

**Evolution des conceptions
de l'univers
(aka Phys 137)**

Evolution des conceptions de l'univers

Séance 7 :

Relativité générale et cosmologie

Relativité

Relativité restreinte : 1905

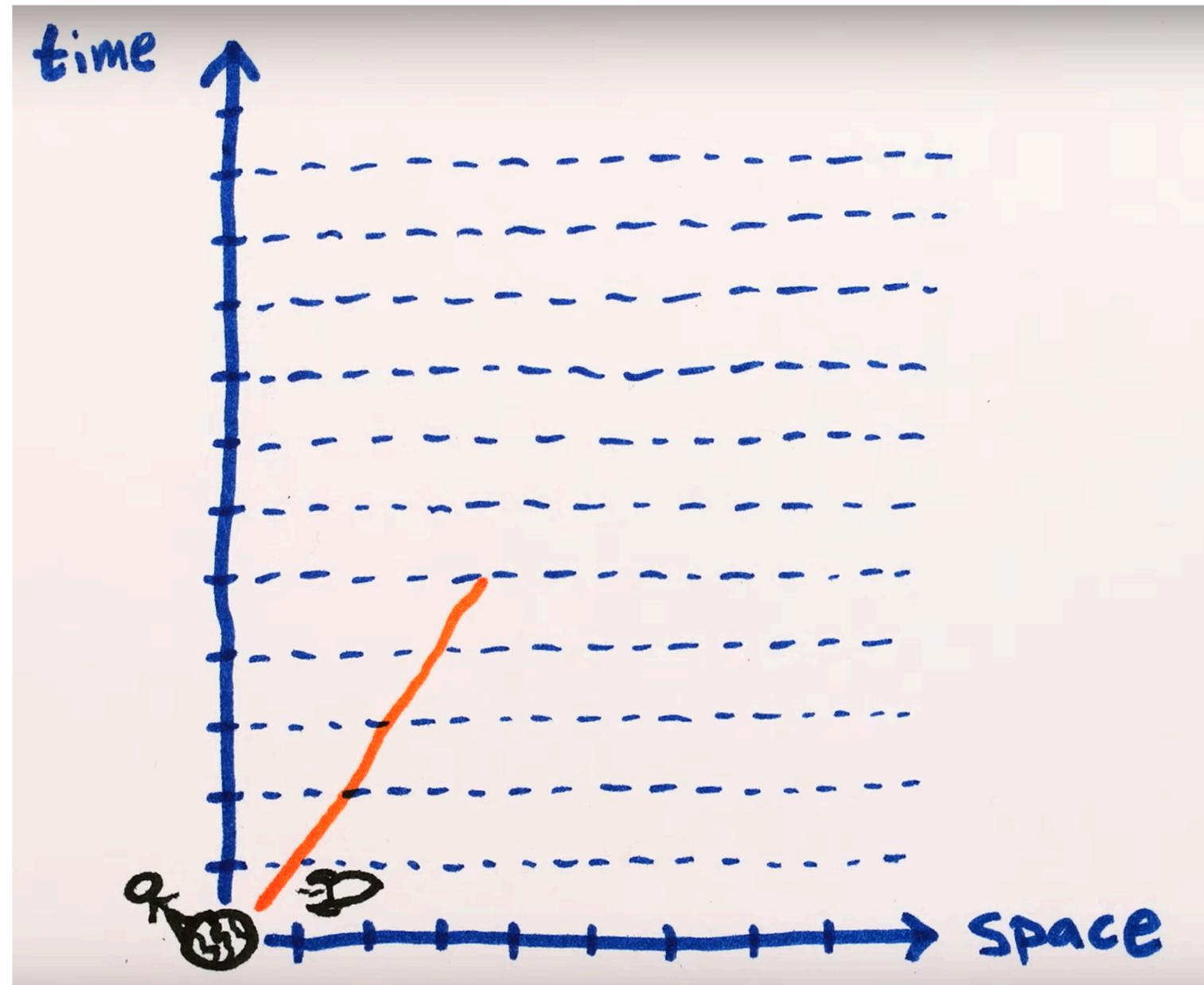
Relativité générale : 1915

Temps absolu de Newton / Espace-temps d'Einstein

- Relativité générale = généralisation de la relativité restreinte ! (aux référentiels non galiléens)**
- Gravité = géométrie (et non une force)**
- La masse courbe l'espace-temps**

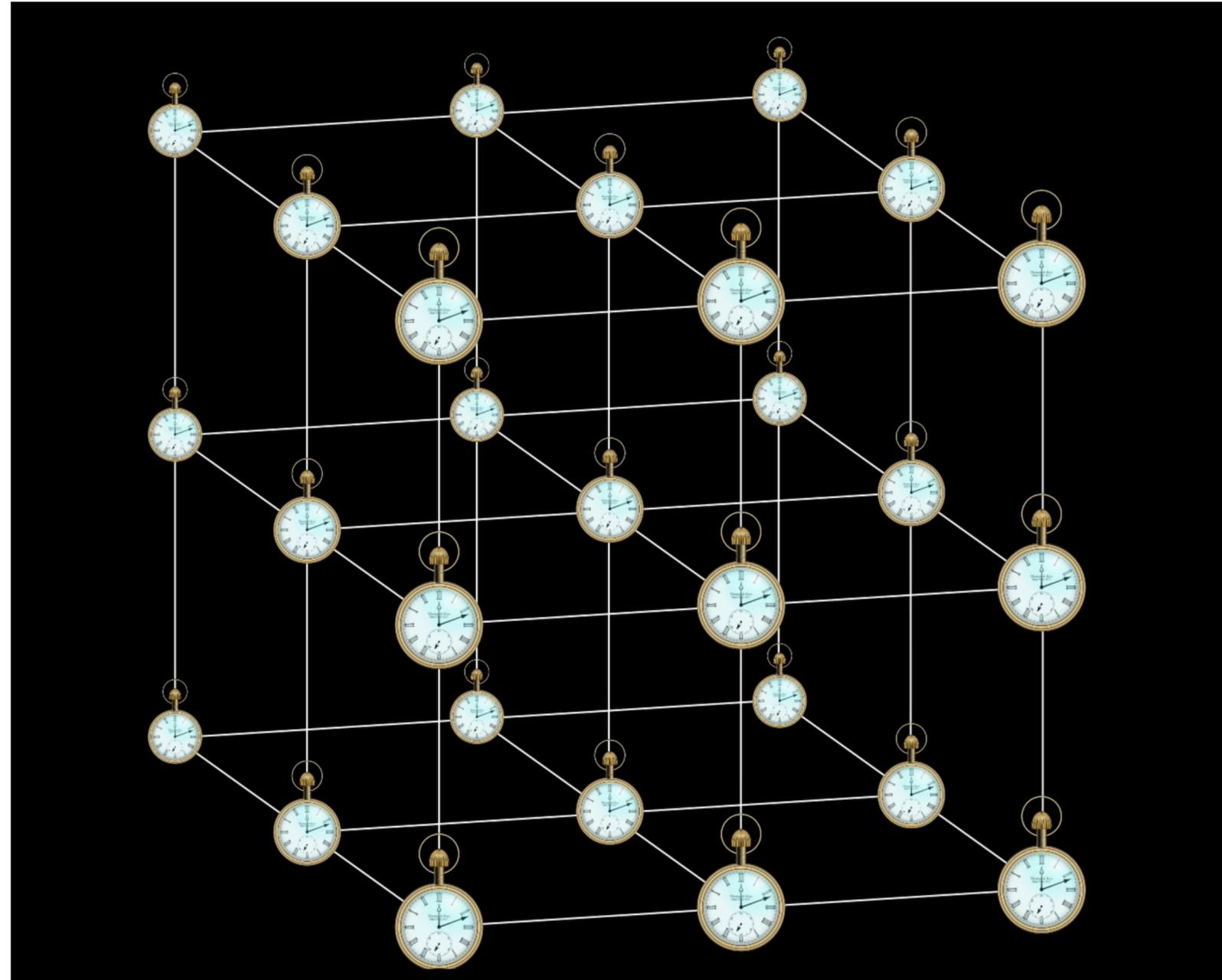
Relativité

Espace-temps à 2 dimensions, 1 d'espace, 1 de temps



Relativité

Espace-temps à 4 dimensions, 3 d'espace, 1 de temps



Relativité

Espace(-temps) décrit par une "métrique"

Espace à 2 dimensions spatiales :

$$s^2 = x^2 + y^2$$

Espace-temps plat à 4 dimensions :

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$$

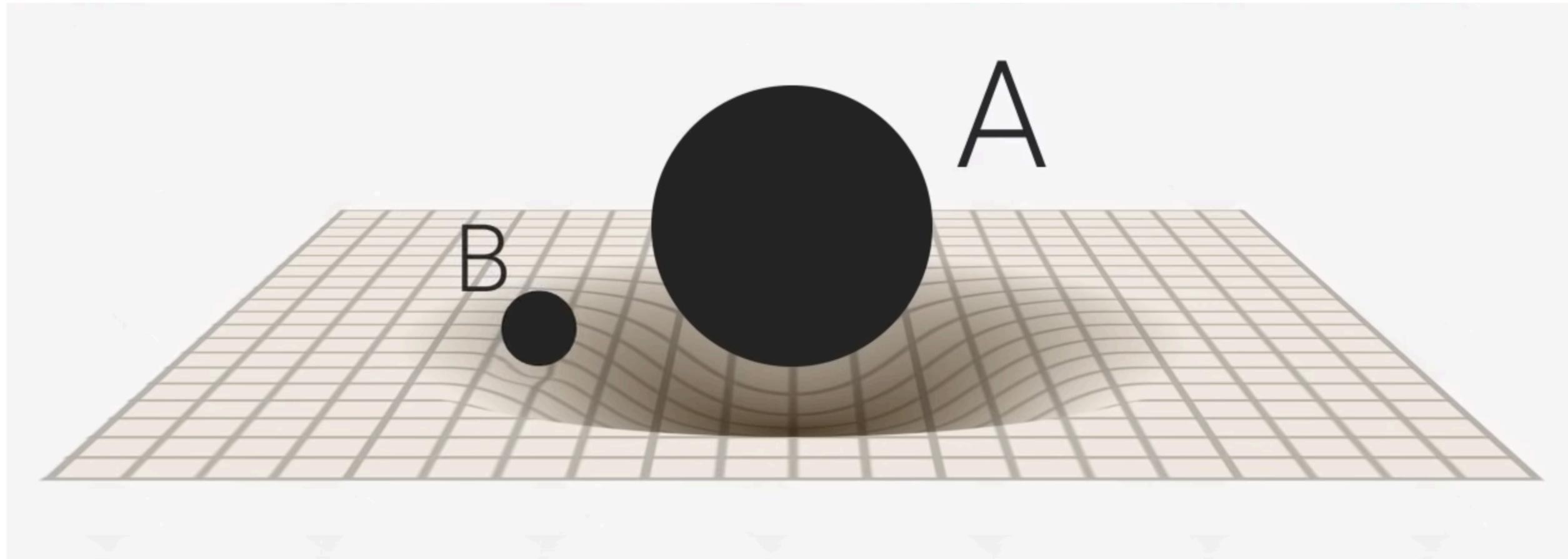
Espace-temps courbé à 4 dimensions :

$$s^2 = g_{11}x^2 + g_{22}y^2 + g_{33}z^2 + g_{00}c^2t^2 + \dots$$

$g_{\alpha\beta}$ = gravité

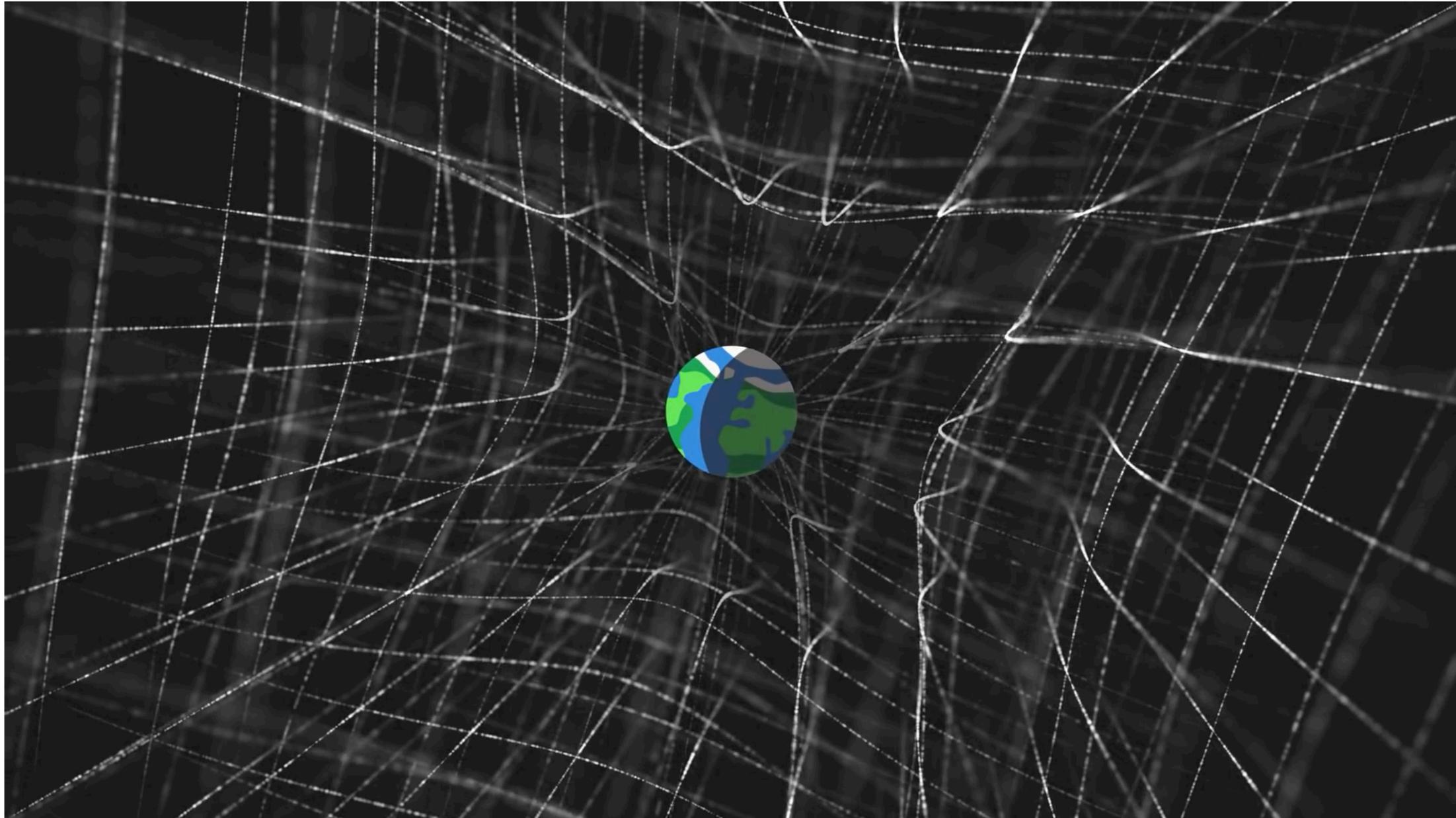
Relativité

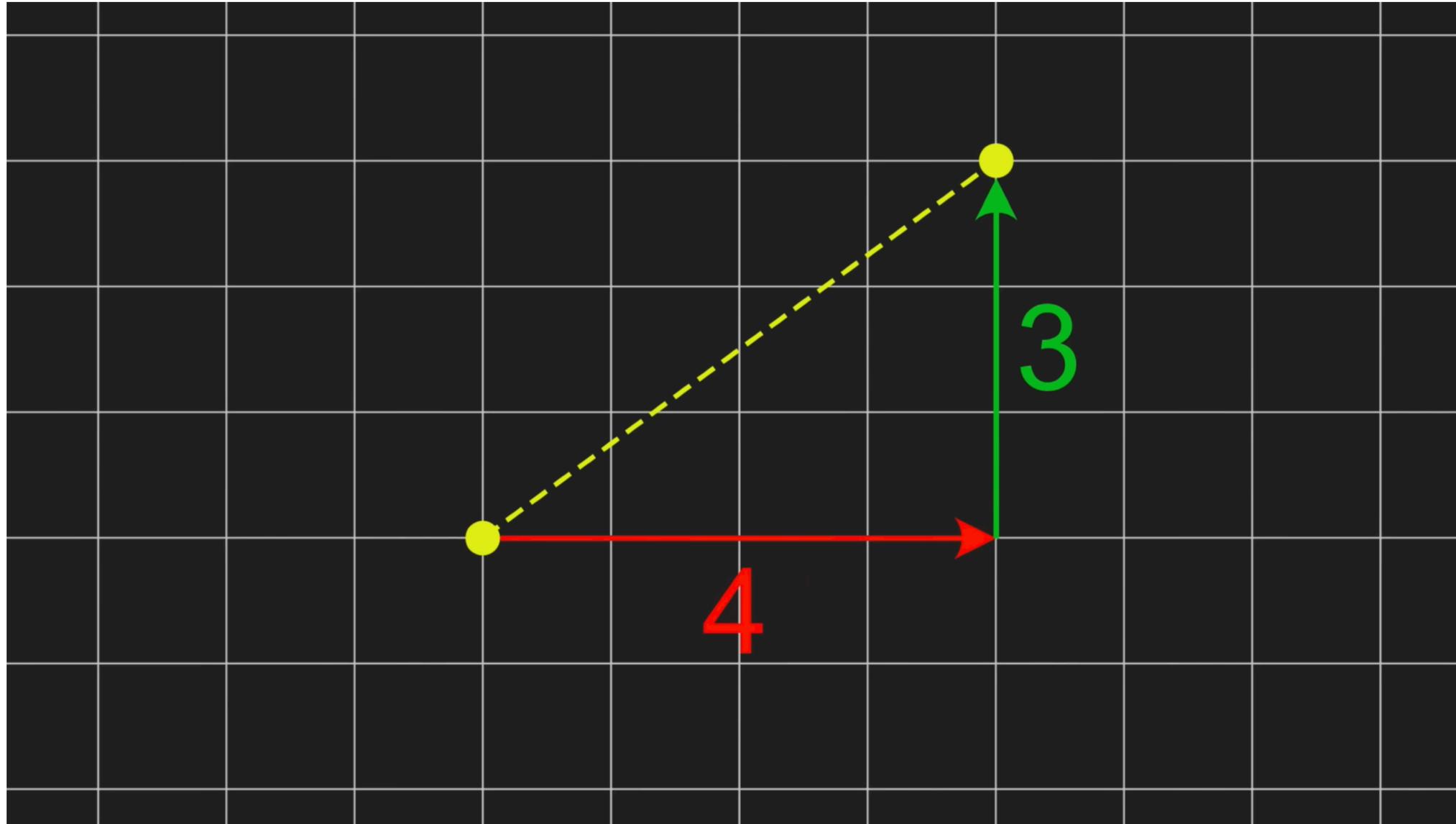
espace-temps à 4 dimensions, 3 d'espace, 1 de temps
courbure ~ gravité (déformation car présence de matière)



Relativité

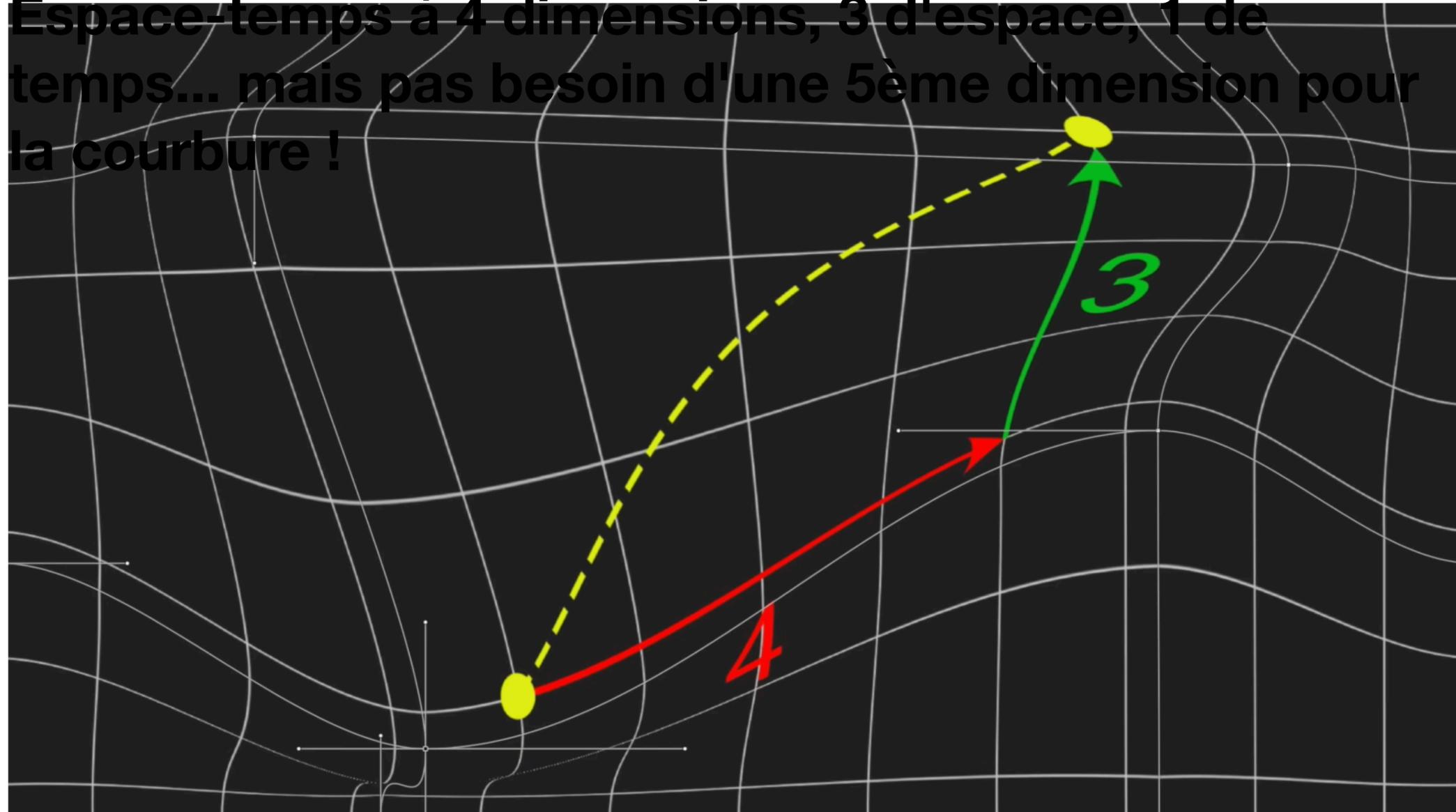
Espace-temps à 4 dimensions, 3 d'espace, 1 de temps



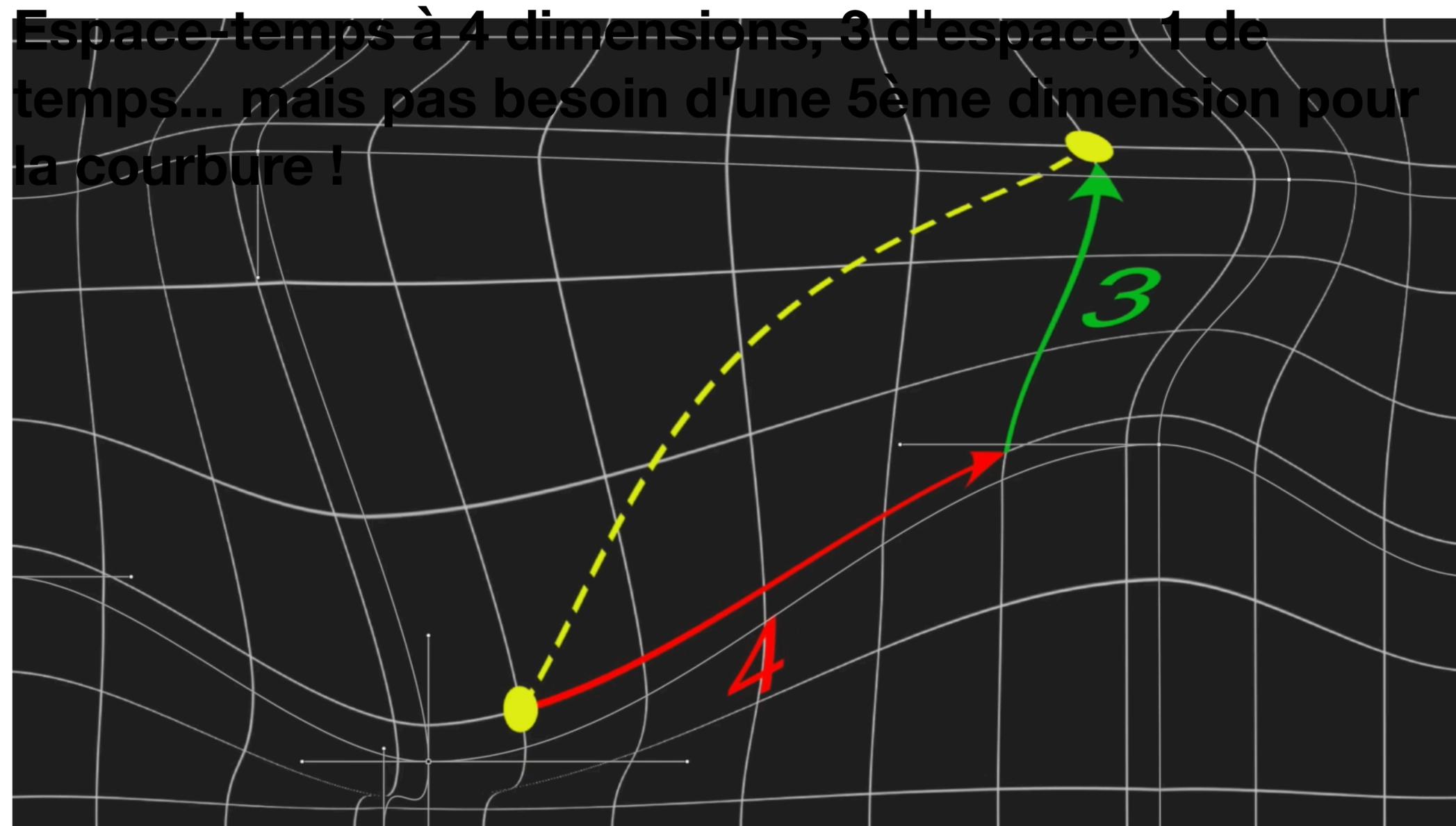


Univers plat : $d = \sqrt{4^2 + 3^2}$

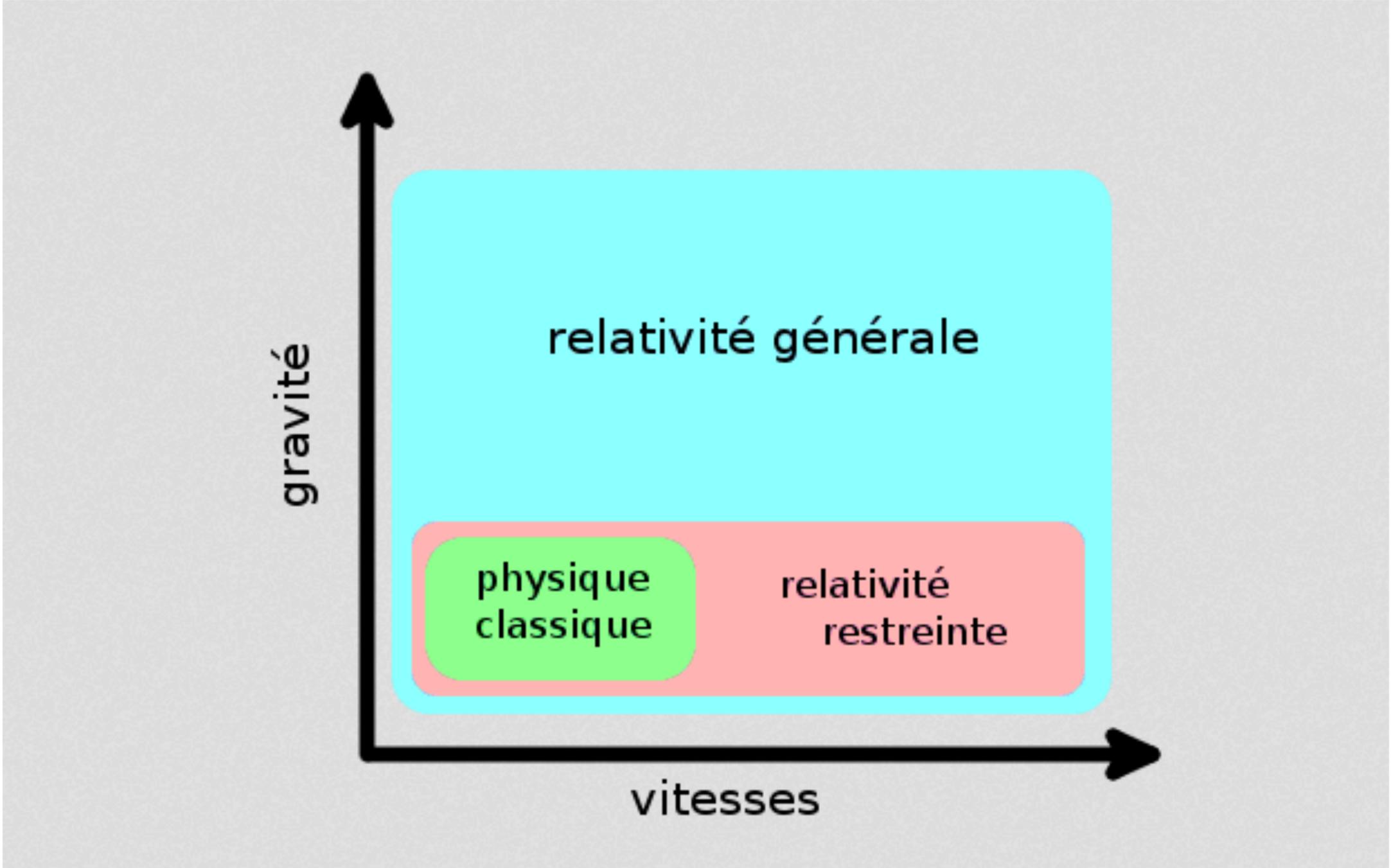
Espace-temps à 4 dimensions, 3 d'espace, 1 de temps... mais pas besoin d'une 5ème dimension pour la courbure !



Univers courbe : $d = \sqrt{g_x 4^2 + g_y 3^2}$

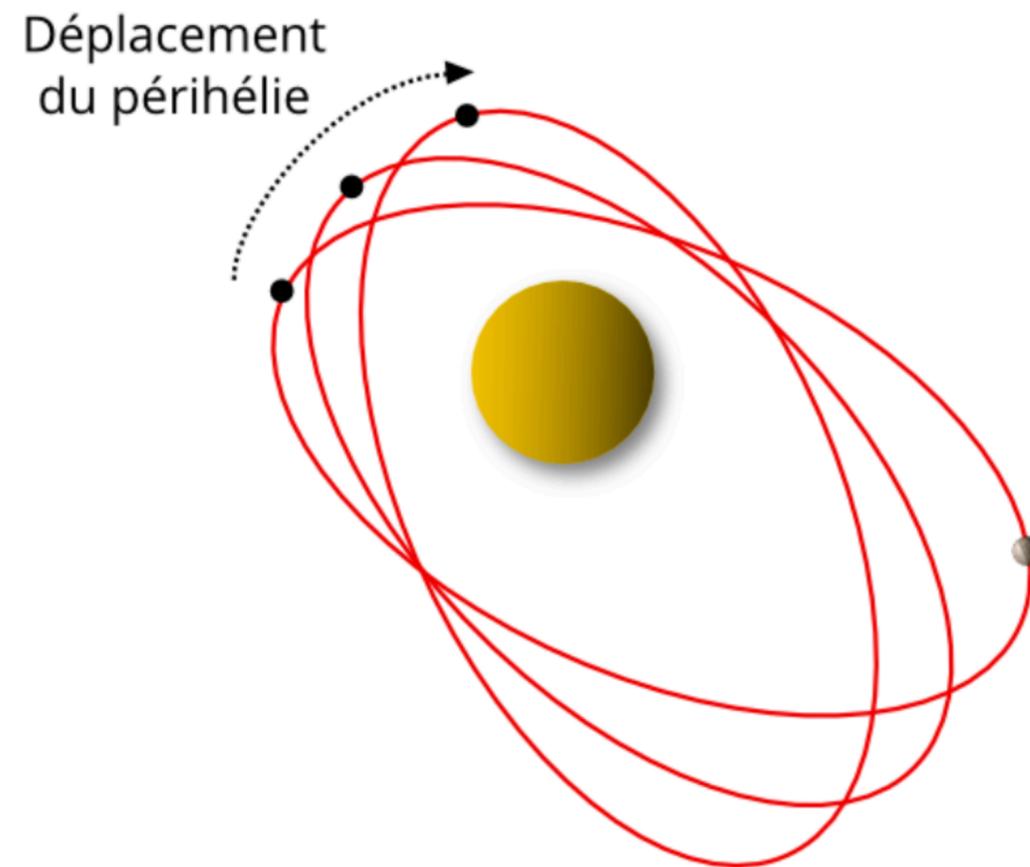


Espace-temps à 4 dimensions, 3 d'espace, 1 de temps... mais pas besoin d'une 5ème dimension pour la courbure !



