

La superstructure de l'Univers

- amas et supermas
- structure filamentaire à grande échelle
- les galaxies les plus lointaines

Cosmologie observationnelle

Le paradoxe d'Olbers

Les fondements observationnels du Big Bang

- la solution du paradoxe d'Olbers
- le rayonnement de fond cosmologique
- la loi de Hubble et l'expansion de l'Univers
- les abondances des éléments légers

Résumé et questions ouvertes

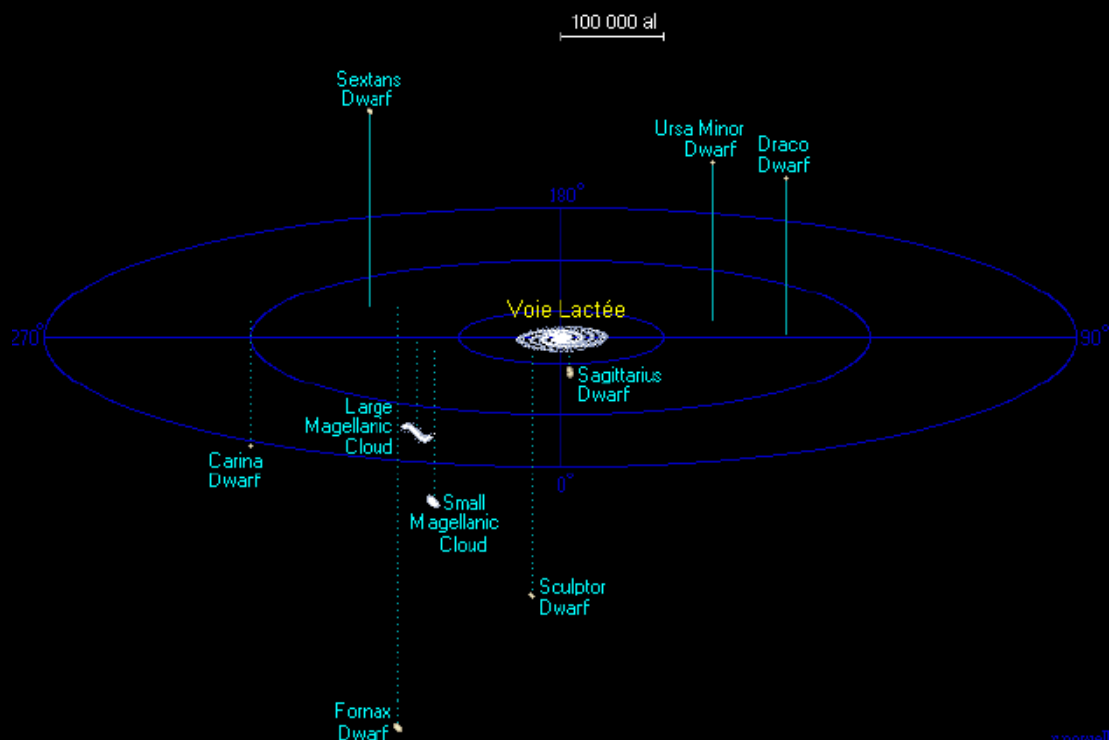
Eléments de cosmologie

Grandes structures de l'Univers



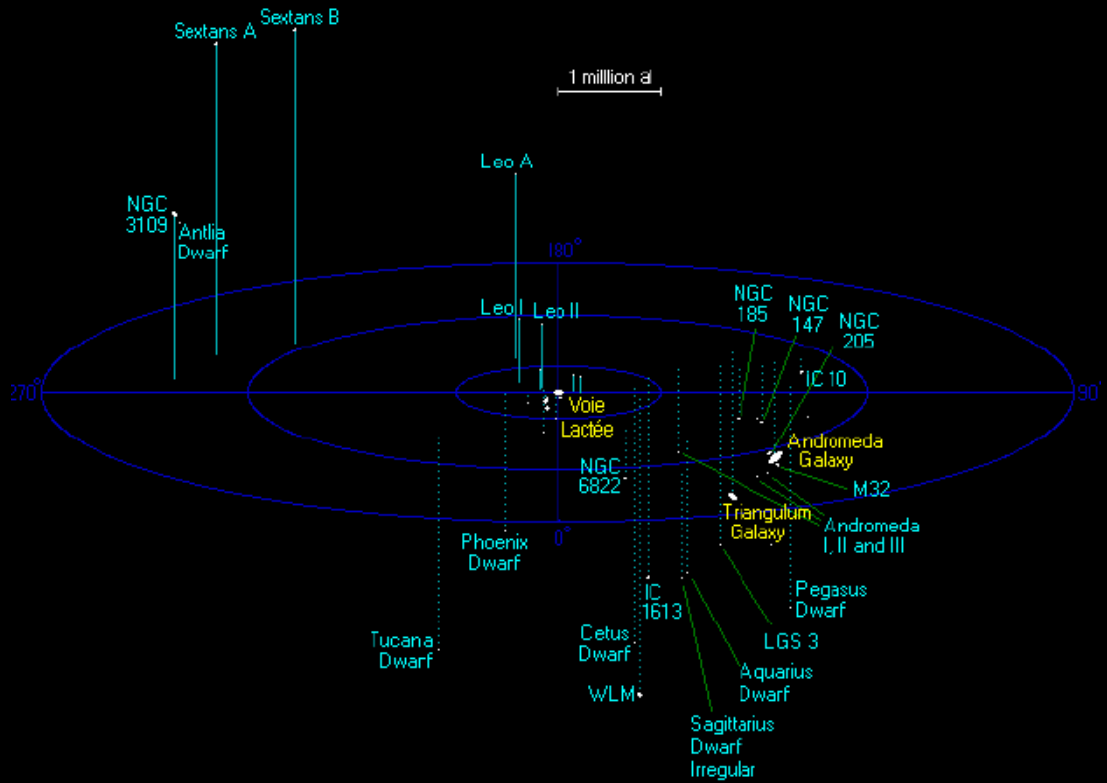
Superstructure de l'Univers

Groupe local



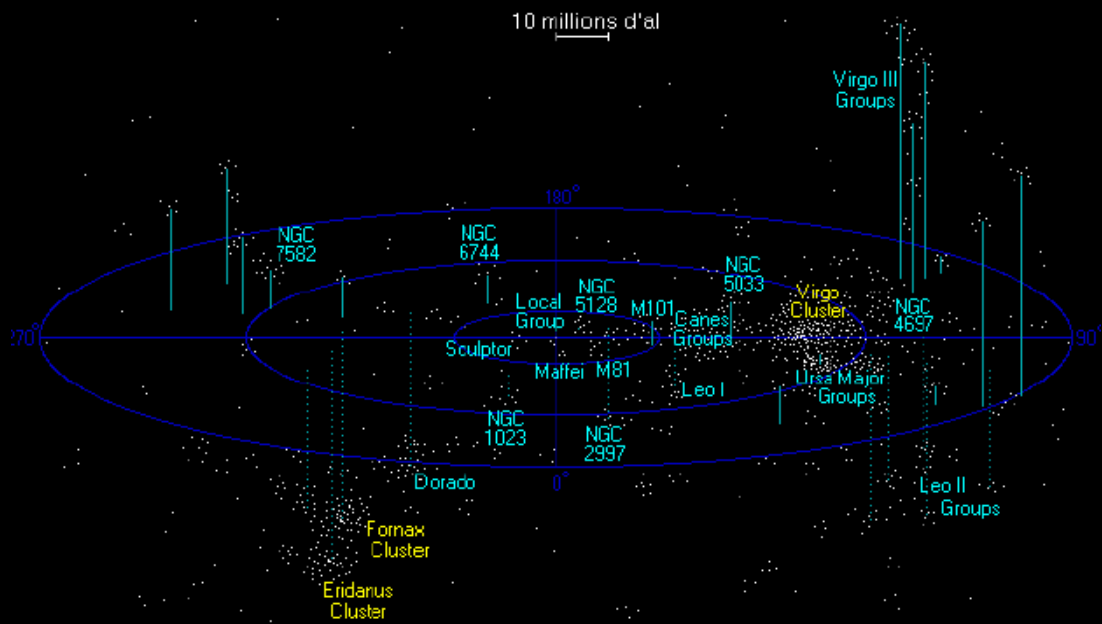
Superstructure de l'Univers

Amas local



Superstructure de l'Univers

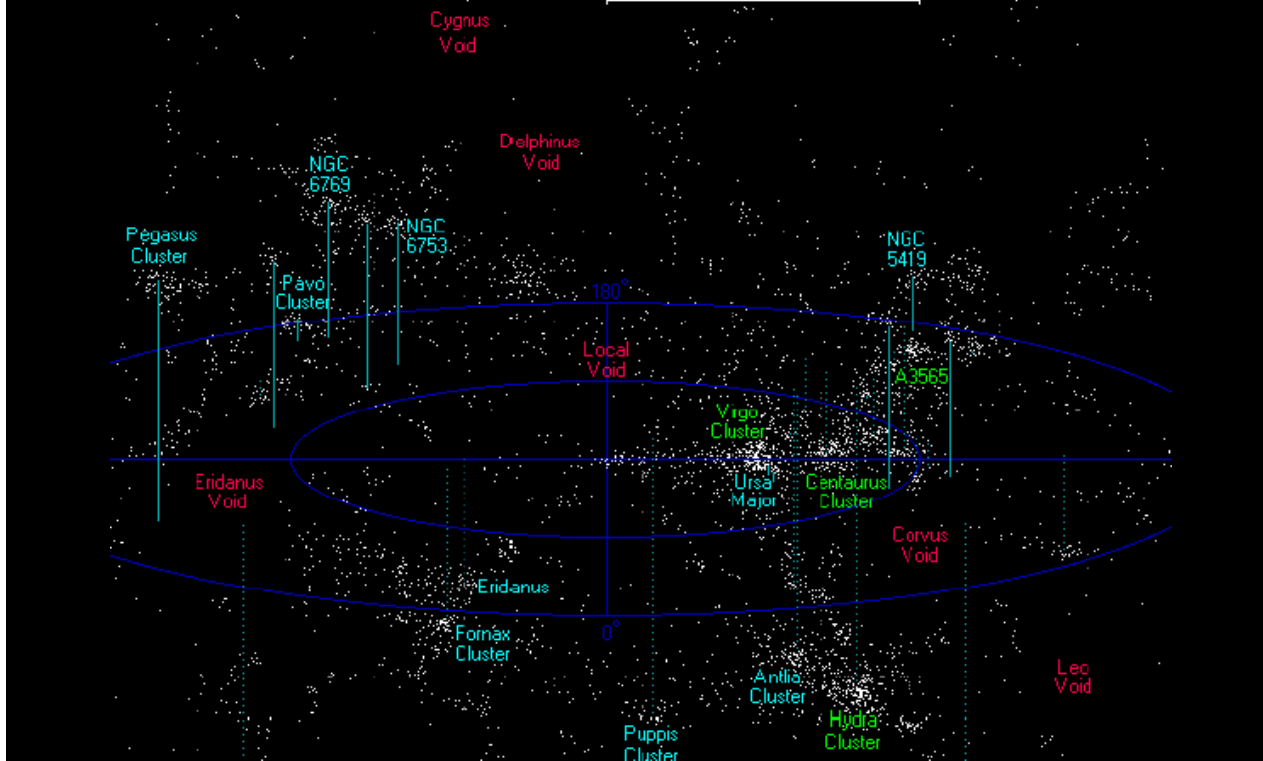
