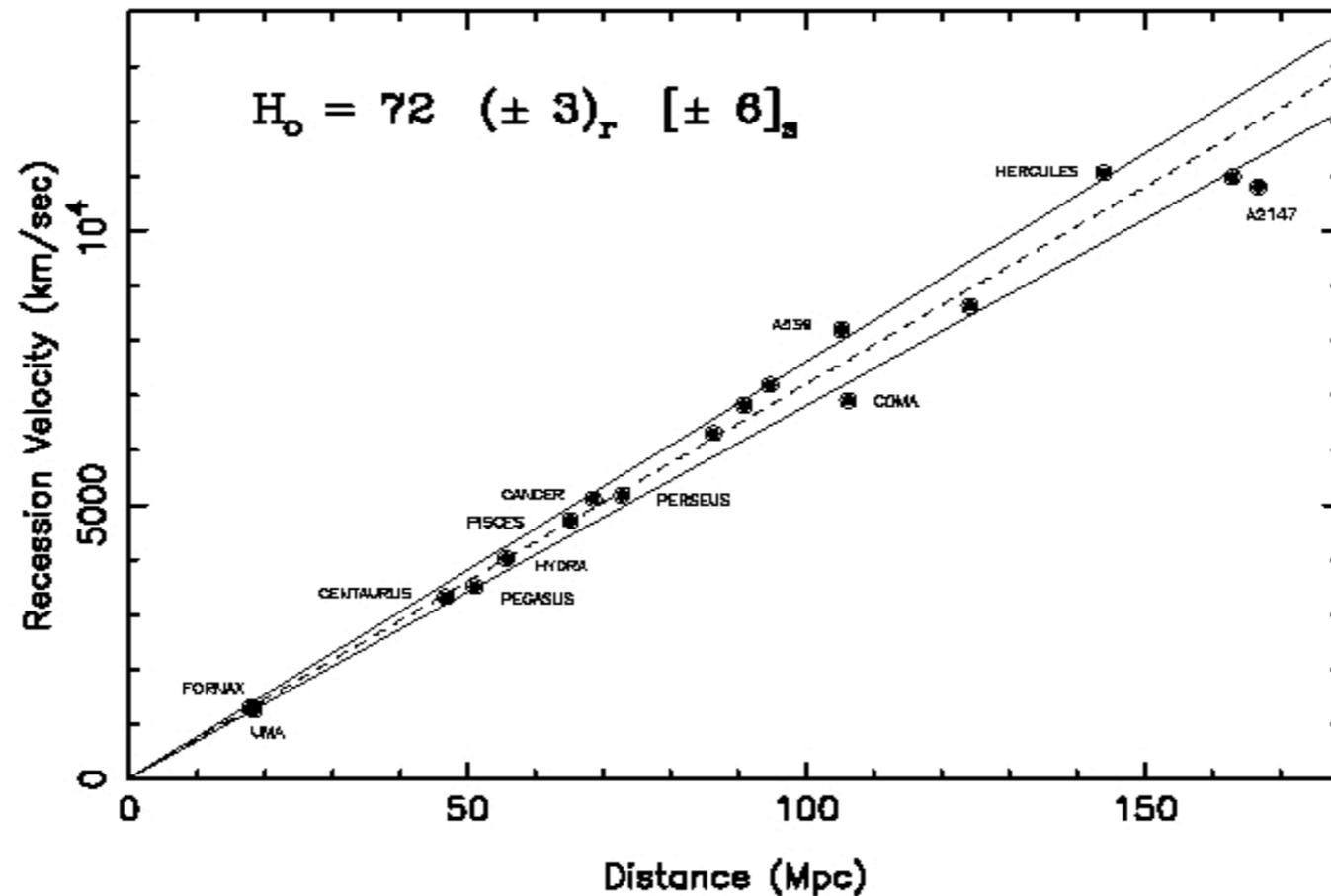
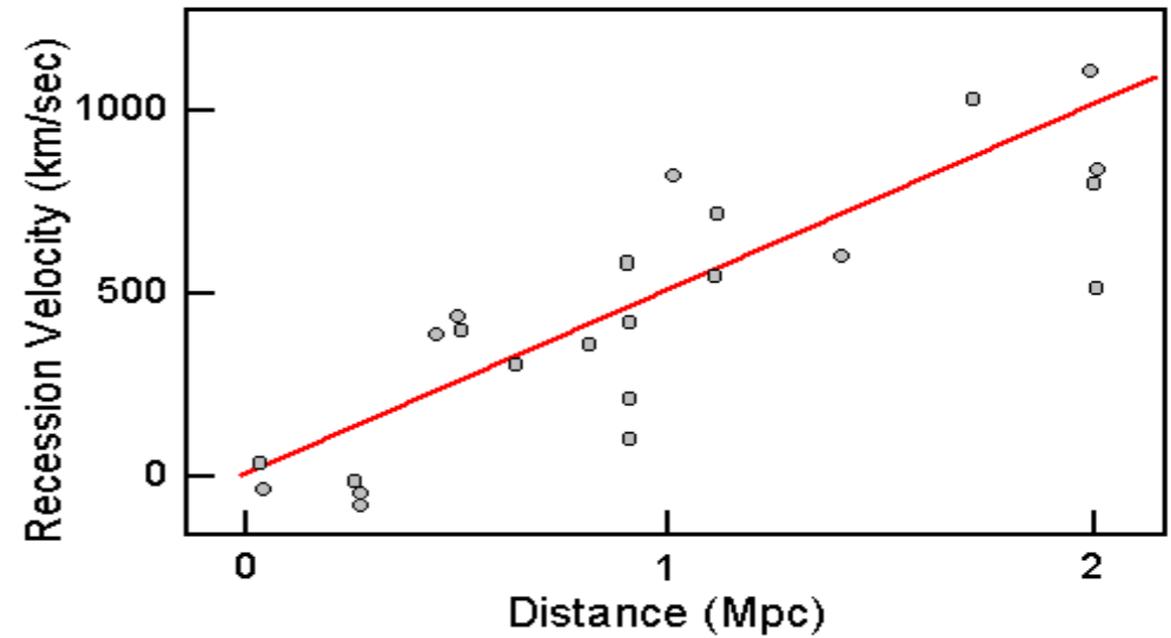
***Paramètre de Hubble
(fonction du temps)***

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

Observations



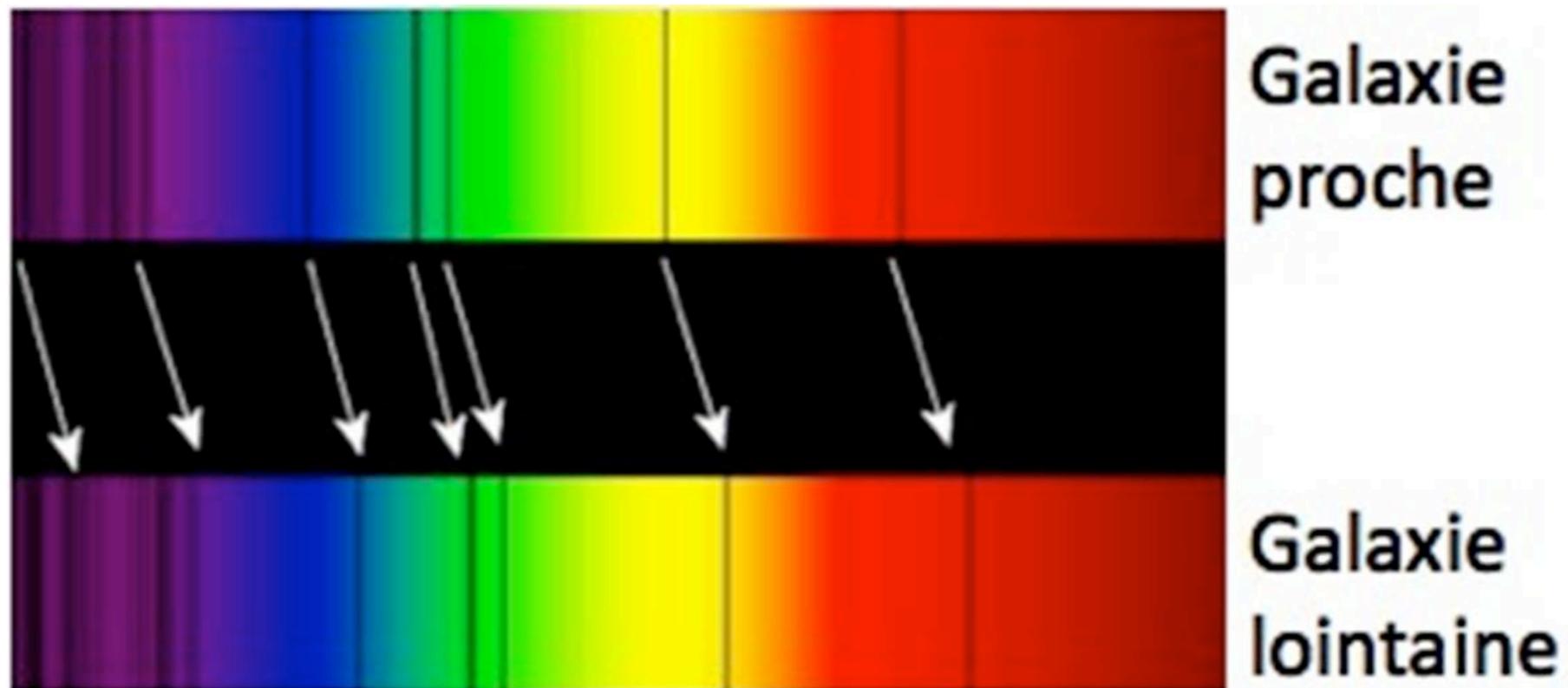
Données de Hubble (1929)



Observations

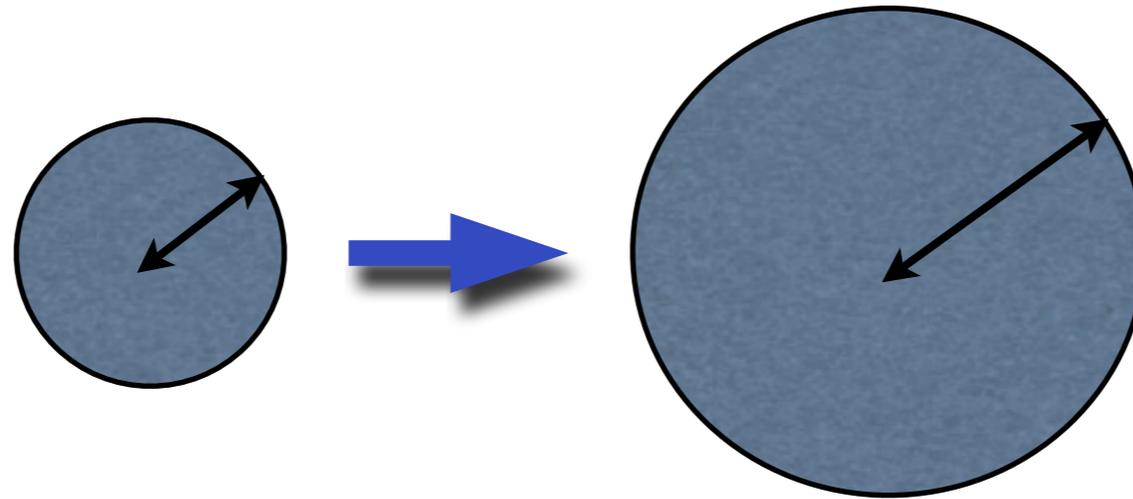
Décalage vers le rouge
(redshift)

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{rec}}}{\lambda_{\text{em}}} = \frac{a_{\text{rec}}}{a_{\text{em}}}$$