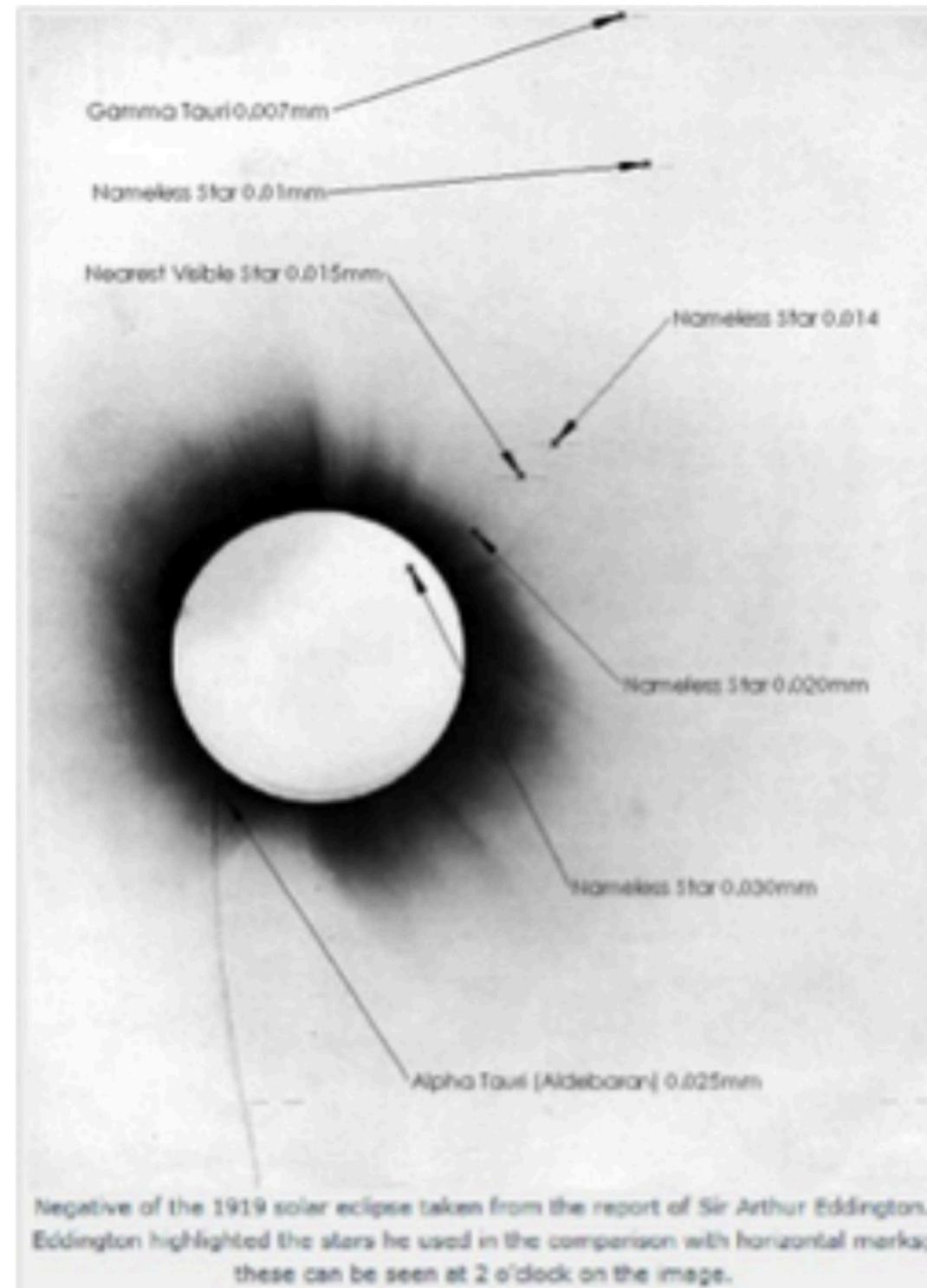
Relativité générale : preuves expérimentales

Péihélie de Mercure : (voir TD)



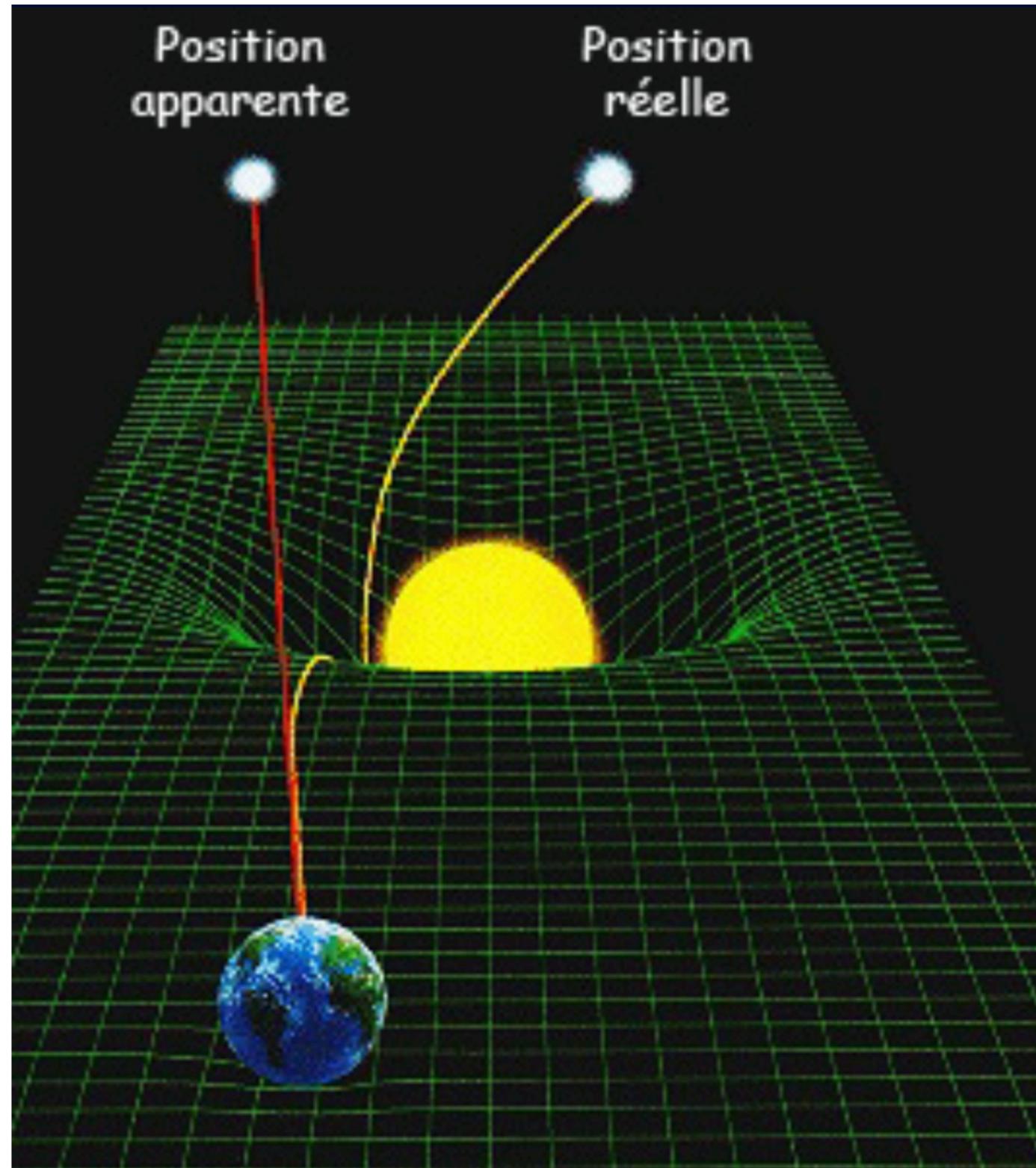
Relativité générale : preuves expérimentales

Éclipse de 1919 :



Relativité générale : preuves expérimentales

Éclipse de 1919 :



Relativité générale : preuves expérimentales

Dilatation du temps dû à la gravité

Le temps passe plus lentement si la gravité est plus grande

Une horloge à l'altitude de 9 km pendant 48 h a vieilli de $0,15 \mu\text{s}$ de plus qu'une horloge restée au sol

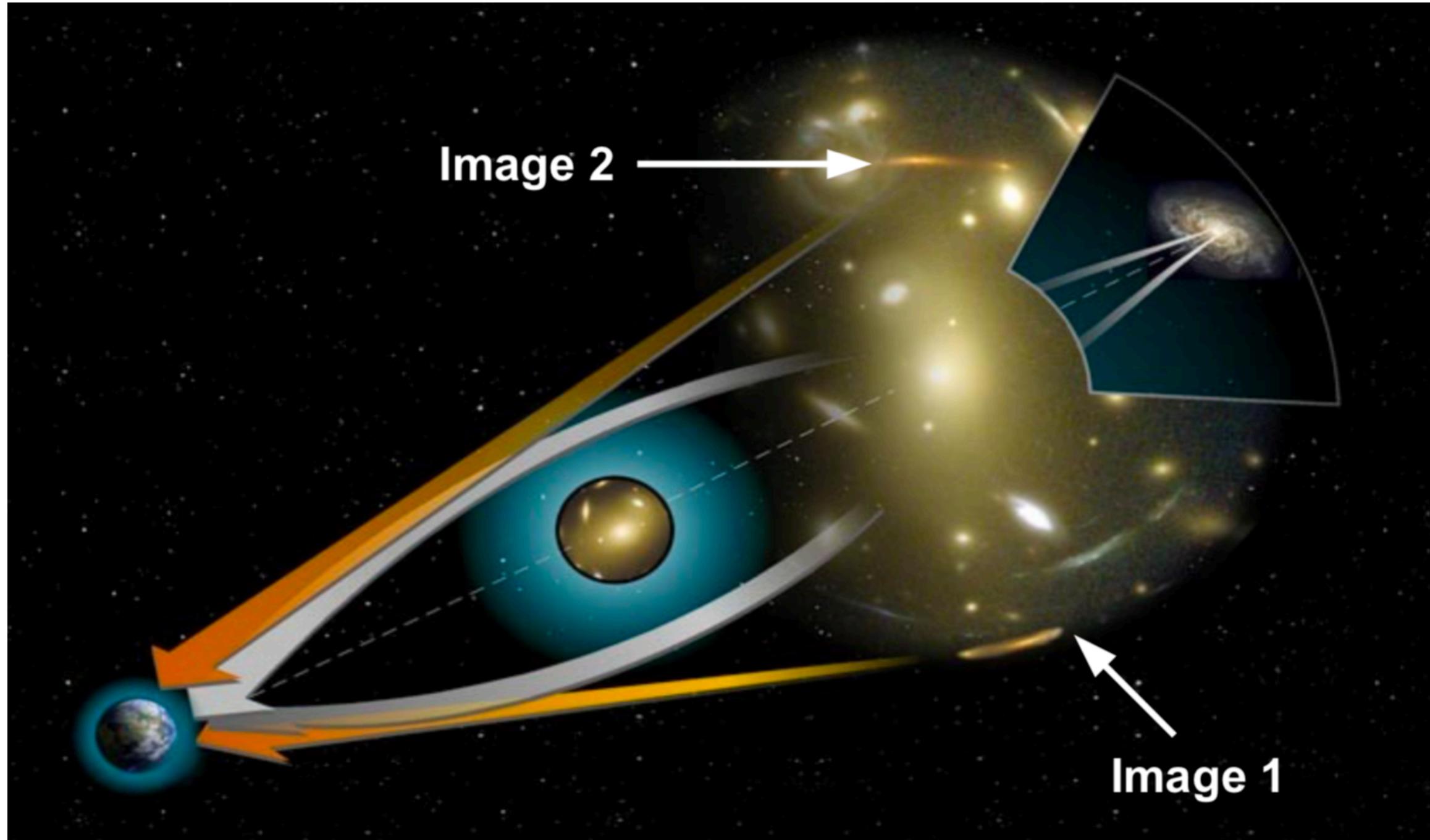
Expérience de Hafele & Keating (1971)

https://luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/fr/present_pub/courpiere17.pdf



Relativité générale : preuves expérimentales

Lentilles gravitationnelles :



Relativité générale : preuves expérimentales

Lentilles gravitationnelles :



Relativité générale : preuves expérimentales

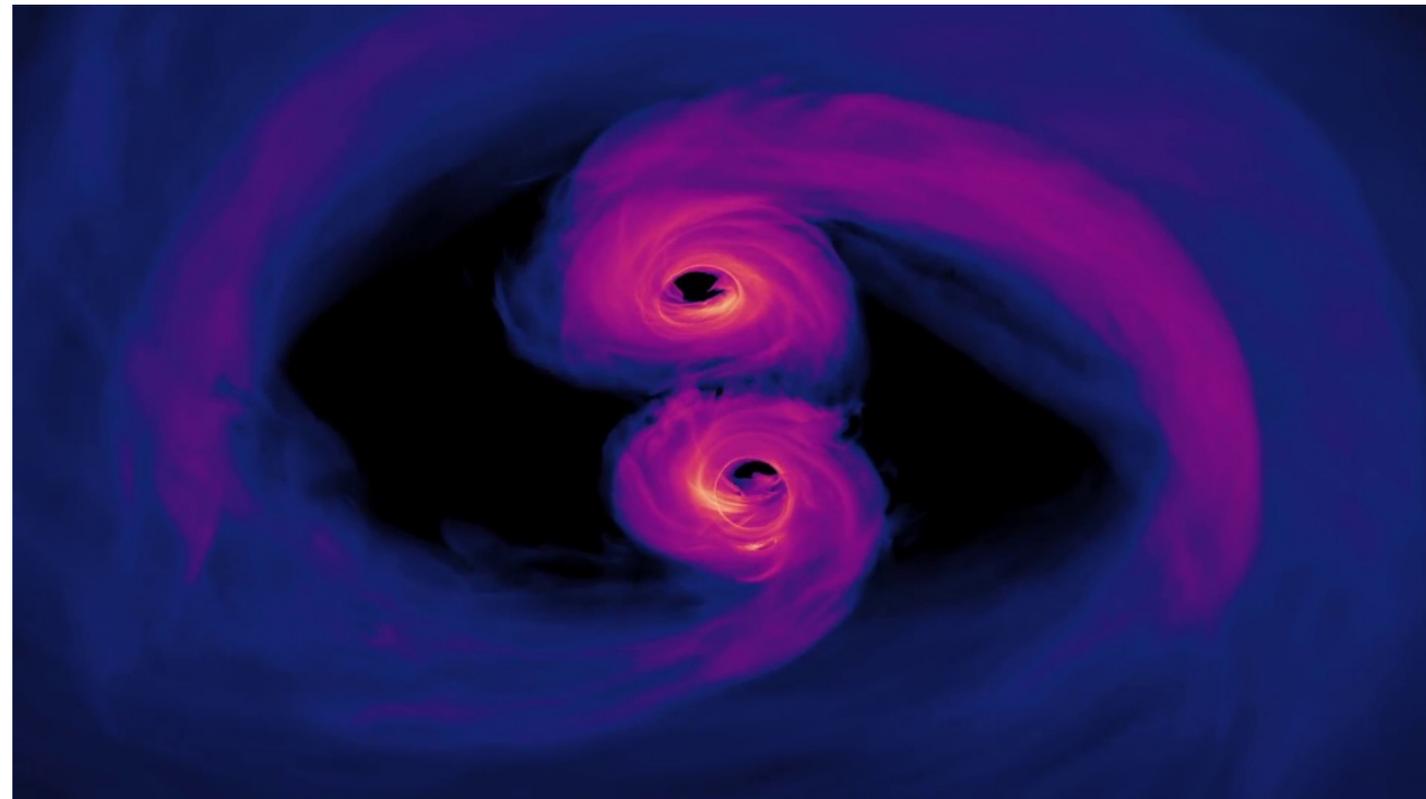
**Ondes gravitationnelles : preuve indirecte
1979, observation d'un pulsar binaire**

**= système de 2 étoiles à neutrons, en rotation rapide
l'une autour de l'autre... mais avec une période
orbitale en (petite) diminution**

=> perte d'énergie supérieure aux pertes

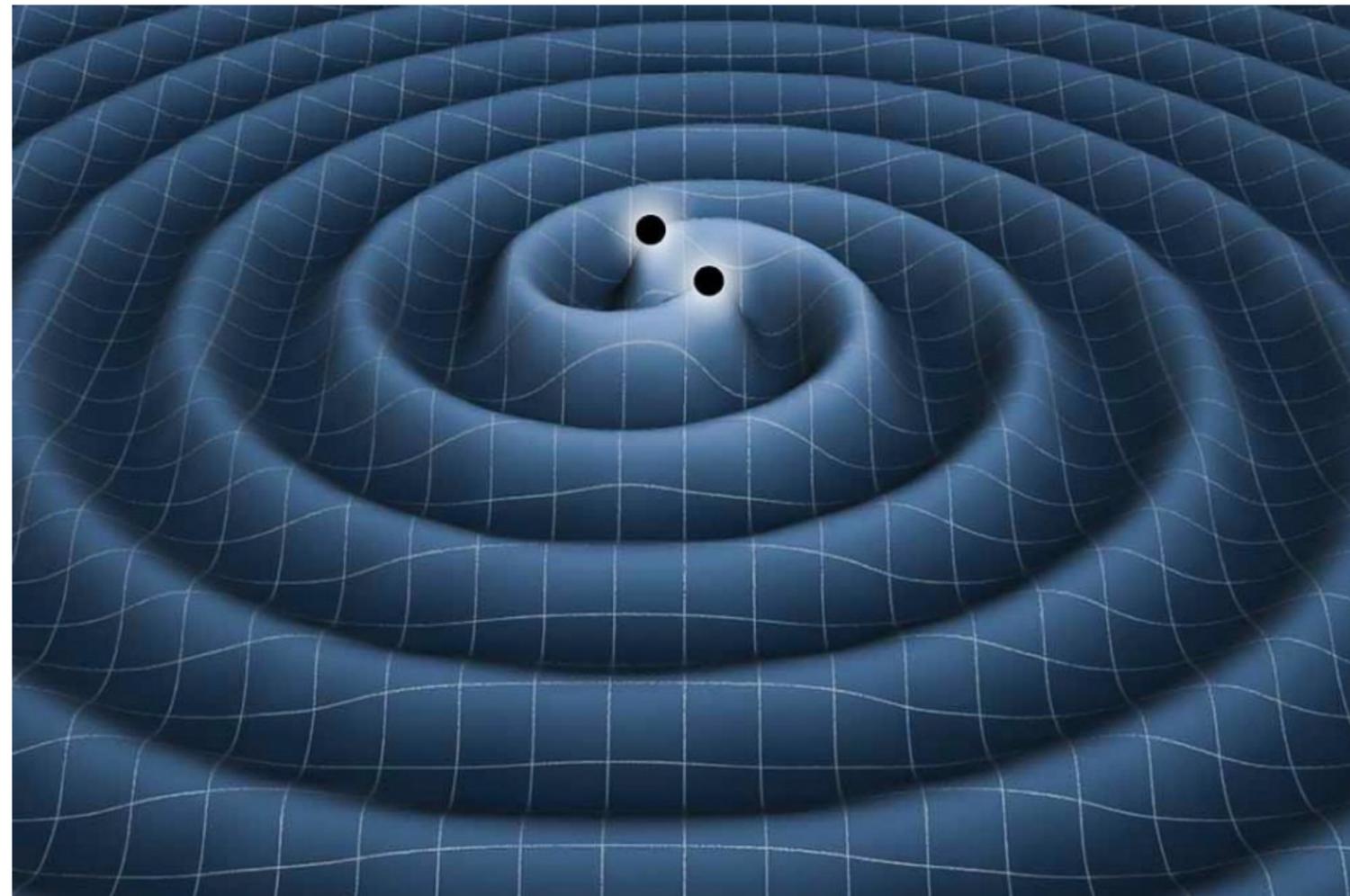
électromagnétiques

**=> perte sous forme
d'ondes gravitationnelles !**



Relativité générale : preuves expérimentales

Ondes gravitationnelles : preuve directe
2015, observation de déformation de l'espace due
à la fusion de 2 trous noirs



Relativité générale : preuves expérimentales

Ondes gravitationnelles : preuve directe
2015, observation de déformation de l'espace due
à la fusion de 2 trous noirs

VIRGO :
interféromètre
européen
bras de 3 km

$\Delta d/d \sim 10^{-17}$
 $\Rightarrow \Delta d \sim 10^{-14} \text{ m}$

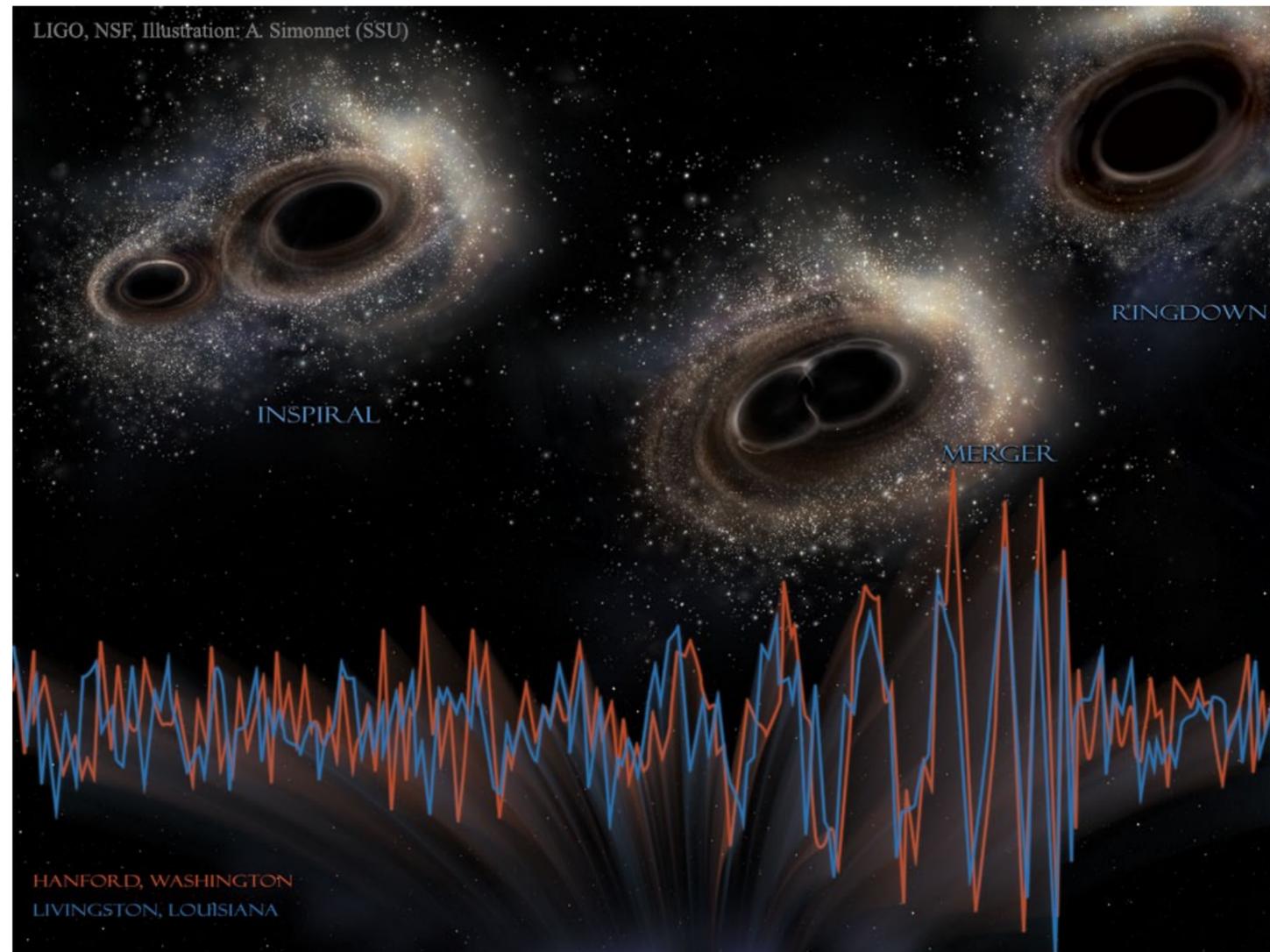


Relativité générale : preuves expérimentales

Ondes gravitationnelles : preuve directe
2015, observation de déformation de l'espace due
à la fusion de 2 trous noirs (36 et 29 masses solaires)
=> pertes de 3 masses solaires

LIGO :
interféromètre
états-unien
bras de 4 km

Train d'onde de
quelques 0,3s



Relativité générale : pour aller plus loin

Vidéos :

- Science étonnante**
- Scienceclic**

Livre :

"Trous noirs et distortions du temps", Kip Thorne

Evolution des conceptions de l'univers

Cosmologie

NB : pas seulement le Big Bang...

Evolution des conceptions de l'univers

Avant de commencer...

...la cosmologie est-elle une science ?

La méthode scientifique repose sur la reproductibilité des expériences...

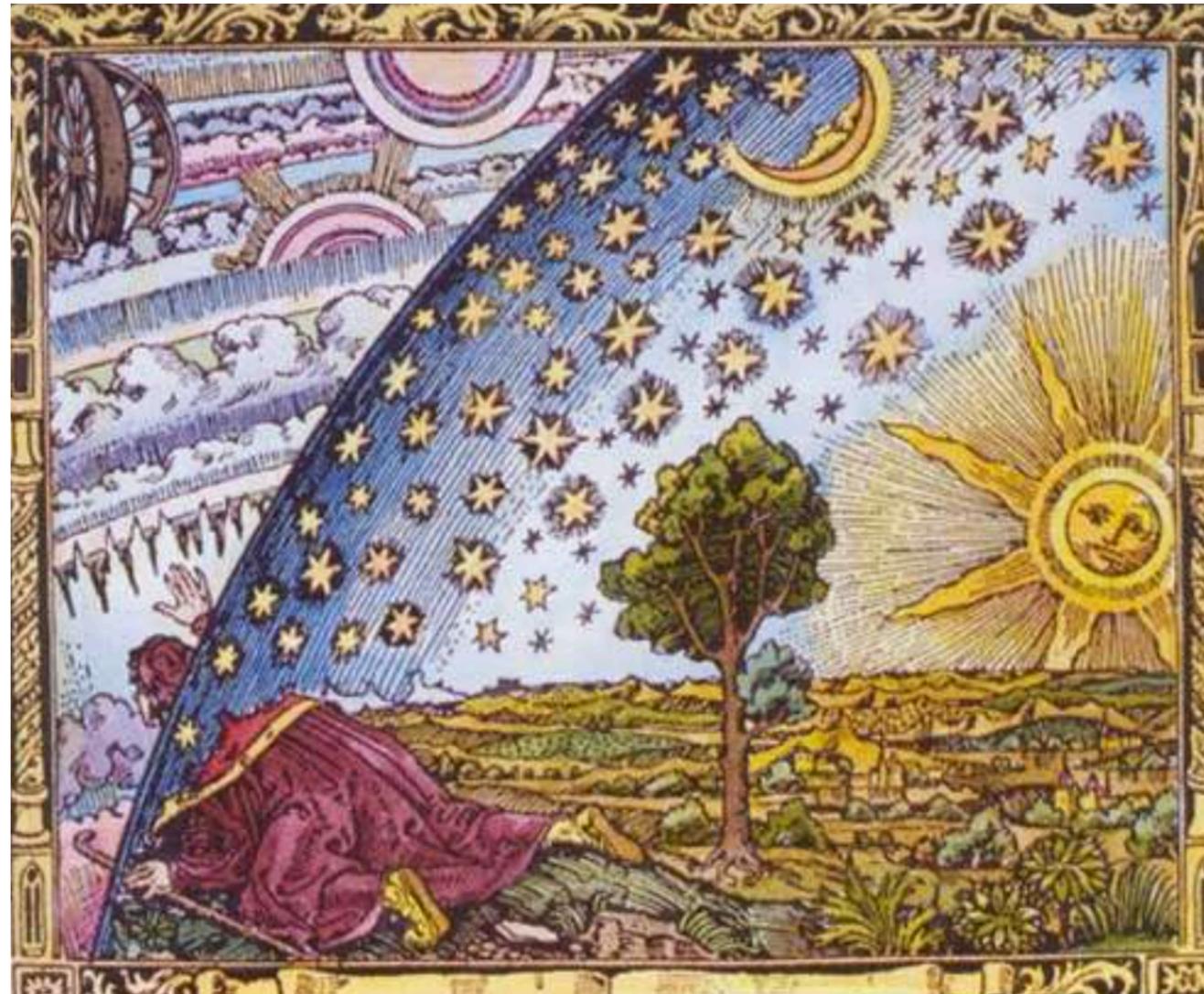
...mais nous ne connaissons qu'un seul univers !

L'observation d'un phénomène implique d'y être extérieur...

...alors que nous sommes dedans !

Premières cosmologies /cosmogonies

Toutes (?) les civilisations ont crée leur récit/explication de la création



Premières cosmologies /cosmogonies

Toutes (?) les civilisations ont créé leur récit/explication de la création

Selon les mésopotamiens :

de l'eau salée et de l'eau douce naquirent les dieux ;
la terre, la voute céleste, les enfers... furent formés
à partir du cadavre d'un dieu mort lors d'une guerre
entre dieux...

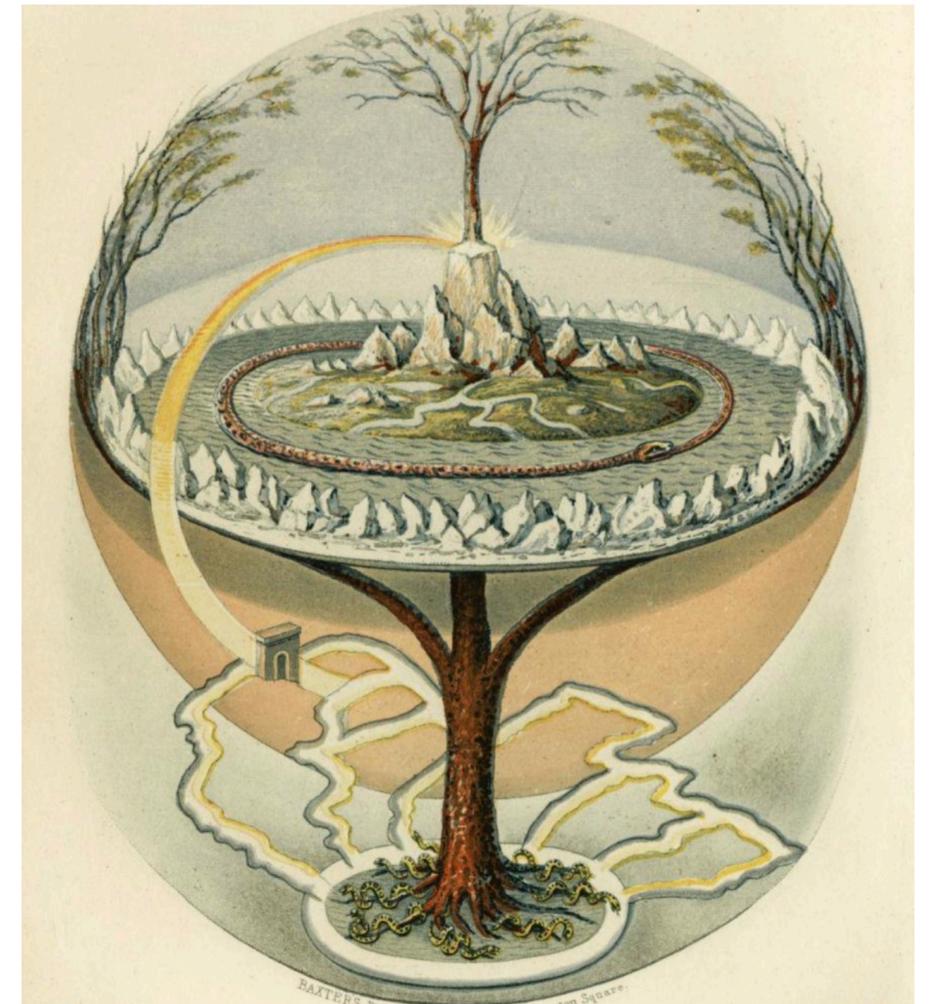


Premières cosmologies /cosmogonies

Toutes (?) les civilisations ont créé leur récit/explication de la création

Selon une mythologie nordique :

dans le chaos, le feu et la glace se rencontrèrent,
donnant naissance au géant Ymir,
qui engendrera d'autres géants,
qui engendreront parmi d'autres
Odin, Hœnir et Lodur qui tueront Ymir.
Son crane devient la voute céleste,
son sang la mer, son corps la terre.