Superamas local



Superstructure de l'Univers

Superamas de la Vierge

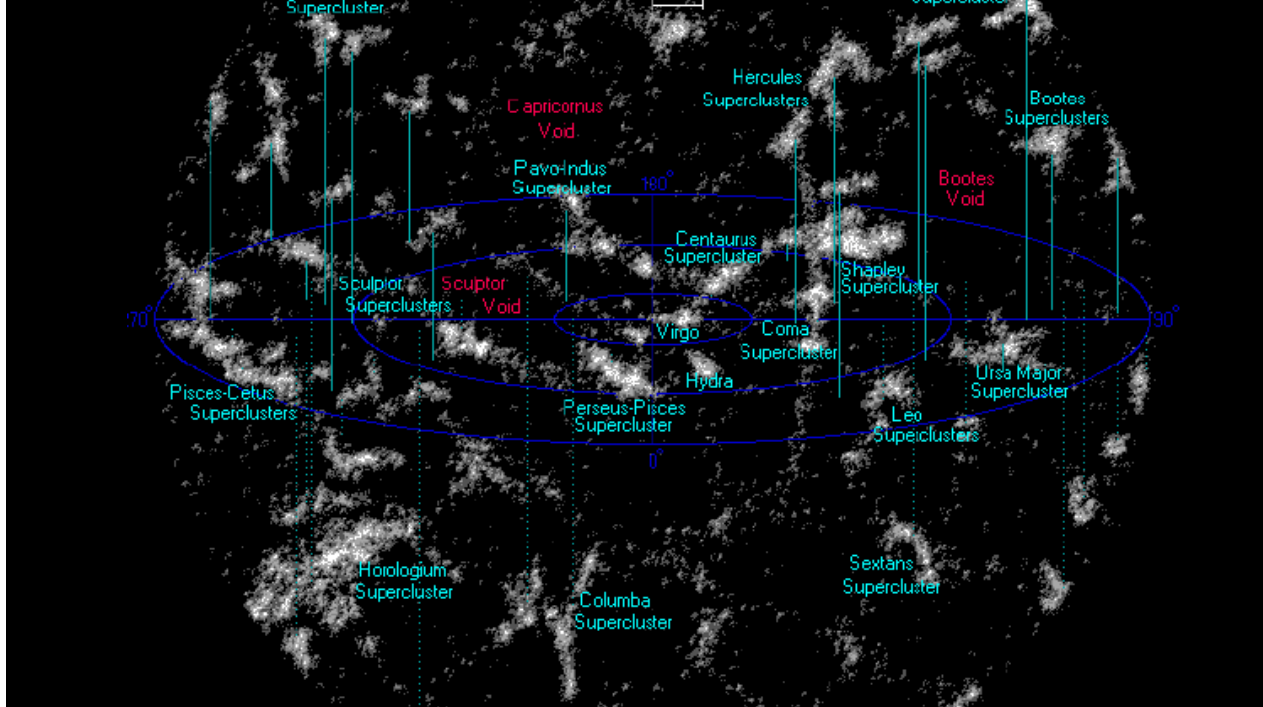
100 millions al

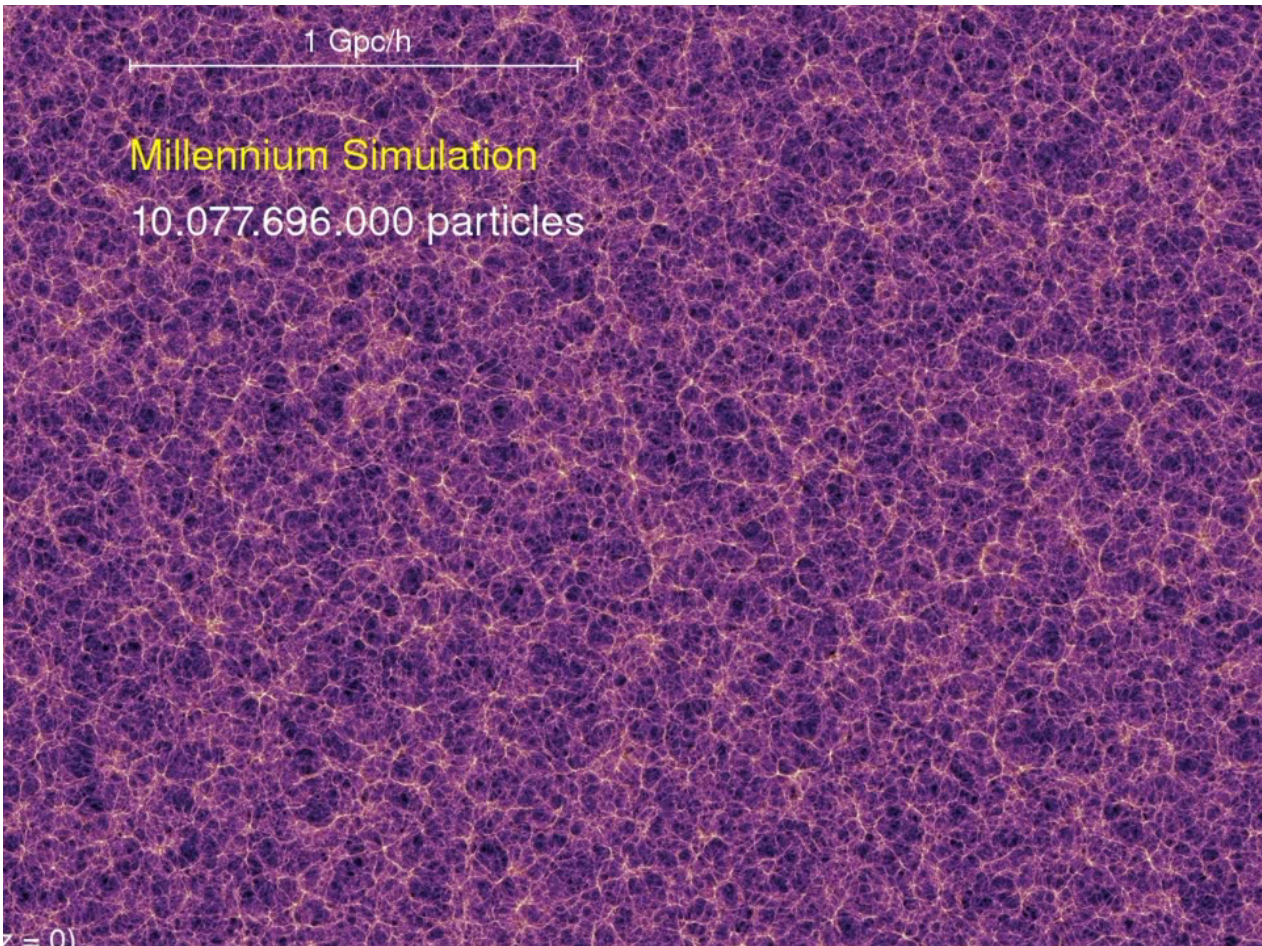
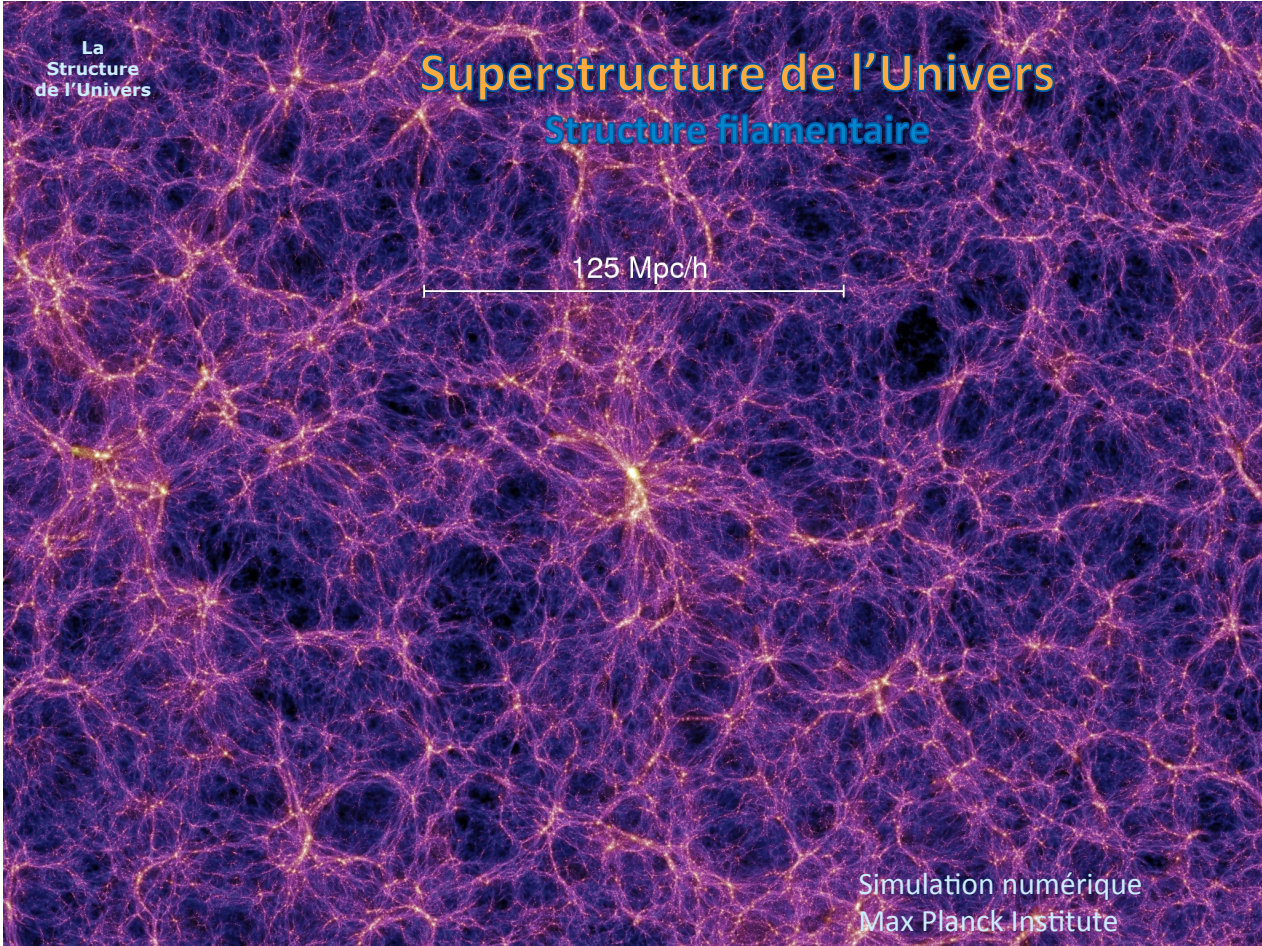


Superstructure de l'Univers

Superamas voisins

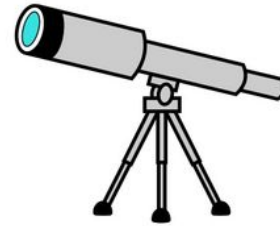
100 million ly



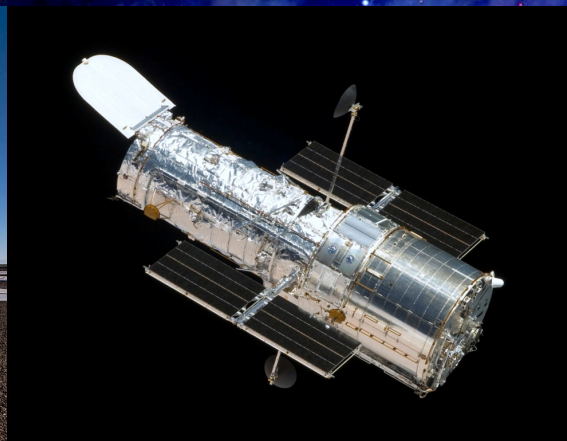


Eléments de cosmologie

Observations



Cosmologie observationnelle



Objets lointains donc peu brillants: leur observation nécessite des télescopes de taille importante (> 8m) et/ou de très long temps de pose

➤ **Very Large Telescope, Hubble Space Telescope...**

Amas de galaxies

Amas du Fourneau, 58 galaxies, 62 MA-L

Chaque
tache
diffuse est
une galaxie!