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

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

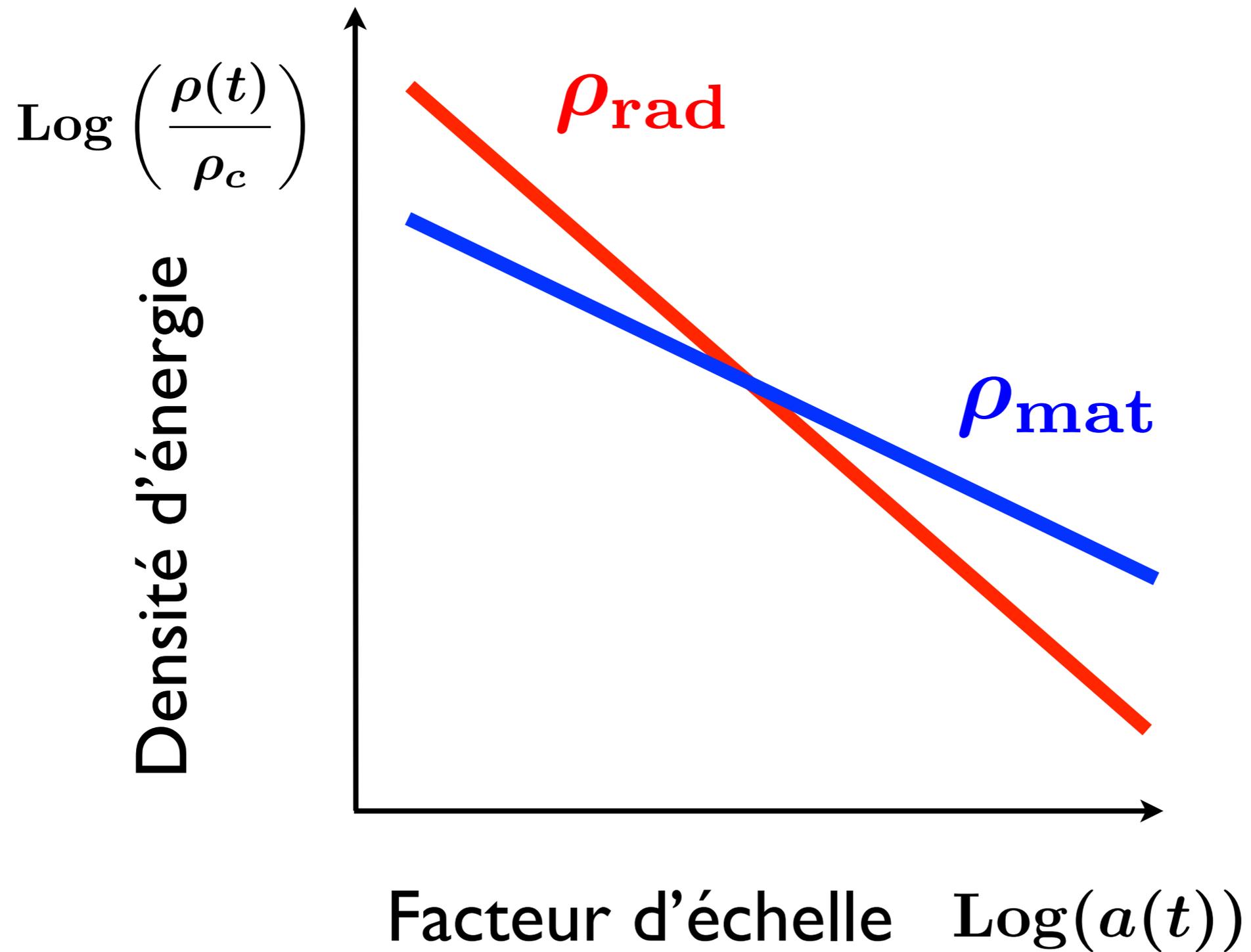
En général,
densité d'énergie

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

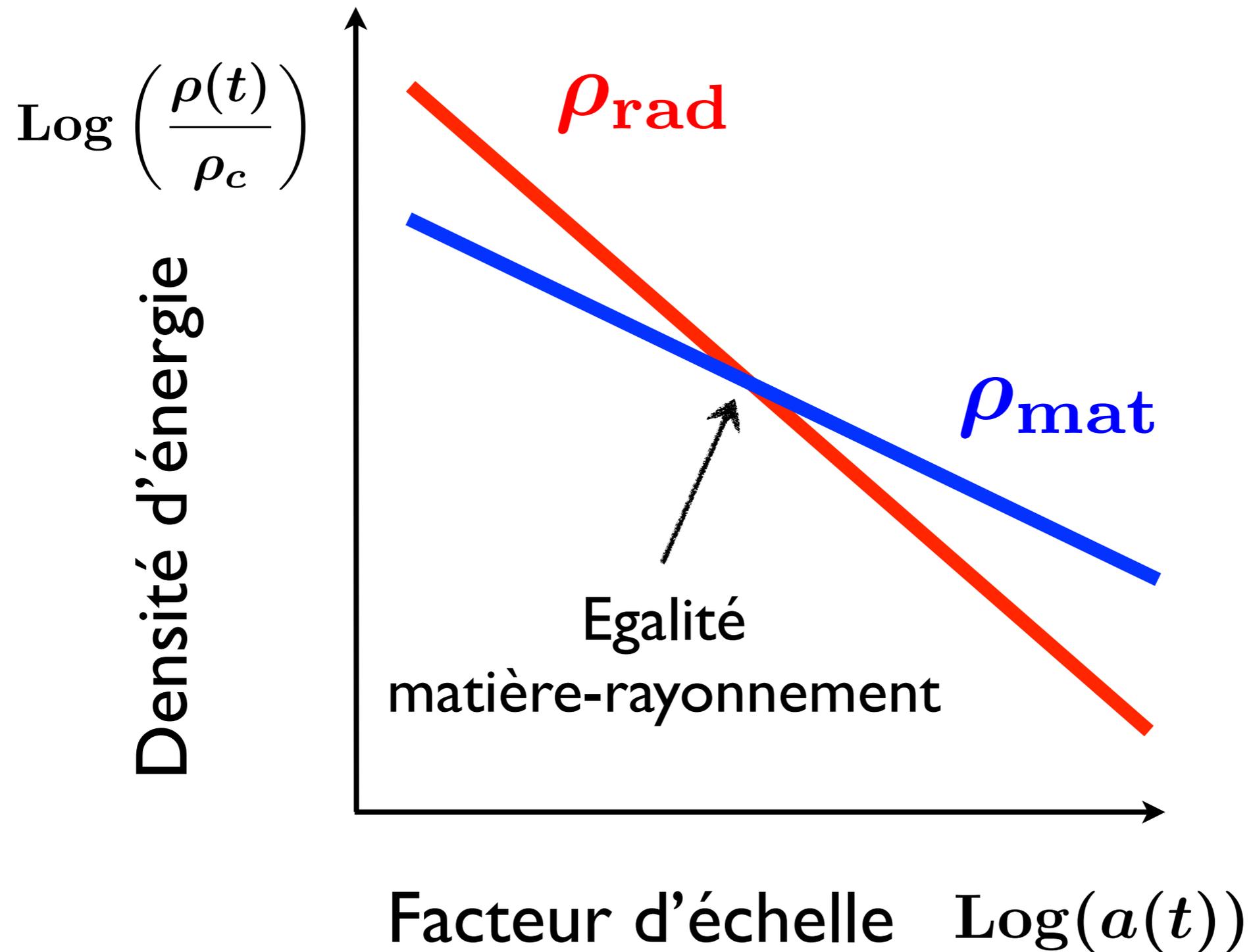
Pour de la radiation (lumière) : $\frac{p_{\text{rad}}}{c^2} = \frac{\rho_{\text{rad}}}{3}$ (Eddington)