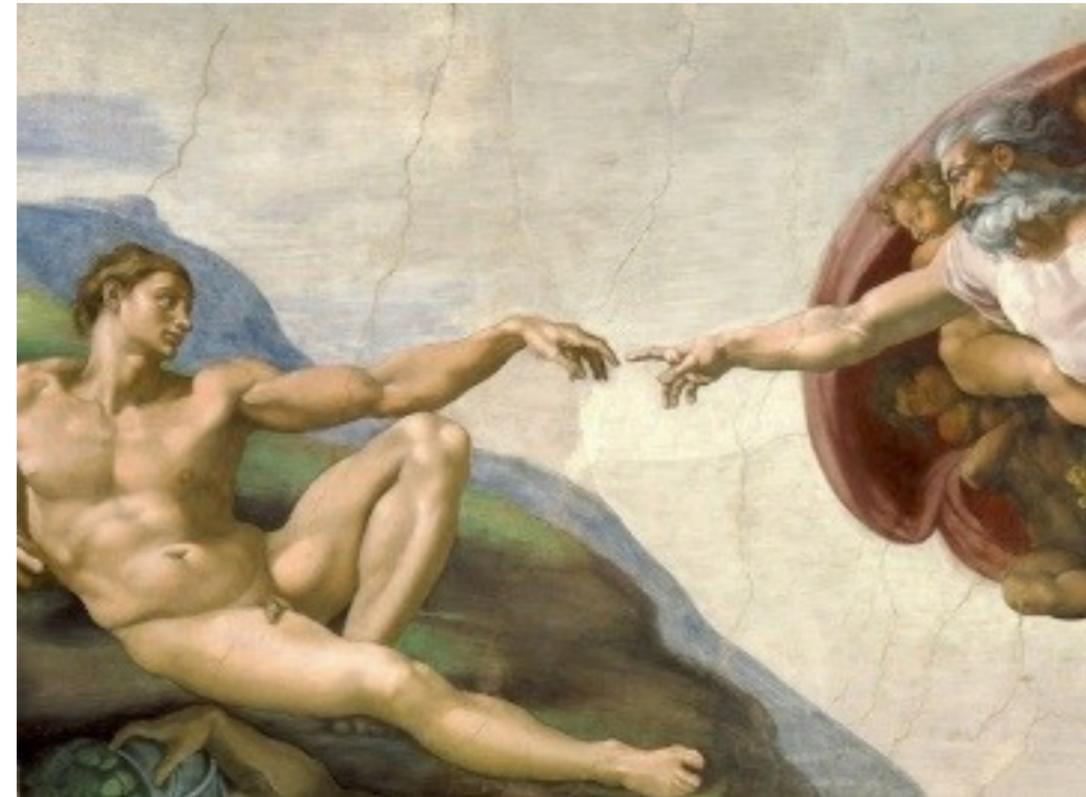


Premières cosmologies /cosmogonies

Toutes (?) les civilisations ont créé leur récit/explication de la création

Selon les textes judéo-chrétiens :

« Que la lumière soit et la lumière fut »



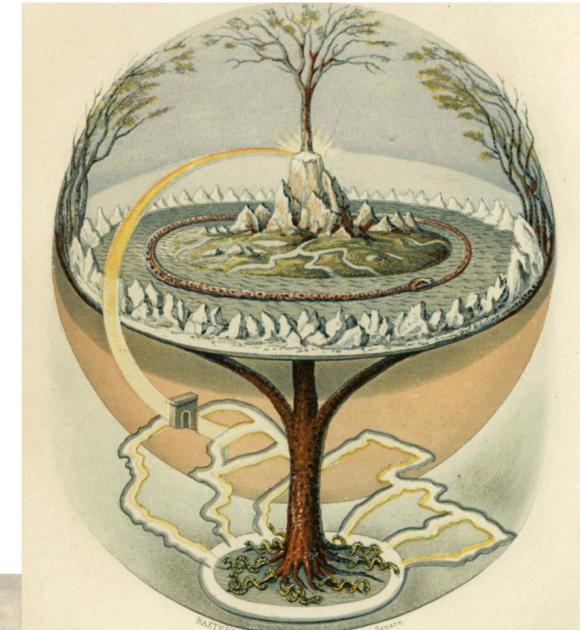
Premières cosmologies / cosmogonies

Toutes (?) les civilisations ont créé leur récit/explication de la création

=> récits métaphoriques

≠ méthode scientifique
(confrontation observation/théorie)

=> cosmologie plutôt que cosmogonies



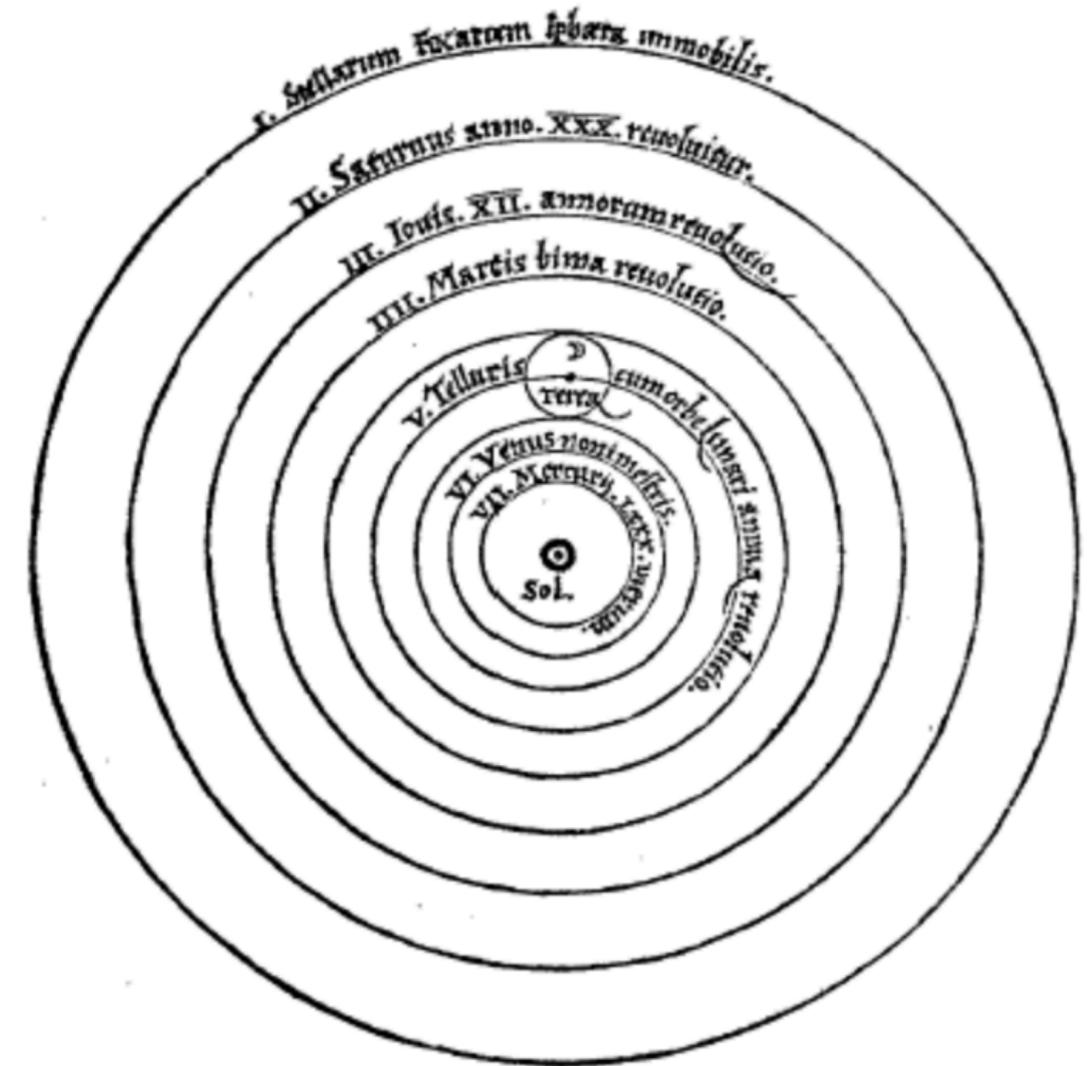
Evolution des conceptions de l'univers

En repartant des grecs
(VI^{ème} siècle avant notre ère)



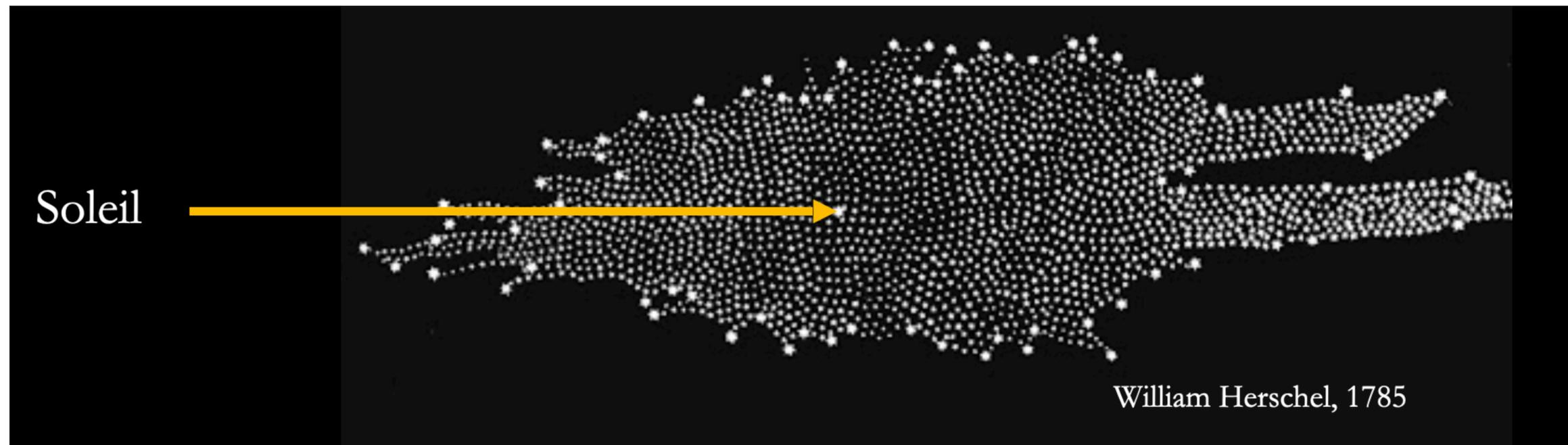
Evolution des conceptions de l'univers

Héliocentrique de Copernic [et autres]
(16^{ème} siècle)



Evolution des conceptions de l'univers

Le soleil, une étoile parmi d'autres
qui forment un "univers-île"
(Herschel, 18ème siècle)
[Giordano Bruno (15ème siècle) l'avait aussi clamé]



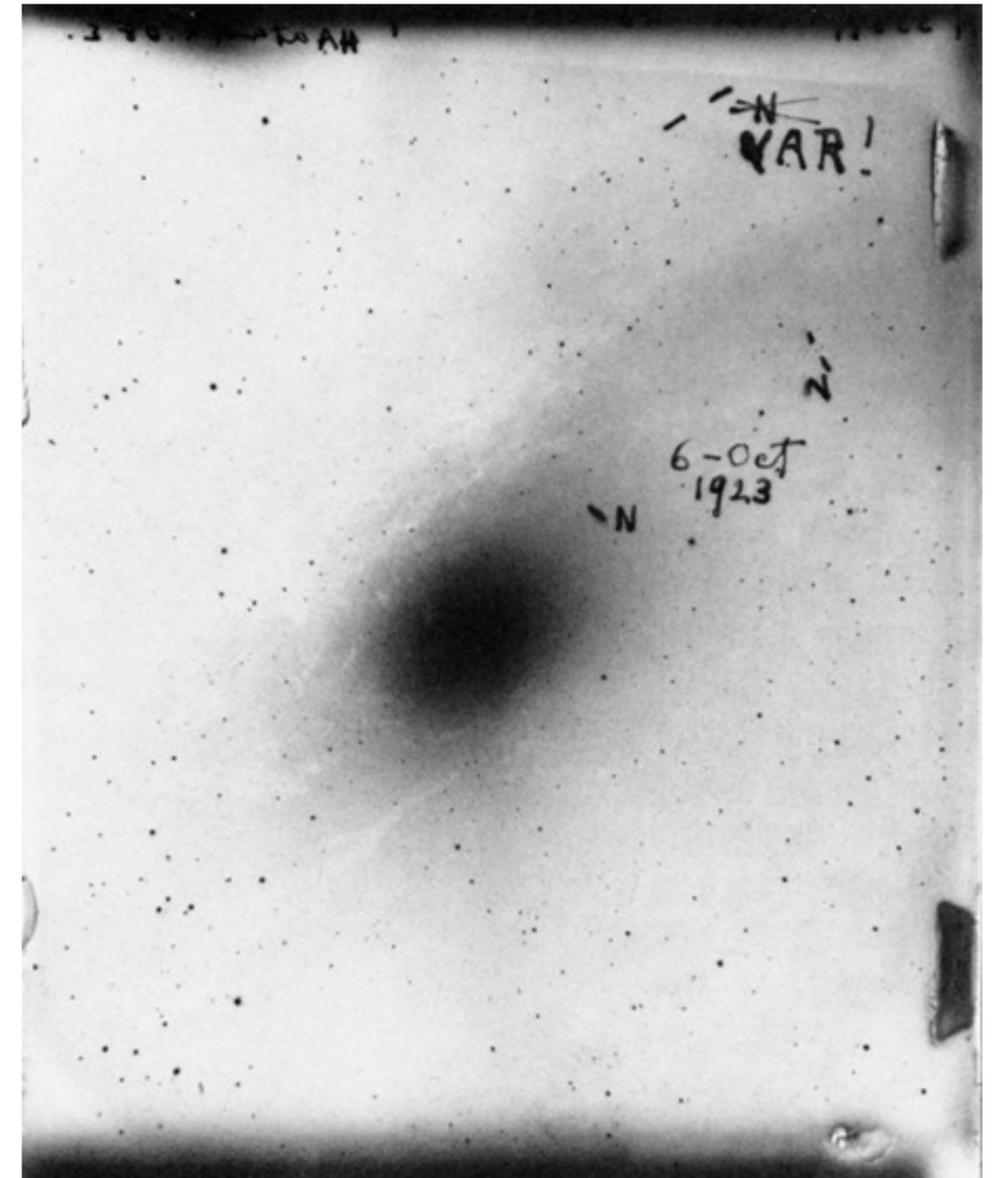
Evolution des conceptions de l'univers

1924 : observation d'une céphéide dans Andromède par E. Hubble



Evolution des conceptions de l'univers

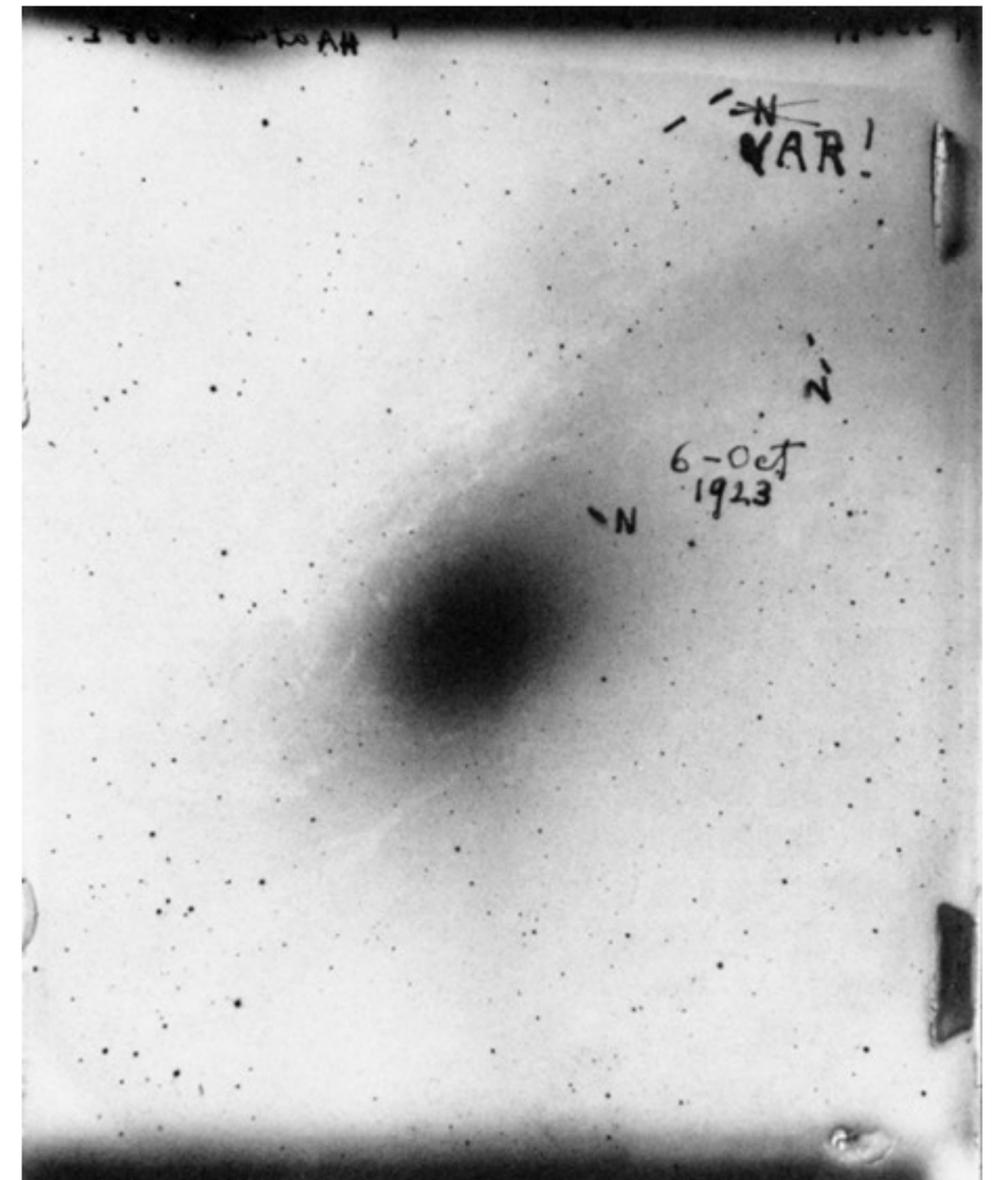
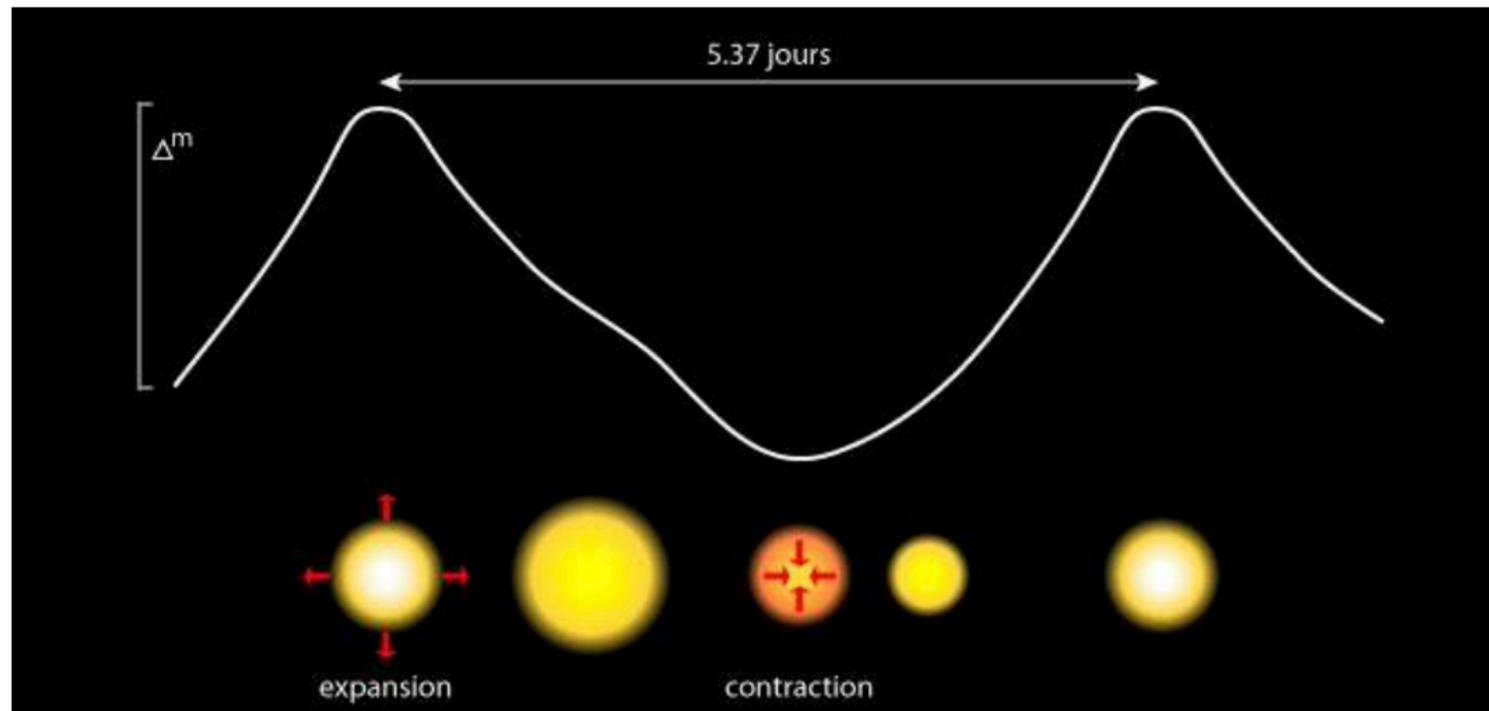
1924 : observation d'une céphéide dans Andromède par E. Hubble



0

1924 : observation d'une céphéide dans Andromède par E. Hubble

Céphéide = étoile variable dont la période renseigne sur la luminosité absolue, donc la distance

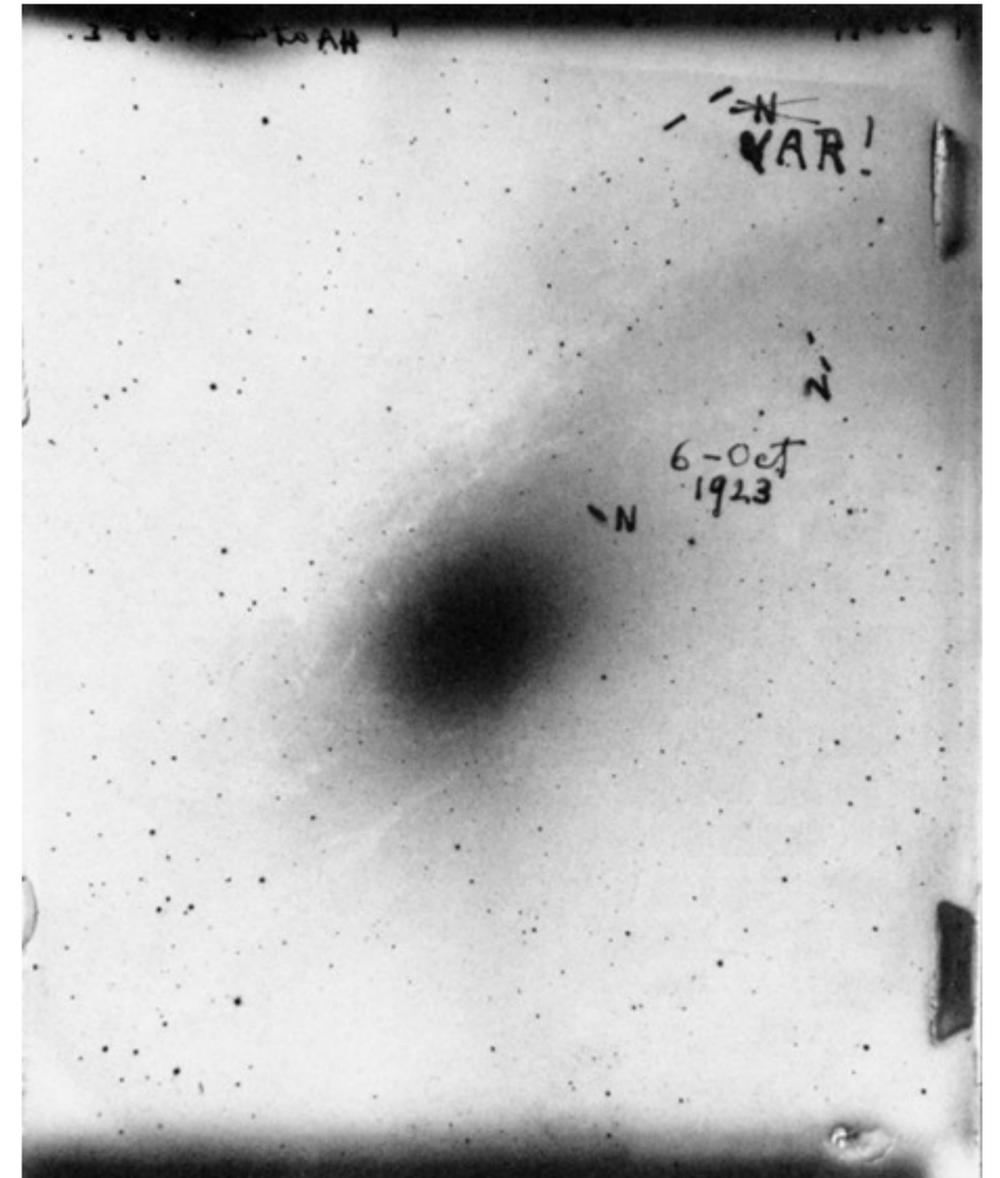


Evolution des conceptions de l'univers

1924 : observation d'une céphéide dans Andromède par E. Hubble

[céphéide = étoile variable dont la période renseigne sur la luminosité absolue, donc la distance]

=> la "nébuleuse" d'Andromède est une autre galaxie !



Evolution des conceptions de l'univers

1927 (et 1929) : observation de galaxies lointaines qui s'éloignent d'autant plus vite qu'elles sont lointaines (par G. Lemaitre en 1927 et E. Hubble en 1929)

=> l'univers n'est pas statique mais en expansion !

=> loi de Hubble-Lemaitre :

$$v = H_0 \times D$$

vitesse de la galaxie → v H_0 ← *constante de Hubble* D ← *distance de la galaxie*

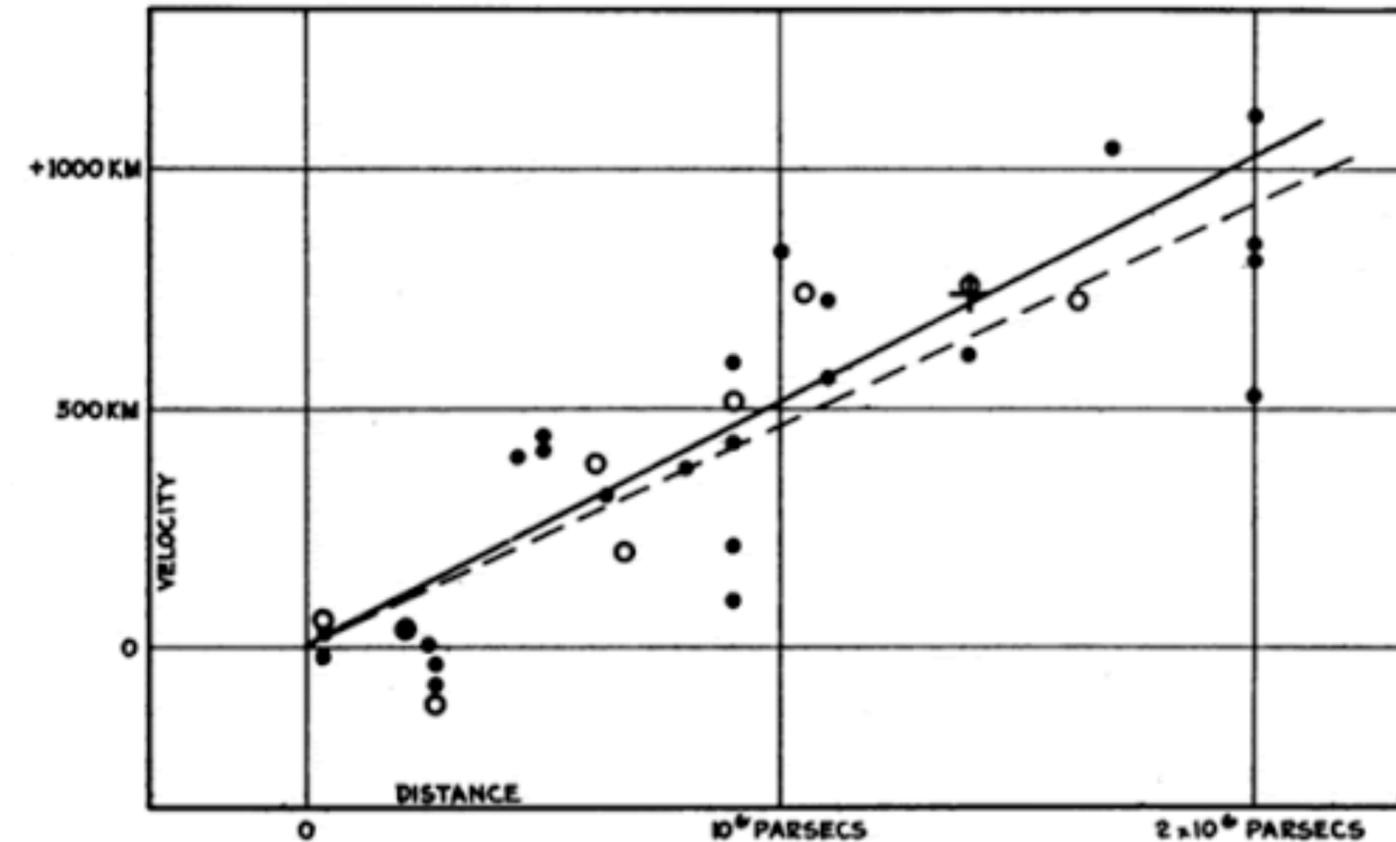
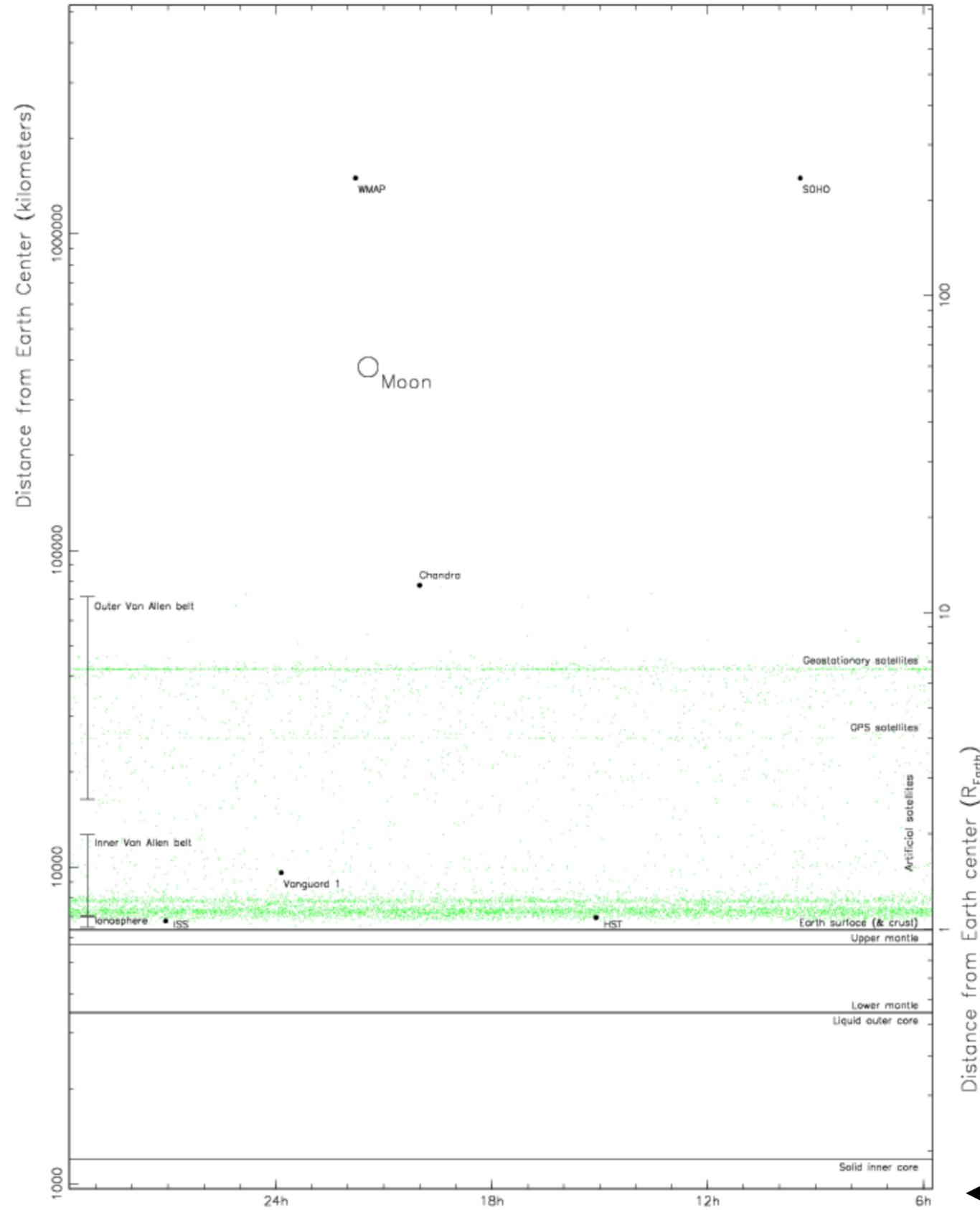


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Où en est-on ?

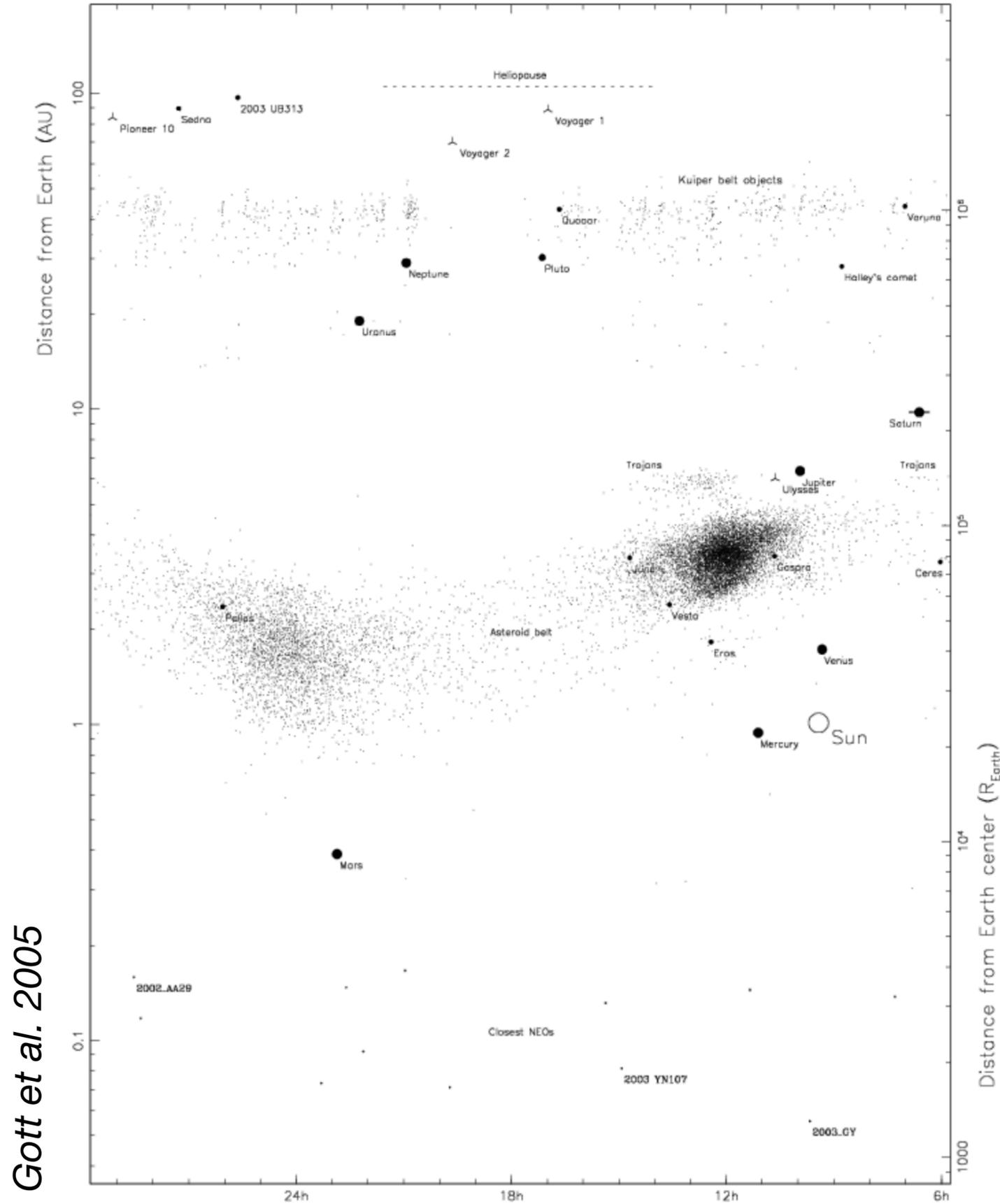
"Cartographie" de l'univers



Gott et al. 2005

Où en est-on ?