On y
observe un
mélange de
galaxies
spirales
et de
galaxies
elliptiques
(plus
jaunes)

VLT

Amas de galaxies

Amas d'Hercule, 200 galaxies, 450 MA-L

Beaucoup
de galaxies
en
interaction
qui vont
fusionner
pour former
des galaxies
elliptiques,
modifiant
ainsi
l'apparence
de l'amas

VLT



Composition en fonction de la distance

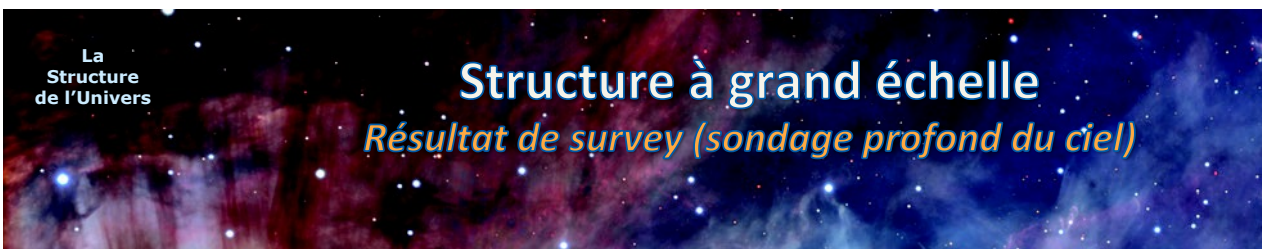
On observe une transition entre les amas proches, contenant beaucoup de **galaxies elliptiques**...

... et les amas lointains contenant beaucoup de **galaxies naines et spirales**

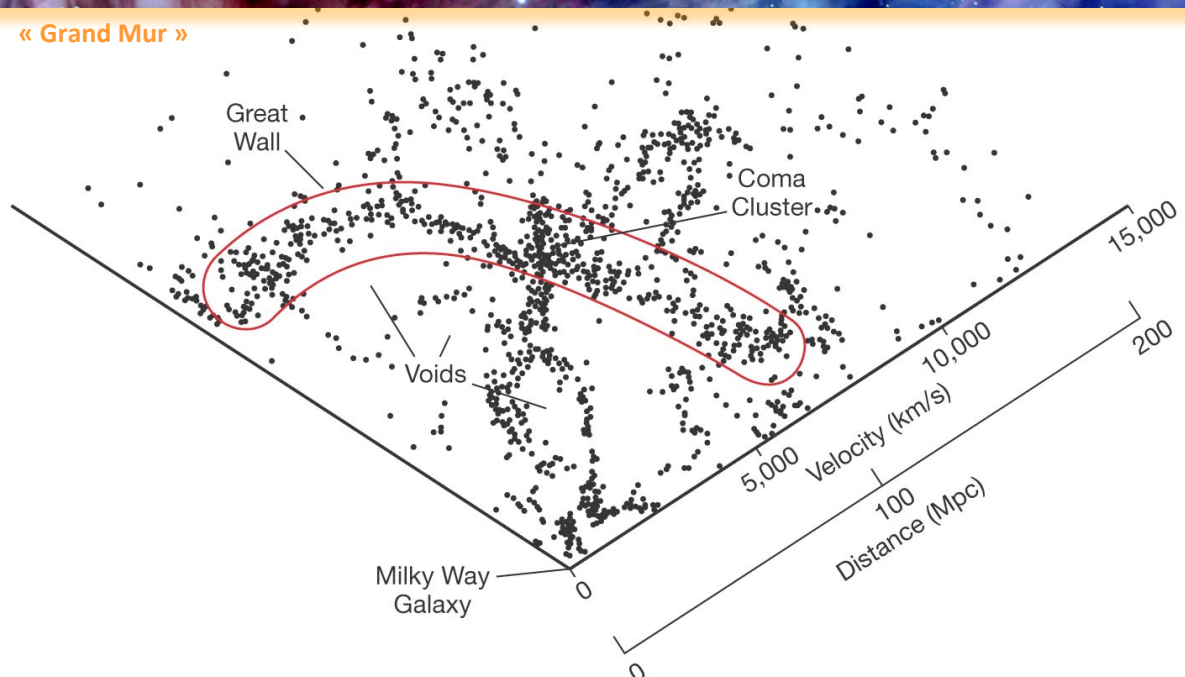
Les amas intermédiaires contiennent beaucoup de **galaxies en interaction**

- la proportion galaxies spirales/galaxies elliptiques reflète le stade évolutif de l'amas :

proche/âgé/elliptiques vs lointain/jeune/spirales



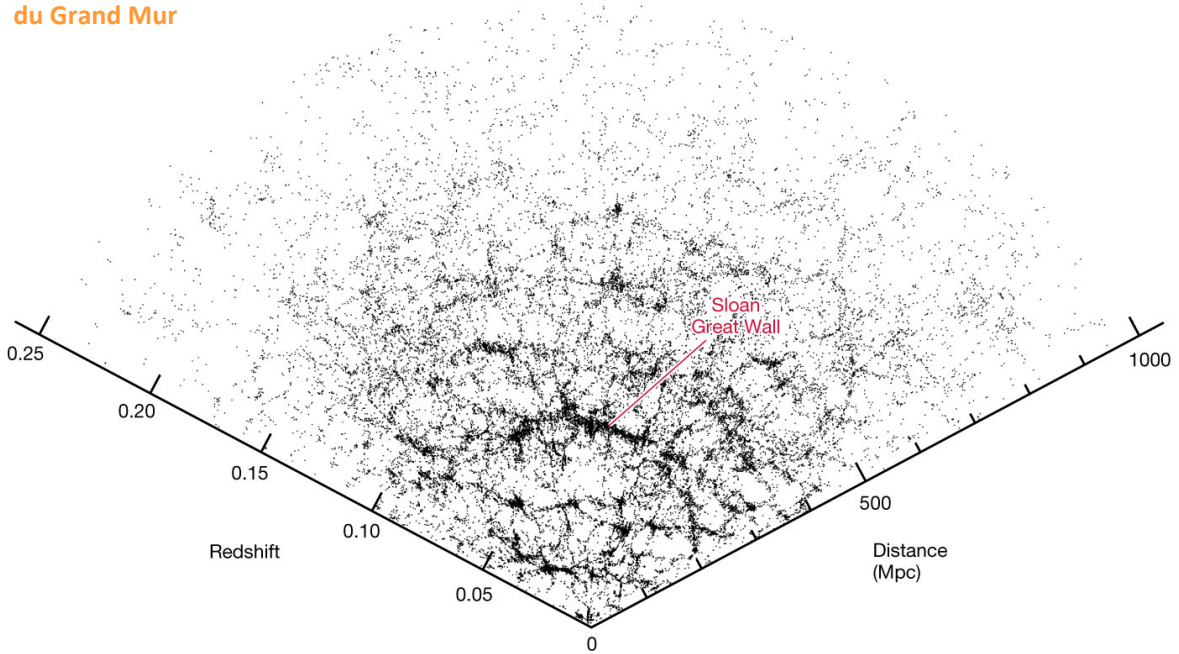
« Grand Mur »



Structure à grand échelle

Résultat de survey (sondage profond du ciel)

Sloan Great Wall = 3 fois la taille du Grand Mur

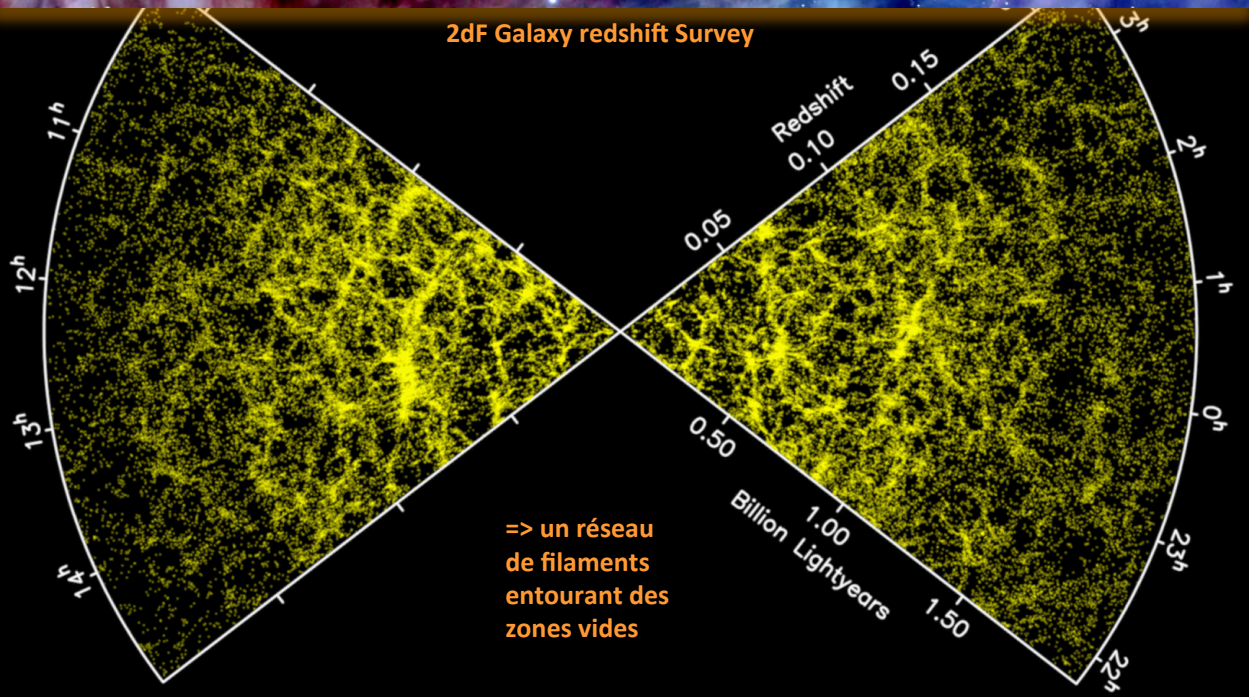


© 2011 Pearson Education, Inc.