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

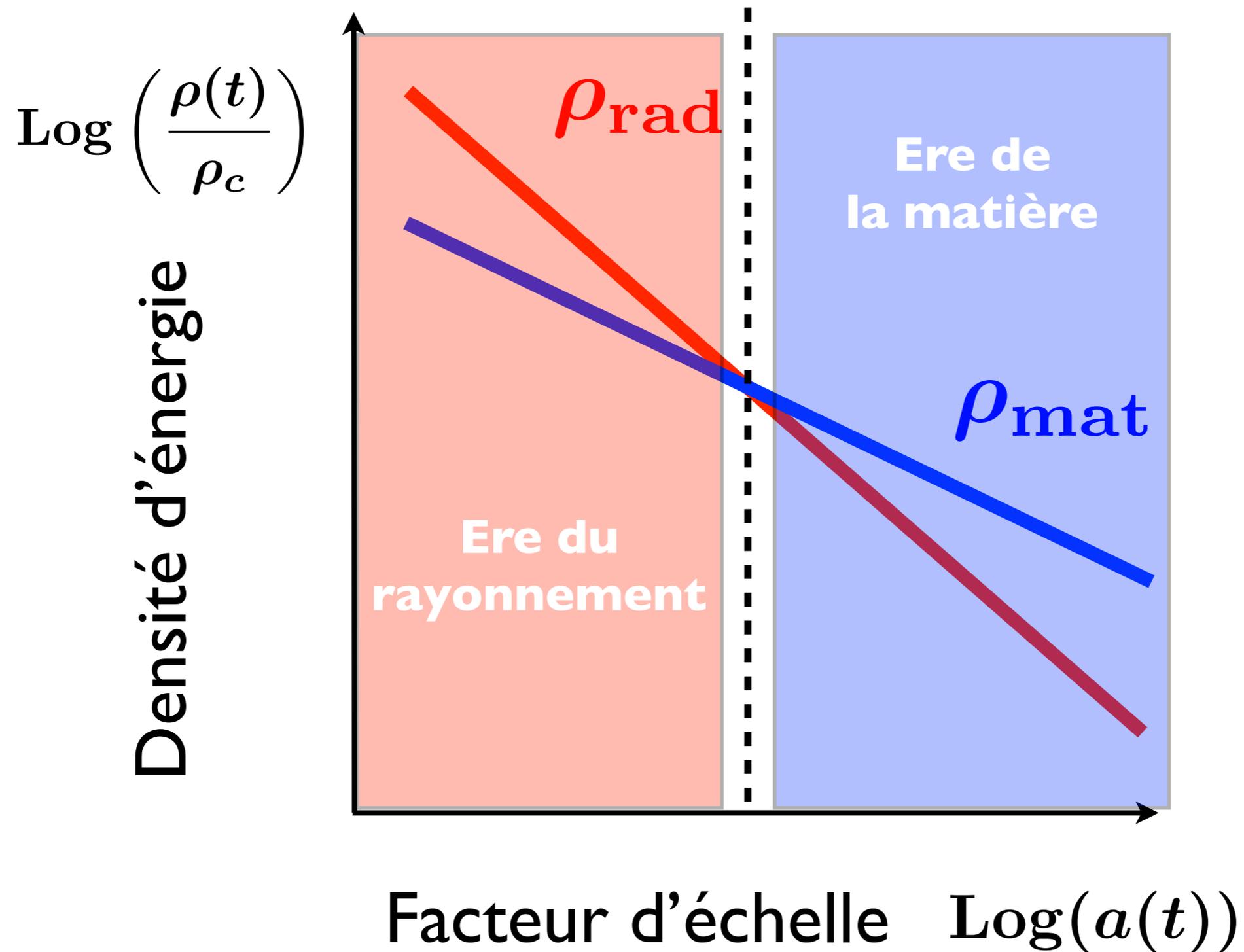
Evolution de l'univers



Evolution de l'univers



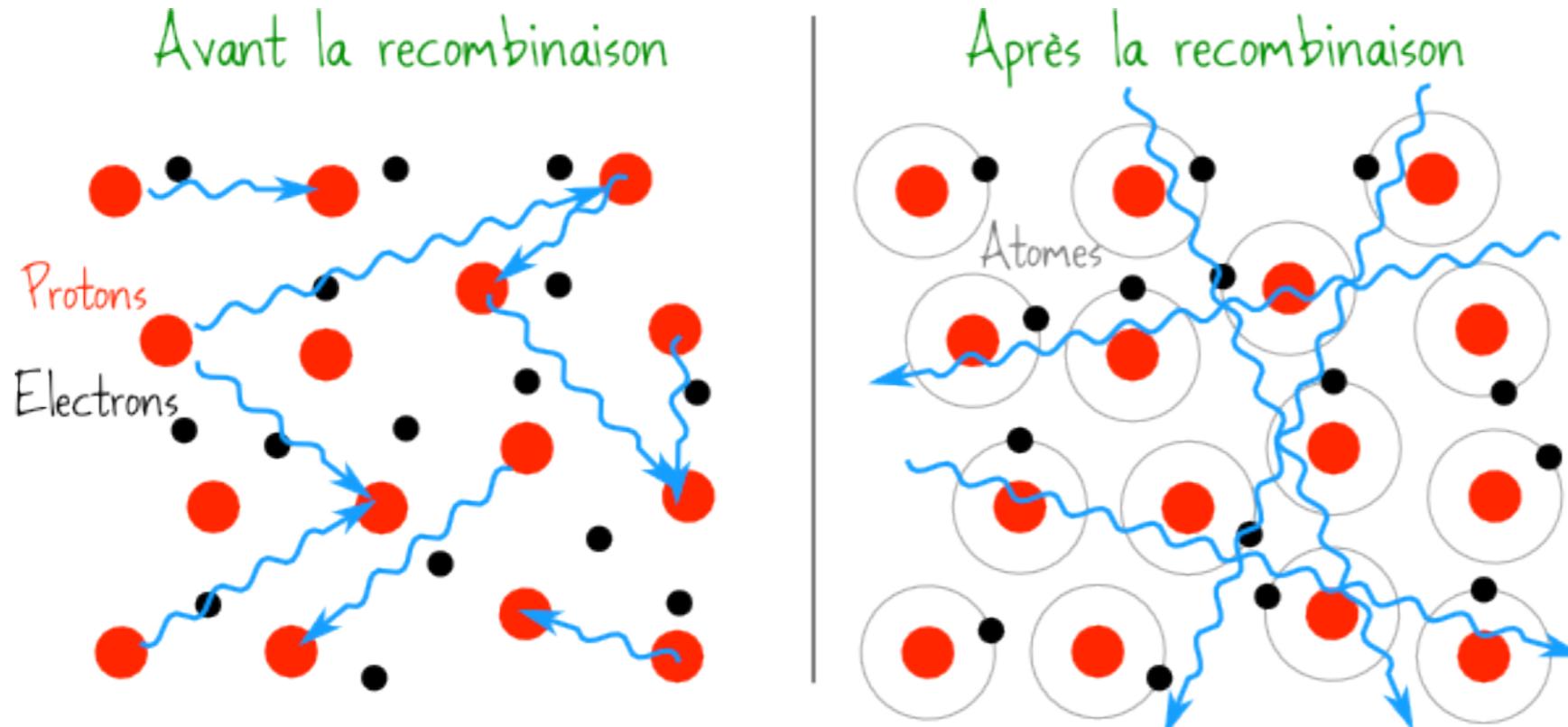
Evolution de l'univers



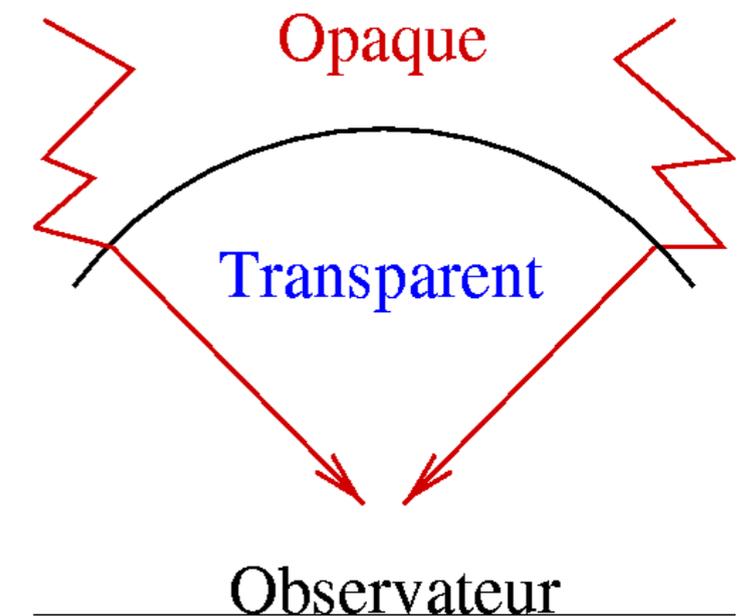
(Re)combinaison

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

Gamow, 1948



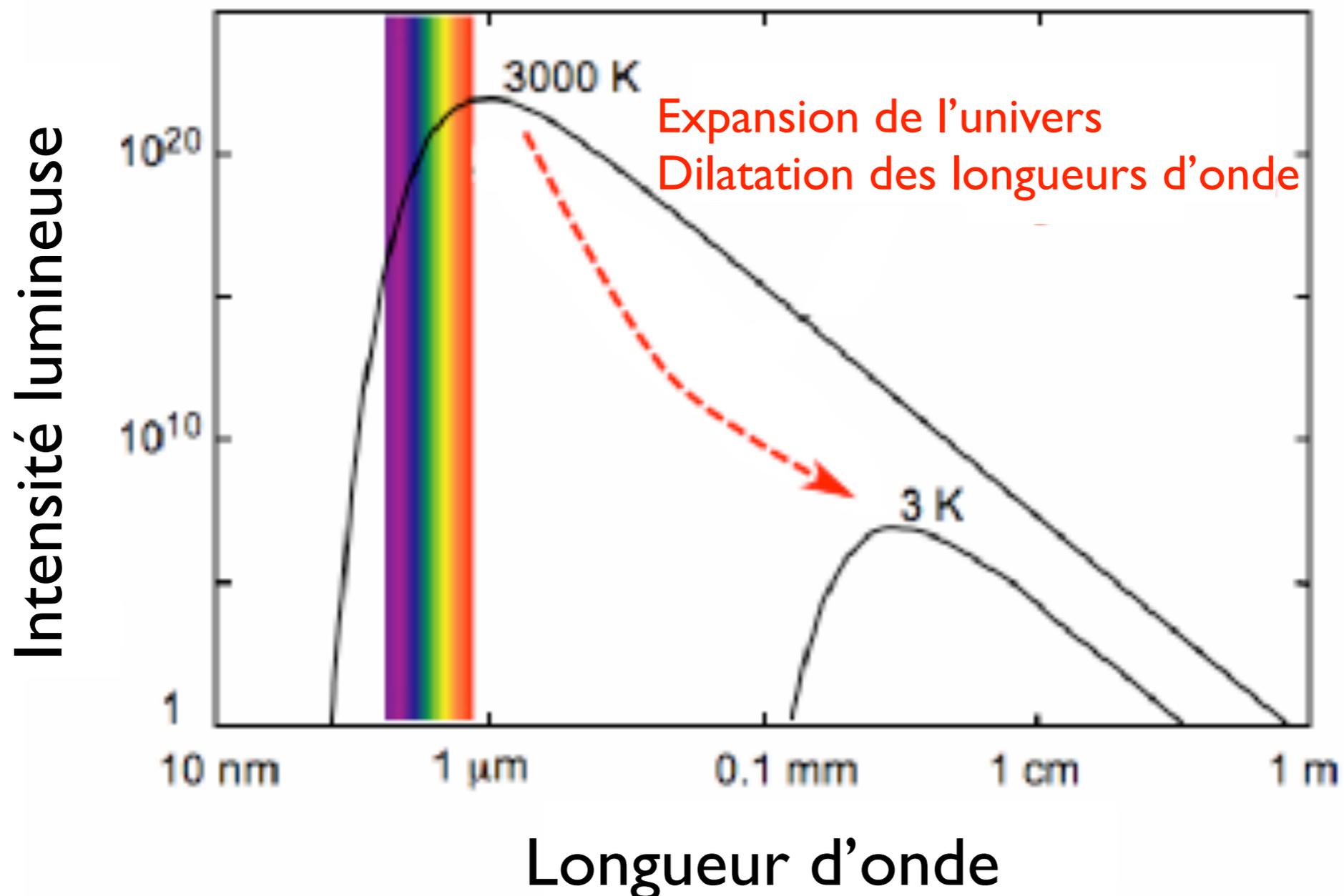
Crédit : <http://sciencetonante.wordpress.com/>



- 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 ».**

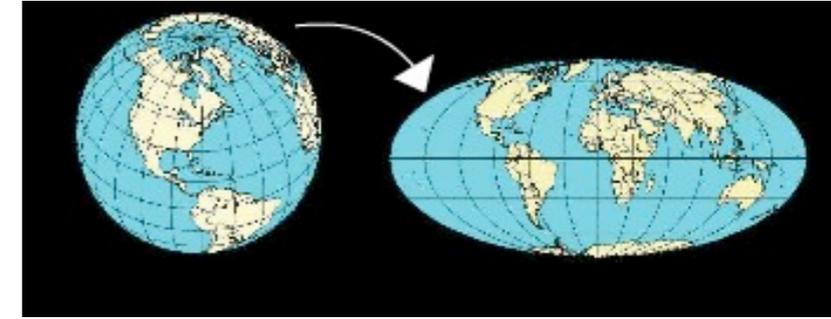
Fond diffus cosmologique

- 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



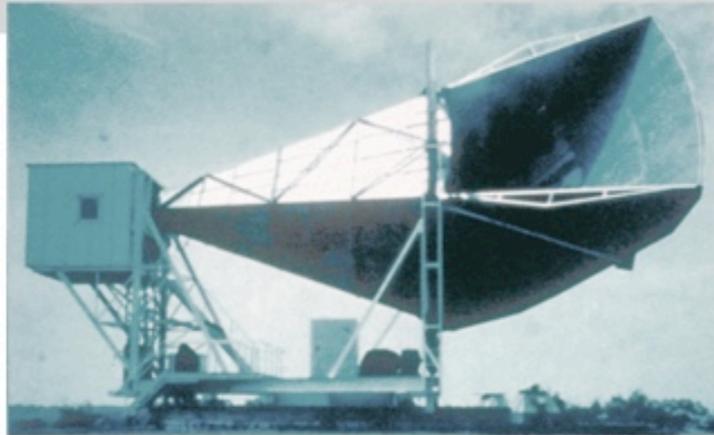
Observations du CMB !

Clef de voute de la cosmologie contemporaine



1965

Penzias and Wilson



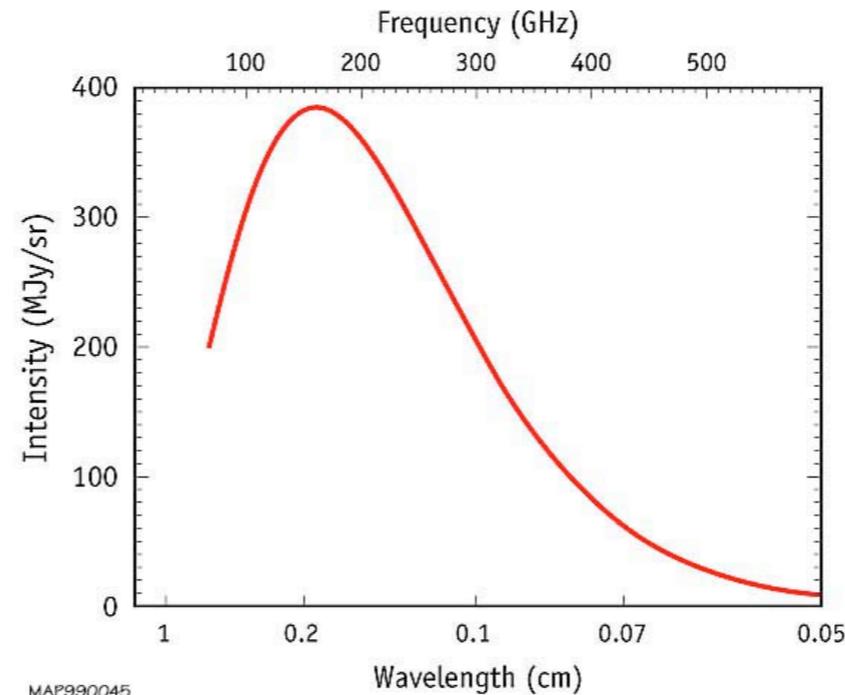
2,73 K
-270,42 °C



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)

Mais ... des problèmes conceptuels

- ★ Singularité initiale
- ★ **Problème de l'horizon** : pourquoi l'univers est-il homogène sur des échelles qui n'ont pas été en contact causal ?
- ★ **Problème de la platitude** : pourquoi la courbure de l'espace est-elle si faible aujourd'hui ?
- ★ **Problème de l'origine des grandes structures** : l'univers n'est pas homogène !

Le modèle du Big-Bang chaud est incomplet !