"Cartographie" de l'univers

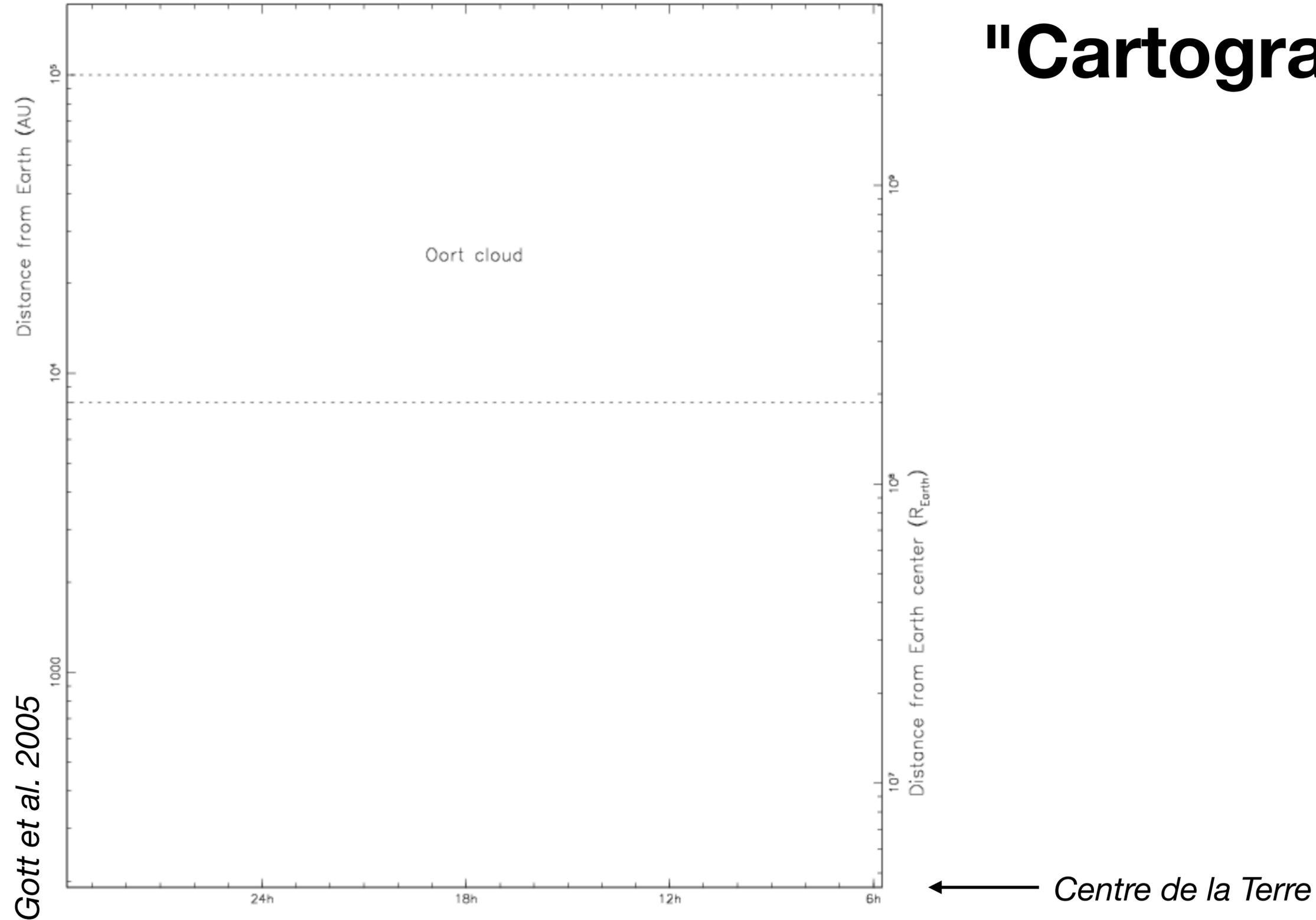


← *Ceinture d'astéroïdes*

← *Centre de la Terre*

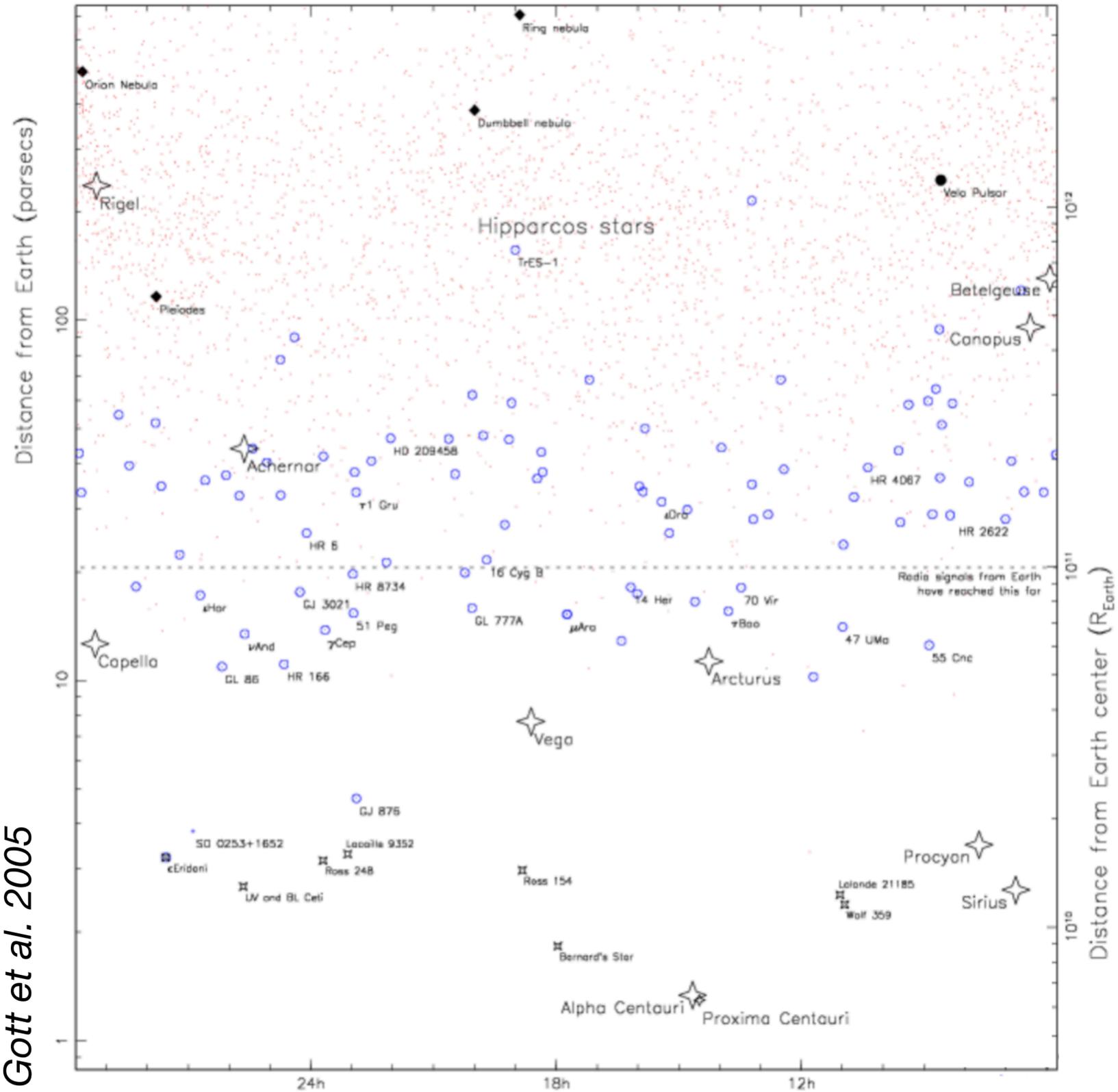
Où en est-on ?

"Cartographie" de l'univers



Où en est-on ?

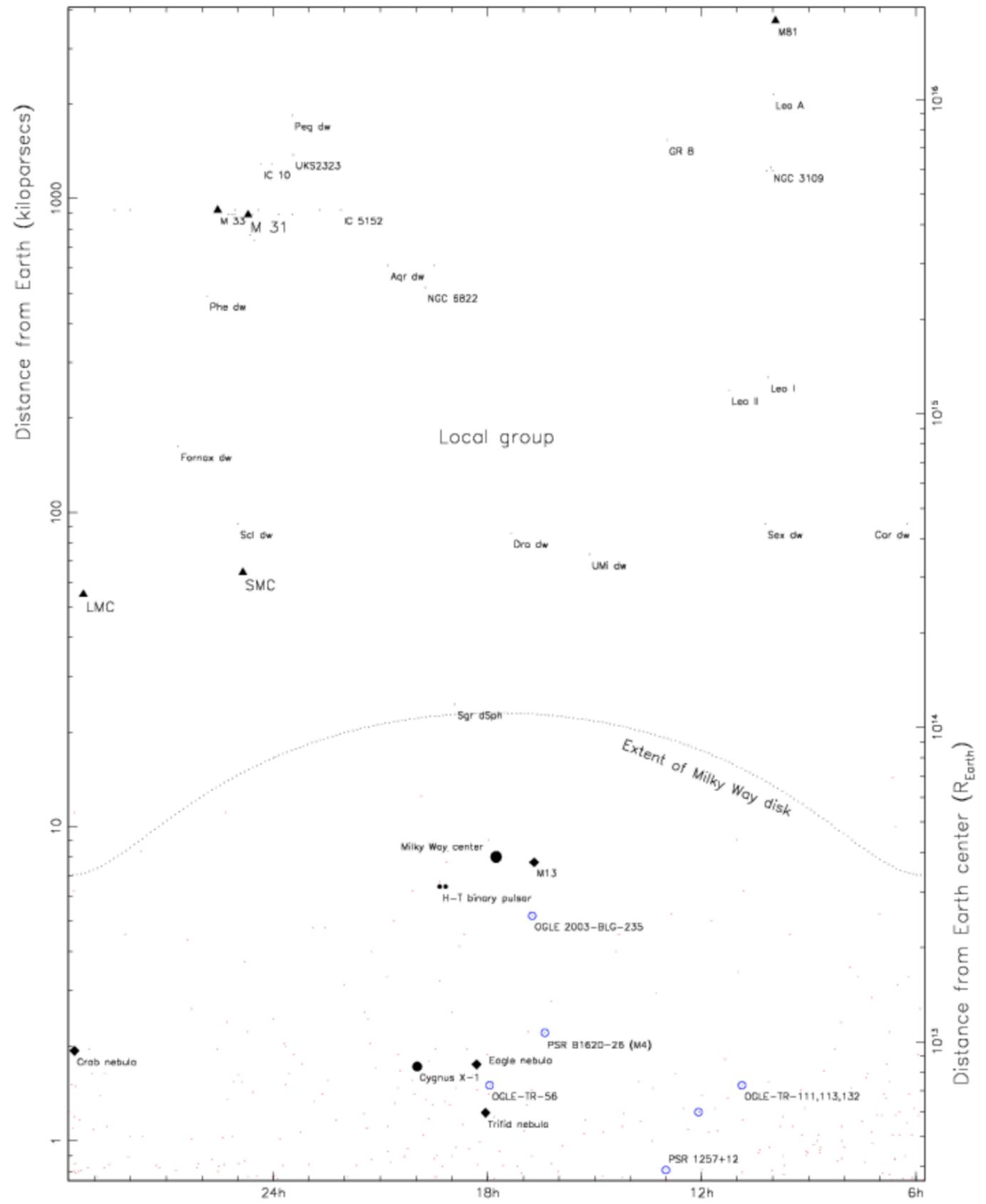
"Cartographie" de l'univers



← Centre de la Terre

Où en est-on ?

"Cartographie" de l'univers

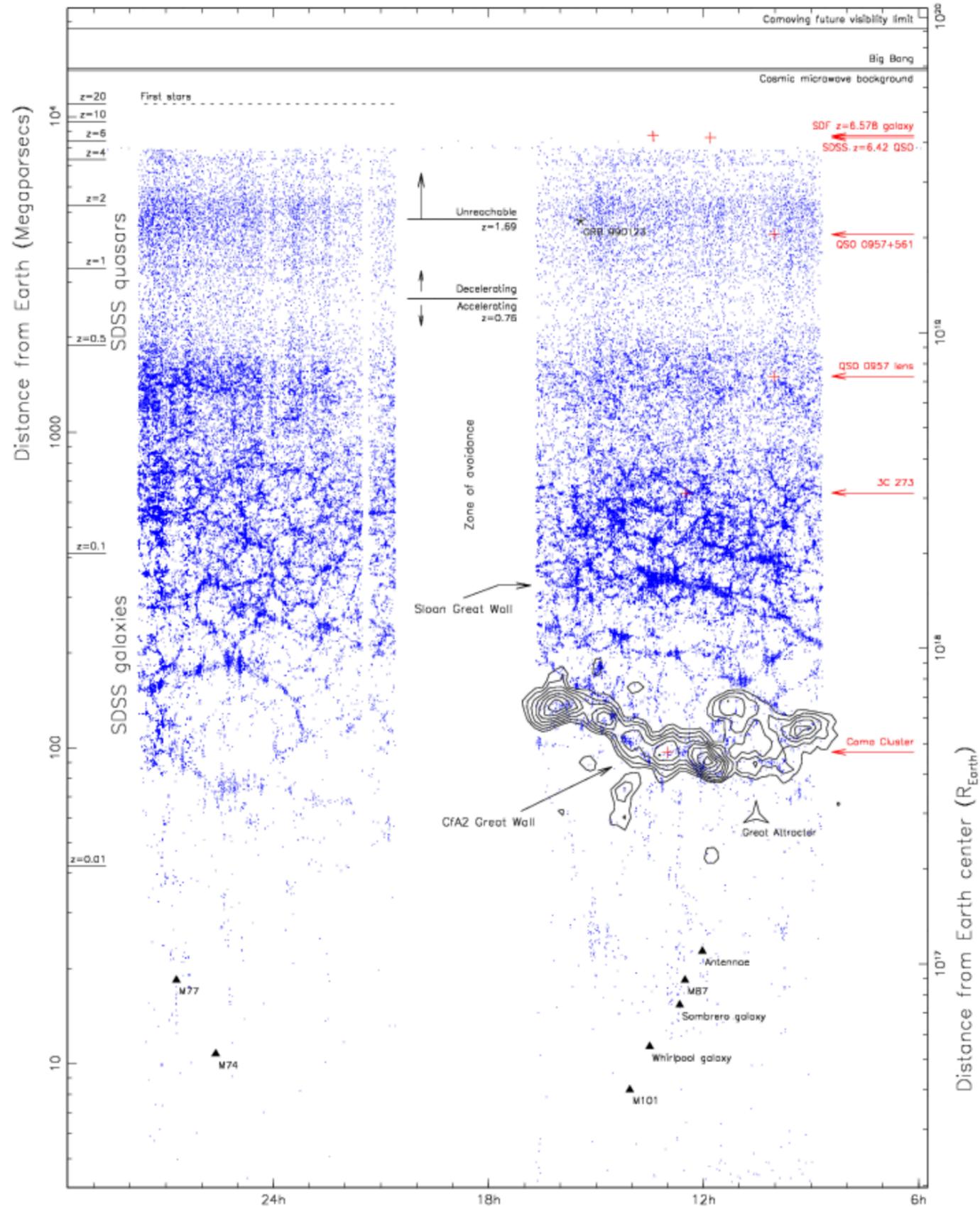


Gott et al. 2005

← Centre de la Terre

Où en est-on ?

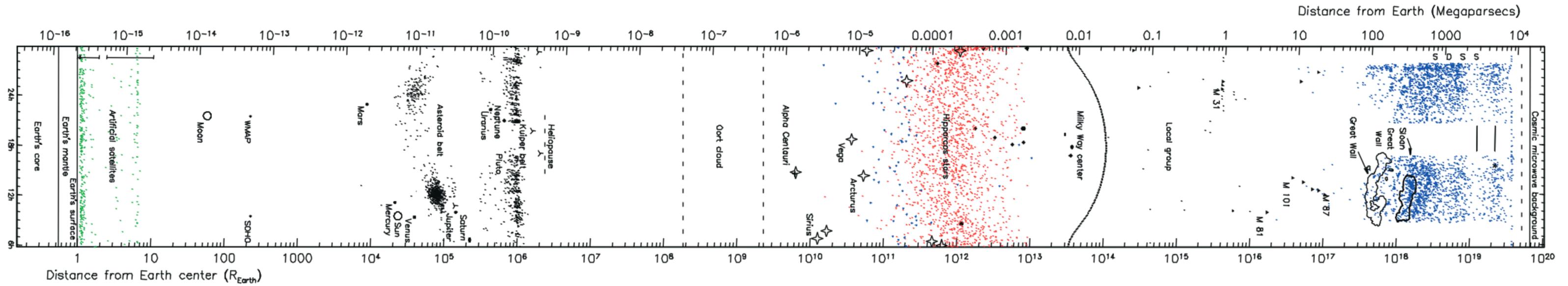
"Cartographie" de l'univers



← Centre de la Terre

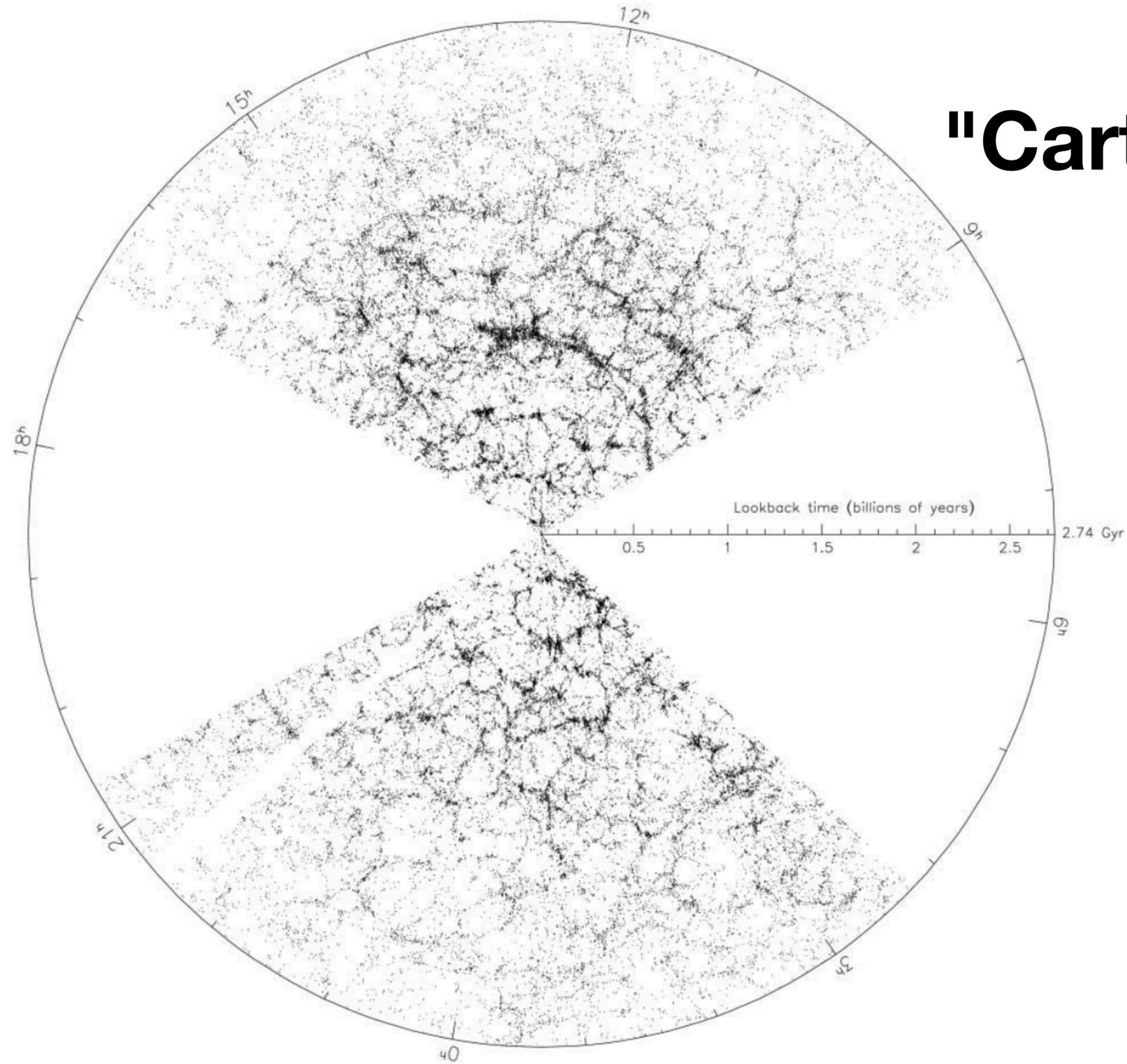
Où en est-on ?

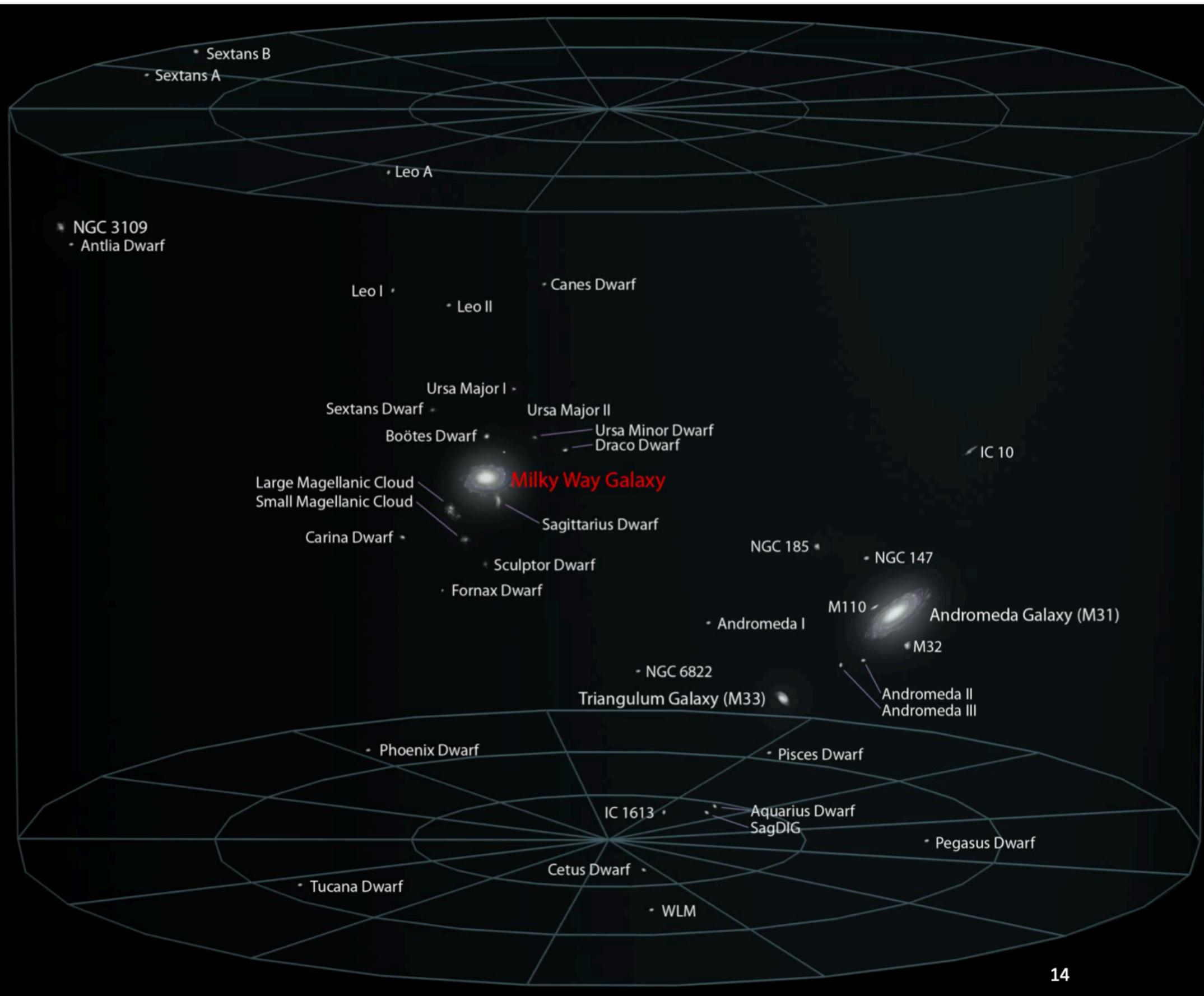
"Cartographie" de l'univers



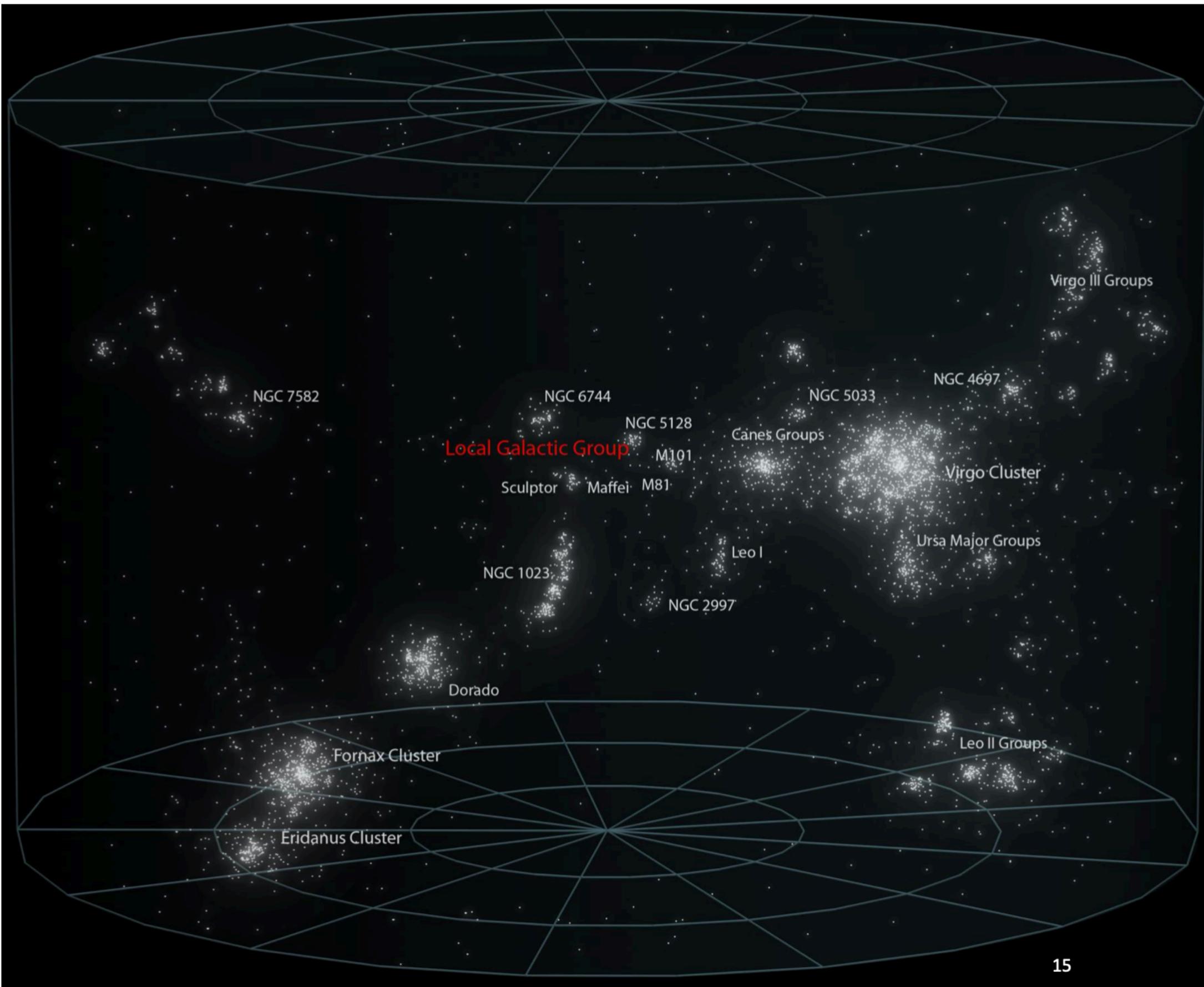
Où en est-on ?

"Cartographie" de l'univers

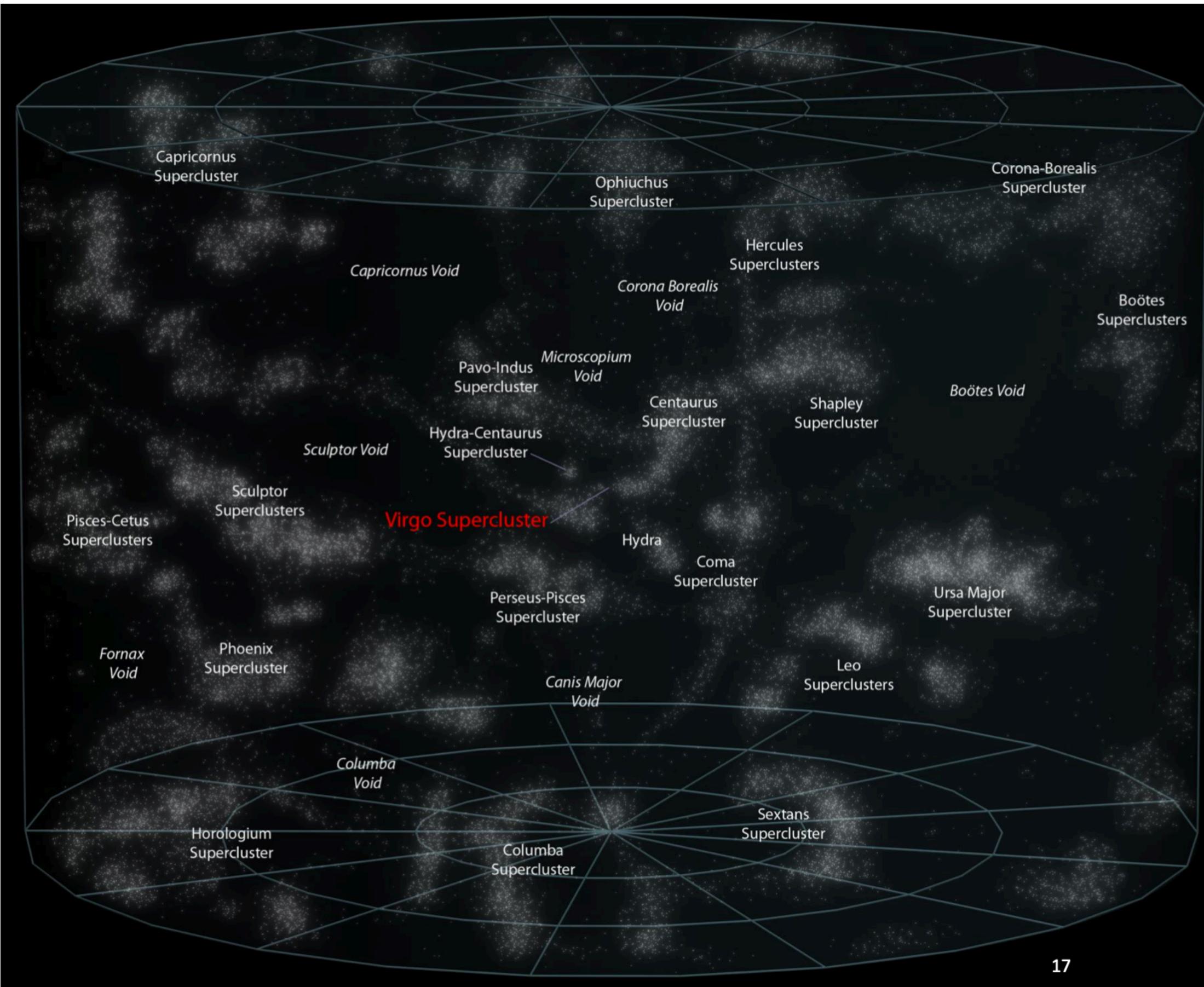




Où en est-on ? "Cartographie" de l'univers



Où en est-on ? "Cartographie" de l'univers



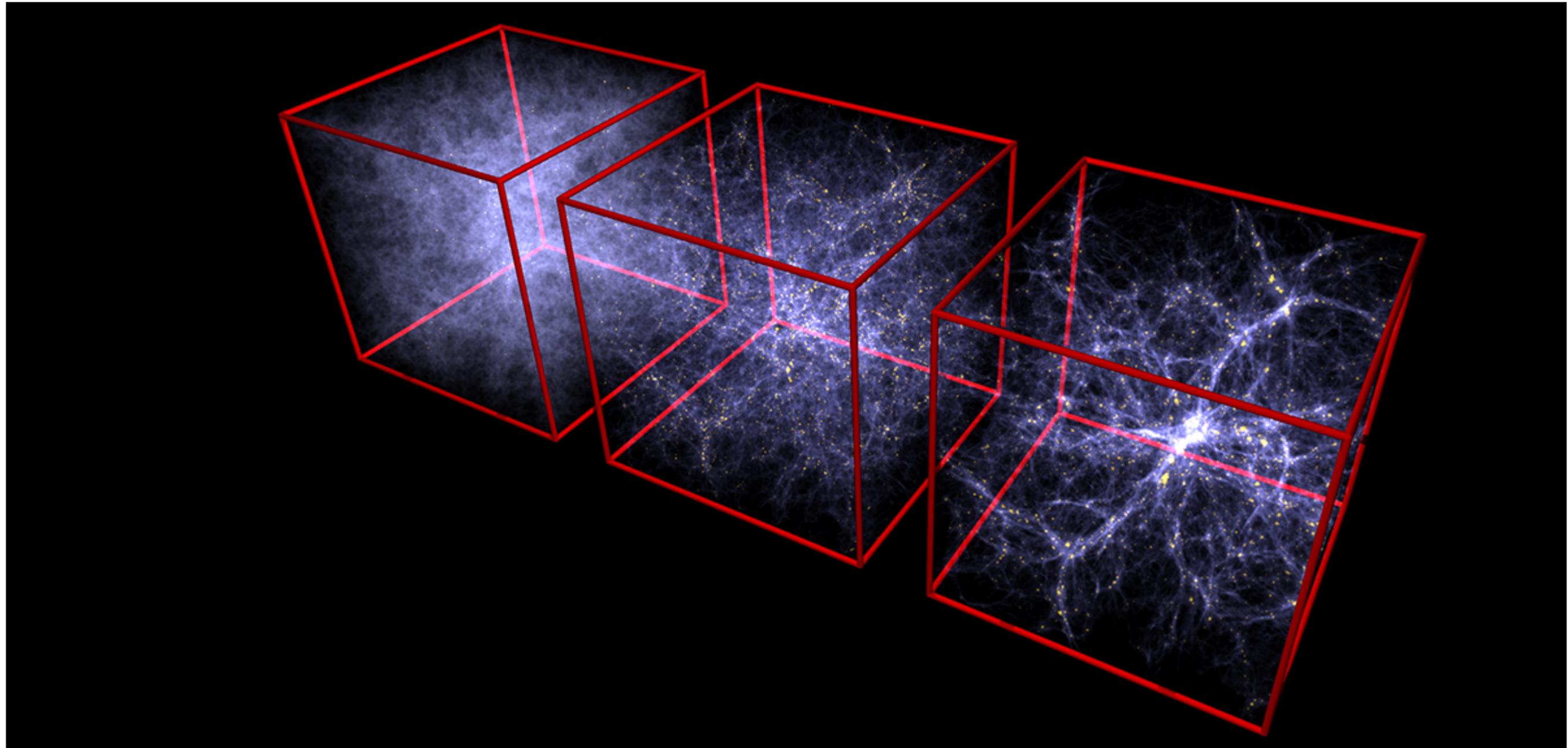
Où en est-on ? "Cartographie" de l'univers



Où en est-on ? "Cartographie" de l'univers

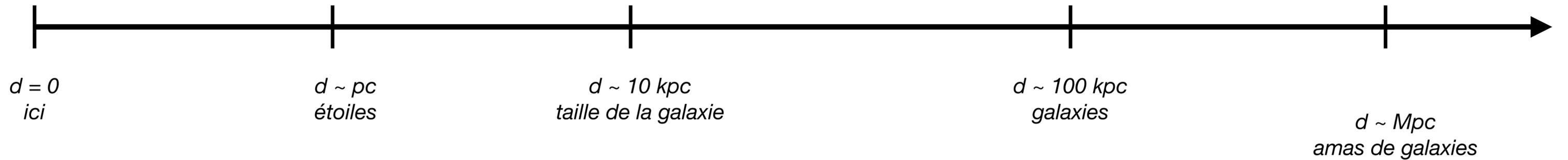
Où en est-on ?

Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles



Où en est-on ?

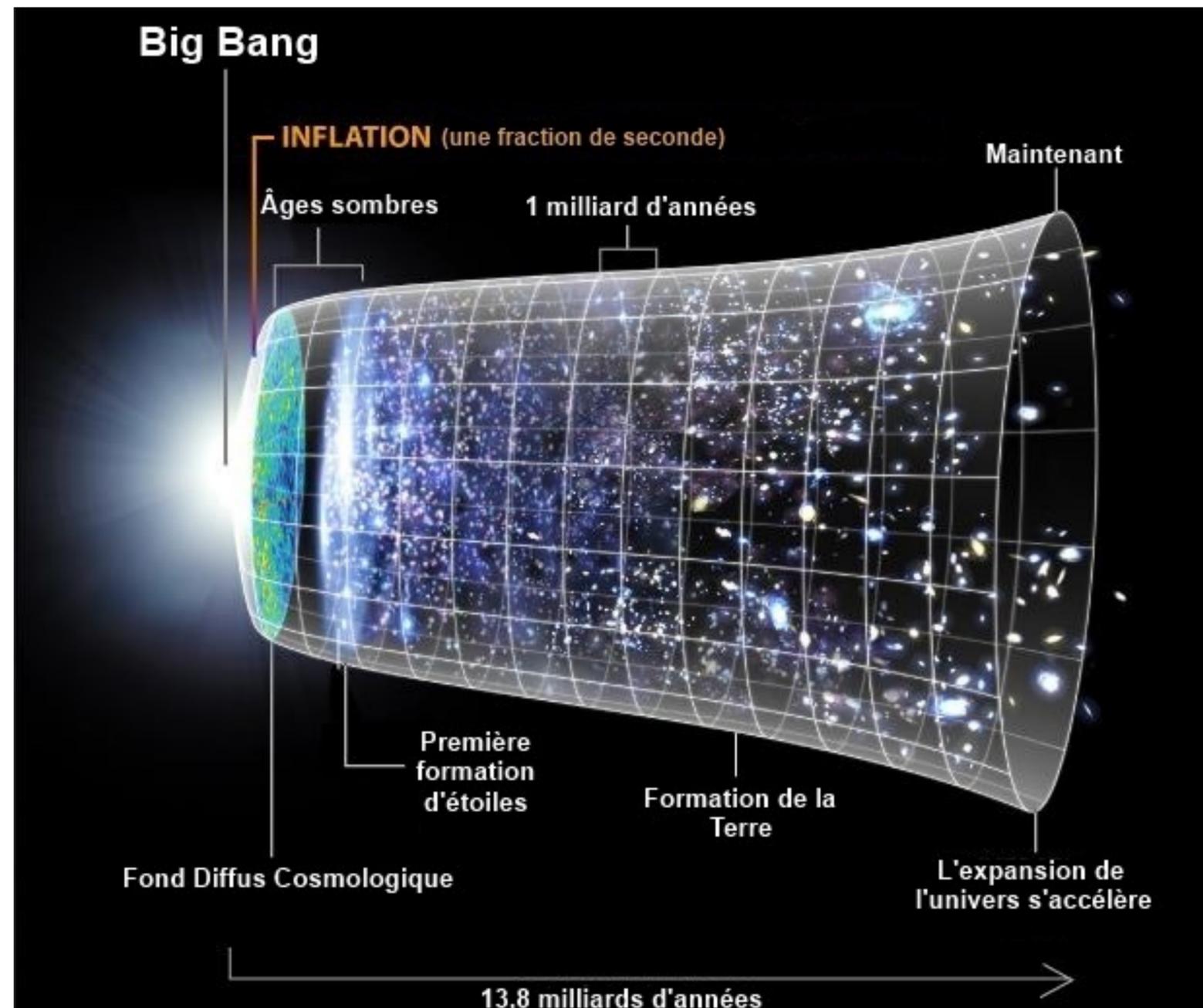
"Cartographie" de l'univers



Univers homogène et isotrope
(principe cosmologique)

Où en est-on ?

Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles



Où en est-on ?

Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles

Observations de Hubble

=> univers en expansion

=> il a donc dû être (très) petit dans le passé
(G. Lemaitre, 1927)

=> Big Bang !
(F. Hoyle, 1949)



G. Lemaitre

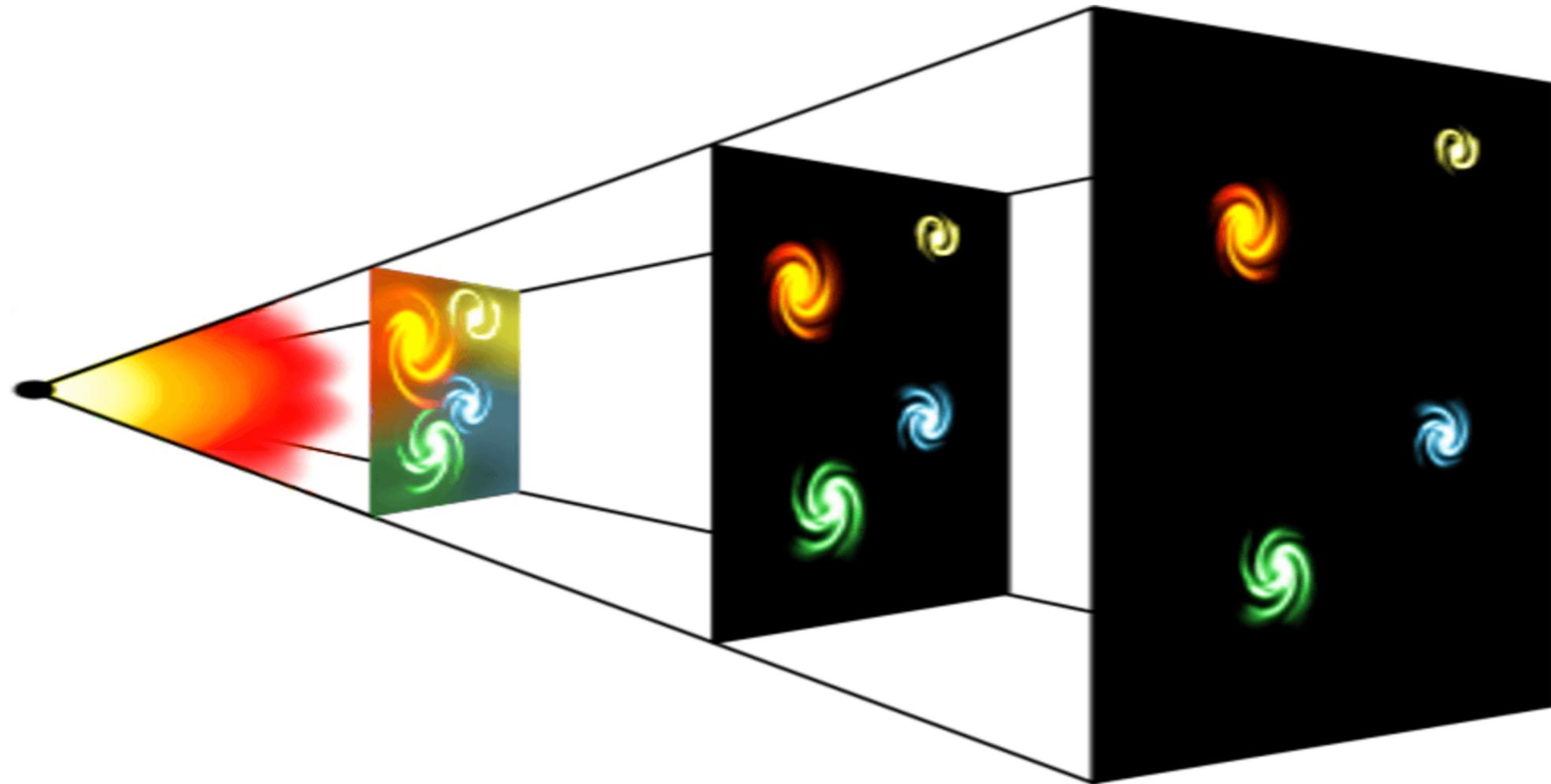


F. Hoyle

Où en est-on ?

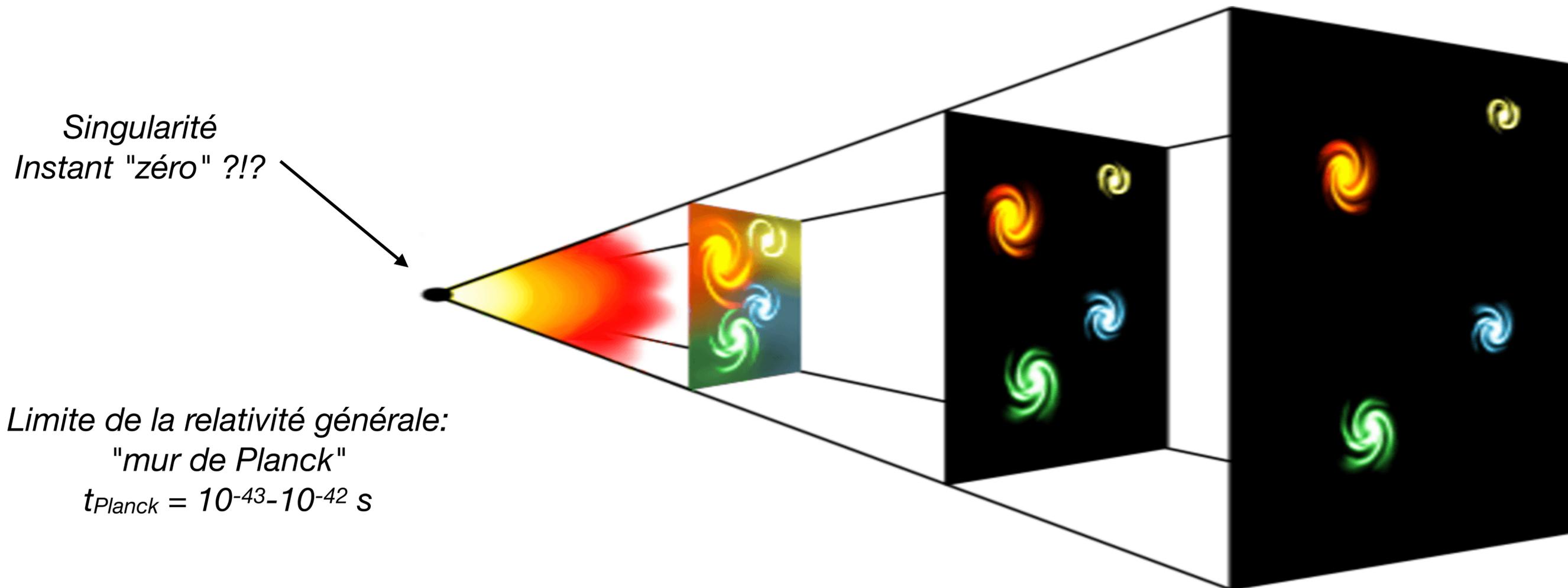
Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles

*Singularité
Instant "zéro" ?!?*



Où en est-on ?

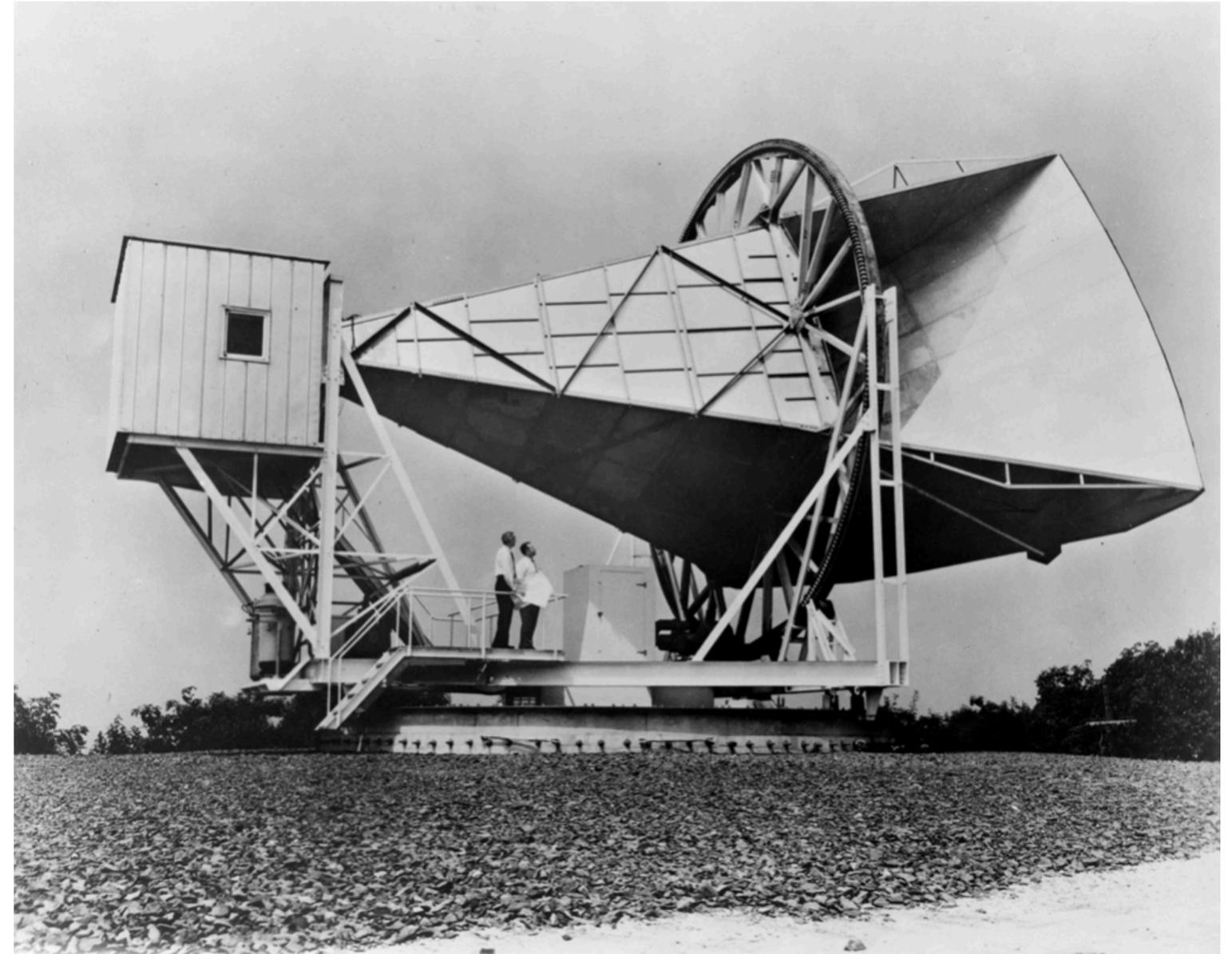
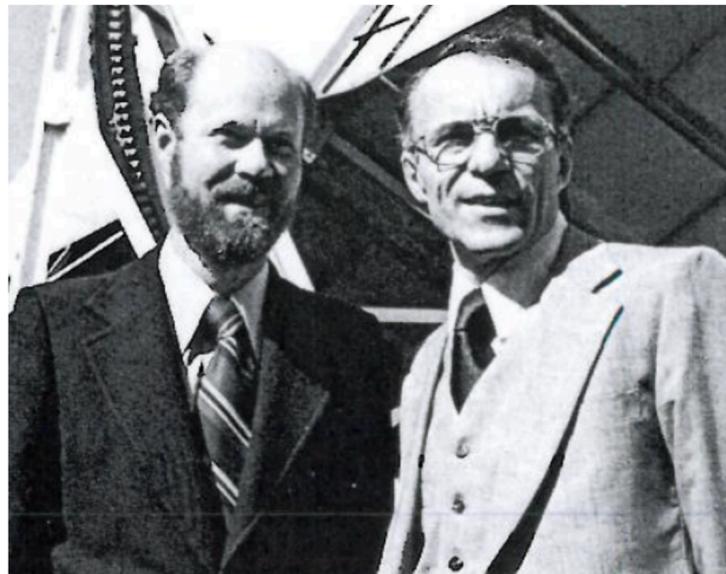
Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles



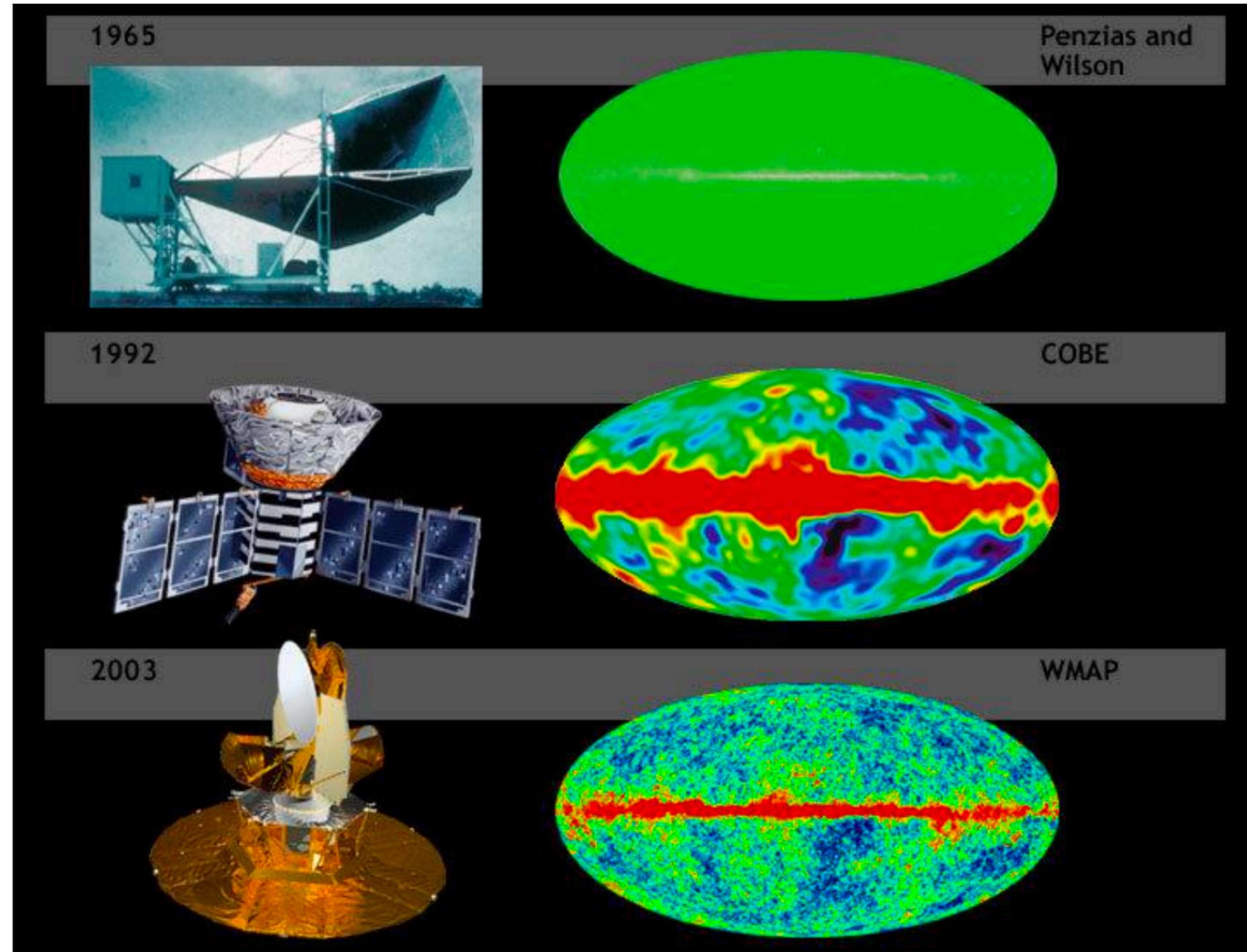
Où en est-on ?

Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles

1964 : A. Penzias et R. Wilson découvre (par hasard ! en testant un radar) le fond diffus cosmologique (prévu par G. Gamow vers 1940)

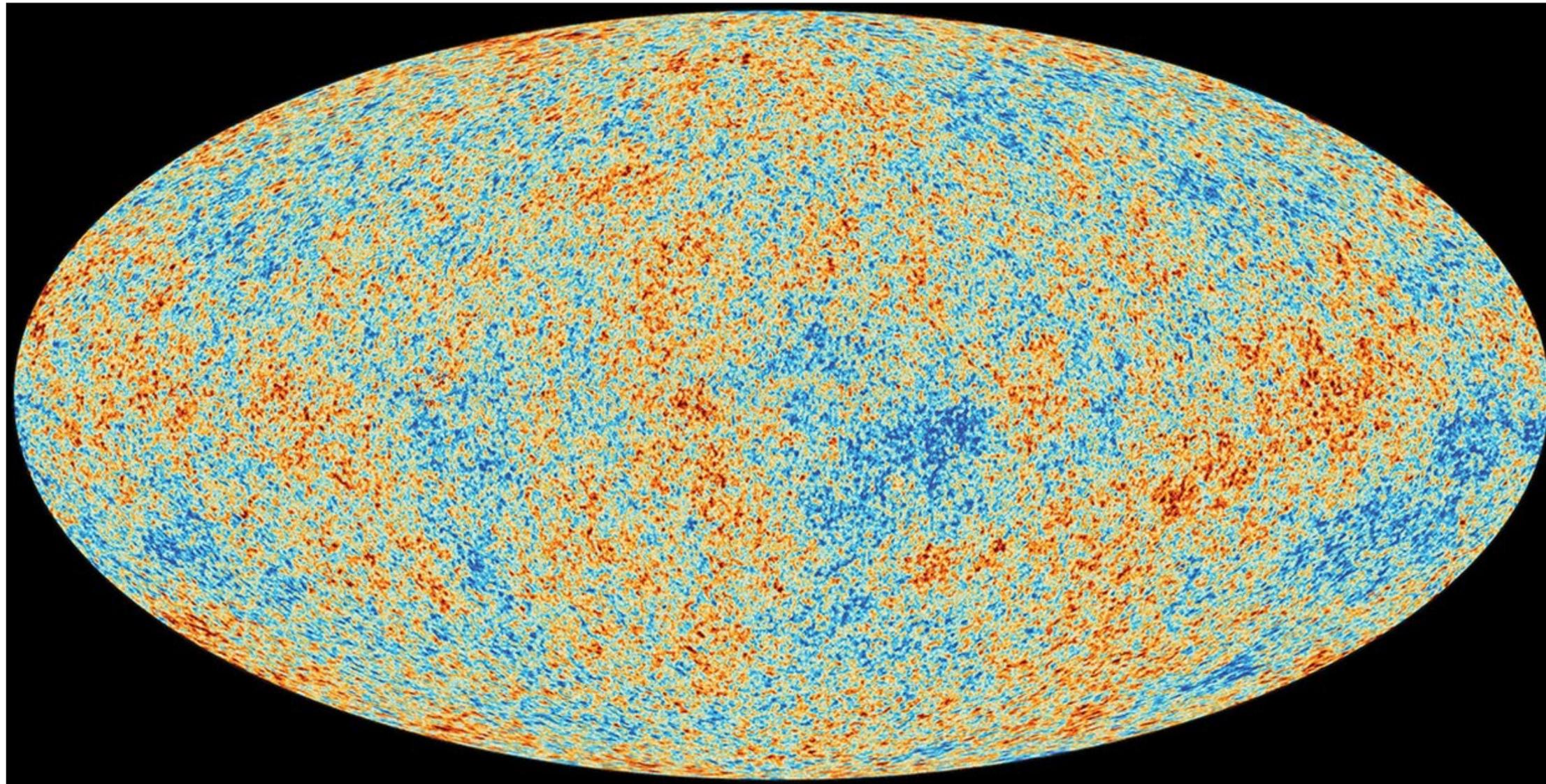


Evolution des conceptions de l'univers



Où en est-on ?

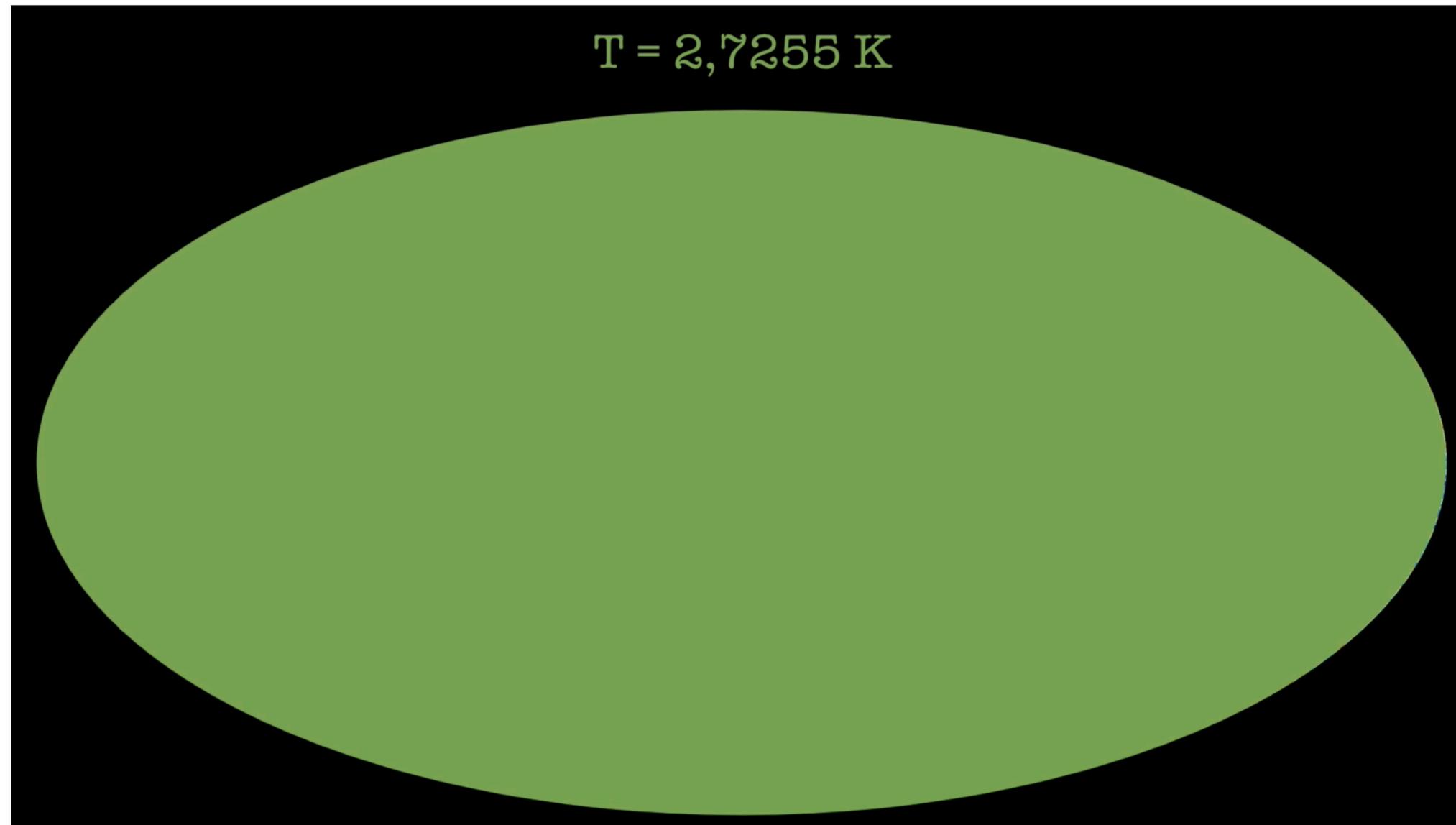
Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles



Carte des fluctuations de température mesurées par Planck

Où en est-on ?

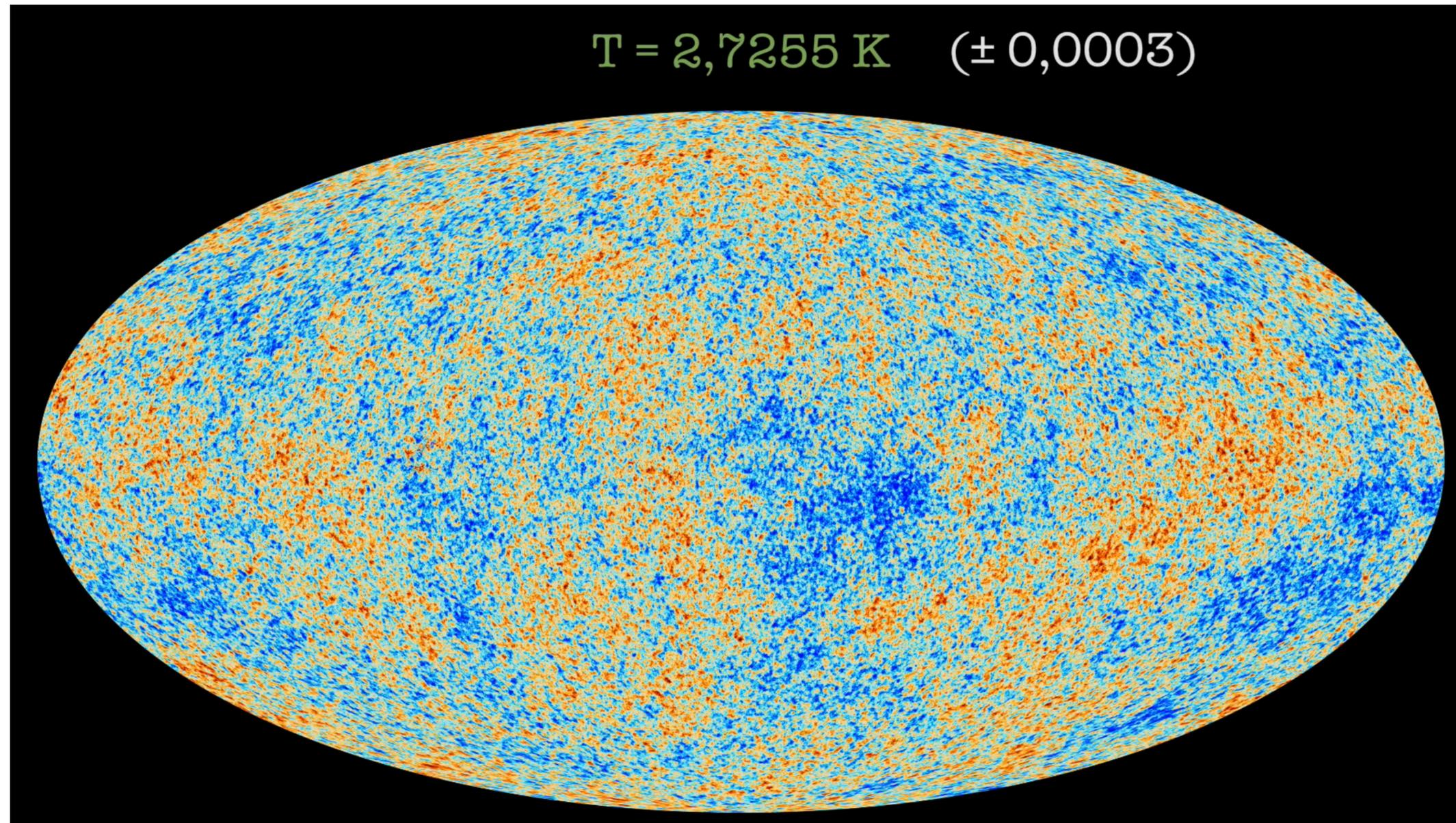
Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles



Carte des fluctuations de température mesurées par Planck

Où en est-on ?