Structure à grand échelle

Résultat de survey (sondage profond du ciel)

2dF Galaxy redshift Survey



=> un réseau de filaments entourant des zones vides

Hubble Deep Field

150 heures, champ de 2.5' (diamètre Lune: 30')



Zone « vide »
de la Grande
Ourse = 2500
galaxies
révélées

Hubble Deep Field

HST WFC2

ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

Hubble Ultra Deep Field

280 heures

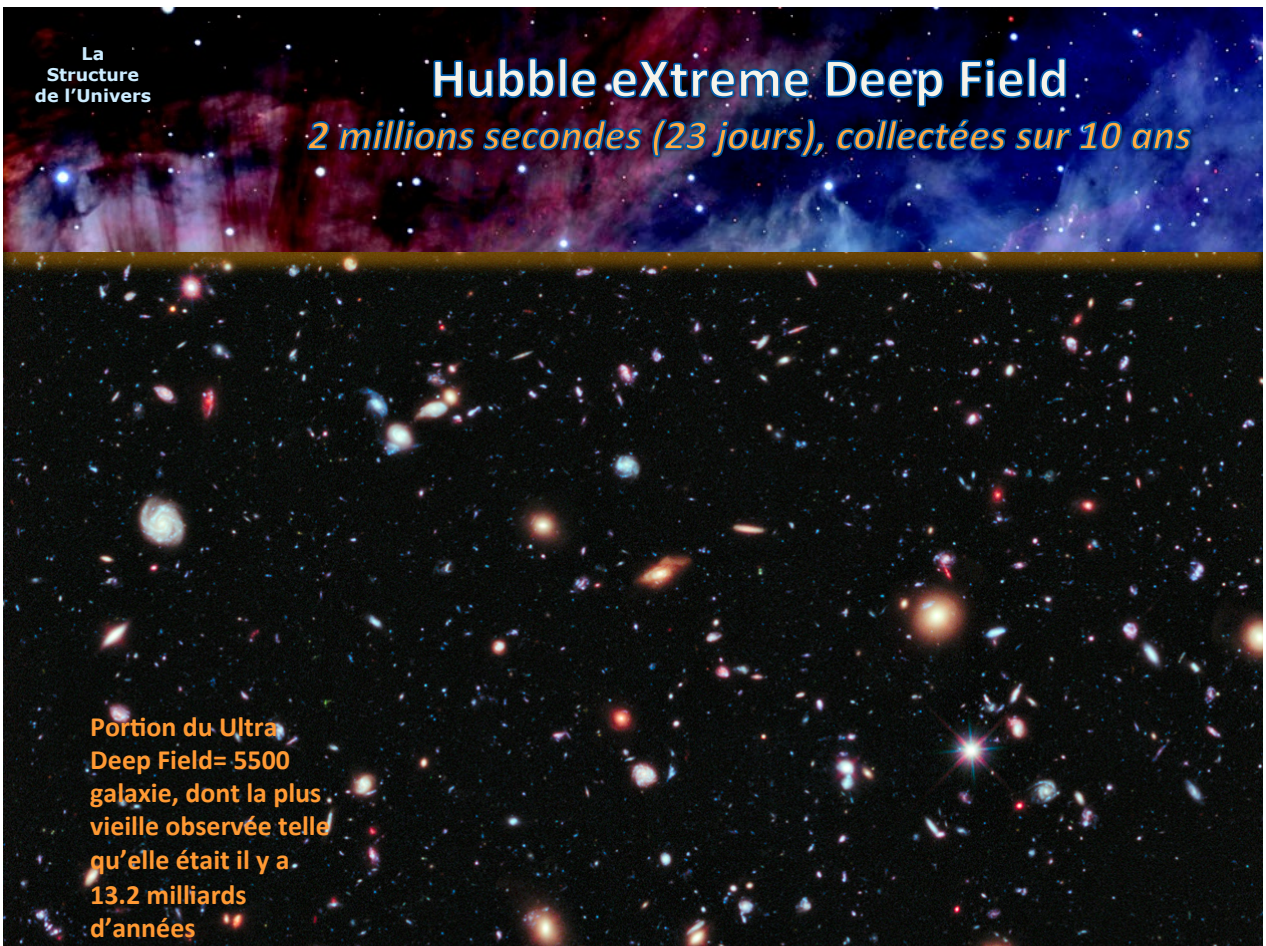


Zone « vide » de
Fornax = 10000
galaxies révélées
lorsque l'Univers
était âgé de 400 à
800 millions
d'années

Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

STScI-PRC04-07a



La
Structure
de l'Univers

Hubble eXtreme Deep Field

2 millions secondes (23 jours), collectées sur 10 ans

Portion du Ultra
Deep Field= 5500
galaxie, dont la plus
vieille observée telle
qu'elle était il y a
13.2 milliards
d'années

Univers observable

Estimation du nombre de galaxies

Comptage grâce au Hubble Deep Field

2500 galaxies dans le HDF, sur $1/(30 \cdot 10^6)$ de la sphère céleste ...

... soit **75 milliards de galaxies** dans l'Univers observable

Nombre d'étoiles: $75 \cdot 10^9 \times 200 \cdot 10^9$ étoiles = **$1.5 \cdot 10^{22}$ étoiles** dans l'Univers

Nombre de protons: $1.5 \cdot 10^{22} \times 2 \cdot 10^{33}$ g (masse d'une étoile) $\times 6.0 \cdot 10^{23}$ protons
(nombre d'Avogadro)

➤ **$1.8 \cdot 10^{79}$ protons** dans l'Univers observable

Record de distance pour une galaxie

GN-z11, redshift $z=11.1$, GOODS (HST+différents surveys)

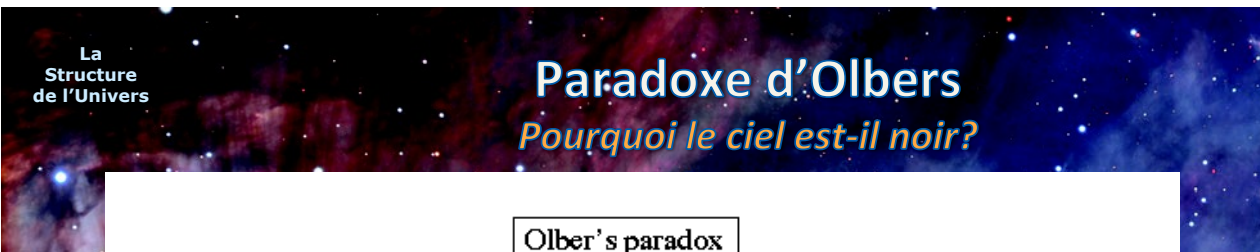
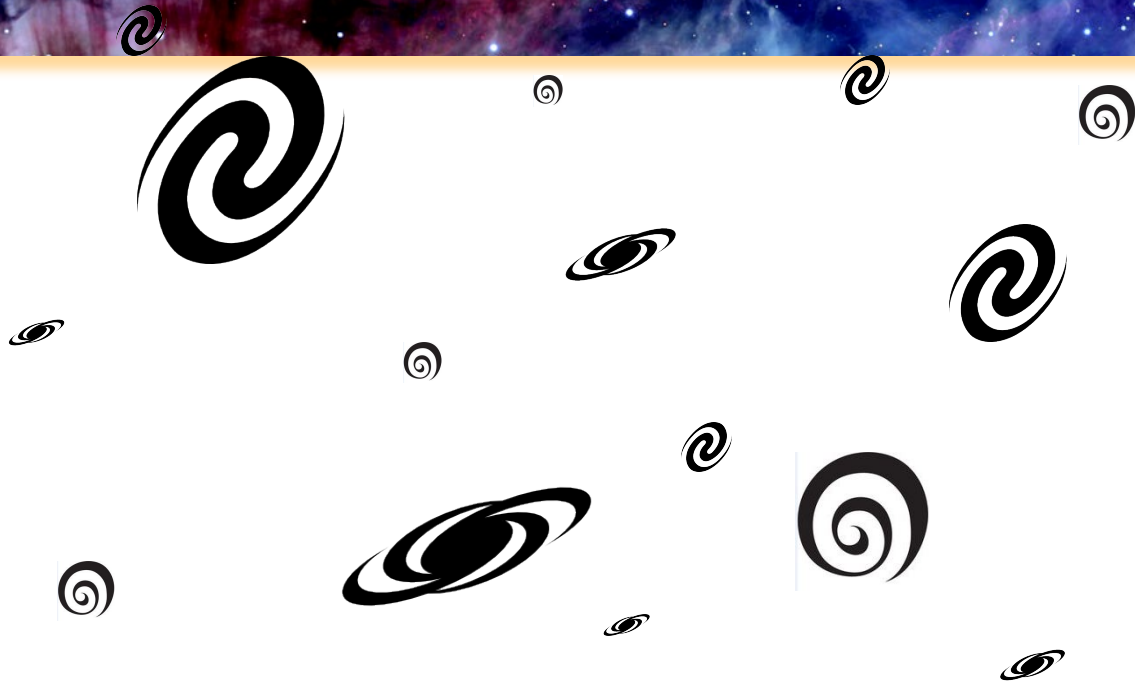


Objet observé lorsque l'Univers était âgé de **400 millions d'années**



Eléments de cosmologie

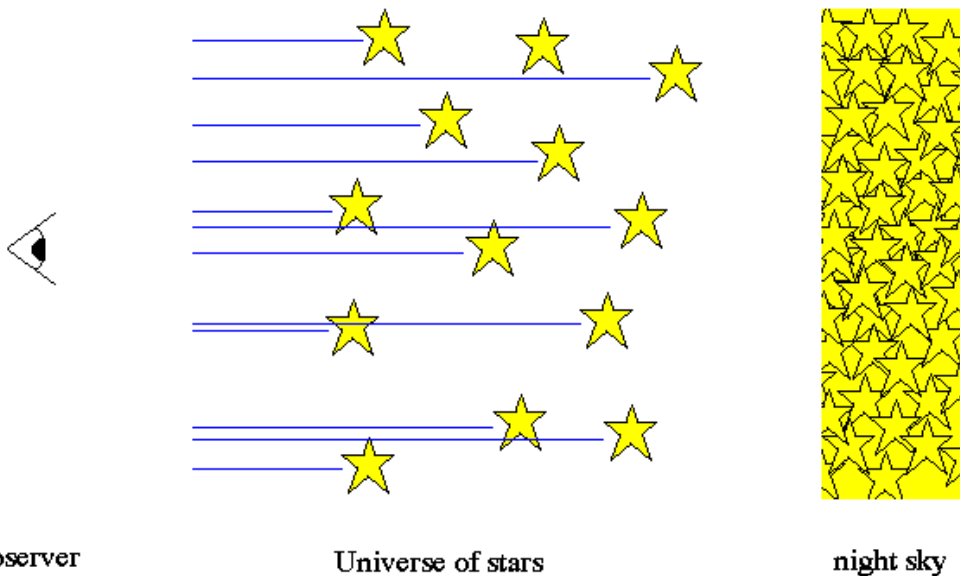
Des galaxies partout



Paradoxe d'Olbers

Pourquoi le ciel est-il noir?

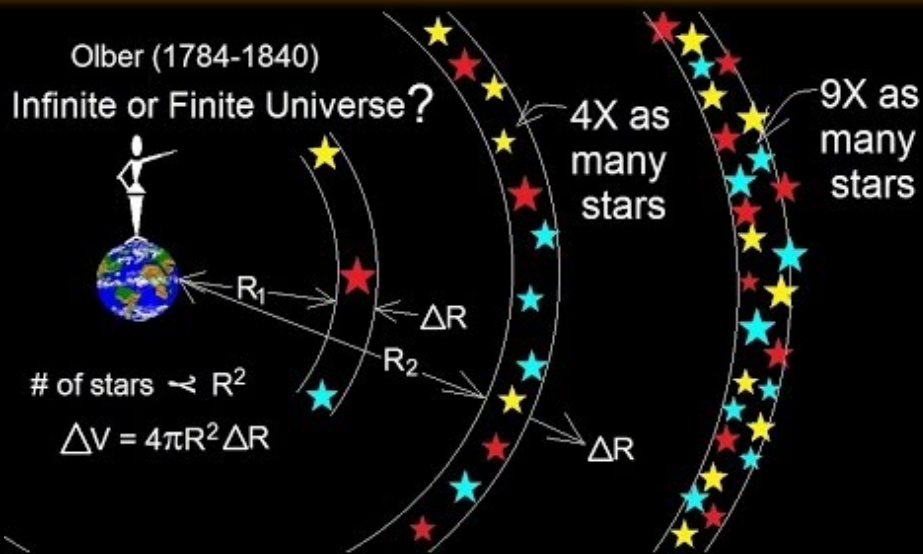
Olber's paradox



Si l'Univers est sans limite, chaque ligne de visée finit par toucher une galaxie...