Singularité initiale

- Equation d'évolution du facteur d'échelle : (preuve simple après le cours sur demande)

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6M_{\text{pl}}^2} \left(\rho + 3\frac{p}{c^2} \right)$$

- Pour la radiation ou la matière ordinaire :

$$\rho > 0, \quad p \geq 0$$

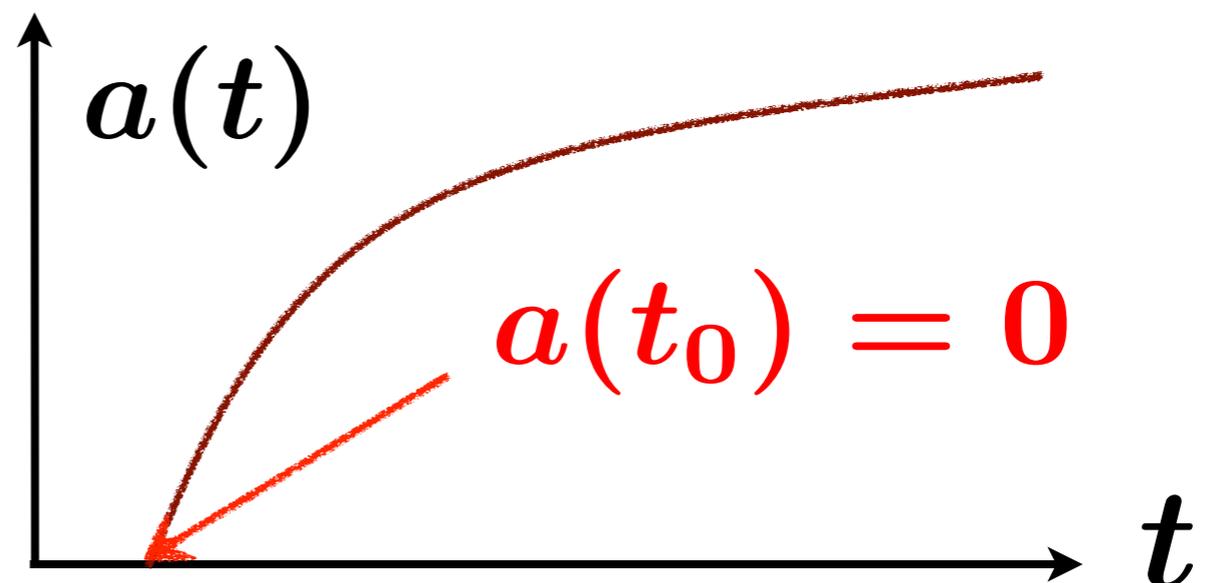


$$\ddot{a} < 0 \quad (\text{décélération})$$

$$+ \quad (\dot{a} > 0) \quad (\text{expansion})$$



Singularité initiale



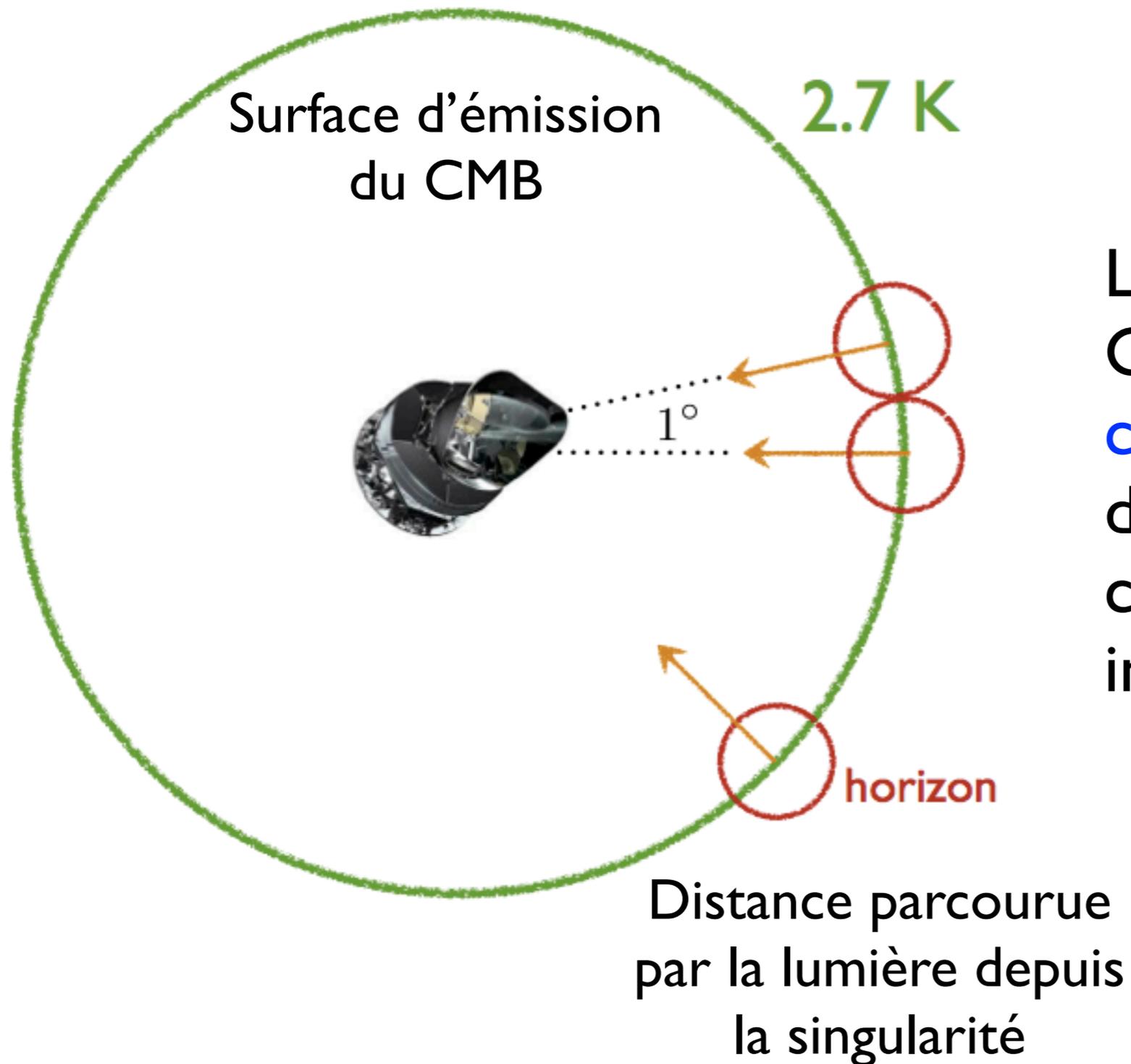
Problème de l'horizon

- Temps fini depuis la singularité initiale + vitesse finie de la lumière



- Des régions du ciel séparées par plus de 1° n'ont jamais été en contact causal.
- Et pourtant, la température du CMB est uniforme (à 10^{-5} près) sur toute la surface du ciel !

Problème de l'horizon bis

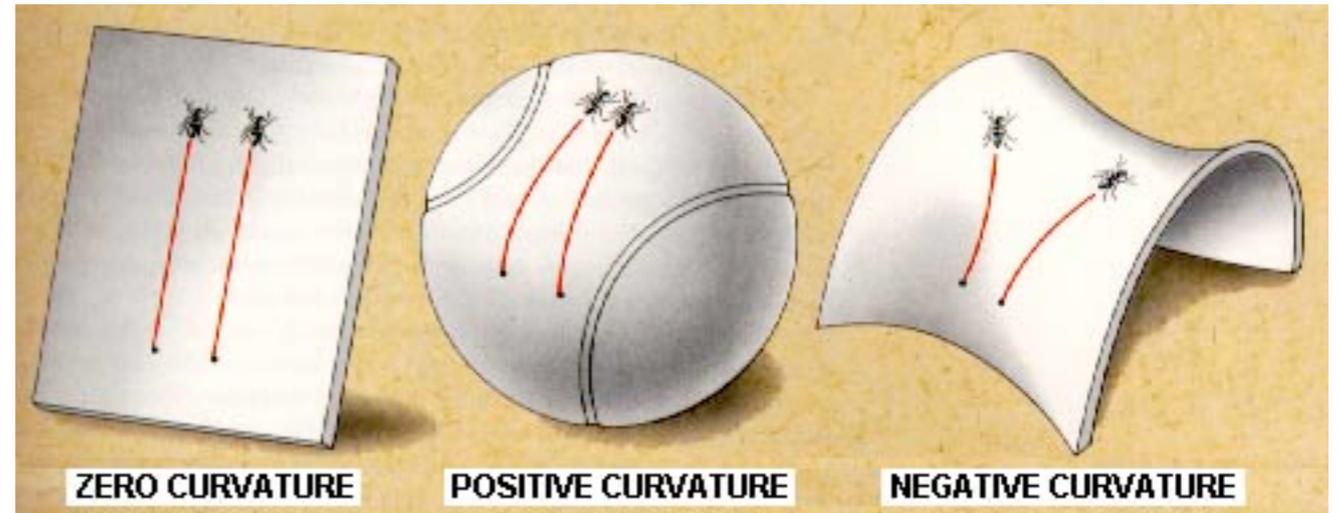


L'extrême uniformité du CMB doit être **postulée comme condition initiale** dans le modèle du Big-Bang chaud. Pas satisfaisant intellectuellement.

Problème de la courbure

- La contribution relative de la courbure à la densité d'énergie de l'univers:

$$\Omega_K \simeq \frac{K}{a^2 H^2}$$



- Aujourd'hui : $|\Omega_K| \lesssim 0,01$
- Or: $\Omega_K \propto a$ (mat), a^2 (rad)

➔ $\Omega_K(t_P) \lesssim 10^{-60}$!

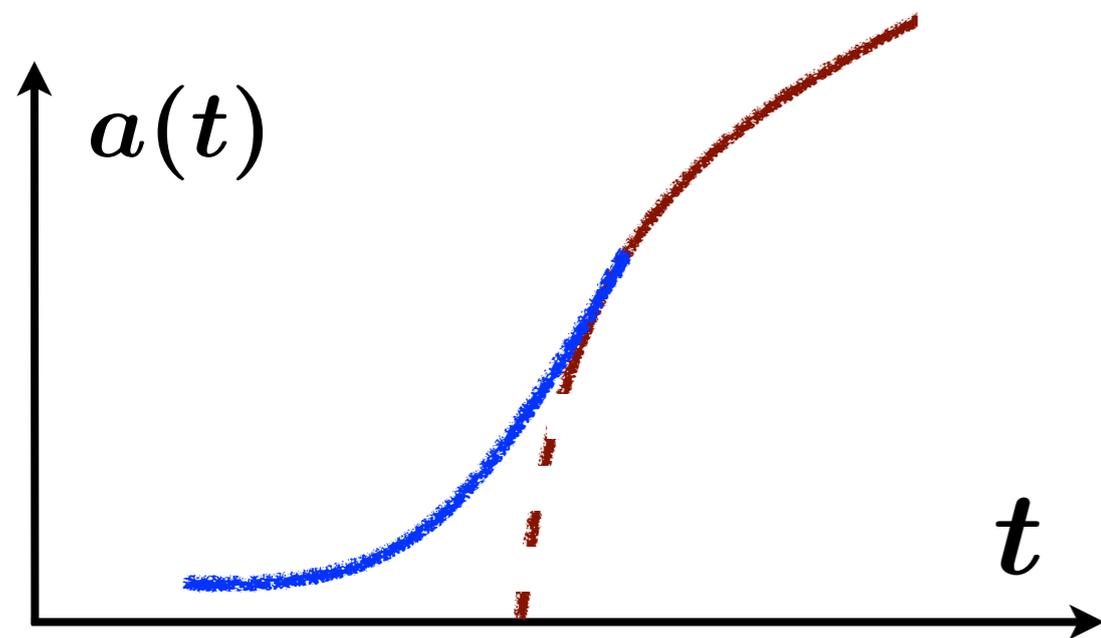
Le modèle du Big-Bang chaud nécessite un **ajustement très fin des conditions initiales.**

Une solution ?

- Avoir plus de temps avant l'émission du CMB que dans le modèle du Big-Bang ?

- Nécessite $\ddot{a} > 0$

**Phase d'inflation =
expansion accélérée**



- Si l'expansion est suffisamment importante, les problèmes de l'horizon et de la platitude sont résolus à partir de conditions initiales génériques

- Nécessite $\rho + 3p < 0$

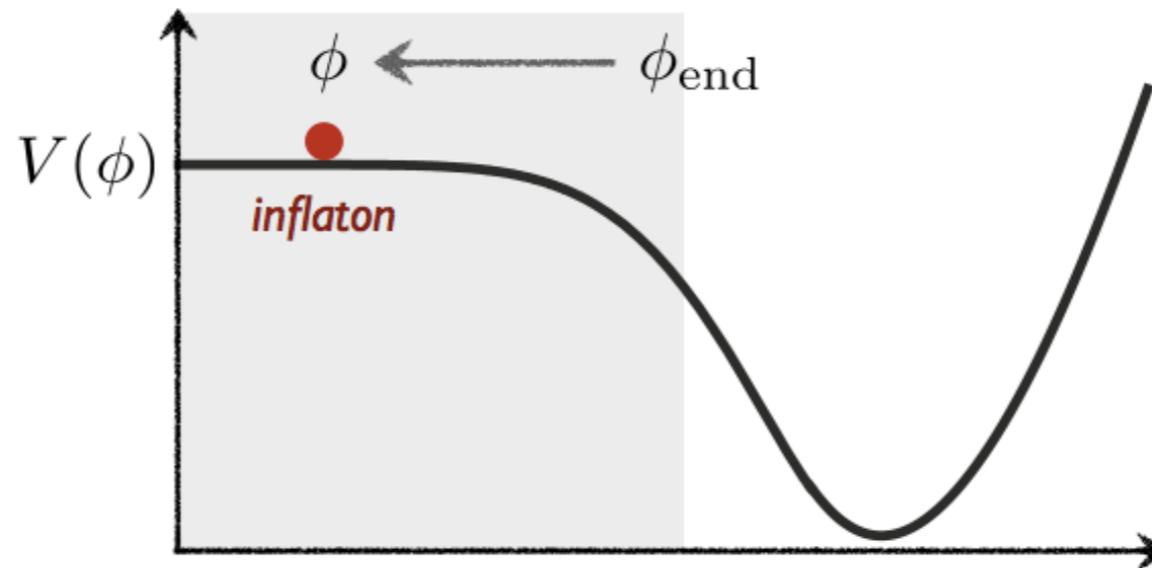
et donc de la matière exotique !