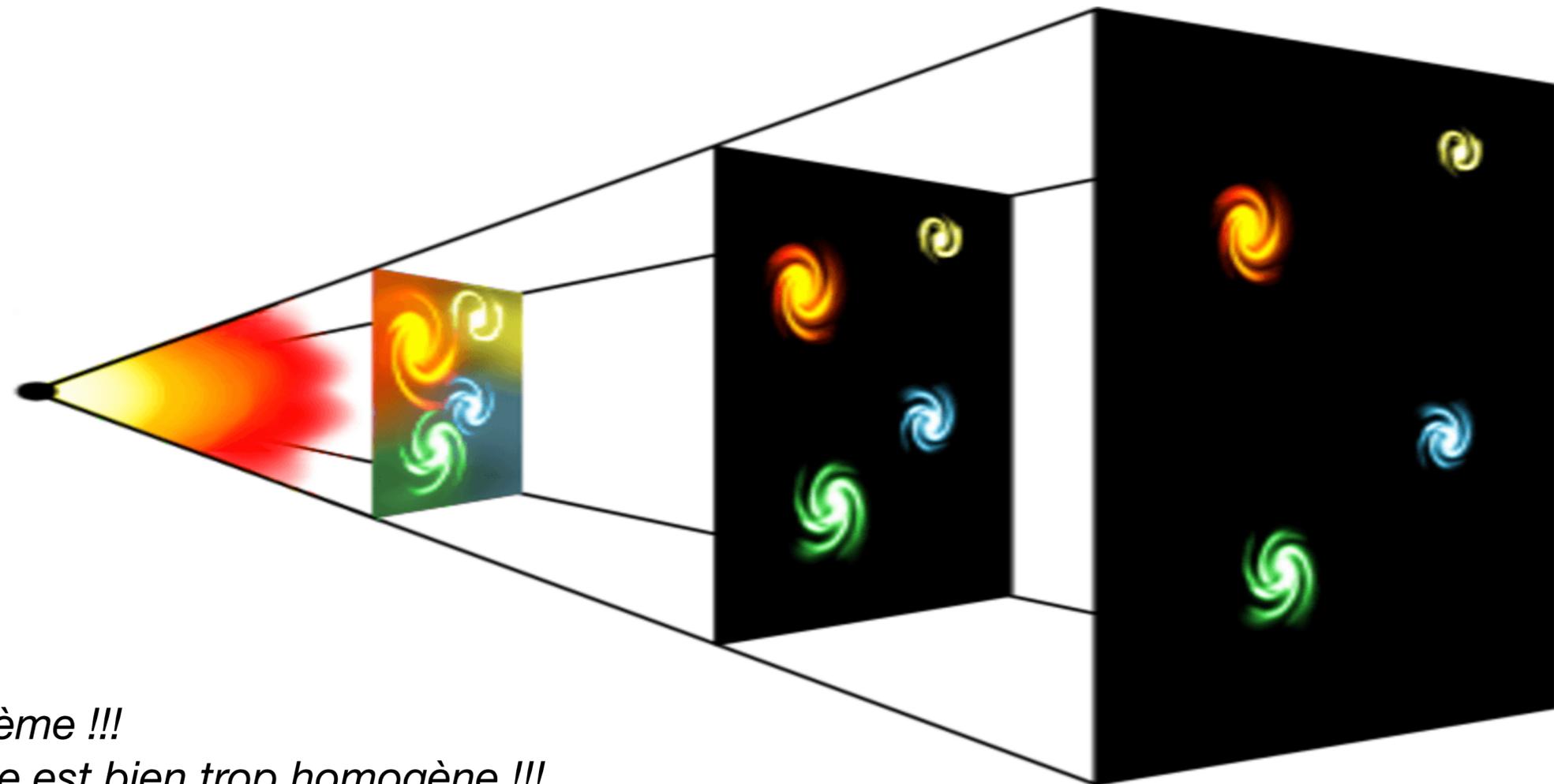
Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles



*Carte des fluctuations de température mesurées par Planck
Ordre de grandeur $\sim 10^{-5}$!!!*

Où en est-on ?

Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles

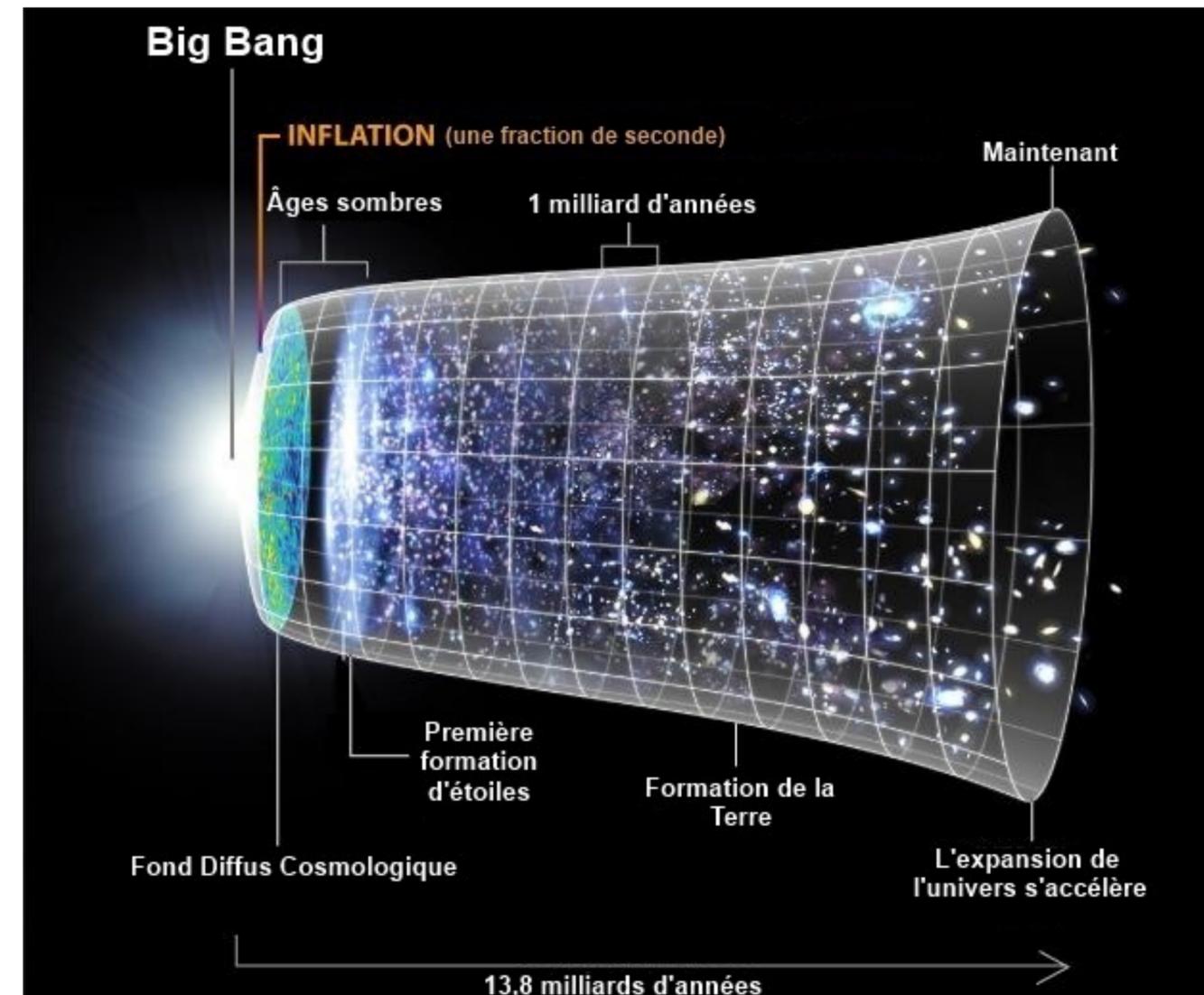
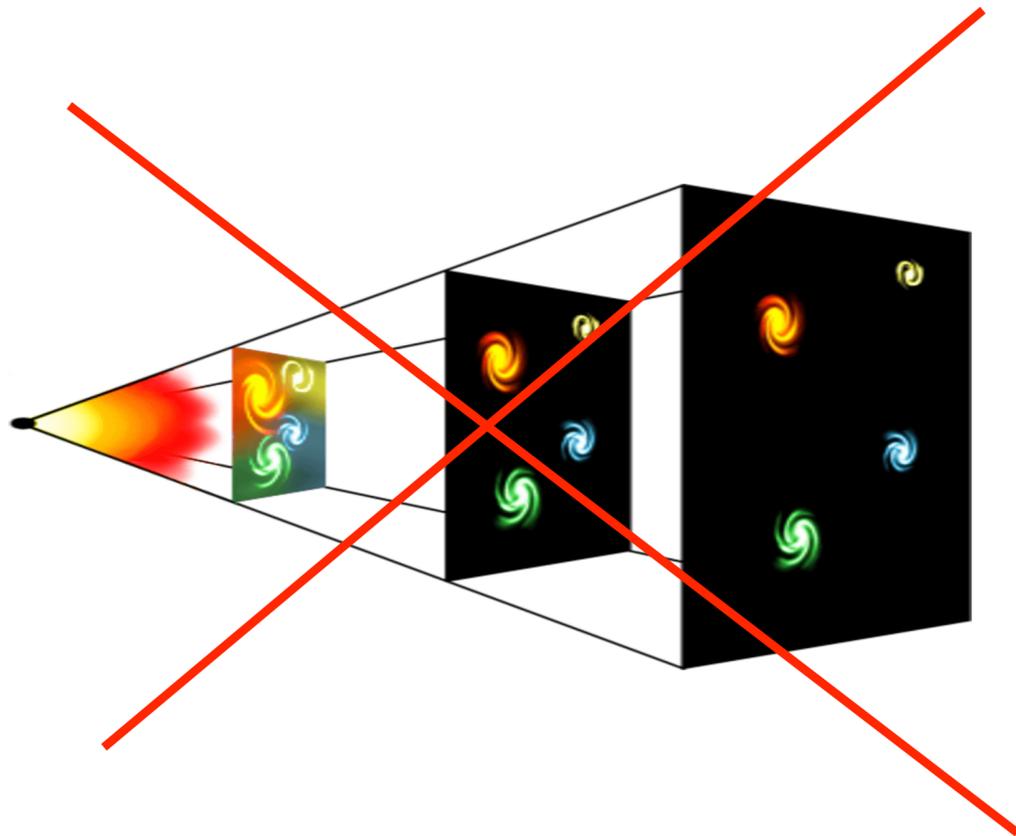


Problème !!!

Le fond diffus cosmologique est bien trop homogène !!!

Où en est-on ?

Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles



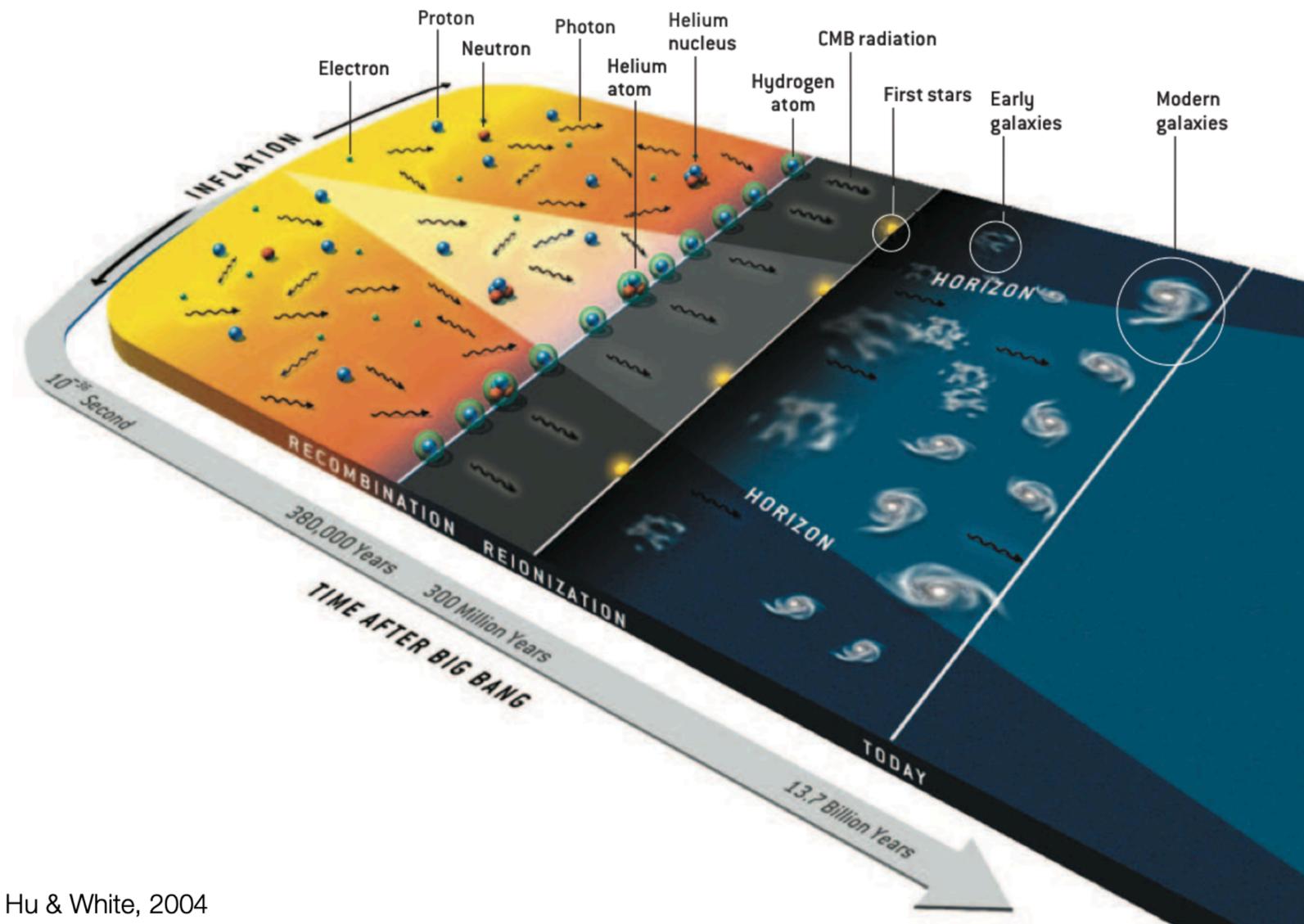
Solution : l'inflation !

La taille de l'univers augmente plusieurs de centaines de fois jusqu'à... $t=10^{-32}$ s !!!

Explique aussi la courbure quasi nulle observée de l'univers

Où en est-on ?

Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles



Hu & White, 2004

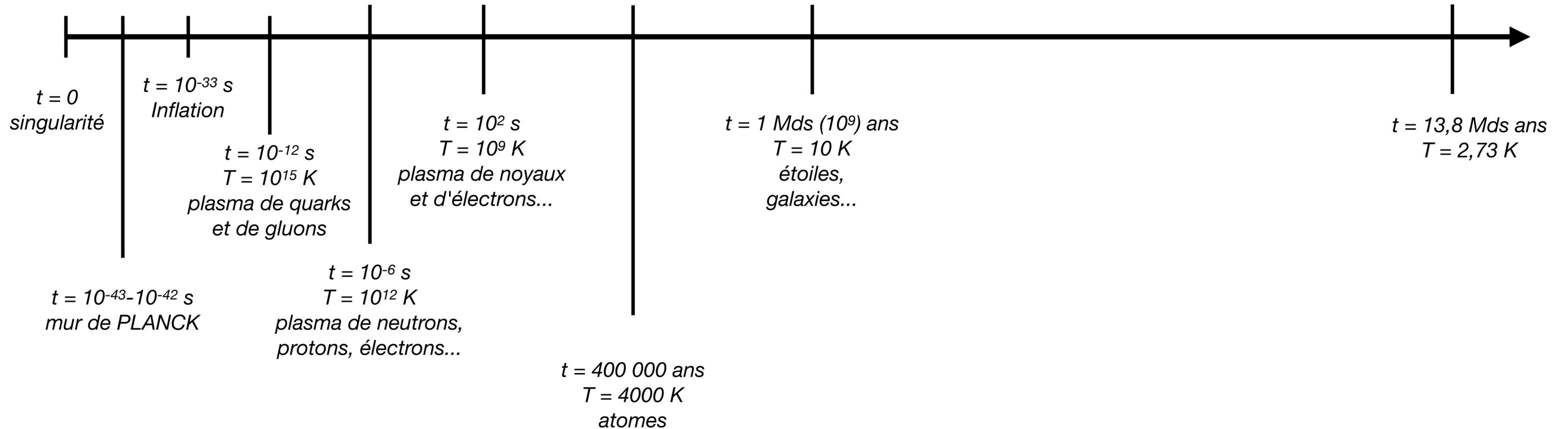
Solution : l'inflation !

La taille de l'univers augmente plusieurs de centaines de fois jusqu'à... $t=10^{-32}$ s !!!

Explique aussi la courbure quasi nulle observée de l'univers

Où en est-on ?

Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles



Le "*redshift*" z (décalage vers le rouge)

Rappel sur le décalage Doppler :

λ_0 = longueur d'onde au repos

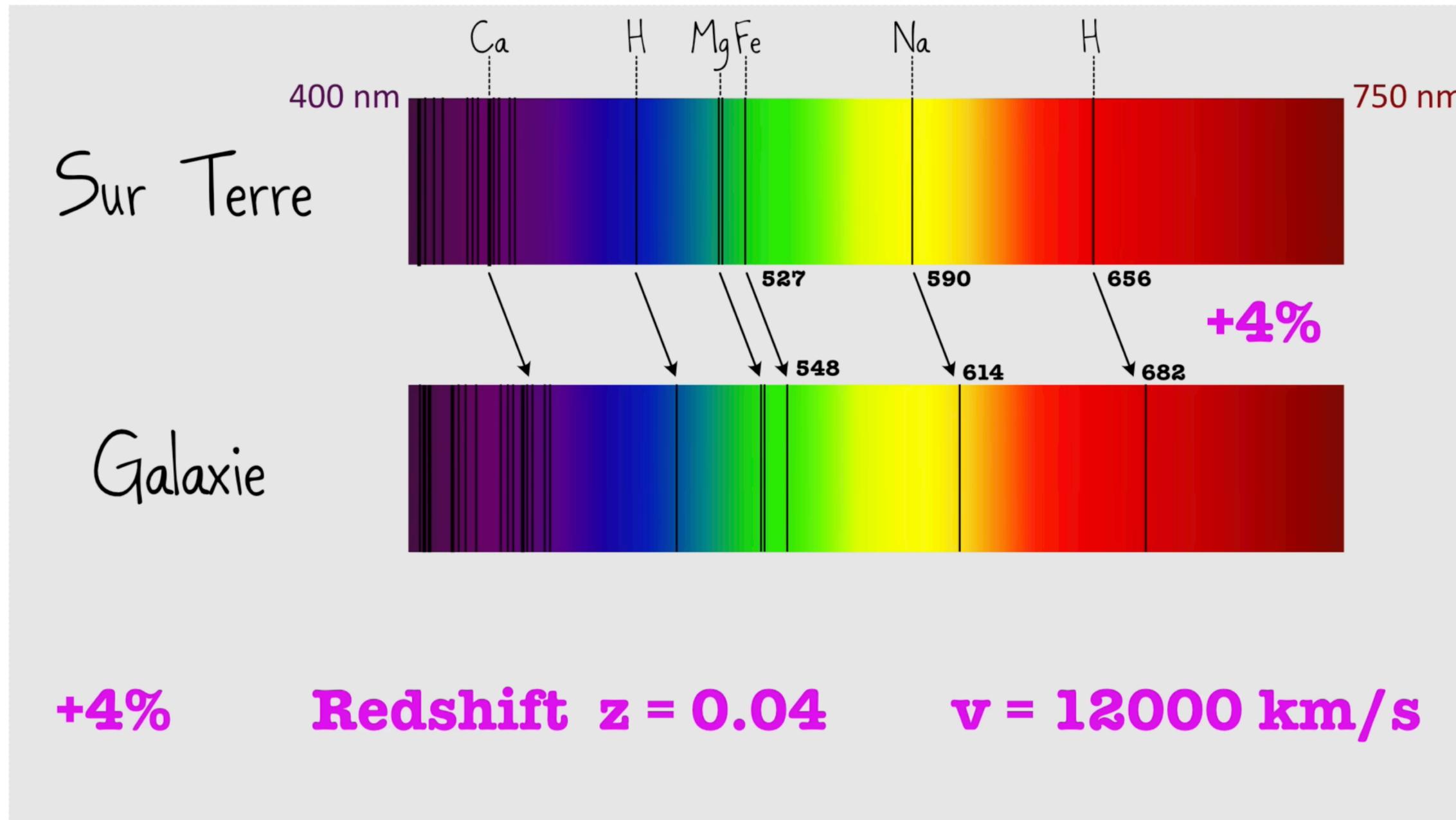
λ_{obs} = longueur d'onde observée d'une onde émise par une source en mouvement

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Si $\lambda_{obs} > \lambda_0 \Rightarrow z > 0$, *redshift* positif = éloignement (dû soit à un mouvement propre, soit à l'expansion de l'univers)

Si $\lambda_{obs} < \lambda_0 \Rightarrow z < 0$, *blueshift* = rapprochement (dû à un mouvement propre de l'objet)

Le "redshift" z (décalage vers le rouge)

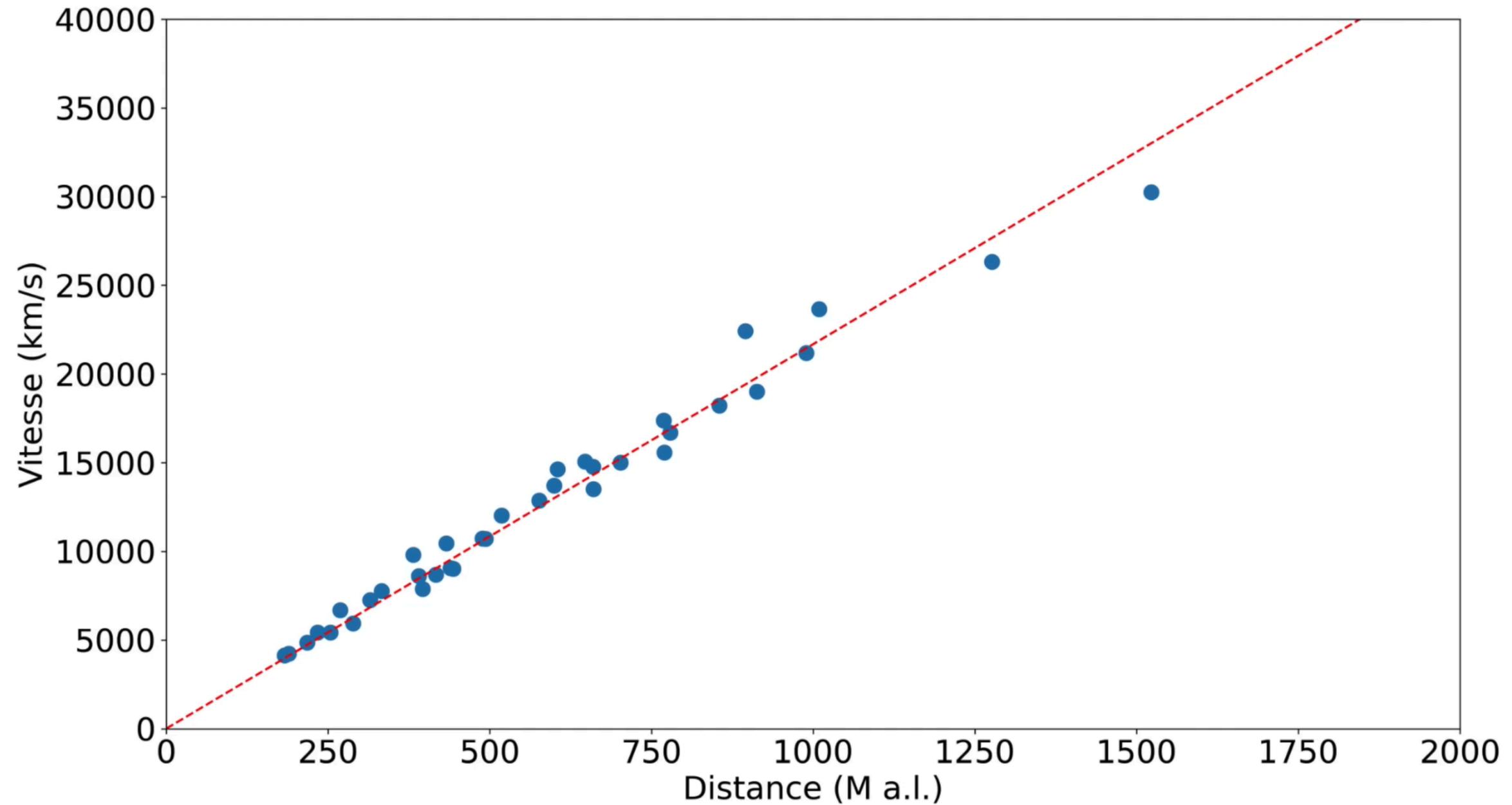


Le "redshift" z (décalage vers le rouge)

Redshift	Percent of Current Age of Universe When the Light Was Emitted (mass = critical density)
0	100 (now)
0.5	54
1.0	35
2.0	19
3.0	13
4.0	9
5.0	7
8.0	4
11.9	2.1
Infinite	0

<https://openstax.org/books/astronomy-2e/pages/29-thinking-ahead>

Loi de Hubble



Estimation de la constante de Hubble à partir de 36 supernovas mesurées par le télescope spatial Hubble

Données : Freedman et al. "Final results from the Hubble Space Telescope key project to measure the Hubble constant." The Astrophysical Journal 553.1 (2001): 47.

Loi de Hubble

Hubble interprète ses mesures sur les galaxies observées comme dues à un décalage Doppler => vitesse d'éloignement des galaxies

$$v = H_0 d$$

The diagram illustrates the Hubble Law equation $v = H_0 d$. Three arrows point from descriptive labels to the variables in the equation: 'vitesse des galaxies' points to v , 'constante de Hubble' points to H_0 , and 'distance des galaxies' points to d .

Loi de Hubble

Hubble interprète ses mesures sur les galaxies observées comme dues à un décalage Doppler => vitesse d'éloignement des galaxies

The diagram shows the equation $v = H_0 d$ centered at the top. Three arrows point from the text below to the variables in the equation: one from 'vitesse des galaxies' to 'v', one from 'km/s/Mpc' to ' H_0 ', and one from 'Mpc' to 'd'.

$$v = H_0 d$$

vitesse des galaxies

km/s/Mpc

Mpc

Loi de Hubble

Hubble interprète ses mesures sur les galaxies observées comme dues à un **décalage Doppler**

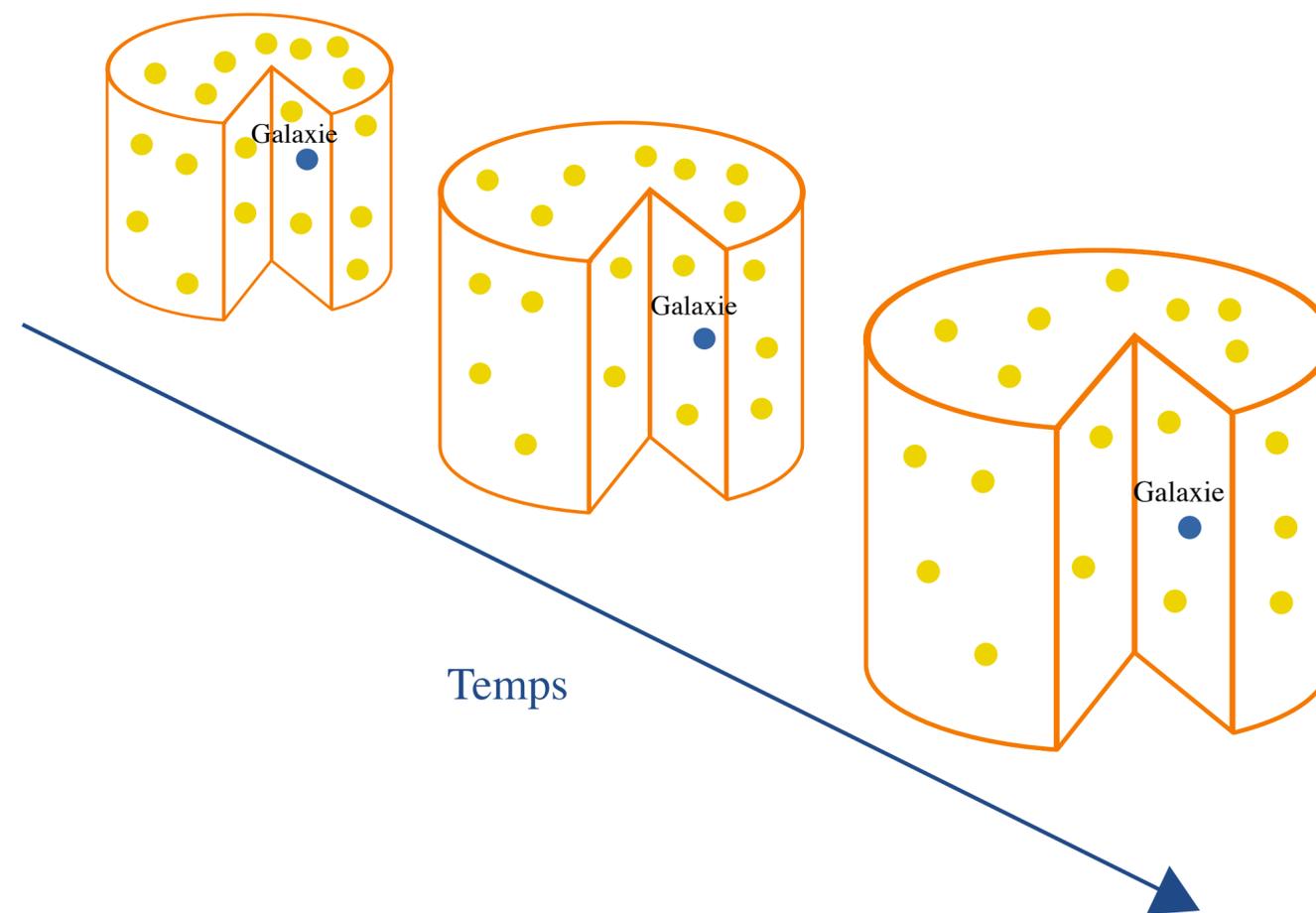
$$v = H_0 d$$

mais cet effet est dû à **l'expansion de l'univers !**

Loi de Hubble

$$v = H_0 d$$

Cet effet est dû à l'**expansion de l'univers** !



Loi de Hubble

$$v = H_0 d$$

Mission Planck : $H_0 = 67,4$ km/s/Mpc

Mesures galaxies proches ou quasars lointains : $H_0 = 73$ km/s/Mpc

=> "tension" sur la constante de Hubble

=> modèle cosmologique standard à revoir ?

ou

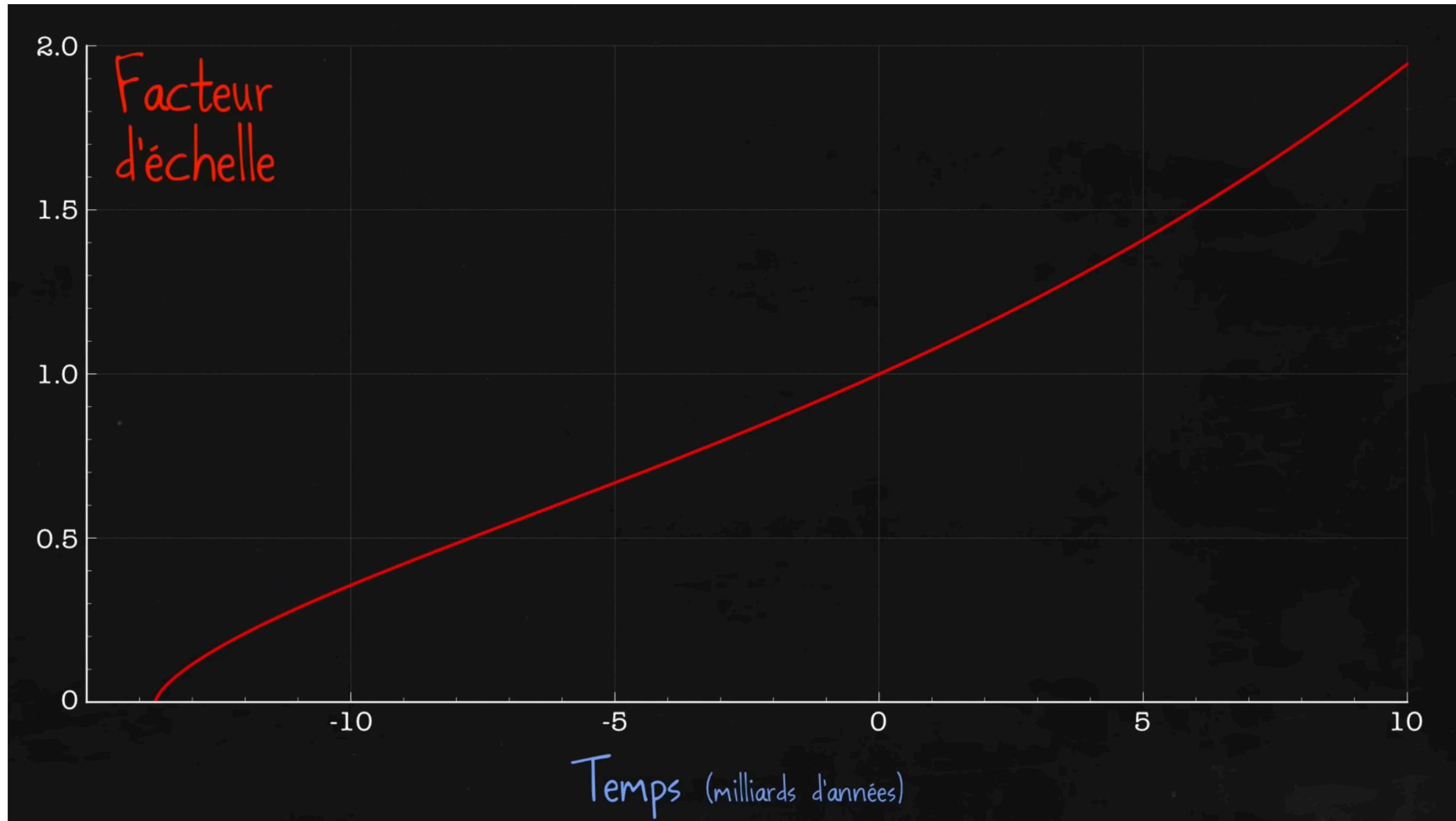
=> mesures à revoir ?