Paradoxe d'Olbers

Énoncé dès 1823



La diminution de brillance est compensée par le nombre croissant de sources

Paradoxe d'Olbers

Pourquoi une nuit noire?

Brillance du ciel

Soit à calculer l'intensité I reçue dans un angle solide Ω en observant le « **fond du ciel** » dans une direction quelconque

Cet **angle solide** intercepte une surface $S = \Omega d^2$ d'une galaxie située à une distance d

La luminosité L émise par cette surface est $L = \ell S = \ell \Omega d^2$ où ℓ est la **brillance de surface**

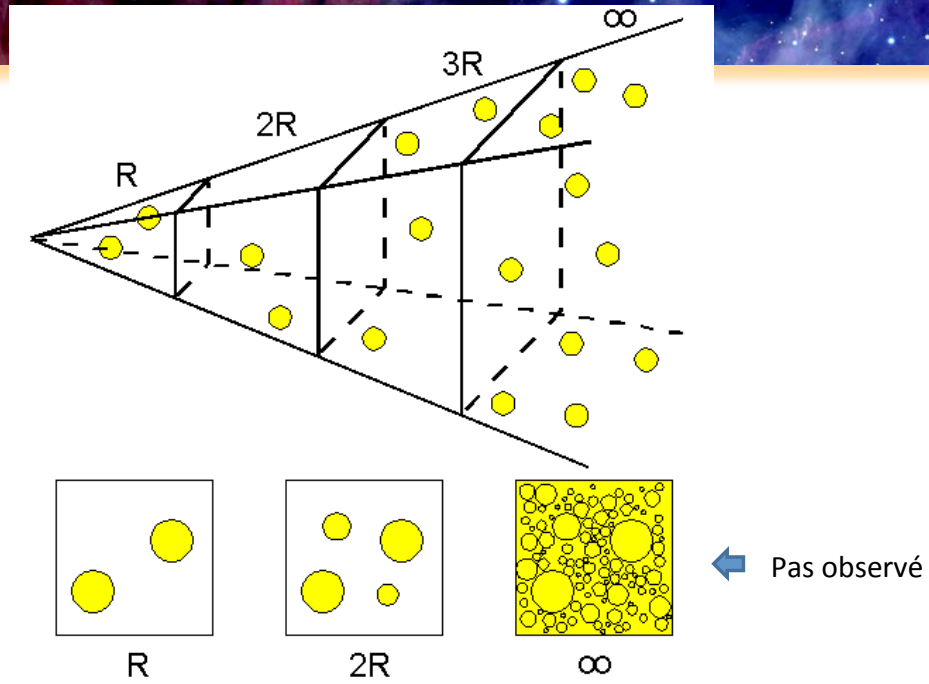
A la distance d , cette luminosité L se traduit par une **intensité apparente** égale à

$$I = L / 4 \pi d^2 = \ell \Omega d^2 / 4 \pi d^2 = \ell \Omega / 4 \pi$$

➤ **indépendant de d !**

Paradoxe d'Olbers

Le ciel est noir car l'Univers est fini?



Nuit noire : chaque ligne de visée NE FINIT DONC PAS par toucher une galaxie!

Eléments de cosmologie

Piliers de la théorie du Big Bang

BANG!

Paradoxe d'Olbers

Solution: l'Univers observable est fini

L'Univers n'est pas nécessairement fini

La vitesse c de la **lumière** est finie: $c = 300\,000$ km/s

Si l'**âge** T de l'Univers est fini, alors il n'est pas possible de voir les galaxies situées au-delà de la distance $d = c T$

➤ première notion d'**horizon cosmologique**

L'Univers (fini ou infini) a donc une **histoire** : début (?) / maintenant / fin (?)

Plus on observe loin, plus on accède aux **premiers âges** de l'Univers

➤ **premier rayonnement** de l'Univers ?

Rayonnement à 3 kelvin

Découvert en 1964 par Penzias et Wilson



Rayonnement isotrope en onde radio à une longueur d'onde de 7.35 cm (équivalent d'une température d'antenne de 2.7 K)

Fond diffus cosmologique

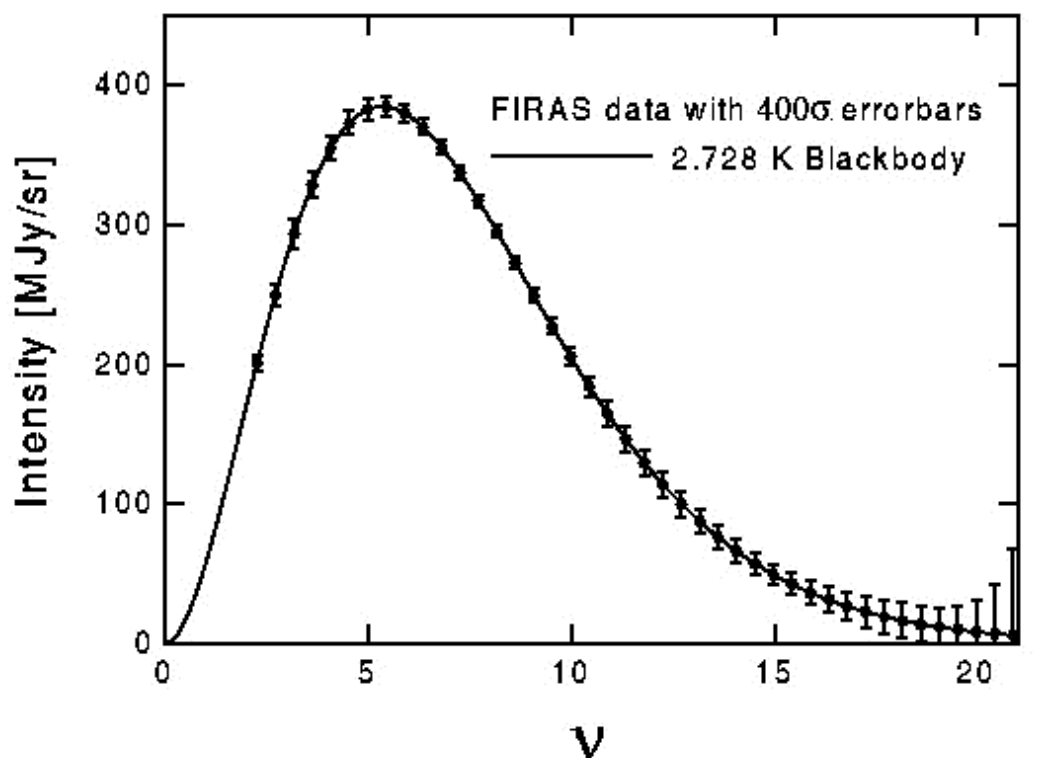
Cosmic Microwave Background (CMB)

Rayonnement fossile

Rayonnement de **corps noir** à 2.728 K : équilibre matière-rayonnement

Distribution du rayonnement du CMB

Rayonnement de corps noir à 2.728 K



Fond diffus cosmologique

Cosmic Microwave Background (CMB)

Rayonnement fossile

Rayonnement de **corps noir** à 2.728 K : équilibre matière-rayonnement

Rayonnement extrêmement **isotrope**, avec une déviation de 10^{-5} : même phénomène physique partout dans l'Univers !

Isotropie du rayonnement du CMB

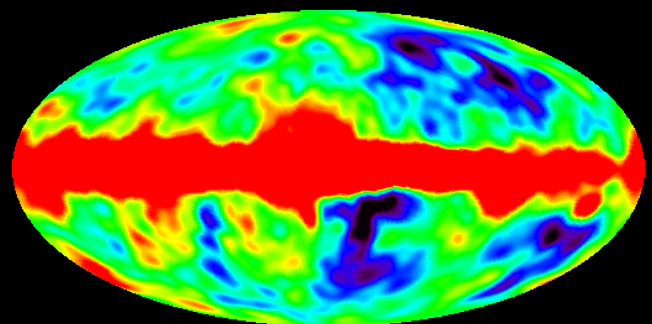
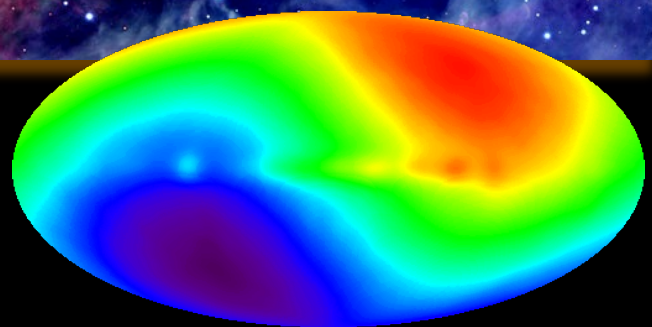
Satellite COBE (COsmic Background Explorer, 1992)

Dipôle Doppler dans le rayonnement de corps noir, lié au mouvement du Soleil par rapport à celui-ci

$$\Delta T / T = 0.003 / 2.7 = 0.12 \%$$

Emissions de la Voie Lactée et inhomogénéités primordiales

$$\Delta T / T = 30 \mu\text{K} / 2.7 \text{ K} = 0.001 \% = 10^{-5}$$



Fond diffus cosmologique

Cosmic Microwave Background (CMB)

Rayonnement fossile

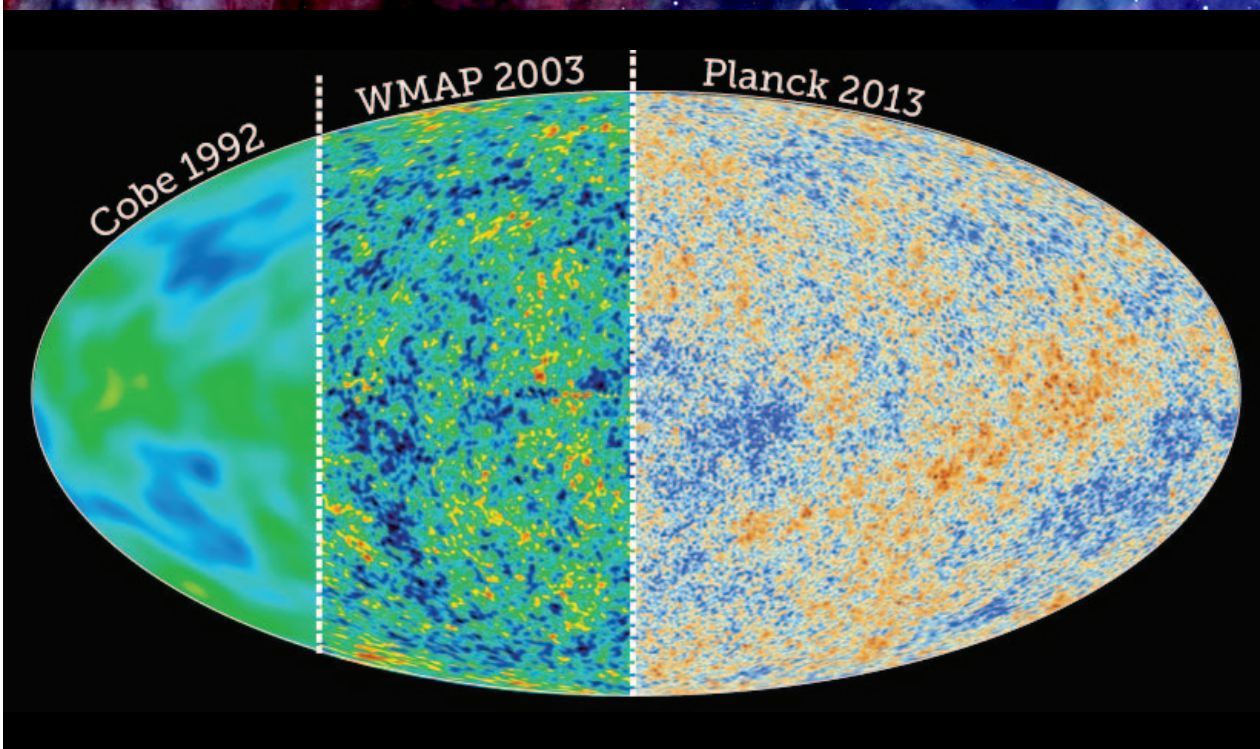
Rayonnement de **corps noir** à 2.728 K : équilibre matière-rayonnement

Rayonnement extrêmement **isotrope**, avec une déviation de 10^{-5} : même phénomène physique partout dans l'Univers !