L'inflaton

- Un candidat : **champ scalaire** (cf. le boson de Higgs)

$$\rho = K + V$$

$$p = K - V$$



- Dans le régime de roulement lent ($K \ll V$) $\frac{p}{\rho} \simeq -1 + 2\frac{K}{V}$

l'inflation est quasi-exponentielle $H \simeq \text{constante}$

 $a(t) \propto e^{Ht}$

- Puis le champ oscille au fond de son potentiel : fin de l'inflation

Quelques nombres ...

- Pour résoudre le problème de l'horizon :

$$< 10^{-60}$$

$$\mathcal{O}(1)$$

$$\frac{\Omega_K(t_f)}{\Omega_K(t_i)} = \left(\frac{a(t_i)}{a(t_f)} \right)^2$$



$$\frac{a_{\text{final}}}{a_{\text{initial}}} \gtrsim e^{60}$$

- Dans un laps de temps :

$$\Delta t \sim 10^{-33} \text{ s}$$

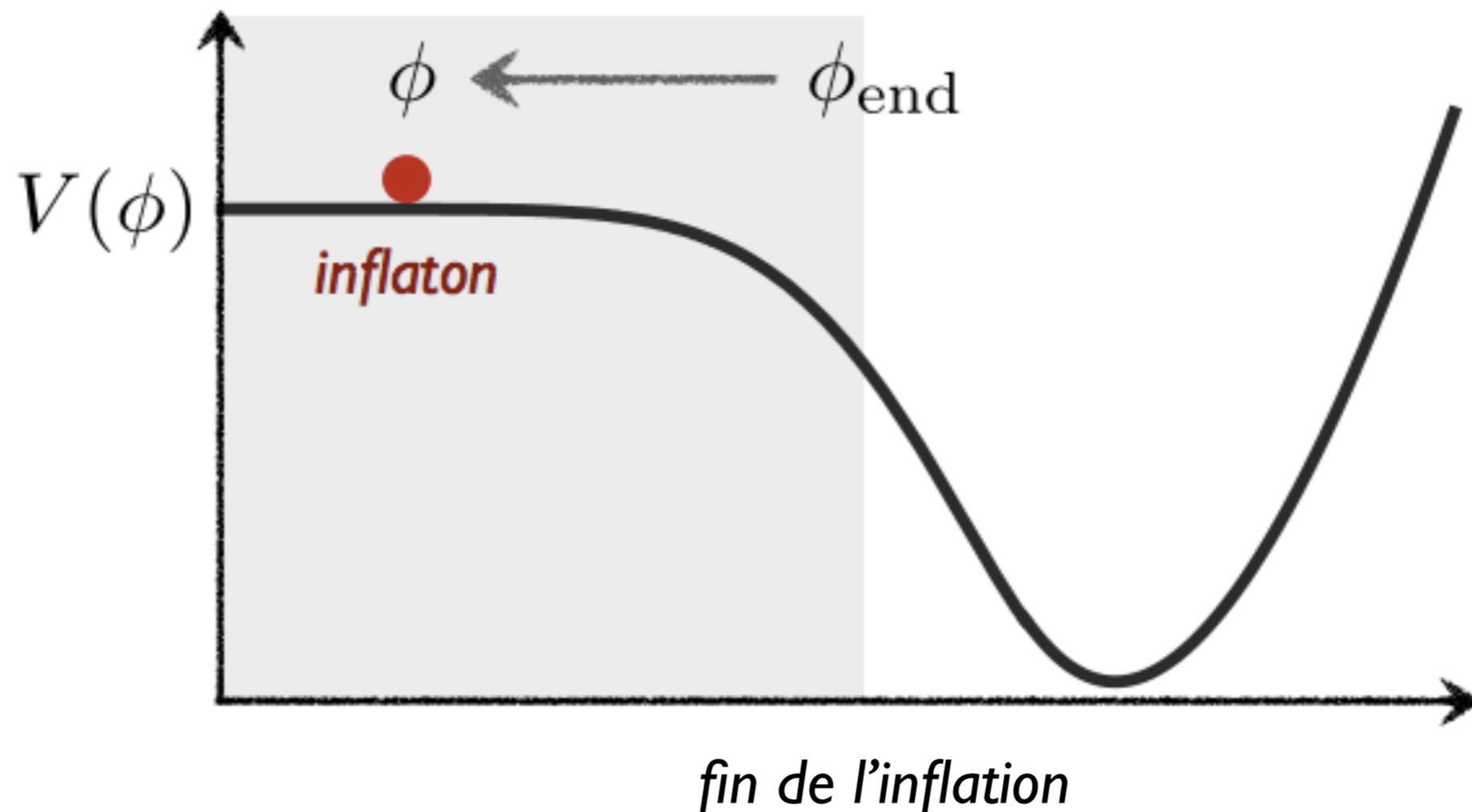
***Jusqu'ici, « postdictions »
plutôt que prédictions.***

***La surprise de l'inflation :
un mécanisme de genèse des
grandes structures.***

ROUGE

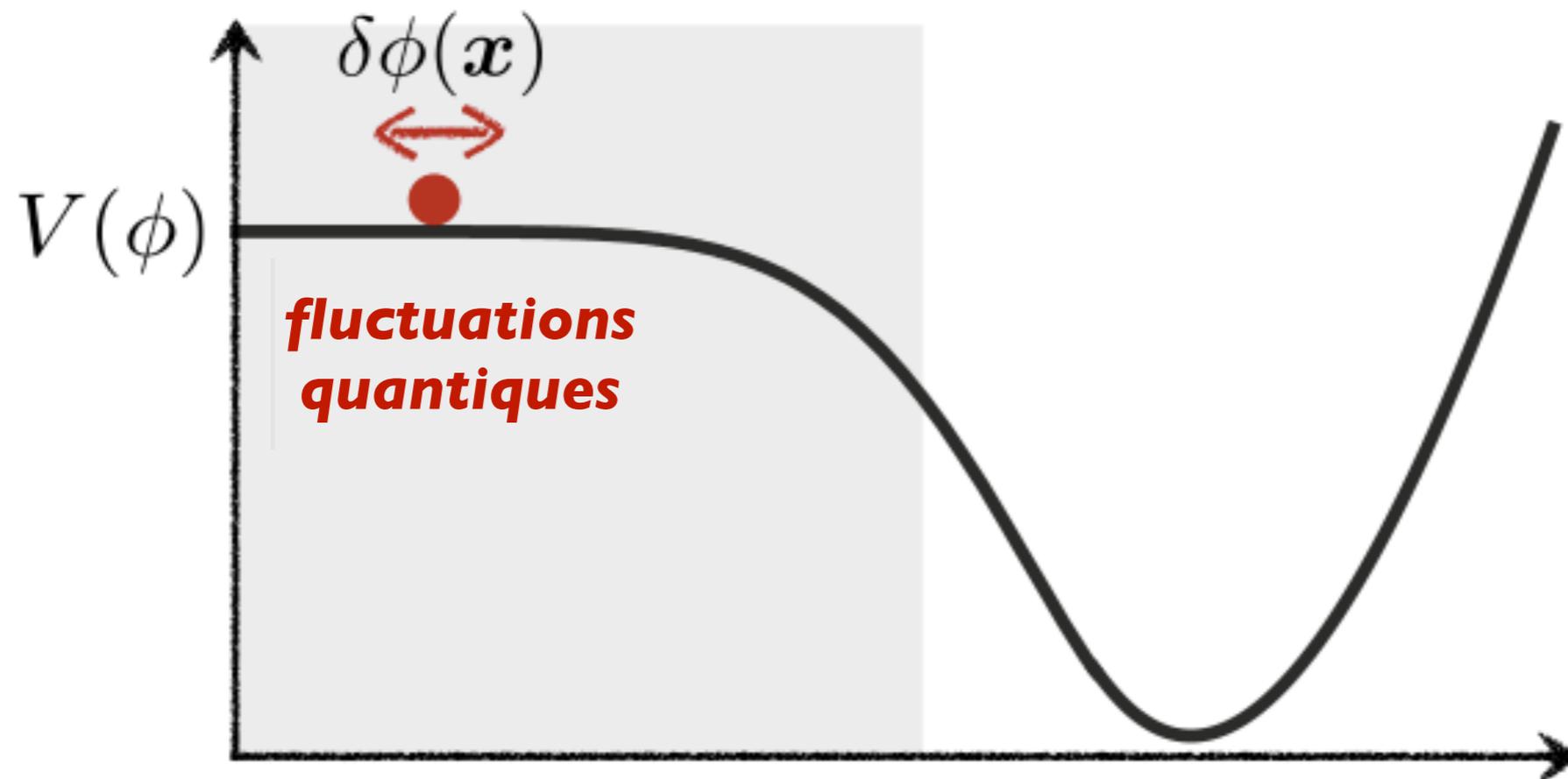
Inflation et mécanique quantique

On peut penser à l'inflaton comme à une **horloge** qui détermine la quantité d'inflation qui doit encore se produire.



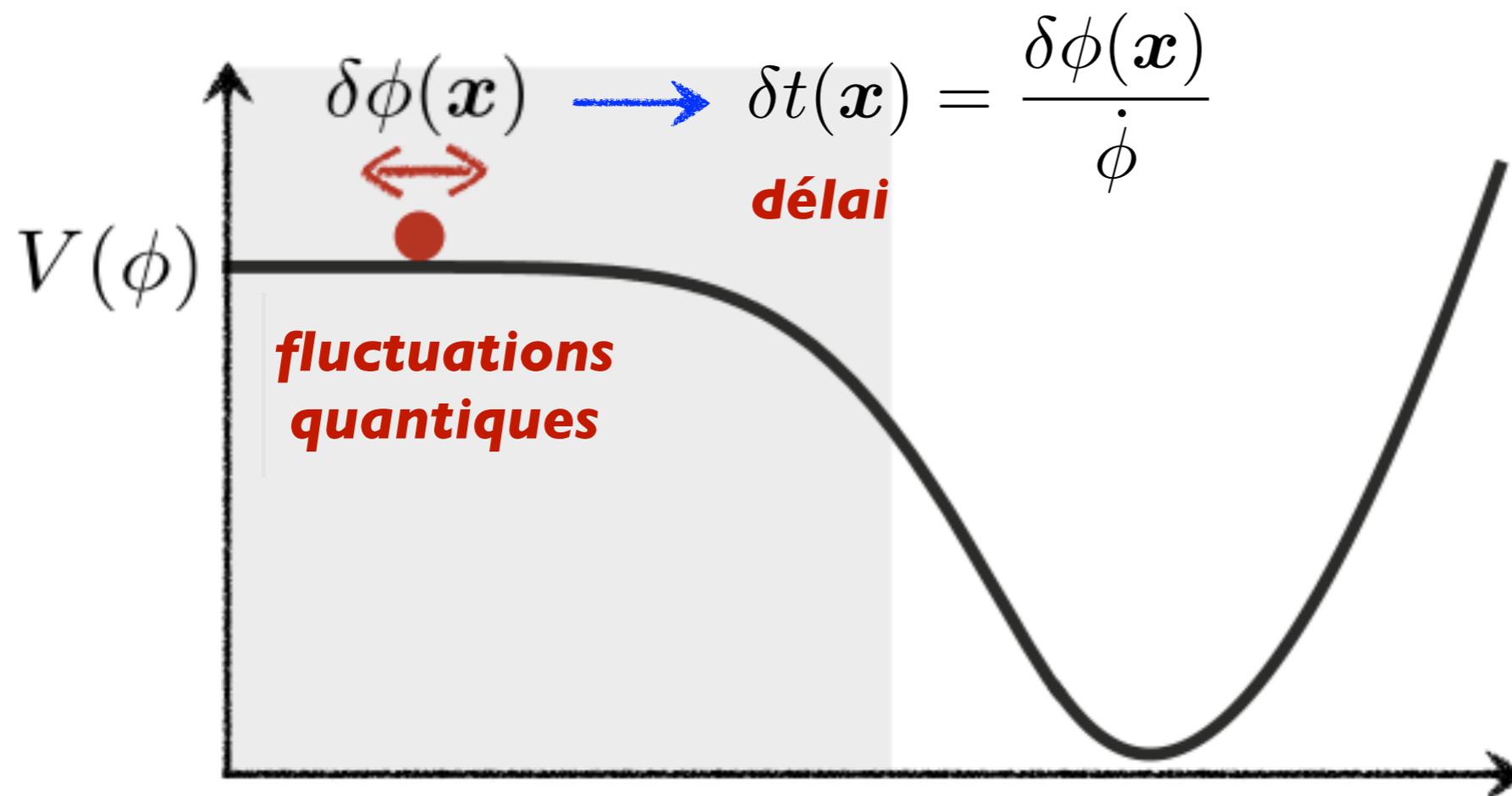
Inflation et mécanique quantique

D'après le ***principe d'incertitude***, un minutage arbitrairement précis n'est pas possible en mécanique quantique :