Constante de Hubble et facteur d'échelle

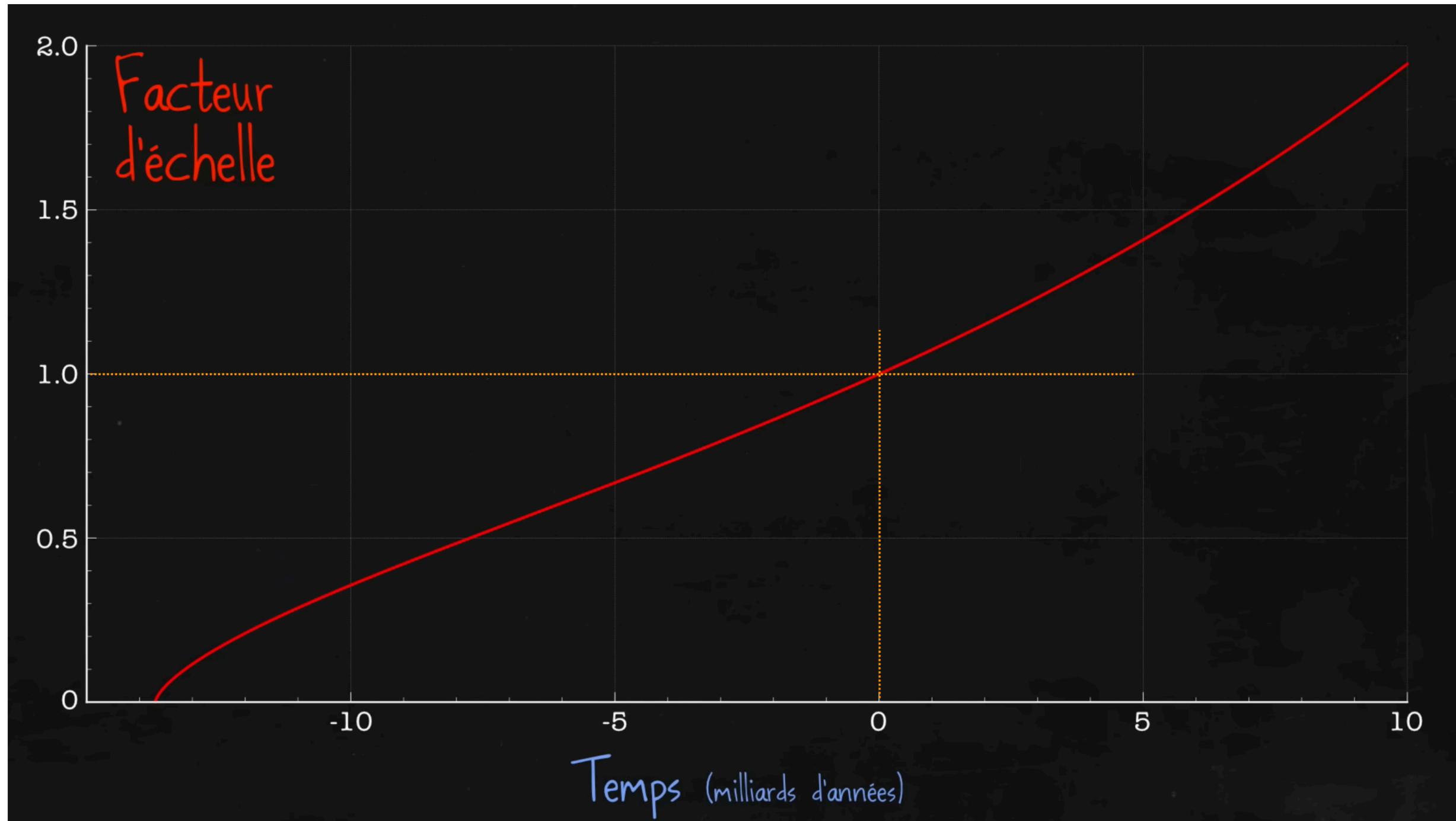
Facteur d'échelle a = quantifie les variations de distances dues à l'expansion :

- on choisit un moment de référence (maintenant par ex) t_0
- à t_0 la distance entre deux objets est $\ell = a(t_0)\ell_0 = a_0\ell_0 = \ell_0$ si on fixe $a_0 = 1$
- à un moment t , $\ell = a(t)\ell_0$

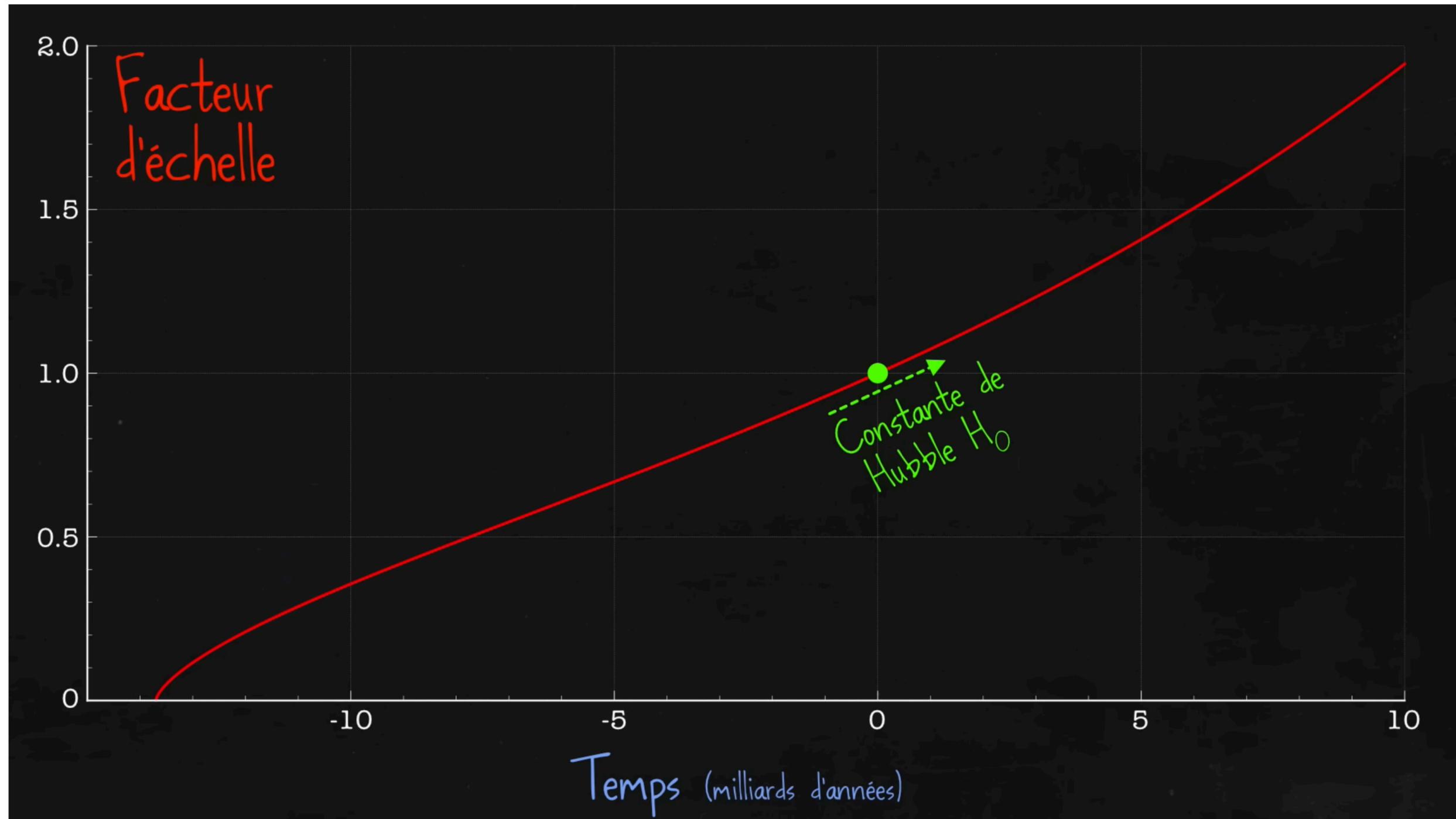
Constante (?) de Hubble



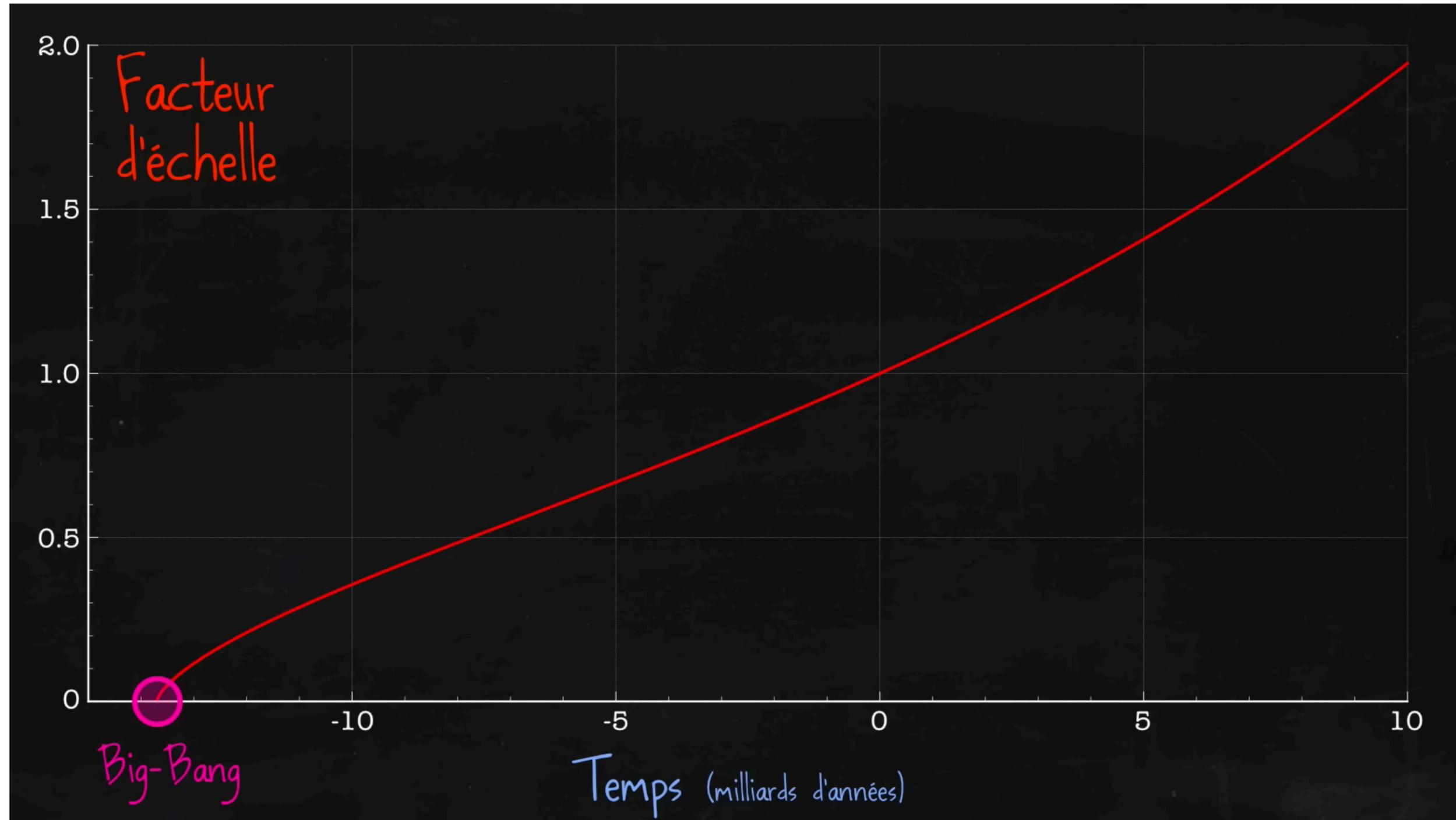
Constante (?) de Hubble



Constante (?) de Hubble

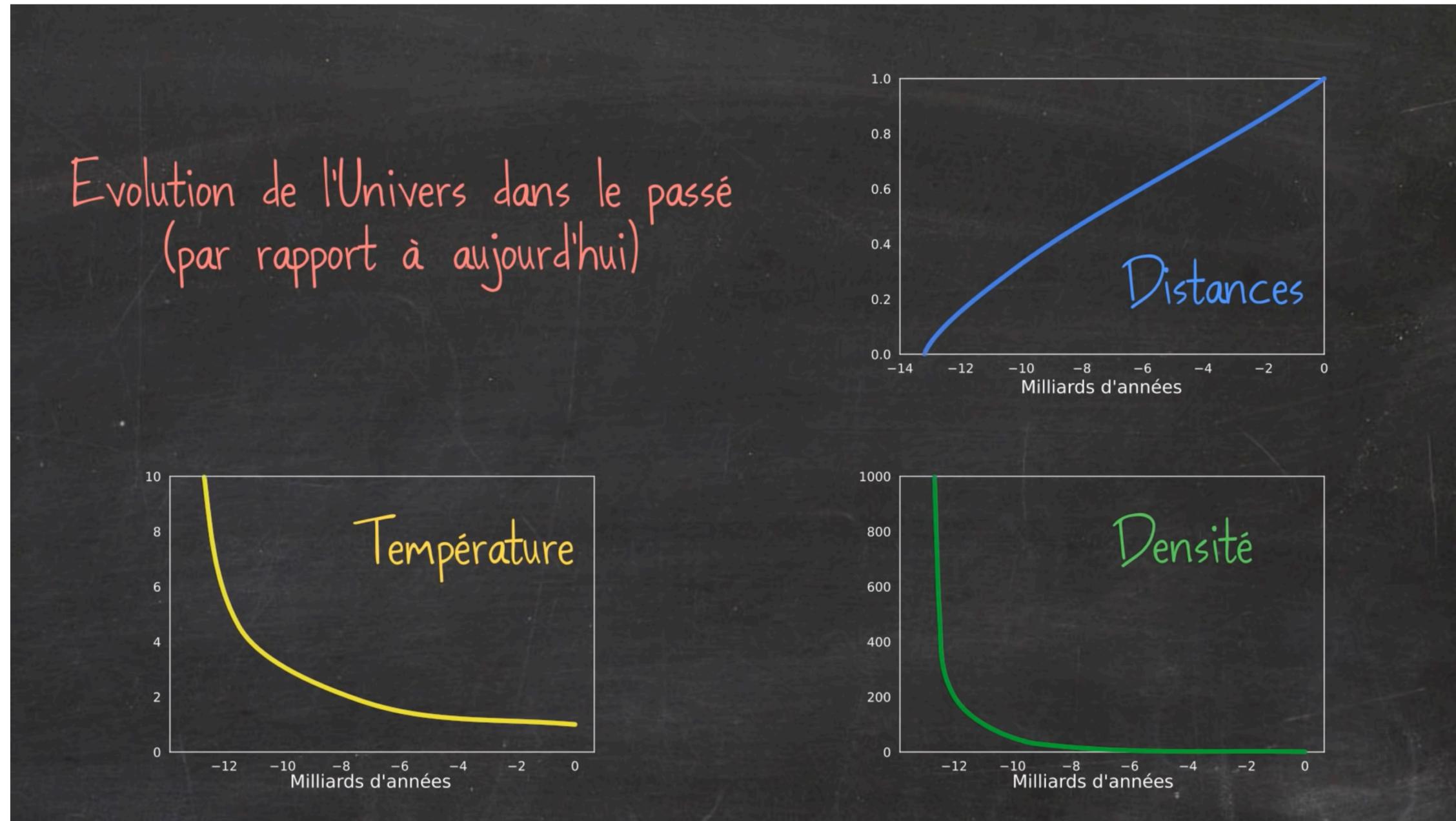


Constante (?) de Hubble



Où en est-on ?

Chronologie de l'univers selon les connaissances (!) actuelles



Constante de Hubble et facteur d'échelle

$$v = Hd$$

$$d(t) = a(t)d_0$$

$$v = \frac{d}{dt}(d)$$

Constante de Hubble et facteur d'échelle

$$v = H\ell$$

$$\ell(t) = a(t)\ell_0$$

$$v = \frac{d\ell}{dt} = \frac{d(a(t)\ell_0)}{dt} = \ell_0 \frac{da}{dt} = \dot{a}\ell_0$$

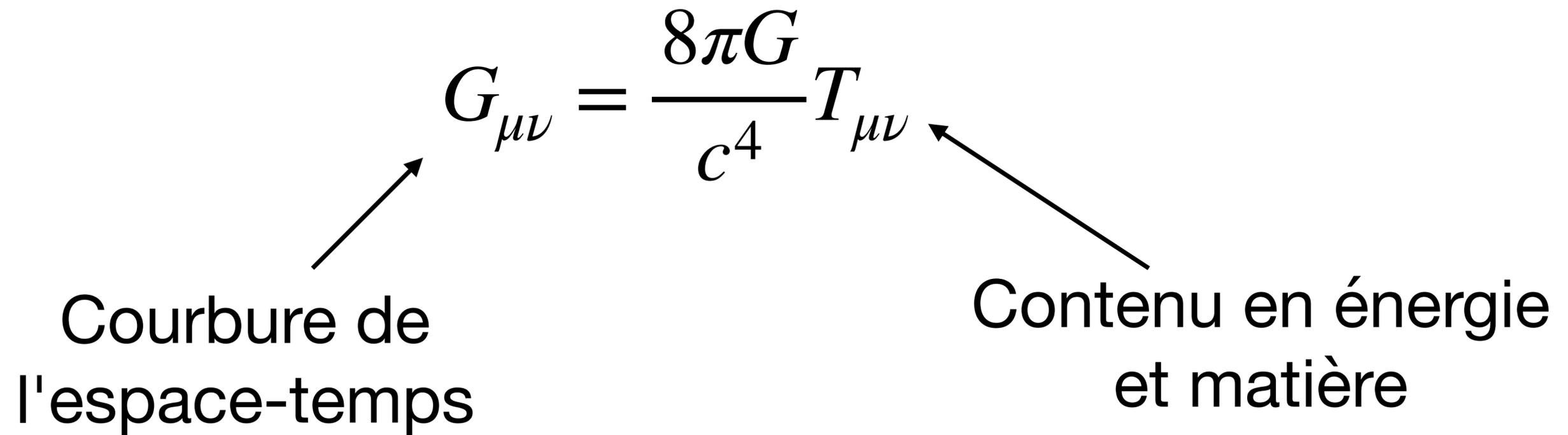
$$\Rightarrow H = \frac{v}{\ell} = \frac{\dot{a}\ell_0}{a\ell_0} = \frac{\dot{a}}{a}$$

Equation d'Einstein

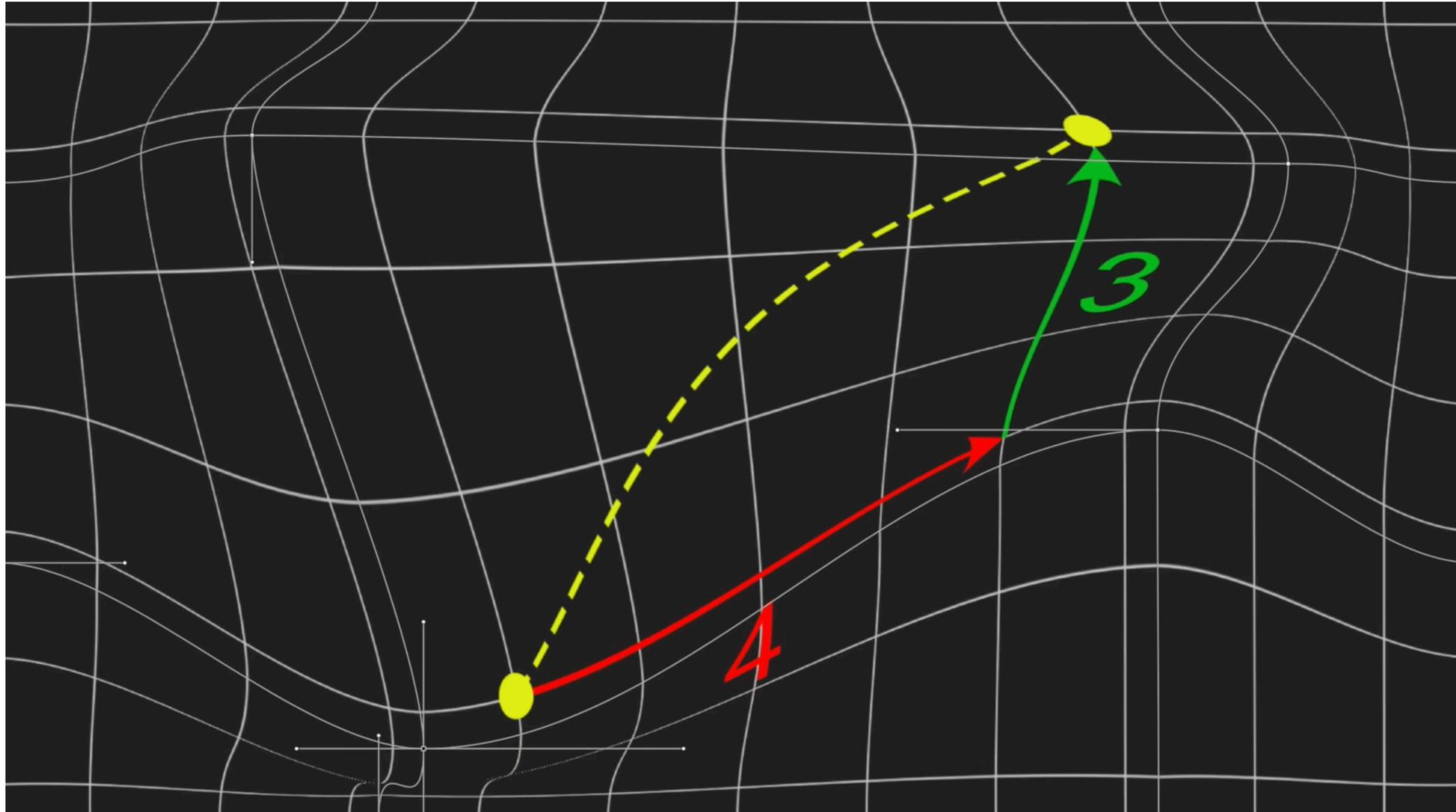
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Courbure de l'espace-temps

Contenu en énergie et matière

The diagram illustrates the Einstein equation, $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$. Two arrows originate from descriptive text below the equation. One arrow points from the text 'Courbure de l'espace-temps' to the $G_{\mu\nu}$ term on the left side of the equation. The other arrow points from the text 'Contenu en énergie et matière' to the $T_{\mu\nu}$ term on the right side of the equation.

Equation d'Einstein



Univers courbe : $d = \sqrt{g_x 4^2 + g_y 3^2}$

Equation d'Einstein

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k_0}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{\Lambda}{3}$$

Énergie sombre

$k_0 = 1 \Rightarrow$ courbure > 0

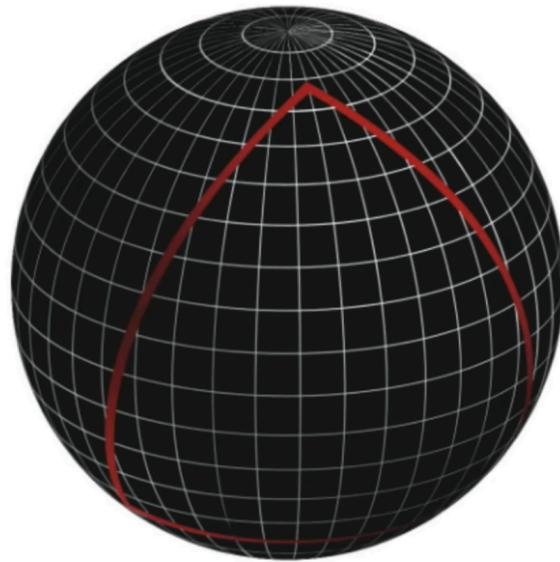
$k_0 = 0 \Rightarrow$ univers plat

$k_0 = -1 \Rightarrow$ courbure < 0

Matière ordinaire
et matière sombre

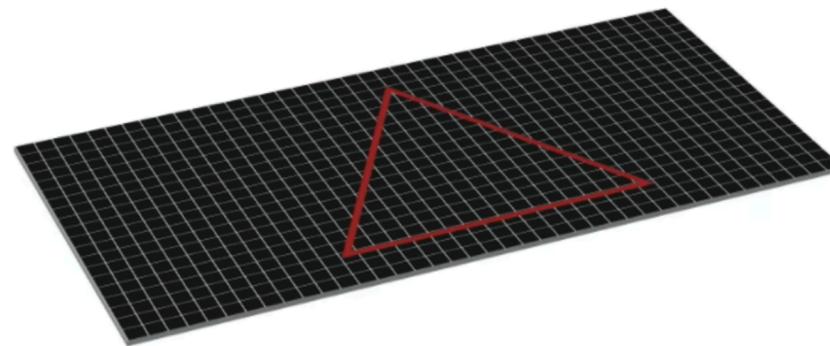
Equation d'Einstein

Courbure spatiale
positive



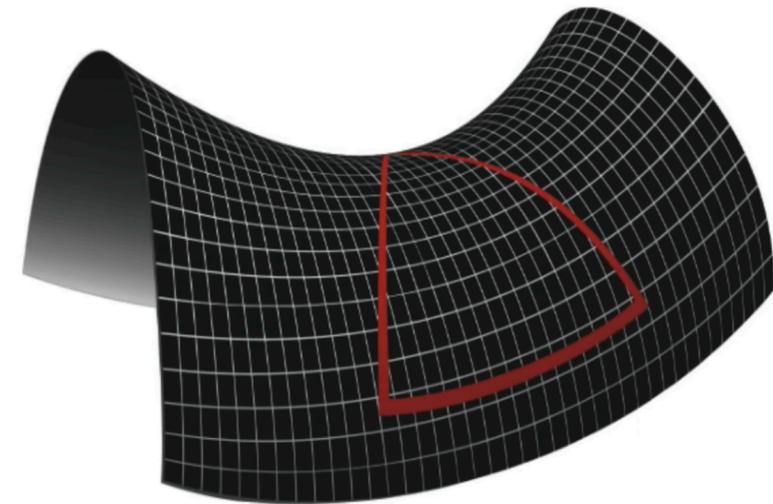
Univers
sphérique fini

Courbure spatiale
nulle



Univers
plat infini

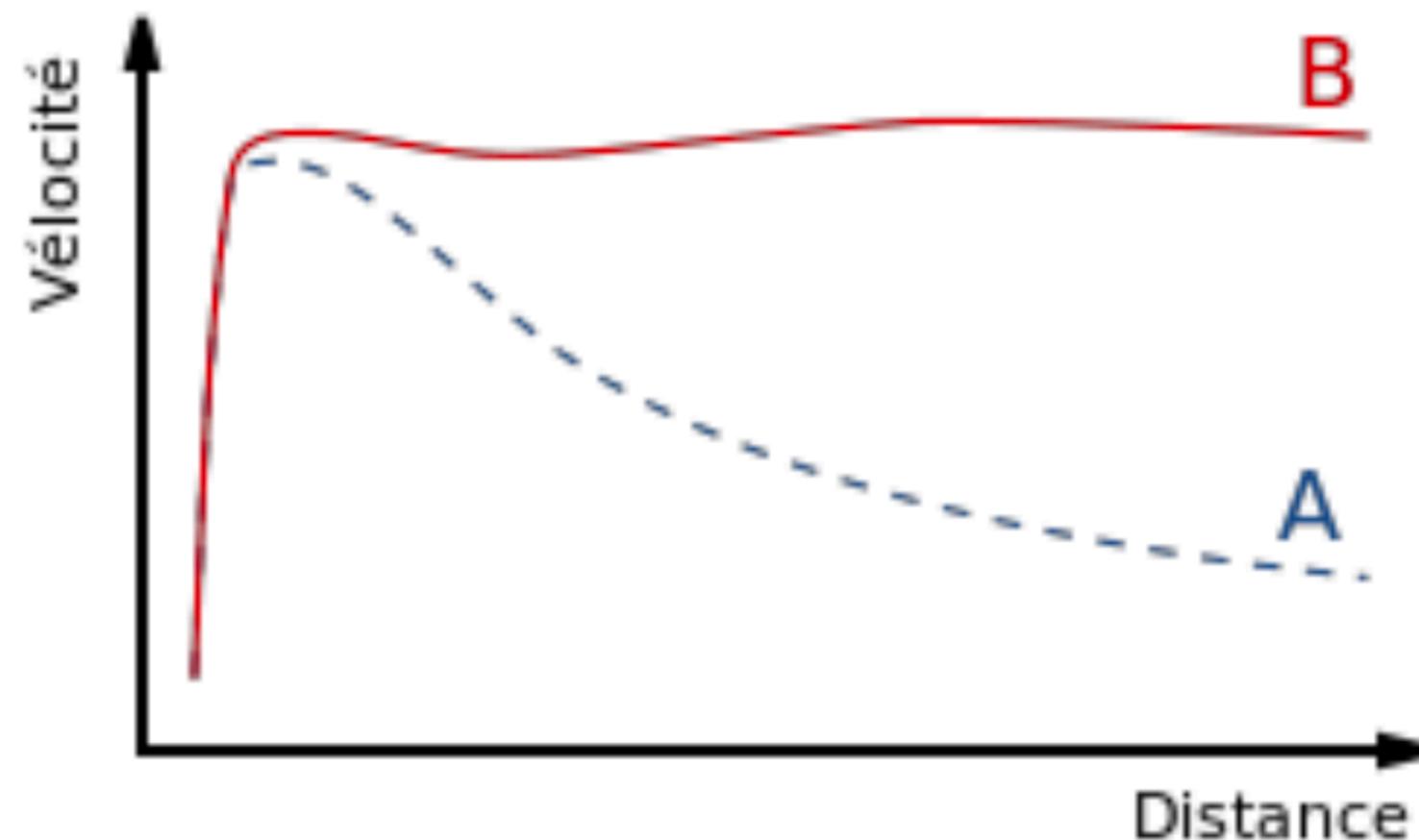
Courbure spatiale
négative



Univers
hyperbolique infini

La matière noire

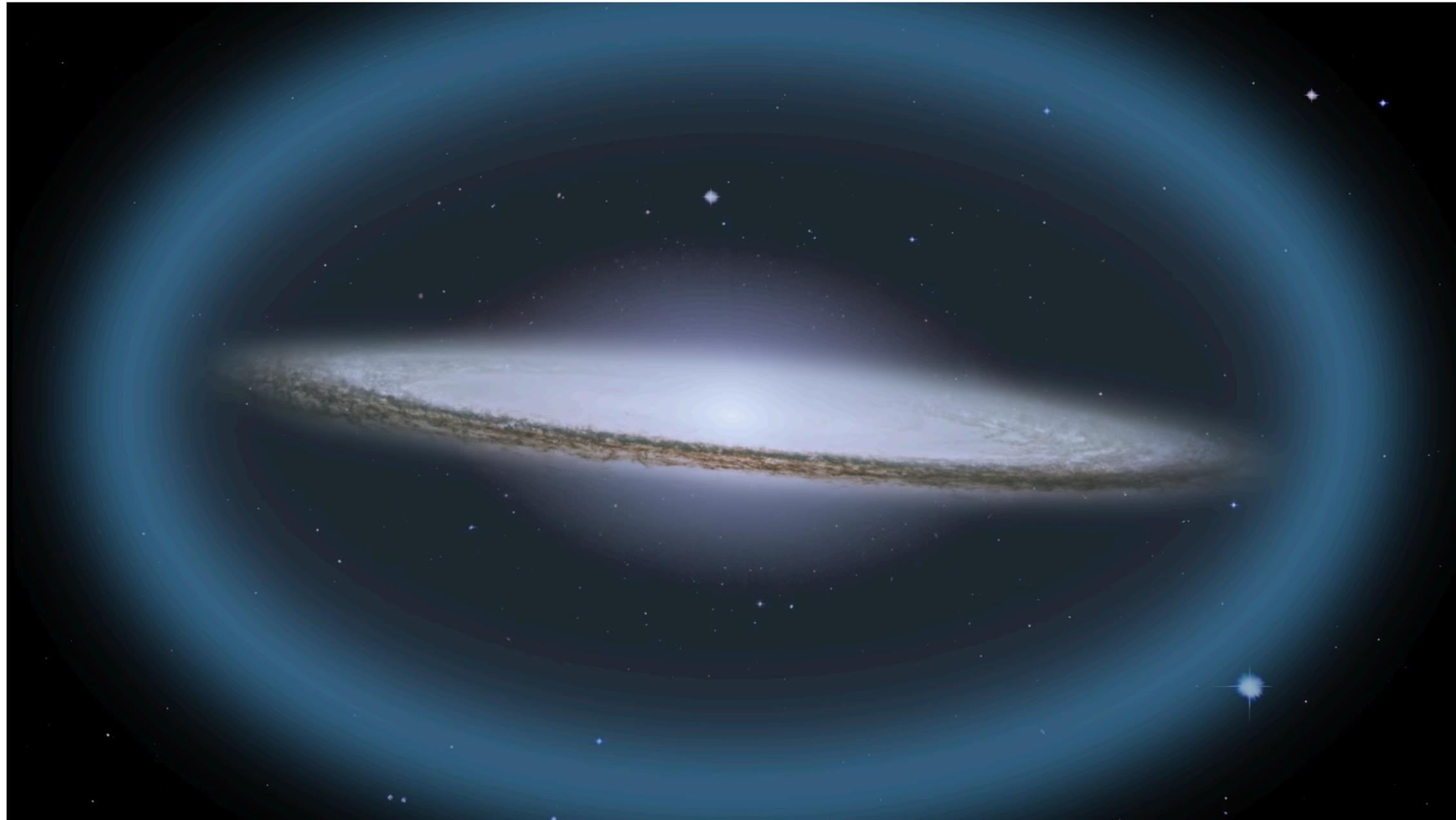
Vitesse de rotation des étoiles dans une galaxie