➤ actuellement, recherche des **anisotropies** (WMAP, Planck)

Anisotropie du rayonnement du CMB

Comparaison COBE / WMAP / Planck (1992-2013)



Fond diffus cosmologique

Cosmic Microwave Background (CMB)

Rayonnement fossile

Rayonnement de **corps noir** à 2.728 K : équilibre matière-rayonnement

Rayonnement extrêmement **isotrope**, avec une déviation de 10^{-5} : même phénomène physique partout dans l'Univers !

➤ actuellement, recherche des **anisotropies** (WMAP, Planck)

Ainsi, le CMB est le rayonnement rémanent d'une époque d'équilibre global : donc événement lié à un paramètre **thermodynamique** de l'Univers

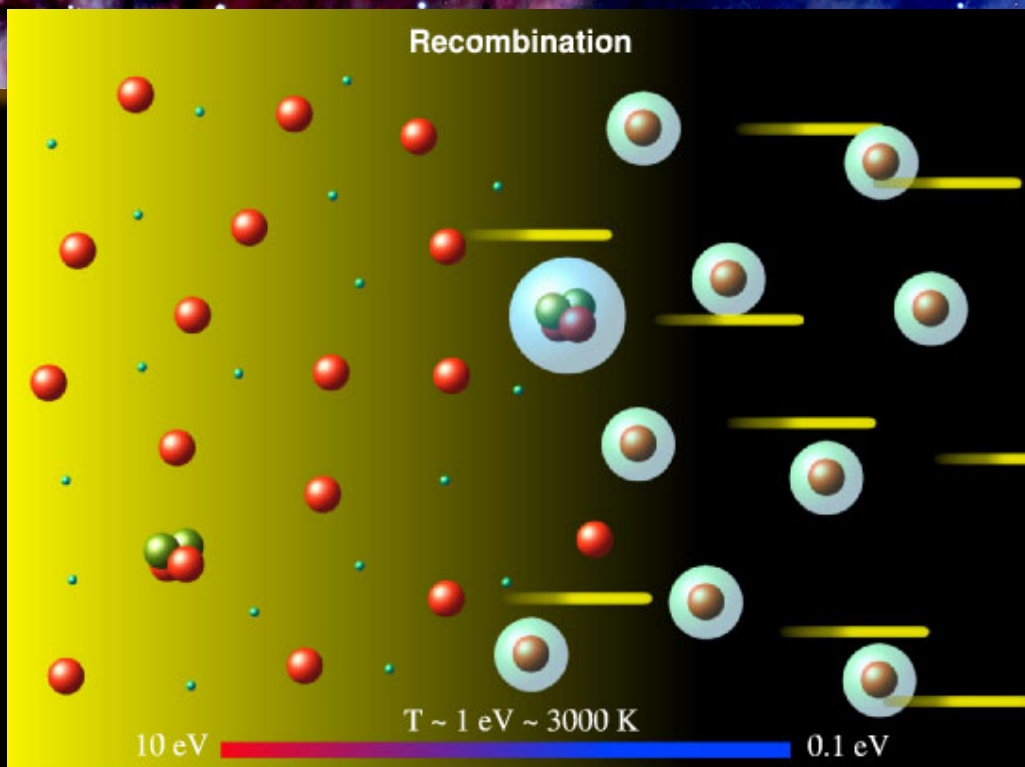
Si la température de l'Univers est supérieure à 3000 K, tout l'hydrogène est **ionisé** (analogie avec le plasma solaire) : très petit libre parcours moyen des photons

La « recombinaison » des électrons et des protons a lieu lorsque la température de l'Univers devient inférieure à 3000 K : **découplage du rayonnement**

Découplage du rayonnement

Recombinaison

Recombination



Fond diffus cosmologique

Cosmic Microwave Background (CMB)

Rayonnement fossile

Rayonnement de **corps noir** à 2.728 K : équilibre matière-rayonnement

Rayonnement extrêmement **isotrope**, avec une déviation de 10^{-5} : même phénomène physique partout dans l'Univers !

➤ actuellement, recherche des **anisotropies** (WMAP, Planck)

Ainsi, le CMB est le rayonnement rémanent d'une époque d'équilibre global : donc événement lié à un paramètre **thermodynamique** de l'Univers

Si la température de l'Univers est supérieure à 3000 K, tout l'hydrogène est **ionisé** (analogie avec le plasma solaire) : très petit libre parcours moyen des photons

La « recombinaison » des électrons et des protons a lieu lorsque la température de l'Univers devient inférieure à 3000 K : **découplage du rayonnement**

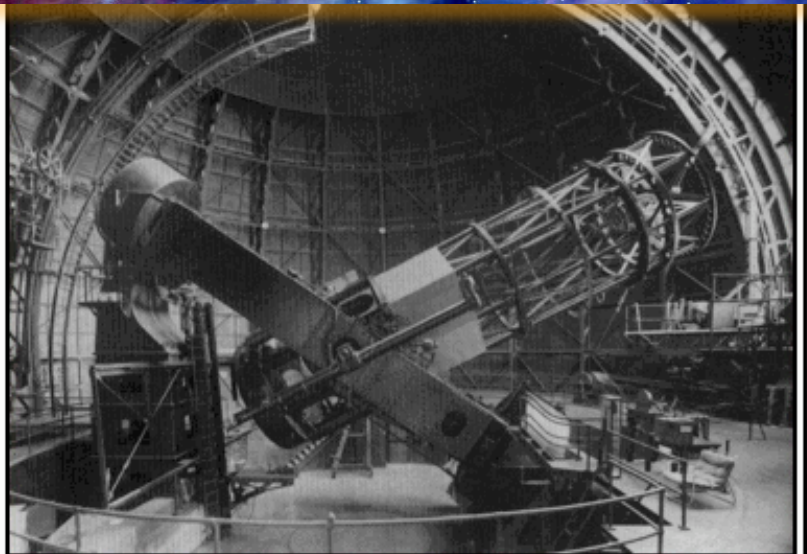
➤ pourquoi un **Univers chaud** dans le passé ?

Récession des galaxies lointaines

Loi publiée en 1929 par Edwin Hubble



Edwin Hubble
1889 – 1953



100 inch Mt Wilson Telescope

La Structure de l'Univers

Loi de Hubble

Fuite des galaxies

Relation vitesse de récession - distance

La distance d des galaxies est mesurée par **étalons de distance** (céphéides, supernovae, etc)

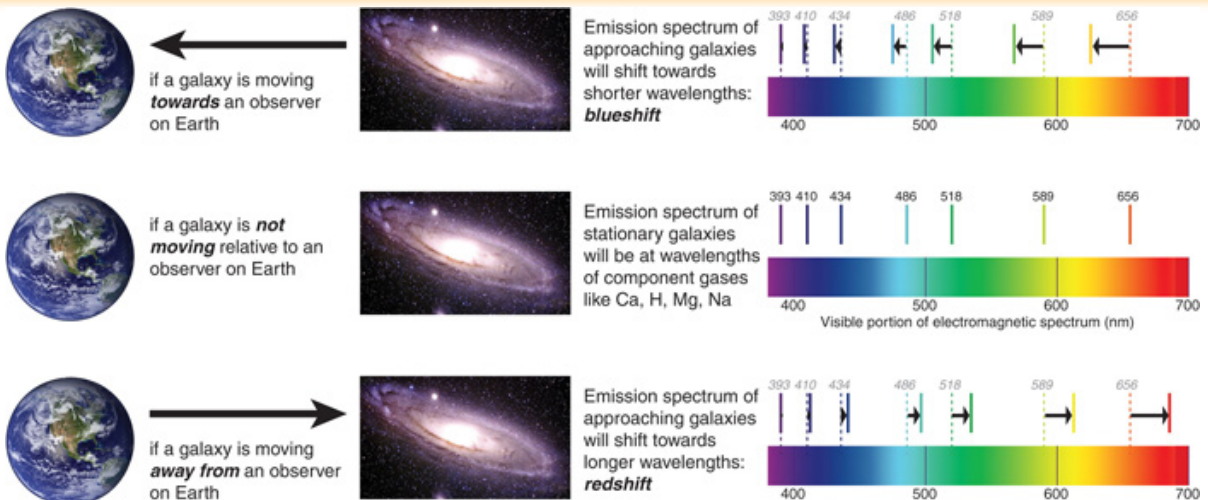
La vitesse v des galaxies est mesurée par **effet Doppler**

$$z = \frac{\delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$$

La Structure de l'Univers

Effet Doppler

Blueshift et redshift



Loi de Hubble

Fuite des galaxies

Relation vitesse de récession - distance

La distance d des galaxies est mesurée par **étalons de distance** (céphéides, supernovae, etc)

La vitesse v des galaxies est mesurée par **effet Doppler**

$$z = \frac{\delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$$

Loi de Hubble : les galaxies suffisamment lointaines s'éloignent de nous avec une vitesse proportionnelle à leur distance

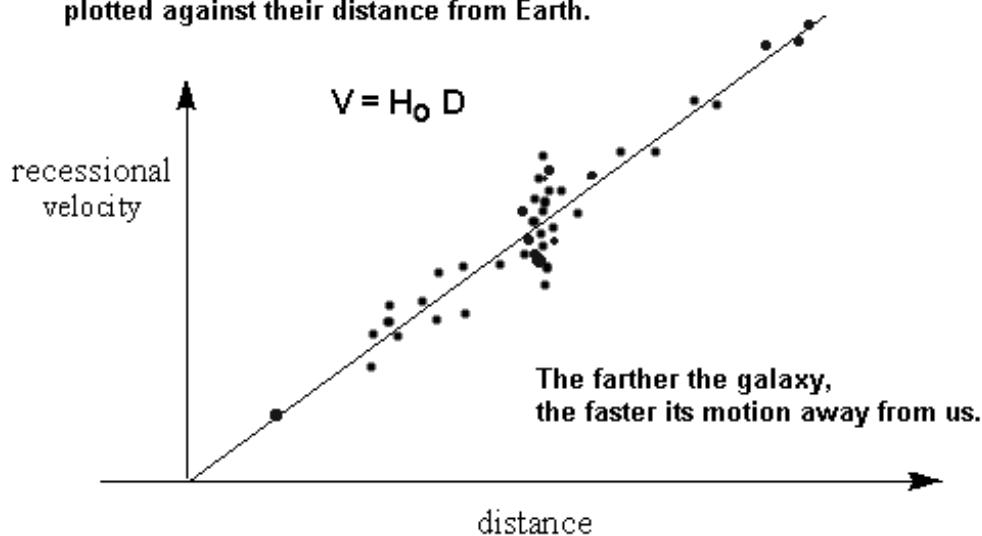
$$v = H_0 d$$

H_0 est la **constante de Hubble**

Loi de Hubble

Valeur de la constante de Hubble : $H_0 = 70 \text{ (km/s)/Mpc}$

The recessional velocity of a few galaxies, plotted against their distance from Earth.