Inflation et mécanique quantique

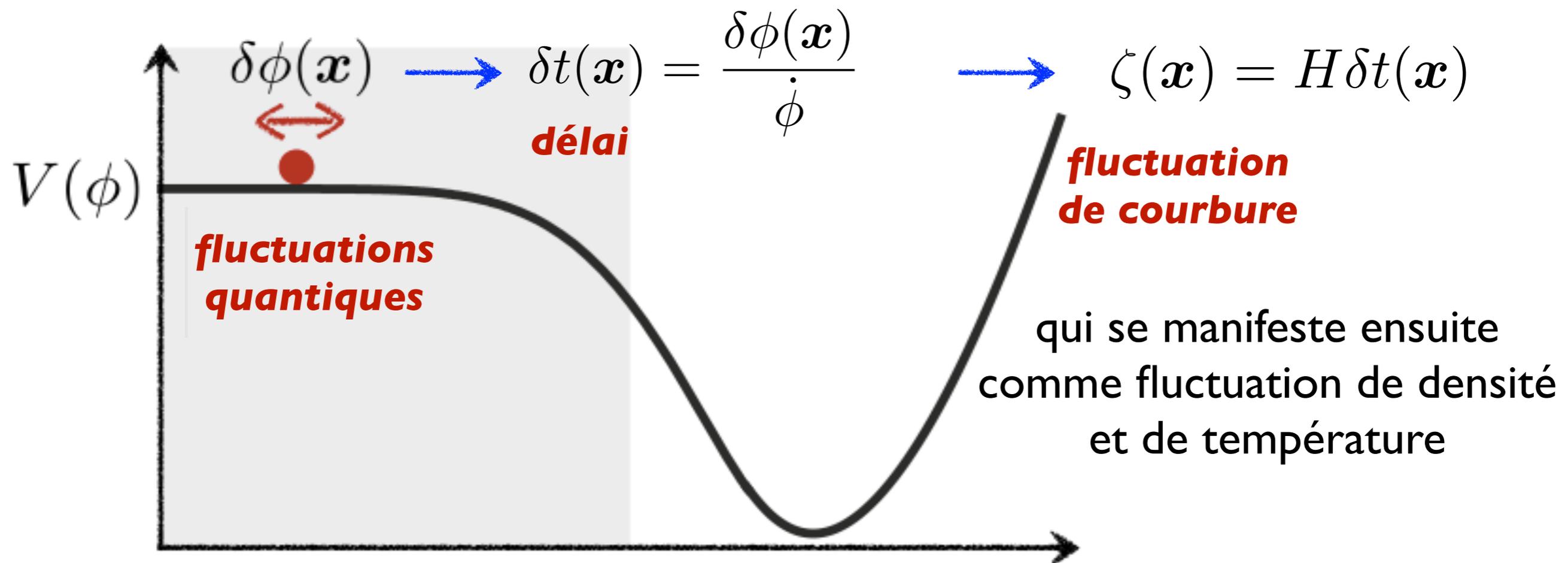
Cela entraîne des **fluctuations dans la fin de l'inflation** ..



Inflation et mécanique quantique

Cela entraîne des **fluctuations dans la fin de l'inflation** ..

... et un **étirement isotrope de l'espace**



Oscillateur harmonique quantique



$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0$$

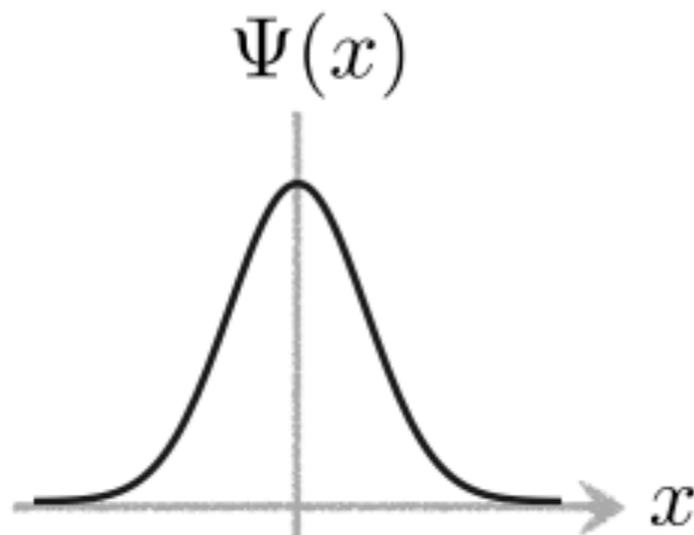
$$\Delta x \Delta p = \frac{\hbar}{2}$$

principe d'incertitude

fluctuations fondamentales

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\hbar}{2\omega}$$

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{2}$$



Wikipedia

Horloges quantiques pendant l'inflation

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0$$



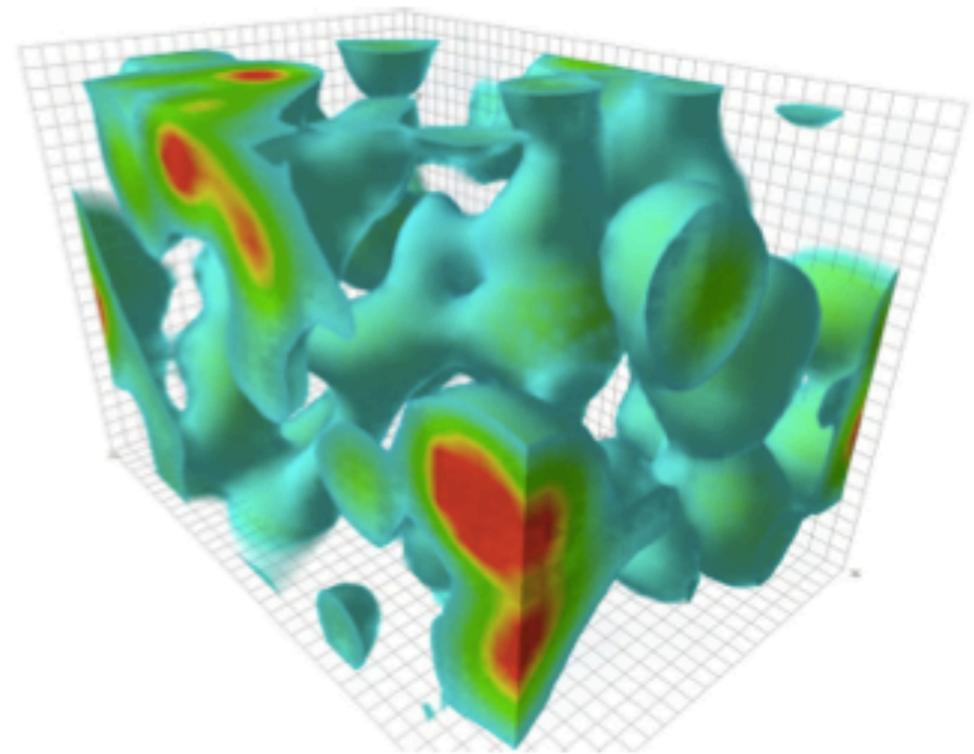
$$\langle x^2 \rangle = \frac{\hbar}{2\omega}$$

**principe
d'incertitude**

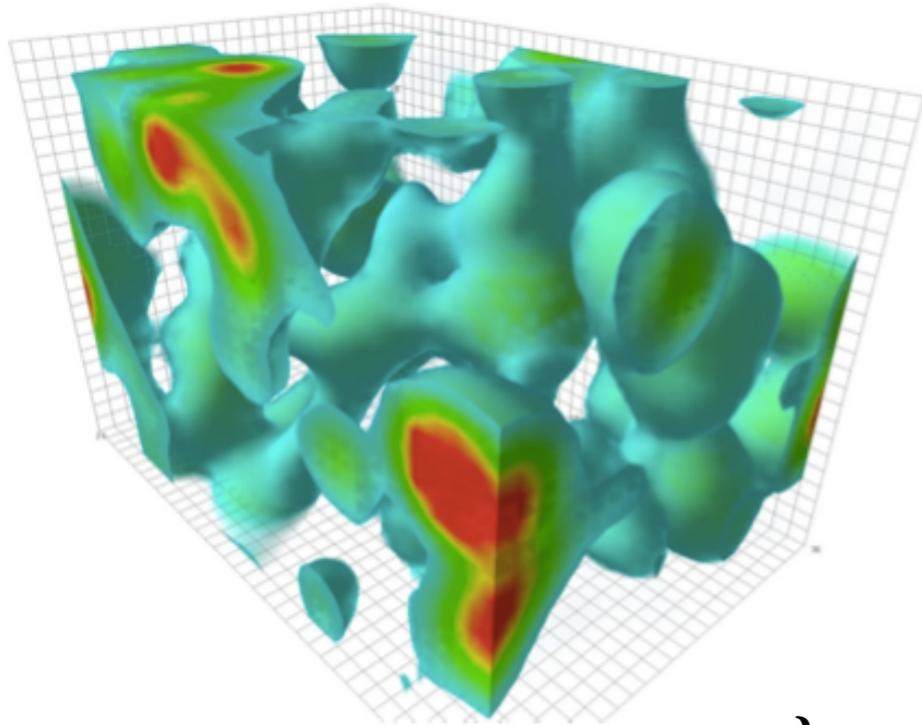
$$\delta\ddot{\phi}_k + 3H\delta\dot{\phi}_k + \frac{k^2}{a^2(t)}\delta\phi_k \approx 0$$



$$\langle (\delta\phi_k)^2 \rangle = \frac{1}{a^3} \frac{\hbar}{2(k/a)}$$



Horloges quantiques pendant l'inflation



$$\langle (\delta\phi_k)^2 \rangle = \frac{1}{a^3} \frac{1}{2(k/a)}$$

Ceci est valable tant que l'expansion de l'univers est négligeable :

$$\lambda_{\text{physique}} = \frac{a}{k} < H^{-1} \quad \leftarrow \text{échelle de courbure caractéristique de l'univers}$$

Les fluctuations deviennent alors ($k = a_* H_*$) constantes :

$$\langle (\delta\phi_k)_*^2 \rangle = \frac{1}{2} \frac{H_*^2}{k^3}$$

Fluctuations primordiales générées par l'inflation

- **Fluctuations de courbure (densité)**. Nous avons démontré un résultat célèbre :

$$\Delta_s^2 \equiv k^3 \langle |\zeta_k|^2 \rangle = \frac{1}{2} \frac{H_\star^4}{\dot{\phi}_\star^2} = \frac{H_\star^4}{M_{\text{pl}}^2 \dot{H}_\star}$$

- Les fluctuations quantiques génèrent également un étirement anisotrope de l'espace (**ondes gravitationnelles**)

$$\Delta_t^2 \equiv k^3 \langle |h_k|^2 \rangle = \frac{H_\star^2}{M_{\text{pl}}^2}$$

BLEU

L'inflation prédit

Un univers, aux grandes échelles, ***homogène, isotrope et plat***

+

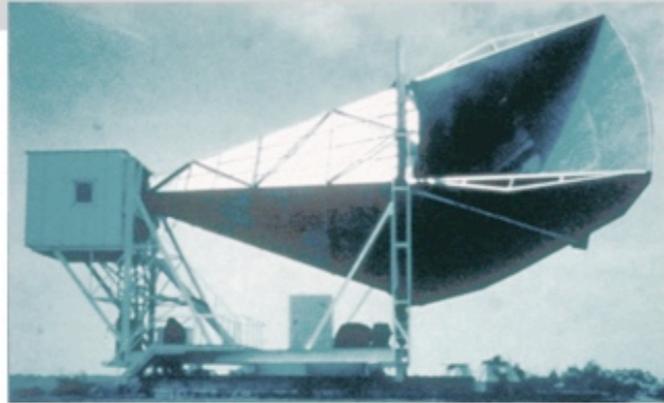
Des ***fluctuations de densité***, germes des grandes structures,
d'origine quantique, avec des propriétés bien précises

+

Des ***ondes gravitationnelles primordiales***, d'origine quantique,
avec des propriétés bien précises

Observations des fluctuations de densité primordiales dans le CMB !