B : profil de vitesse observé

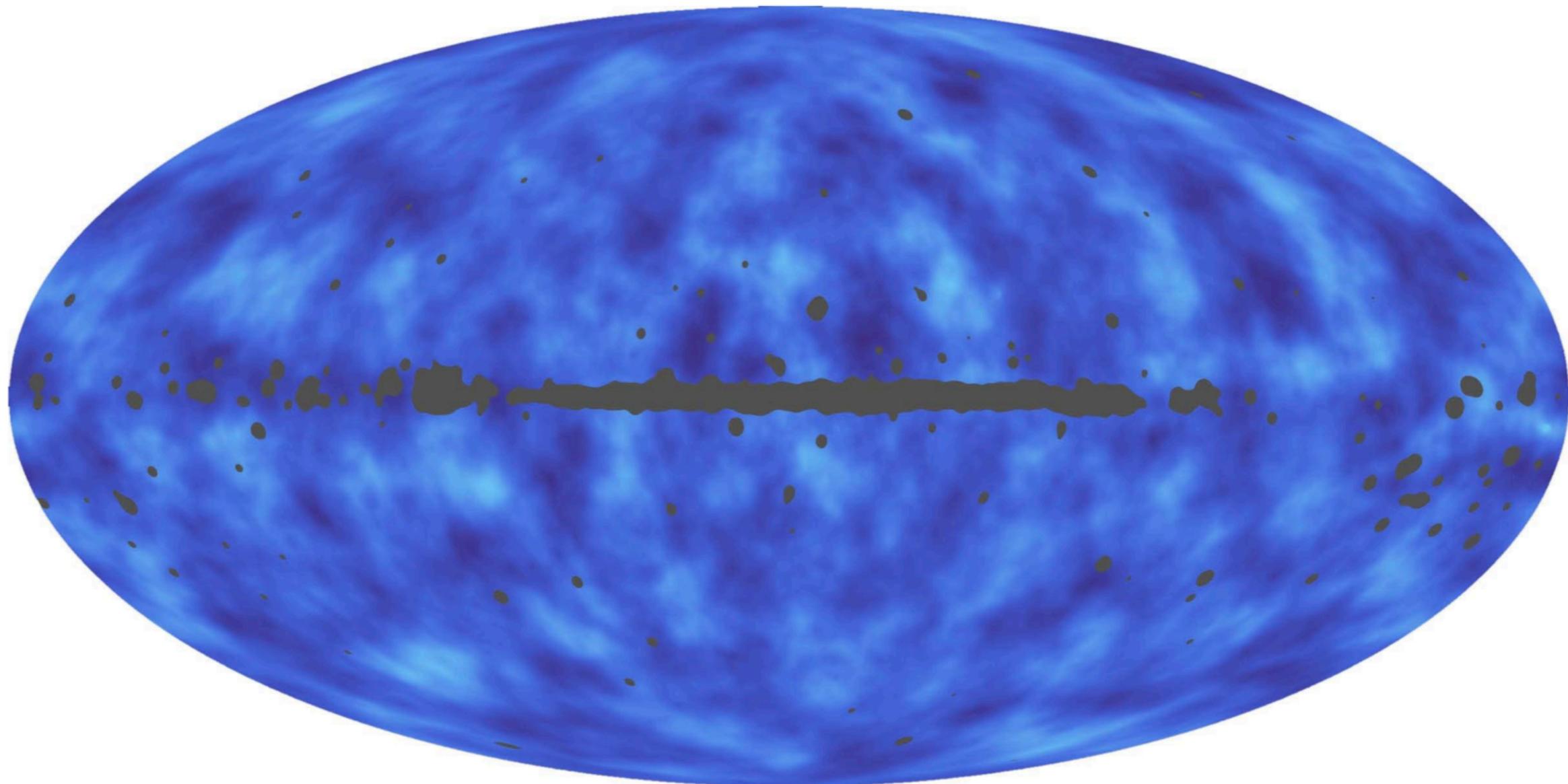
A : profil de vitesse attendu vu les masses estimées dans la galaxie

La matière noire

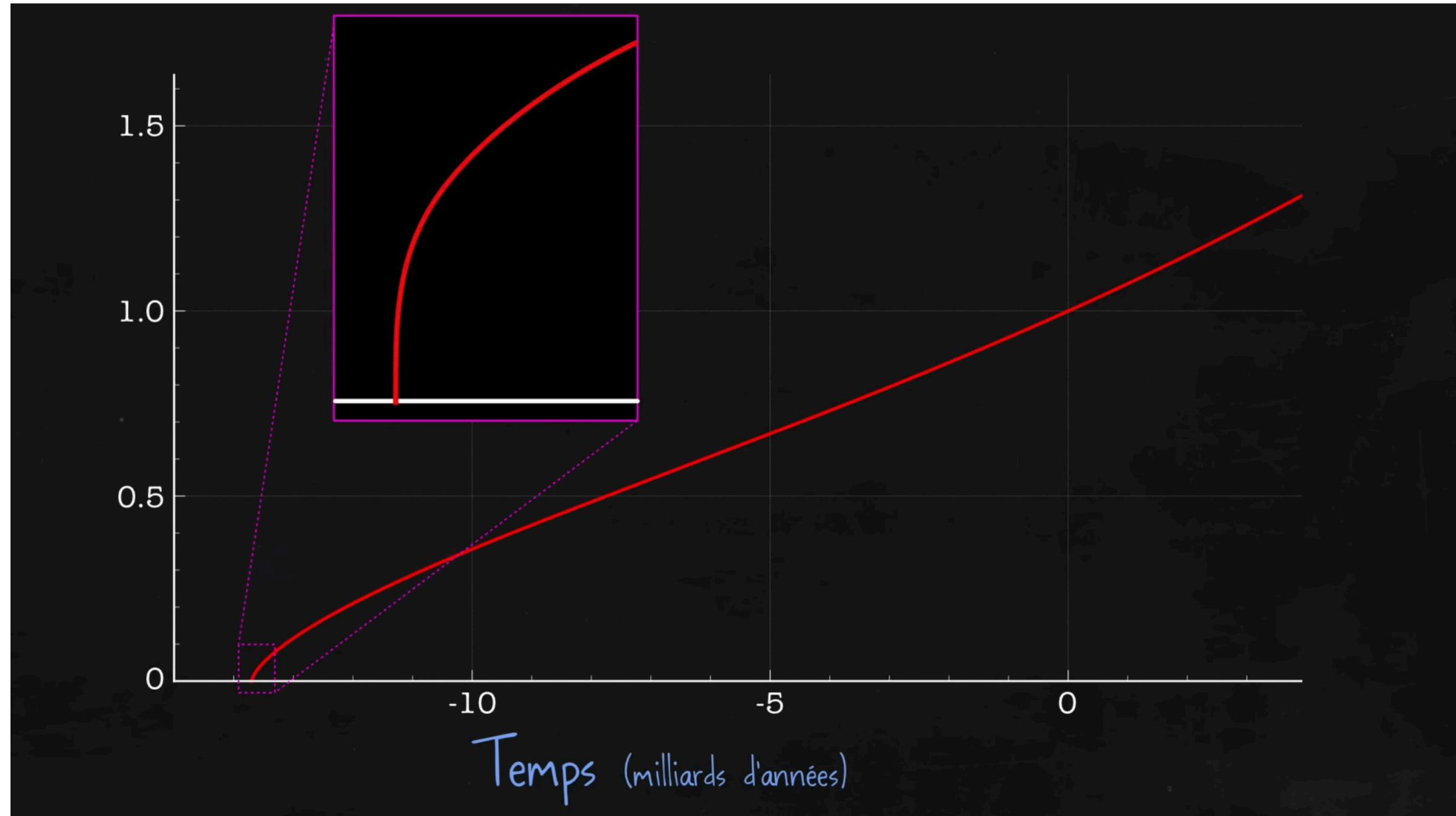


La matière noire

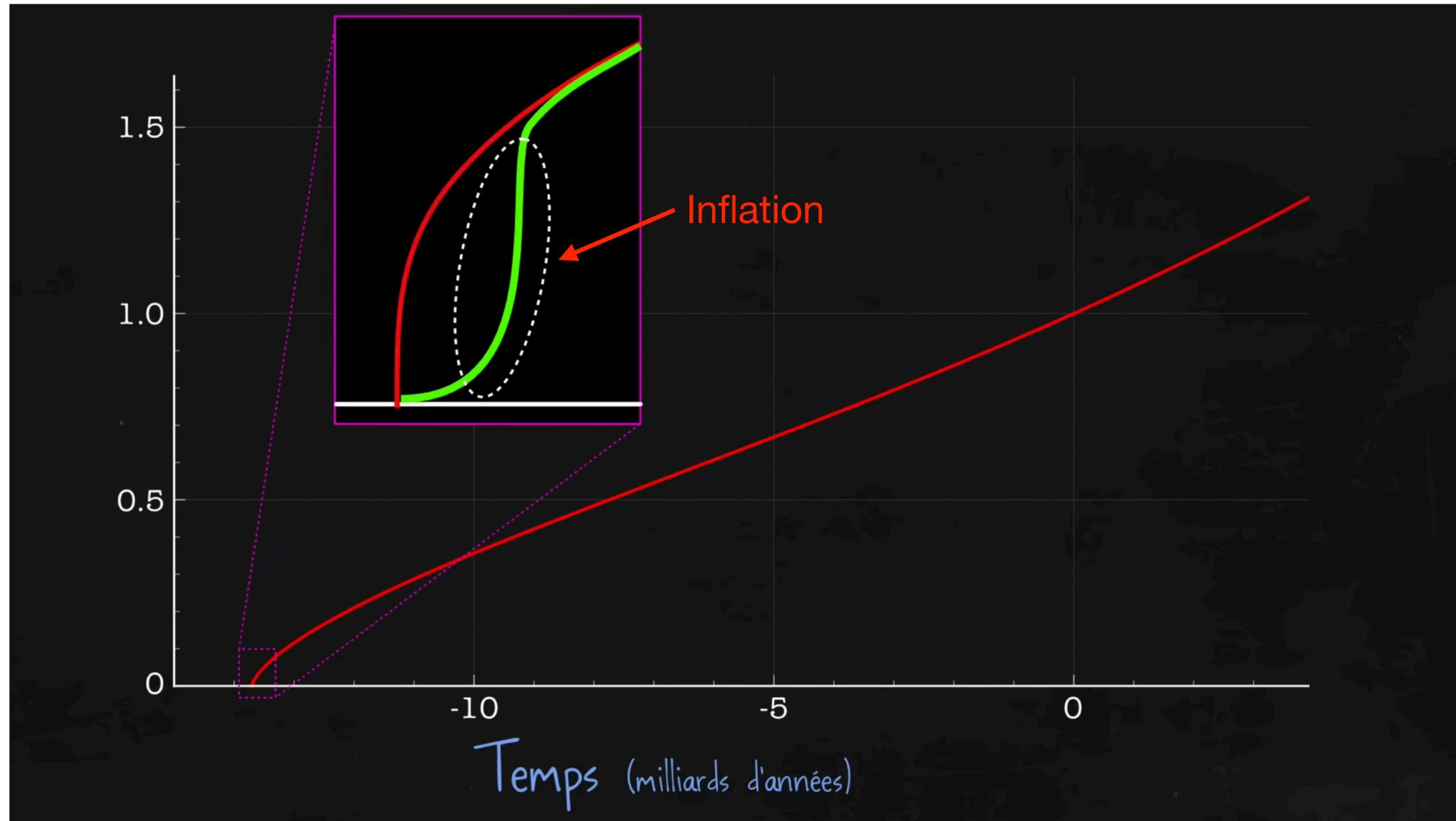
Carte de la matière noire selon Planck



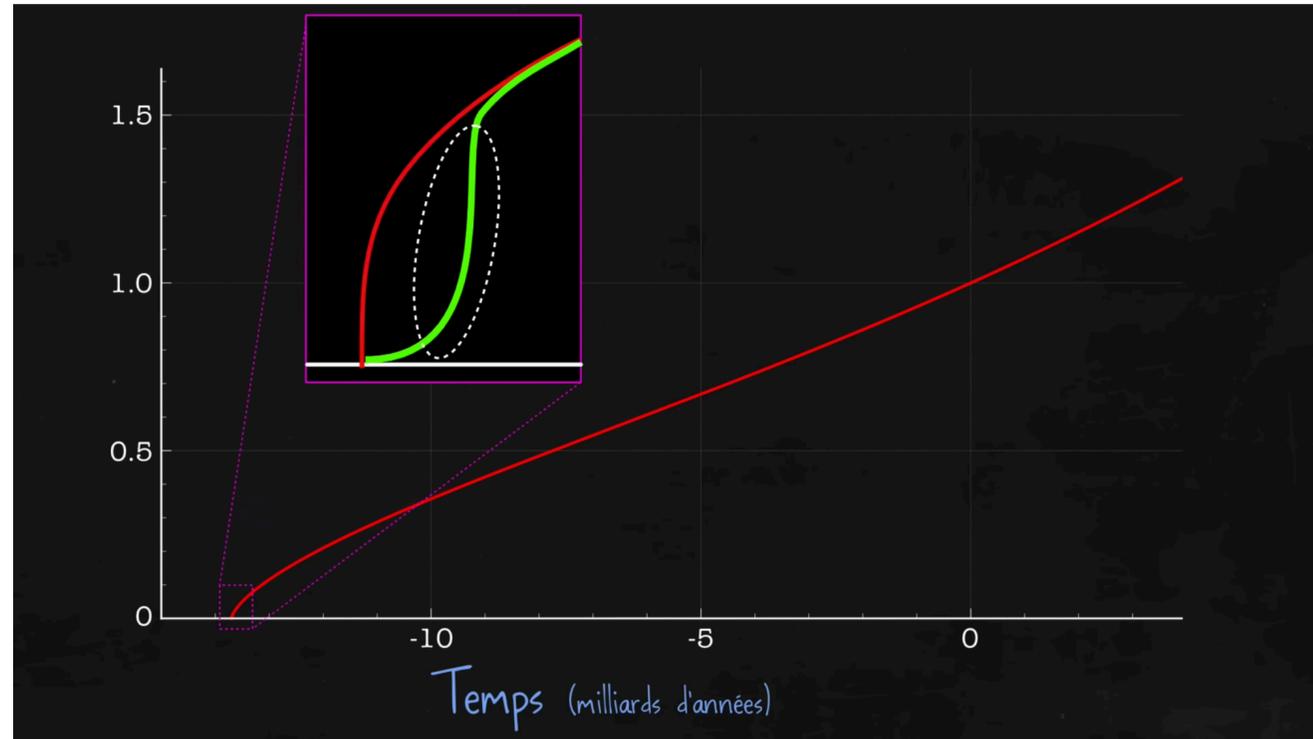
L'inflation (cosmique)



L'inflation (cosmique)



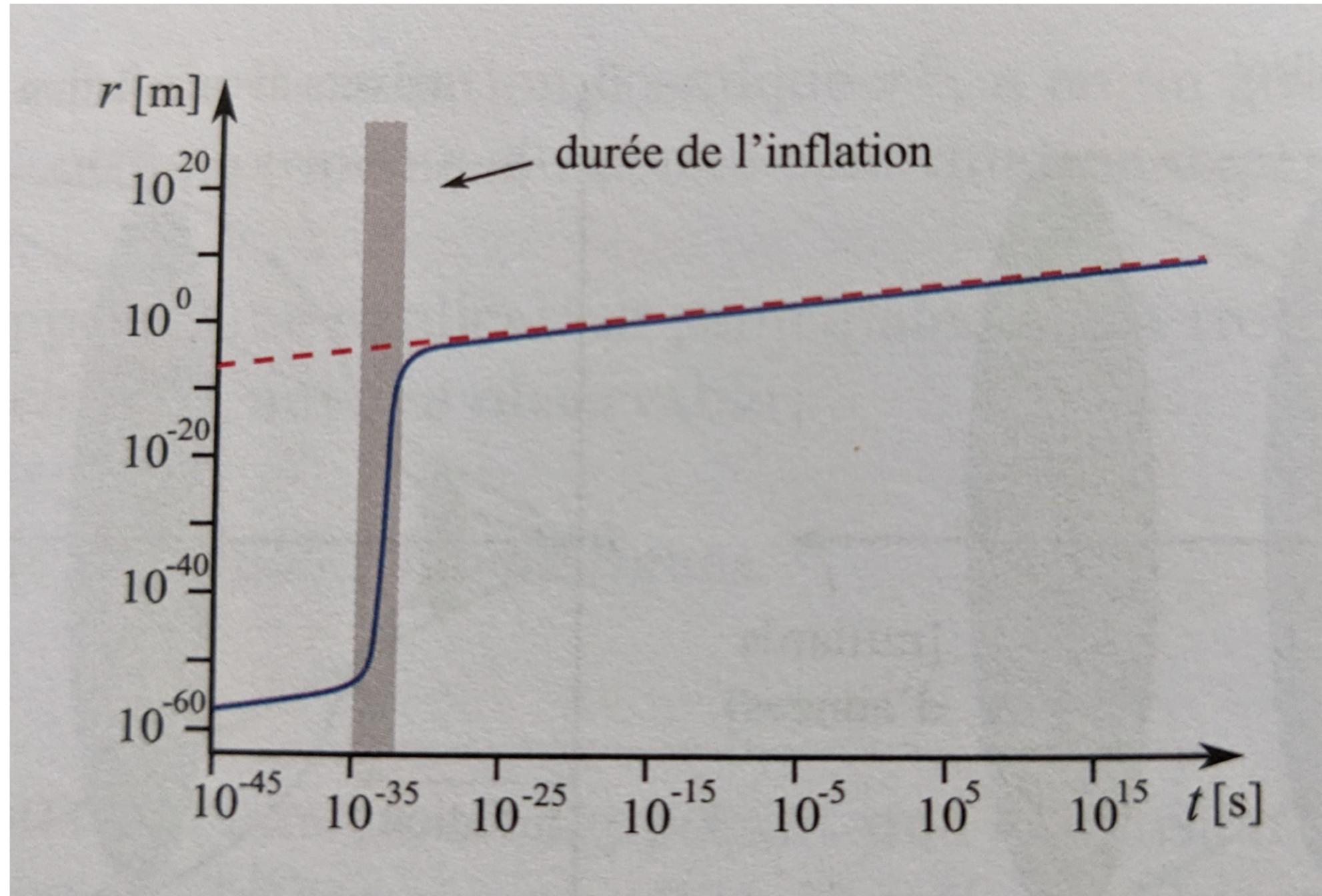
L'inflation (cosmique)



Inflation = dilatation d'un facteur... 10^{27} en... 10^{-33} s !!!

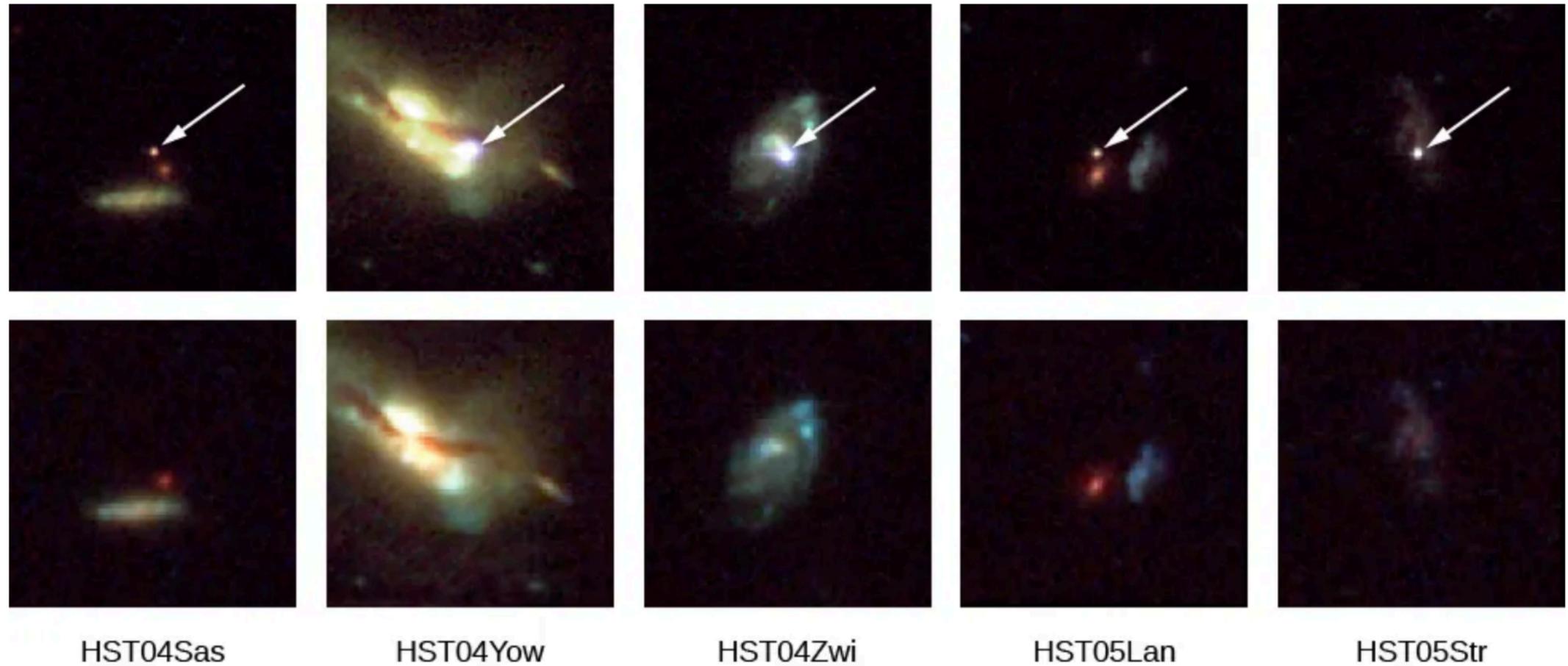
=> permet de rendre l'univers homogène (rayonnement fossile) et plat (ajustement parfait matière/énergie)

L'inflation (cosmique)



L'énergie noire

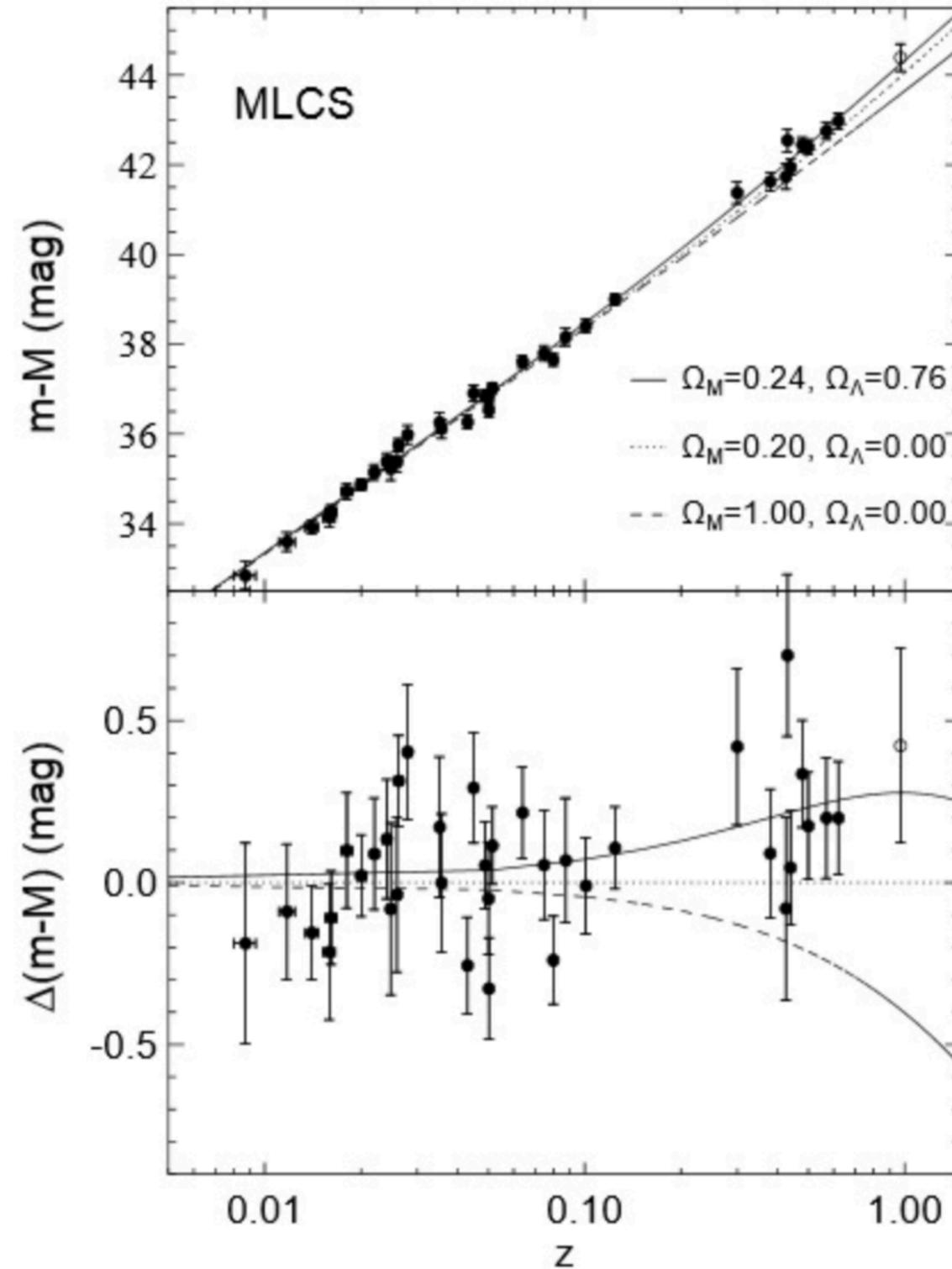
1998 : S. Perlmutter et
indépendamment A. Riess,
montrent que l'expansion de
l'univers s'accélère !
(grâce à l'observation de
supernova de type Ia)



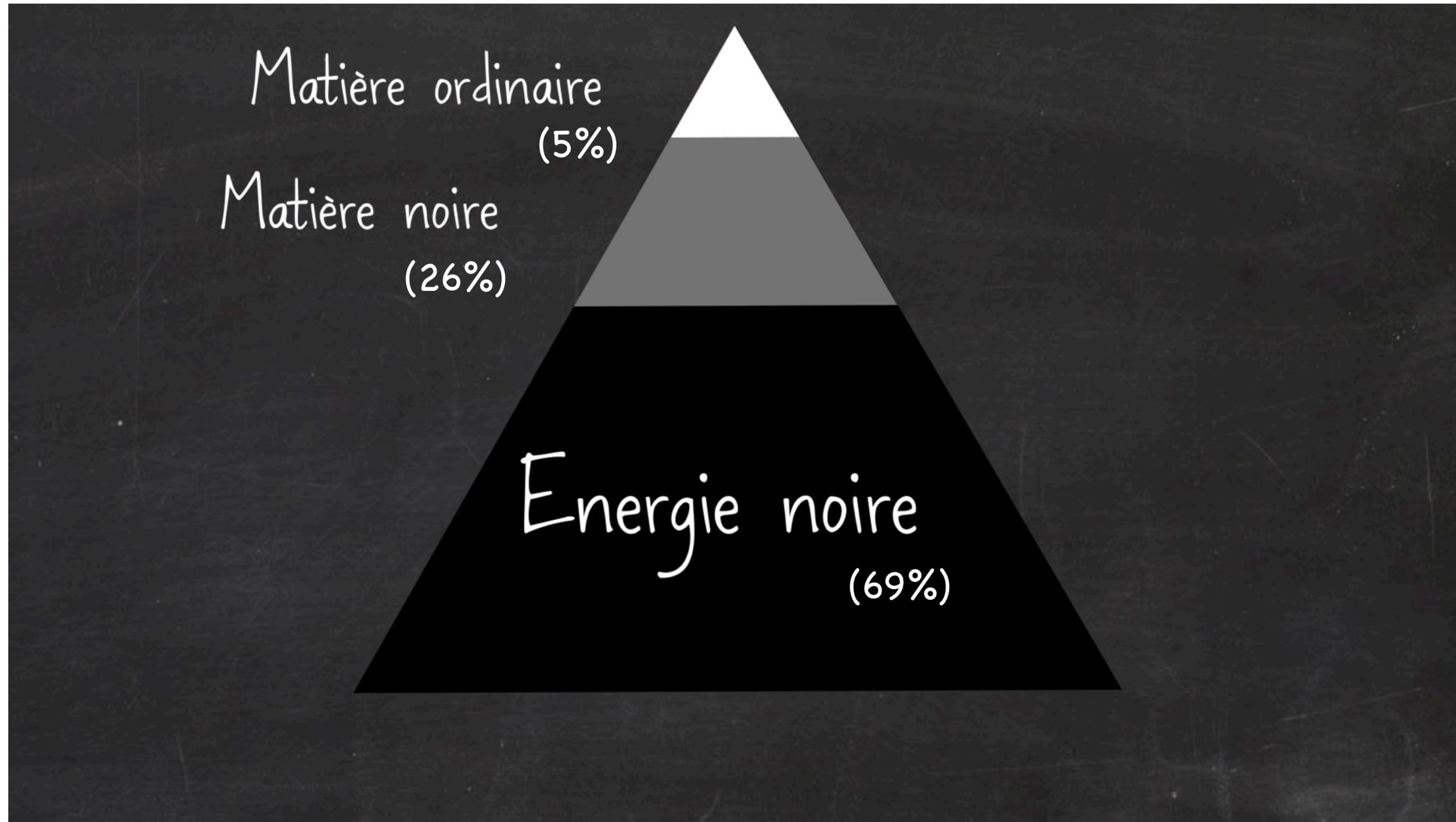
Riess et al. 1998

L'énergie noire

1998 : S. Perlmutter et
indépendamment A. Riess,
montrent que l'expansion de
l'univers s'accélère !
(grâce à l'observation de
supernova de type Ia)



Riess et al. 1998



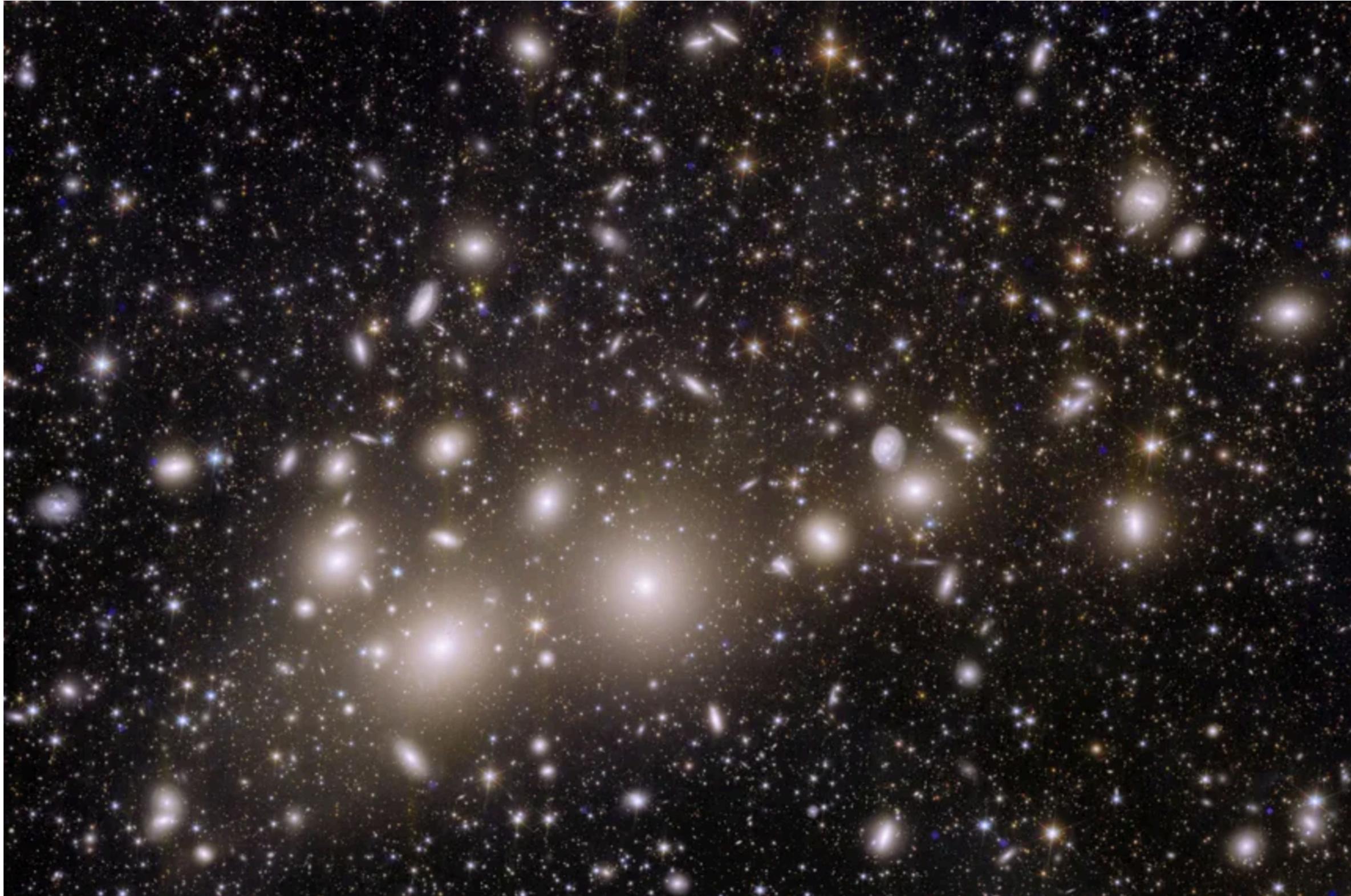
Premières images d'Euclid



Premières images d'Euclid



Premières images d'Euclid



Cosmologie : pour aller plus loin

Vidéos :

-cours en ligne de R. Taillet :

<https://pod.grenet.fr/la-formation/648-cours-de-cosmologie/>

Livres (en anglais):

<https://openstax.org/books/astronomy-2e/pages/29-thinking-ahead>

**Cosmologie et relativité générale, A. Gasparini,
Presses polytechniques et universitaire romandes**