1965



Penzias and Wilson

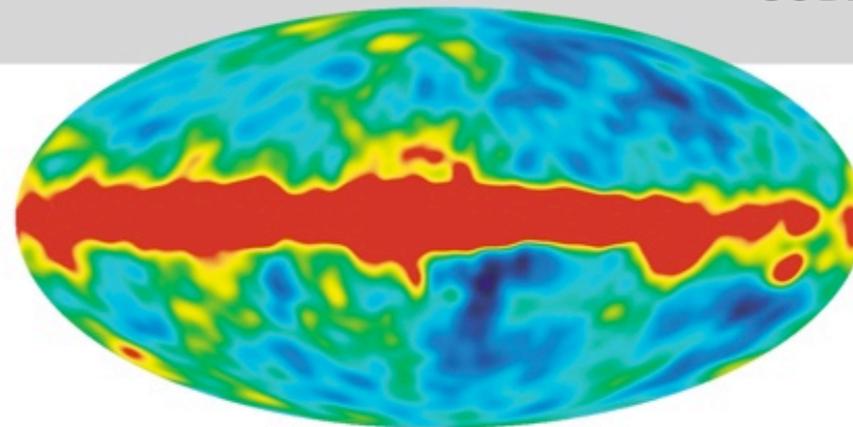
2,73 K
-270,42 °C



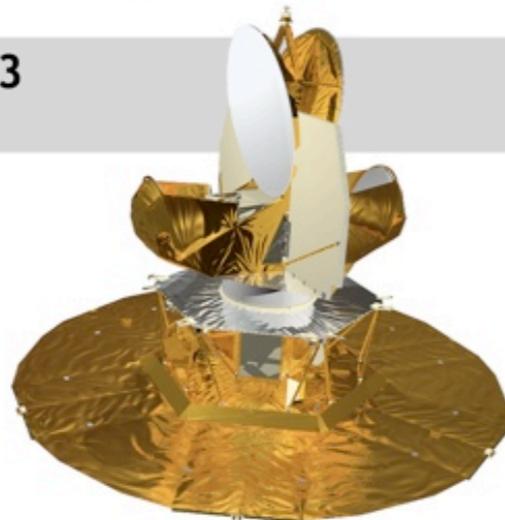
1992



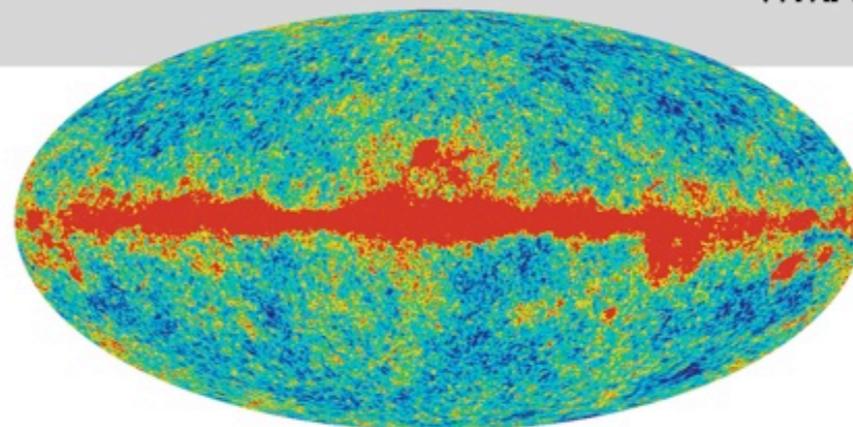
COBE



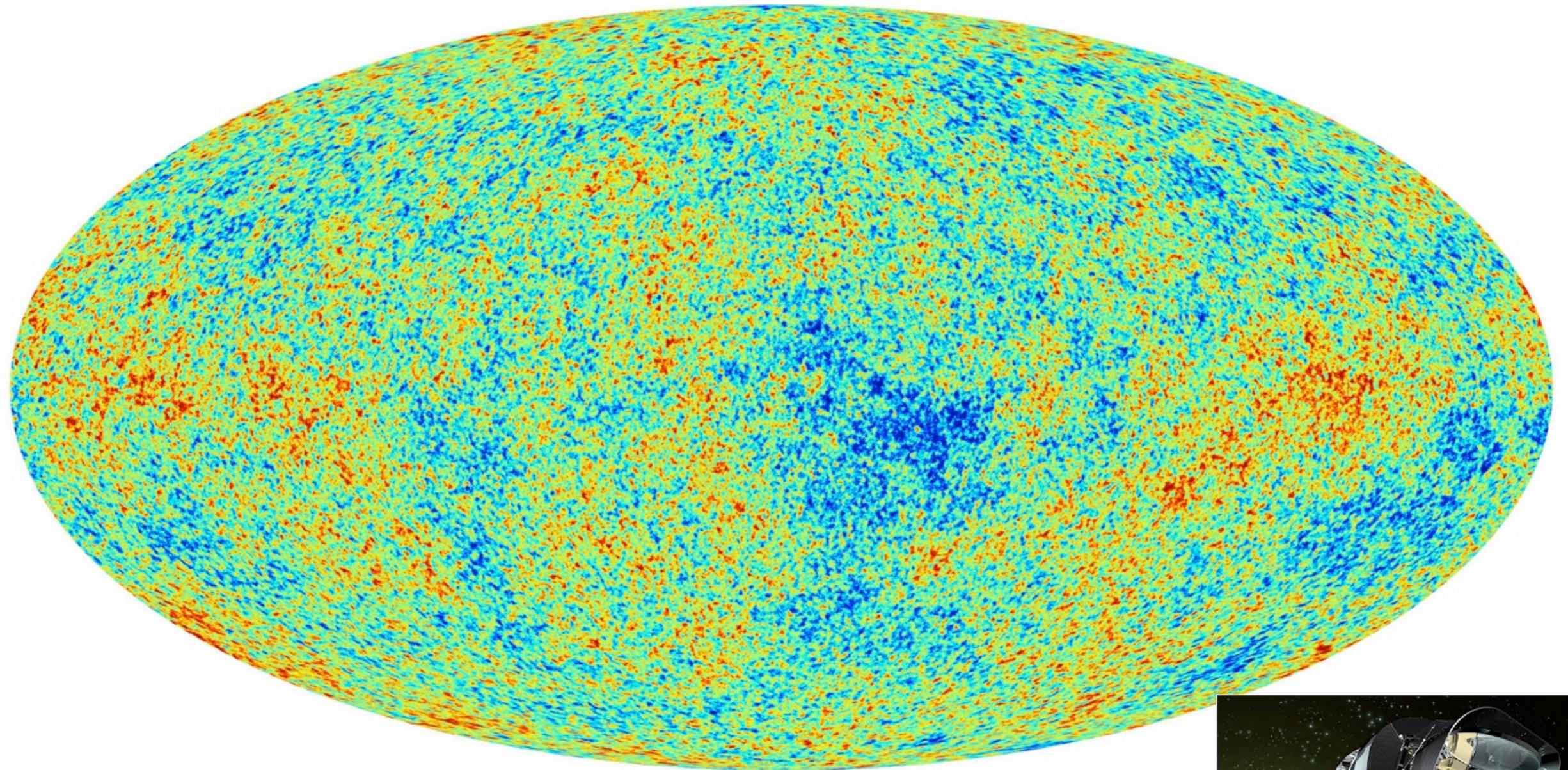
2003



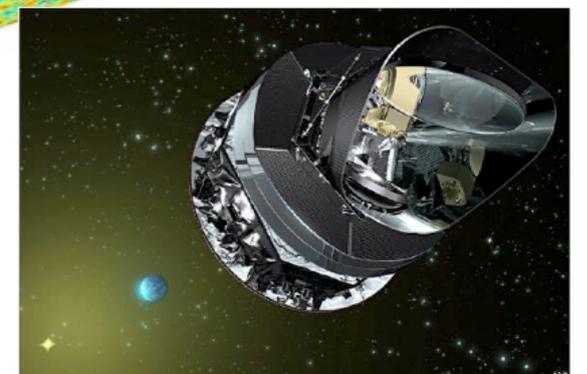
WMAP



Observations des fluctuations de densité primordiales dans le CMB



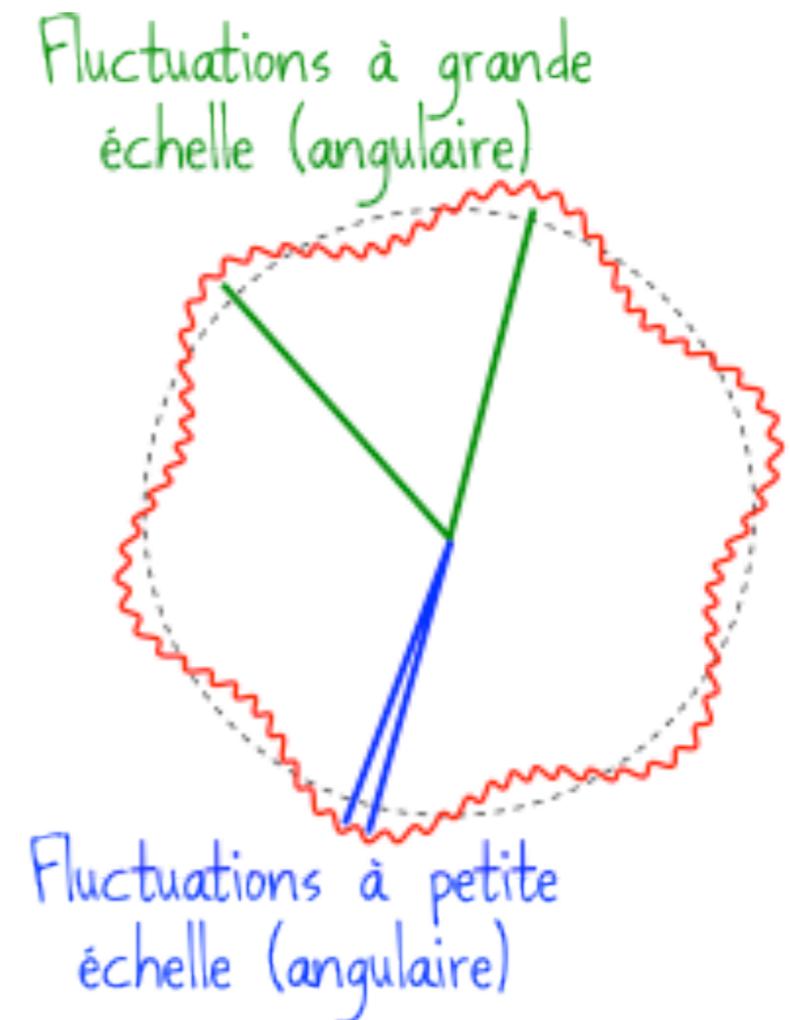
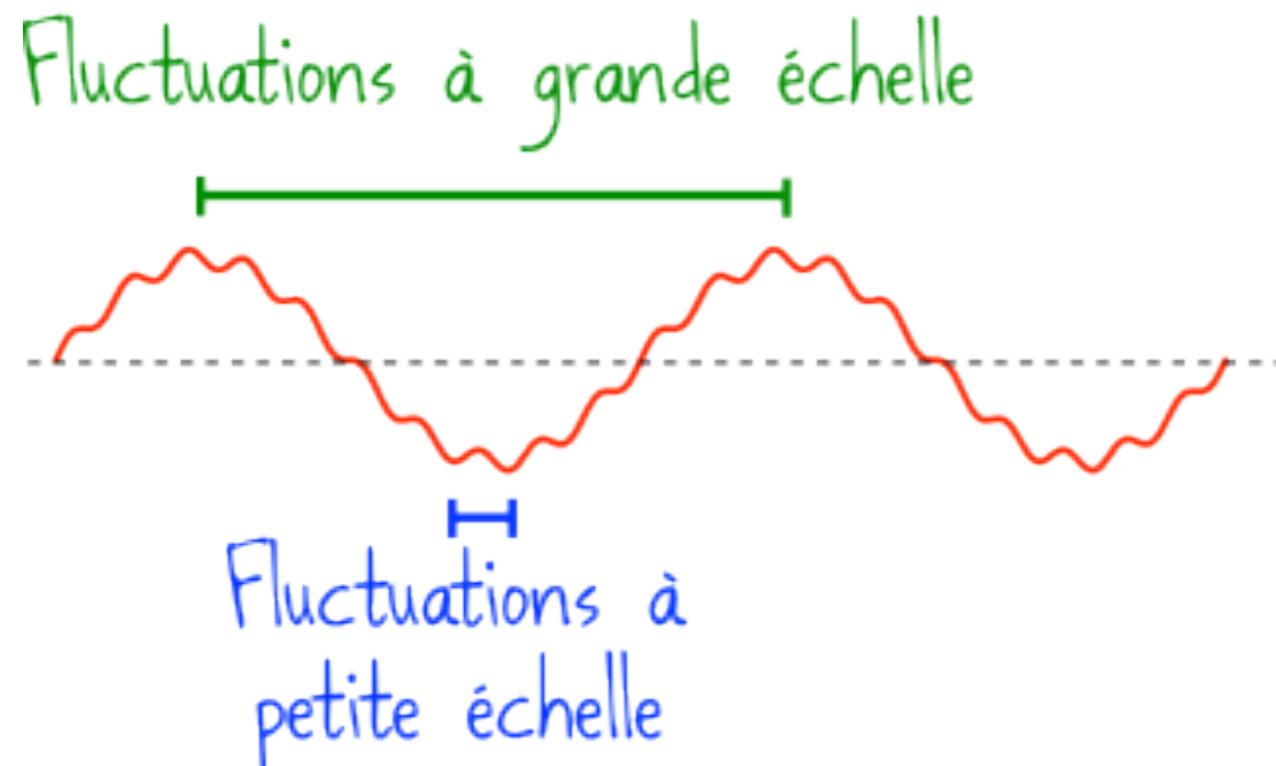
PLANCK, 2013



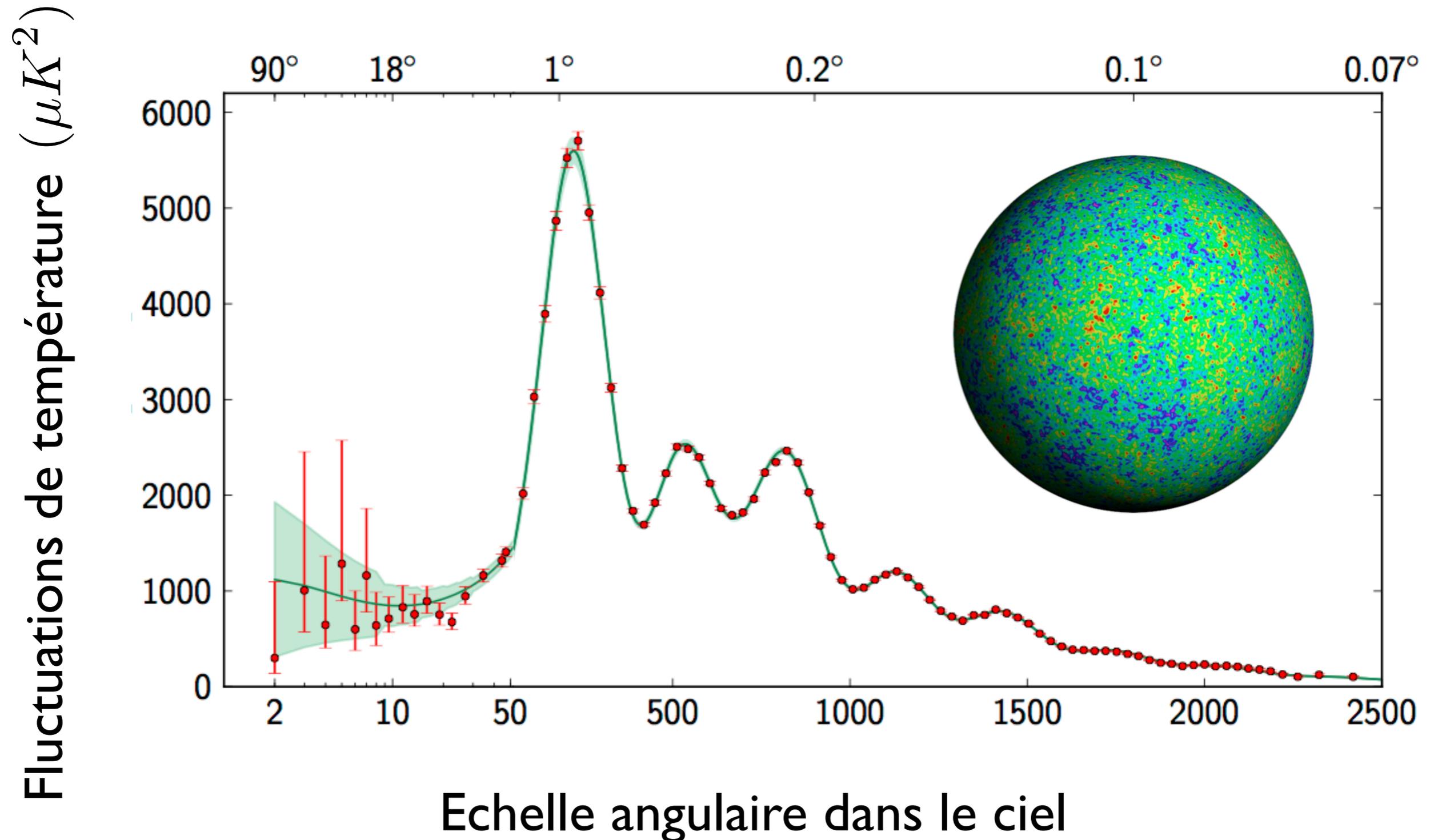
Analyse des fluctuations en fonction de l'échelle angulaire

Décomposition
de Fourier

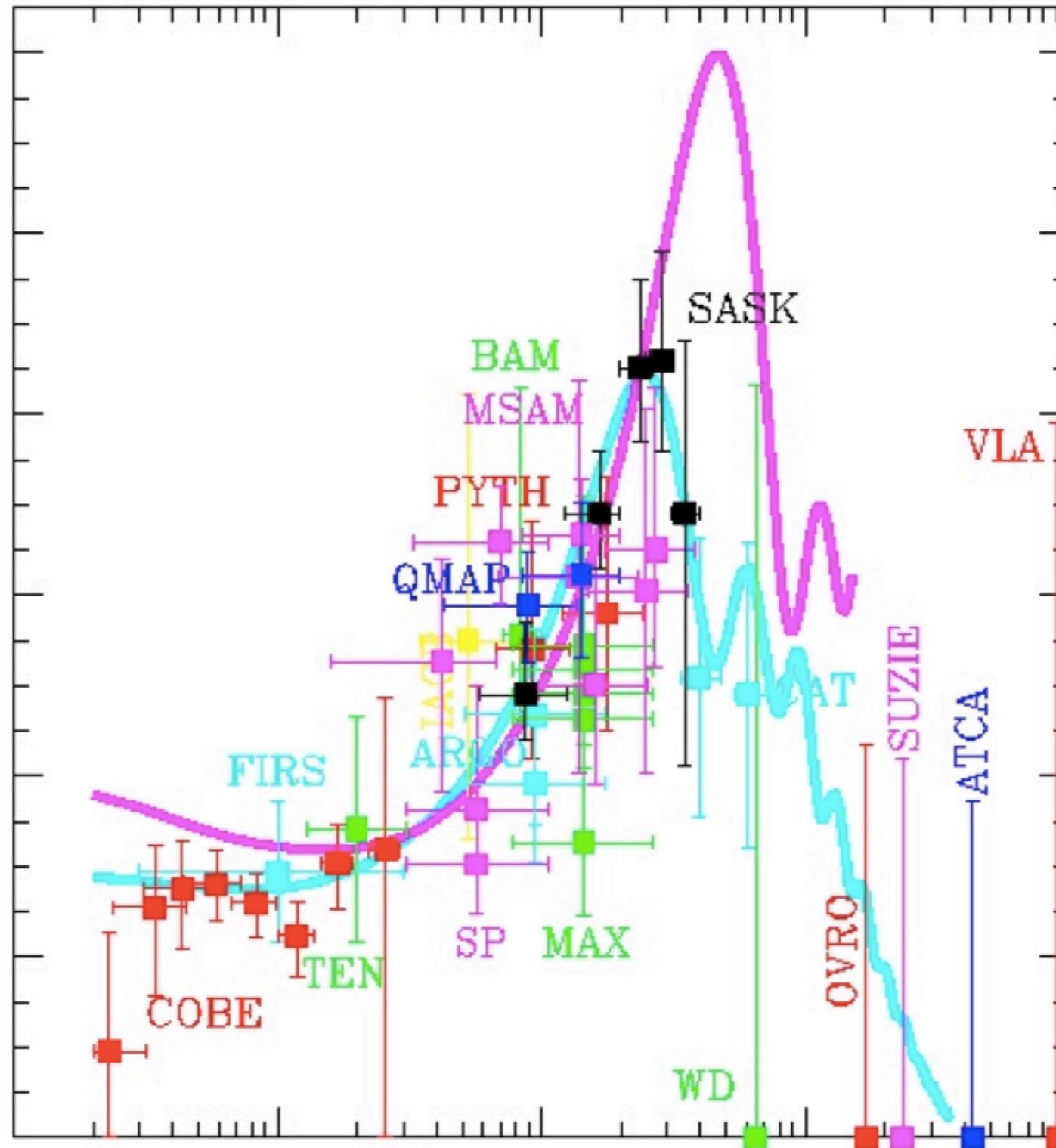
Analogie sur la sphère
(harmoniques sphériques)



Plein accord entre théorie et mesures !



(Observations il y a 15 ans ...)



***Et les ondes
gravitationnelles ?***

NATURE | BREAKING NEWS

Telescope captures view of gravitational waves

Images of the infant Universe reveal evidence for rapid inflation after the Big Bang.

Ron Cowen

SCIENTIFIC AMERICAN™

Sign In | Register  0

Search ScientificAmerican.com

Subscribe

News & Features

Topics

Blogs

Videos & Podcasts

Education

Space » News

54 :: Email :: Print

This article is from the In-Depth Report Cosmic Inflation and Big Bang Ripples

Gravitational Waves from Big Bang Detected

A curved signature in the cosmic microwave background light provides proof of inflation and spacetime ripples



fr **LE FIGARO**
- sans la liberté de l'Internet, il n'est point d'usage Ratier - Brannach

TÉLÉVISION « APOCALYPSE » : LA GRANDE GUERRE EN COULEURS PAGE 22

INTERNET LES GÉANTS CHINOIS L'ASSAUT DE WALL STREET PAGE 24

Alibab

Big bang : la preuve qu'Einstein avait raison

PS et Verts s'affrontent sur les mesures antipollution

La circulation alternée à Paris n'a pas été reconstruite mardi, mais, à une semaine du premier tour de municipales, la pollution a provoqué une violente passe d'armes entre Anne Hidalgo et Cécile Ducloux

À moins d'une semaine des municipales, le non monte entre la candidate PS à Paris et les Verts. En plein épisode de pollution, Anne Hidalgo s'en est prise aux écologistes, coupables selon elle d'avoir

EELV et ses plus hautes représentants, pourtant alliés naturels du PS au second tour des municipales, dénoncent en retour l'immobilité de la municipalité sortante. La droite s'amuse de cette polé-

PS ET ECOS DÉCHIRÉS À 11
LE CONTRE-GOUVERNEMENT À 11
CONOMES À 11
A DÉCIS DE LA CIRCULATION

Primordial gravitational wave discovery heralds 'whole new era' in physics

Gravitational waves could help unite general relativity and quantum mechanics to reveal a 'theory of everything'

17 March 2014 Last updated at 14:46 GMT

Share  

Cosmic inflation: 'Spectacular' discovery hailed

By Jonathan Amos
Science correspondent, BBC News

Depuis le pôle sud, des échos du Big Bang

LE MONDE | 17.03.2014 à 17h50 • Mis à jour le 18.03.2014 à 17h04 |

Par David Larousserie

Abonnez-vous à partir de 1 € Réagir Classer Partager    

Recommander Partager 14 405 personnes le recommandent. Inscription pour voir ce que vos amis recommandent.



17 March 2014 Last updated at 14:46 GMT

Share  

Cosmic inflation: 'Spectacular' discovery hailed

By Jonathan Amos
Science correspondent, BBC News

Etat des lieux

- ★ Depuis mars dernier et l'annonce de cette « découverte », des doutes sérieux ont été émis, et les auteurs même de l'étude sont maintenant plus prudents.
- ★ Le signal observé est réel, mais n'est **pas nécessairement d'origine cosmologique**.
- ★ De nombreuses observations futures (Planck) permettront de trancher.

Ce qu'impliquerait une détection :

- De l'eau supplémentaire au moulin de l'inflation
- Ondes gravitationnelles ! d'origine quantique !
- Identification de l'échelle d'énergie de l'inflation :

$$\rho_{\text{inflation}}^{1/4} \sim 2 \times 10^{16} \text{ GeV} \sim 10^{-2} M_{\text{Pl}}$$

- A comparer à la limite actuelle de nos connaissances :

$$\rho_{\text{LHC}}^{1/4} \sim 10^4 \text{ GeV}$$



L'inflation :

- Notre meilleur scénario pour l'univers primordial
- Phénoménologiquement, grand succès
- La physique de l'inflation reste encore mal connue :
 - ★ Qu'est l'inflaton ?
 - ★ Quel est son potentiel ?
 - ★ Comment l'inflation a-t-elle commencé ?
 - ★ Comment l'inflation a-t-elle terminé ?
 - ★ Quel est son lien avec le reste de la physique des particules ?