On this graph, the slope of the line is equal to Hubble's Constant (H_0)

Loi de Hubble

Fuite des galaxies

Relation vitesse de récession - distance

La distance d des galaxies est mesurée par **étalons de distance** (céphéides, supernovae, etc)

La vitesse v des galaxies est mesurée par **effet Doppler**

$$z = \frac{\delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$$

Loi de Hubble : les galaxies suffisamment lointaines s'éloignent de nous avec une vitesse proportionnelle à leur distance

$$v = H_0 d$$

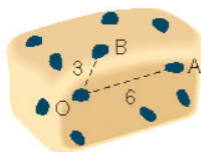
H_0 est la **constante de Hubble**

➤ loi interprétée en terme d'**expansion de l'Univers**

Expansion de l'Univers

Analogie des grains de raisin au sein du pudding

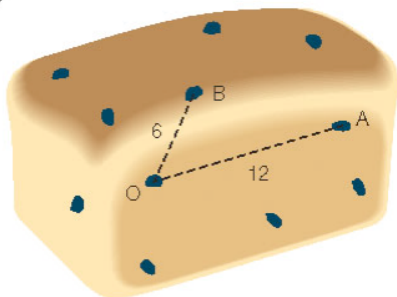
a)



Au temps t_A : $OA = D_A = 6$ & $OB = D_B = 3$

Au temps $t_B = t_A + dt$: $OA = 12$ & $OB = 6$

b)



$v_A = (12 - 6)/dt = 6/dt = D_A/dt = H_0 D_A$

$v_B = (6 - 3)/dt = 3/dt = D_B/dt = H_0 D_B$

où $H_0 (= 1/dt)$ possède les dimensions de l'inverse d'un temps

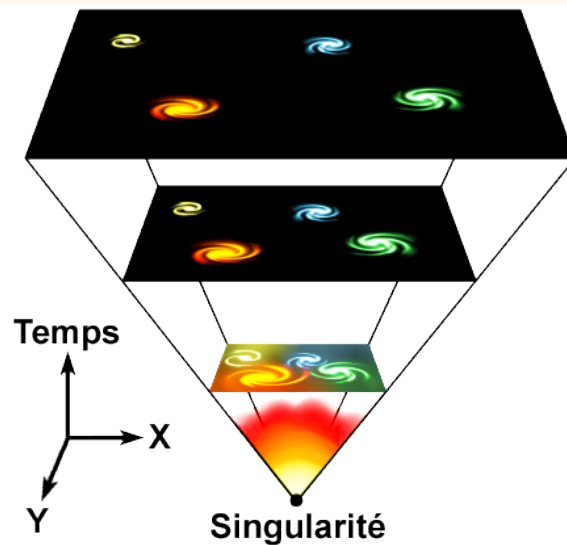
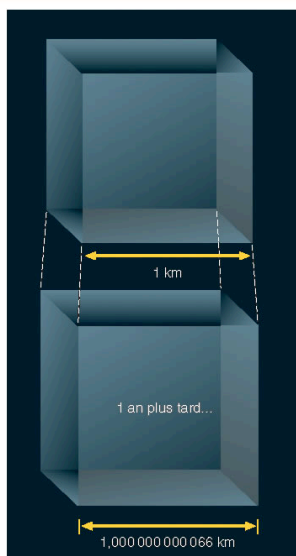


C'est la trame de l'**espace-temps** qui enfle (une solution des équations de la relativité générale)

Ordre de grandeur: 66 nm ajoutés à 1 km après 1 an suite à l'expansion de l'univers

Par conséquent, l'Univers était **plus dense** par le passé : la distance moyenne entre galaxies puis entre particules diminue

➤ singularité primordiale : **Big Bang**



Expansion de l'Univers

Modèle cosmologique

Vers une singularité primordiale

C'est la trame de l'**espace-temps** qui enfle (une solution des équations de la relativité générale)

Ordre de grandeur: 66 nm ajoutés à 1 km après 1 an suite à l'expansion de l'univers

Par conséquent, l'Univers était **plus dense** par le passé : la distance moyenne entre galaxies puis entre particules diminue

➤ singularité primordiale : **Big Bang**

Un Univers plus dense implique un Univers **plus chaud** : explication du rayonnement de fond cosmologique, émis quand $T_{\text{Univers}} = 3000 \text{ K}$

La loi de Hubble implique un **âge pour l'univers** de l'ordre de $\sim 1/H_0$ années

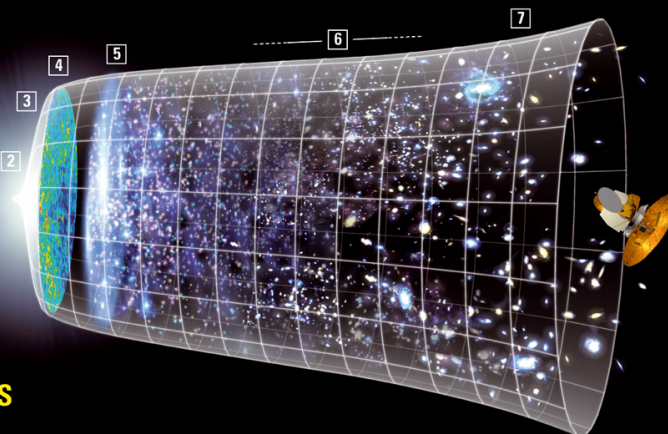
➤ âge de l'Univers : environ **13.8 milliards d'années**

Théorie du Big Bang

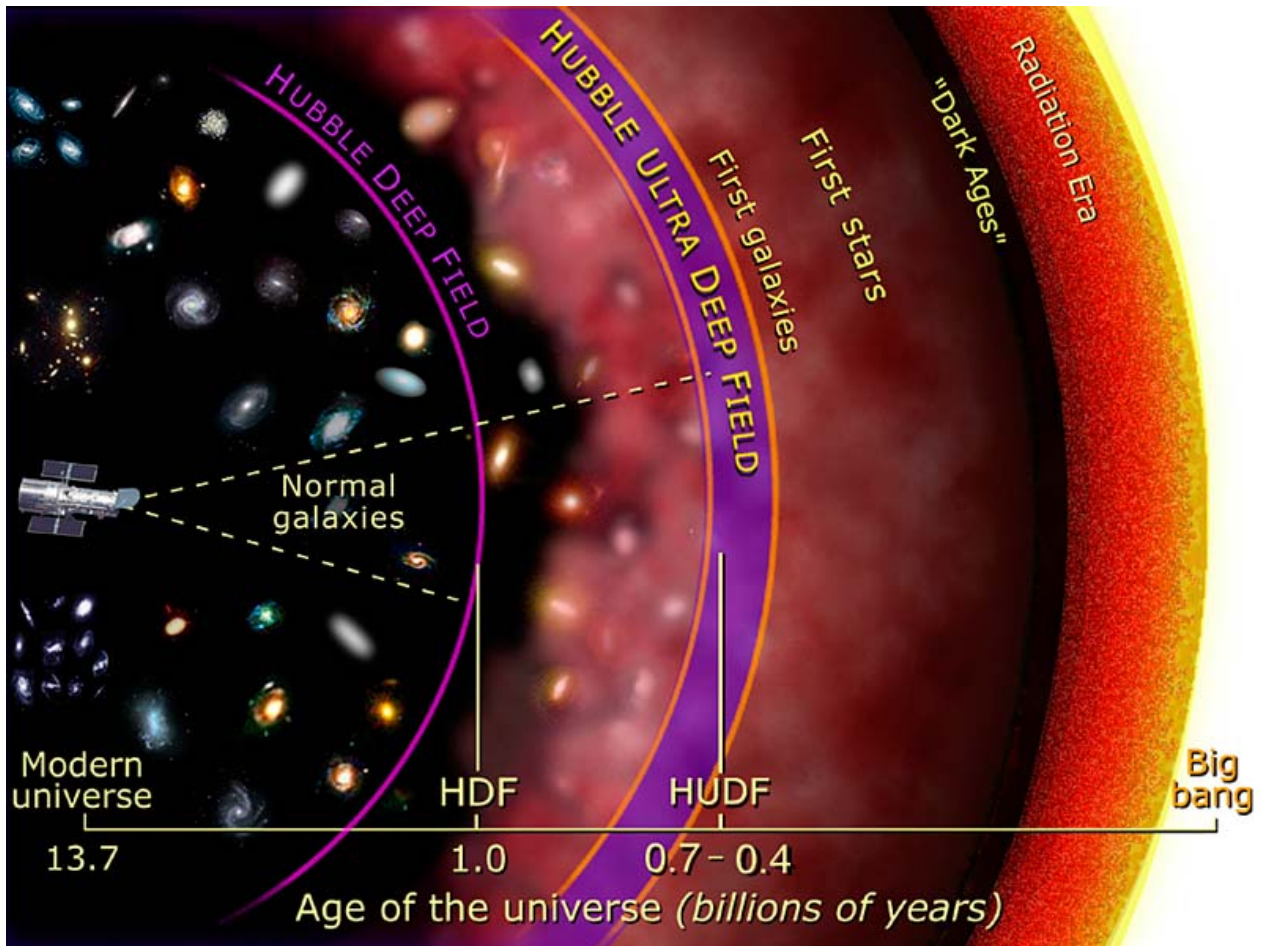
Evolution de l'Univers

1. Big Bang
2. Fluctuations quantiques
3. Inflation
4. Fonds diffus cosmologique
5. Premières étoiles
6. Formation de galaxies, planètes, etc.
7. Accélération de l'expansion de l'Univers

**UNE BRÈVE
HISTOIRE
DE L'UNIVERS**



Expansion de l'Univers, du Big Bang jusqu'à nos jours
(13,7 milliards d'années)



Les conditions de **température** et de **pression**:

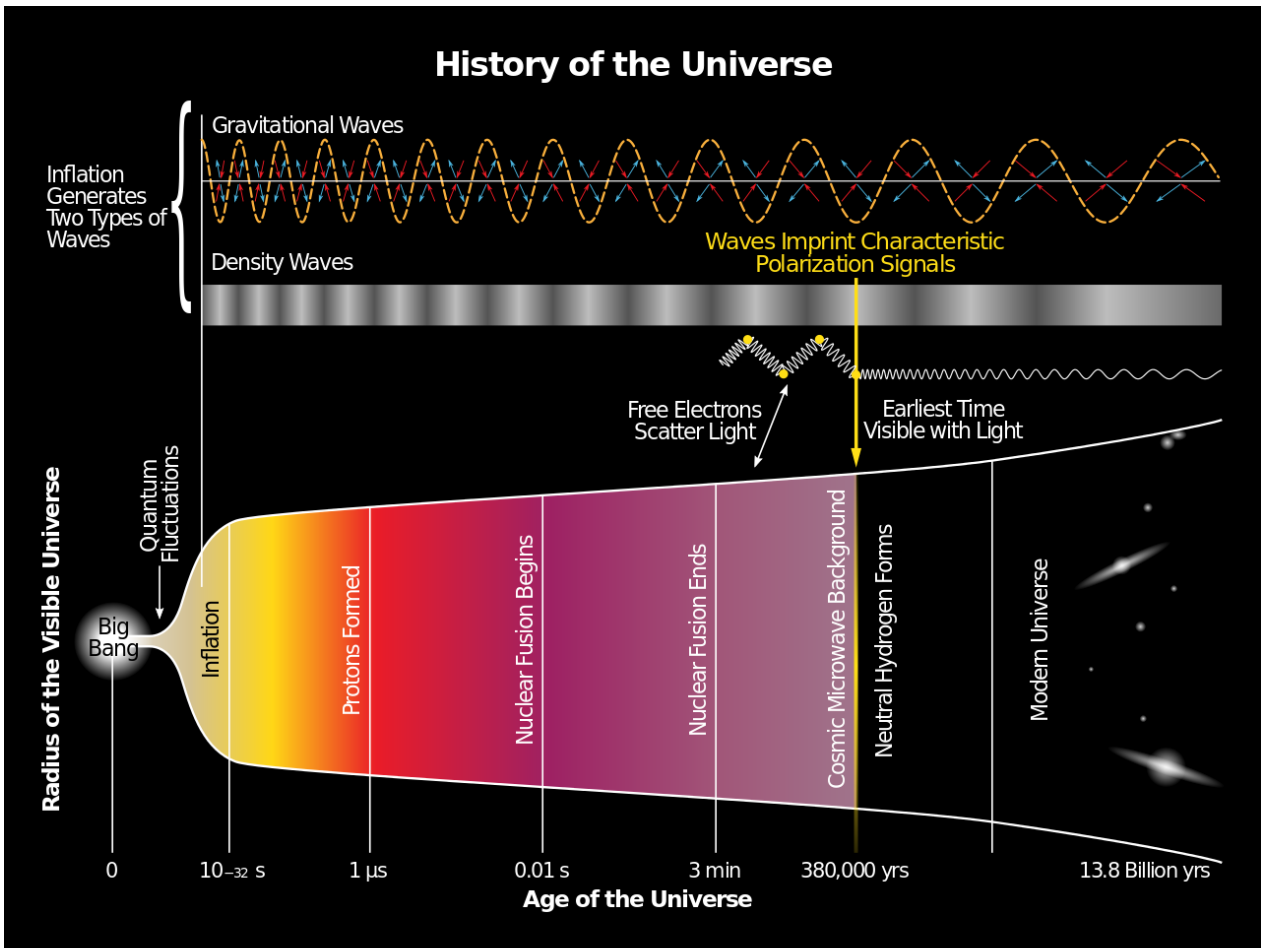
de : $t = 10^{-32} \text{ s}$, $T = 10^{26} \text{ K}$, $\rho = 10^{73} \text{ kg/m}^3$

à : $t = 100 \text{ s}$, $T = 10^9 \text{ K}$, $\rho = 10^5 \text{ kg/m}^3$

prévues par la théorie du Big Bang permettent d'expliquer dans les grandes lignes:

- ✓ la création des **protons** et des **neutrons**
- ✓ la formation des premiers **noyaux d'hélium**
- ✓ l'abondance relative des **éléments légers** (D, He, Li) qu'il est impossible d'expliquer par nucléosynthèse stellaire

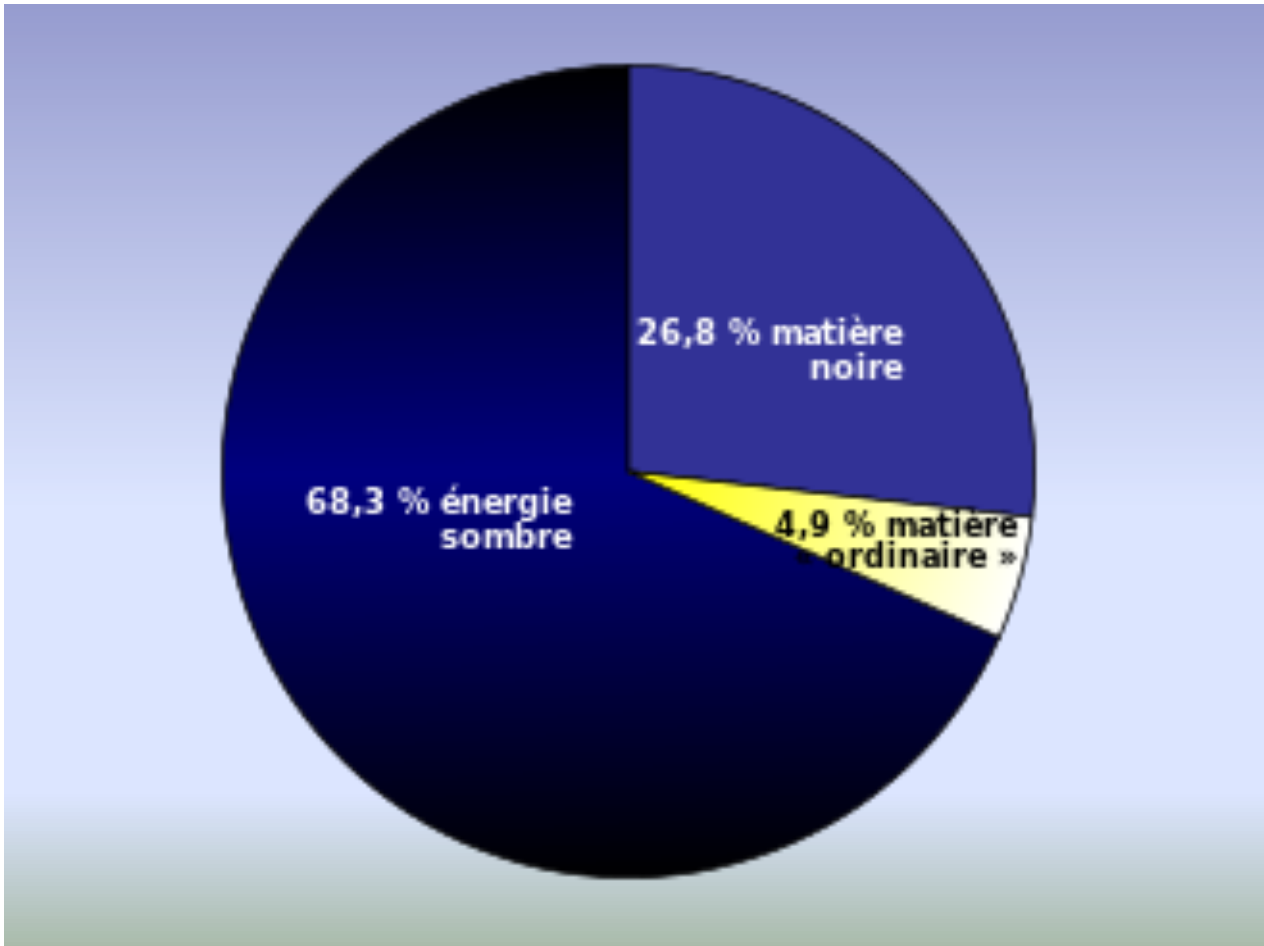
➤ dernier **pilier observationnel** de la théorie du Big Bang



1. Expansion (loi de Hubble)
2. La solution du paradoxe d'Olbers (âge fini de l'univers)
3. Rayonnement fossile
4. Nucléosynthèse primordiale

Questions ouvertes

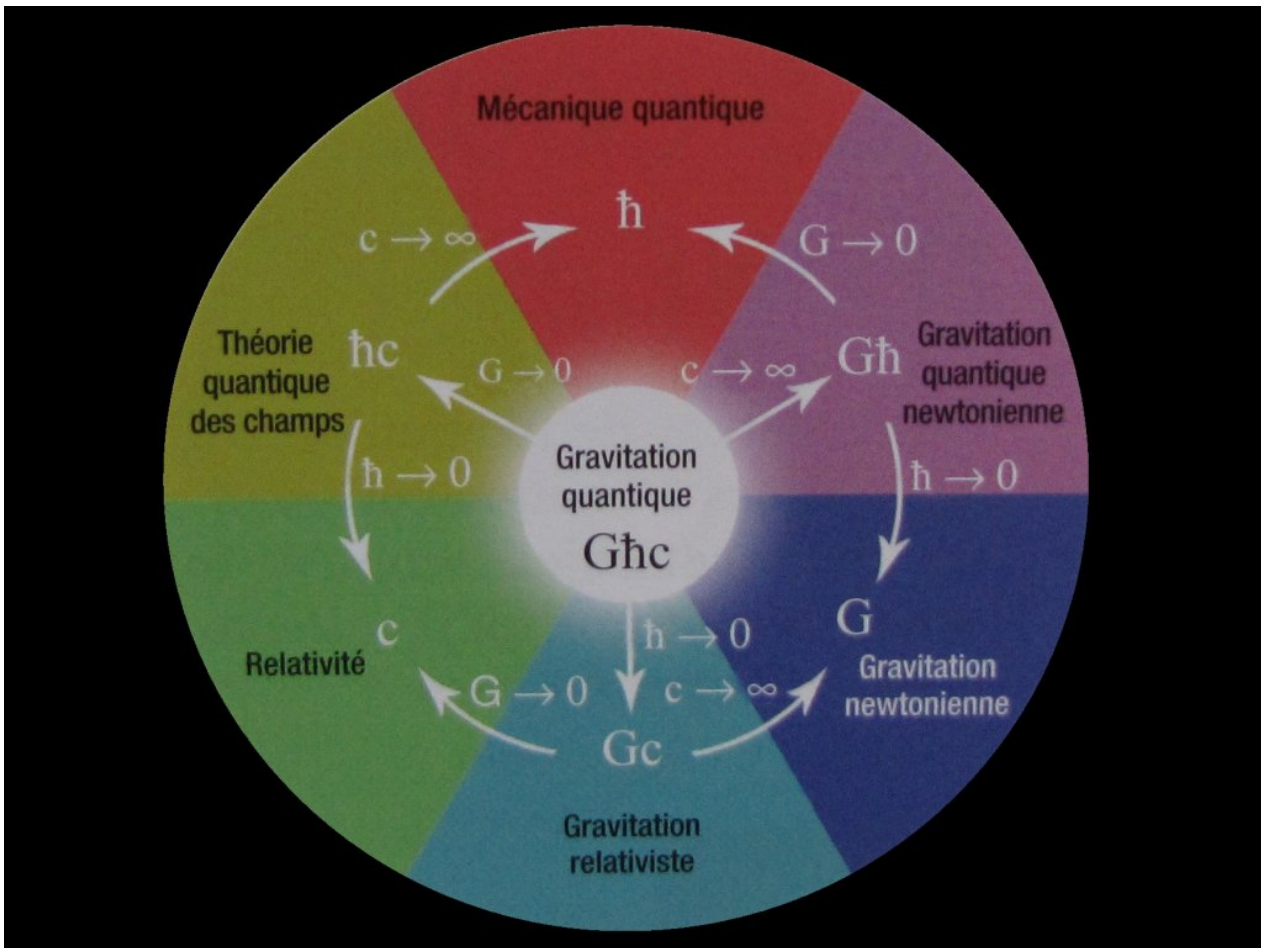
1. **Matière noire** (27% de la densité d'énergie de l'Univers) et **énergie noire** (68%) : la matière ordinaire représente seulement 5% de l'Univers!



1. Expansion (loi de Hubble)
2. La solution du paradoxe d'Olbers (âge fini de l'univers)
3. Rayonnement fossile
4. Nucléosynthèse primordiale

Questions ouvertes

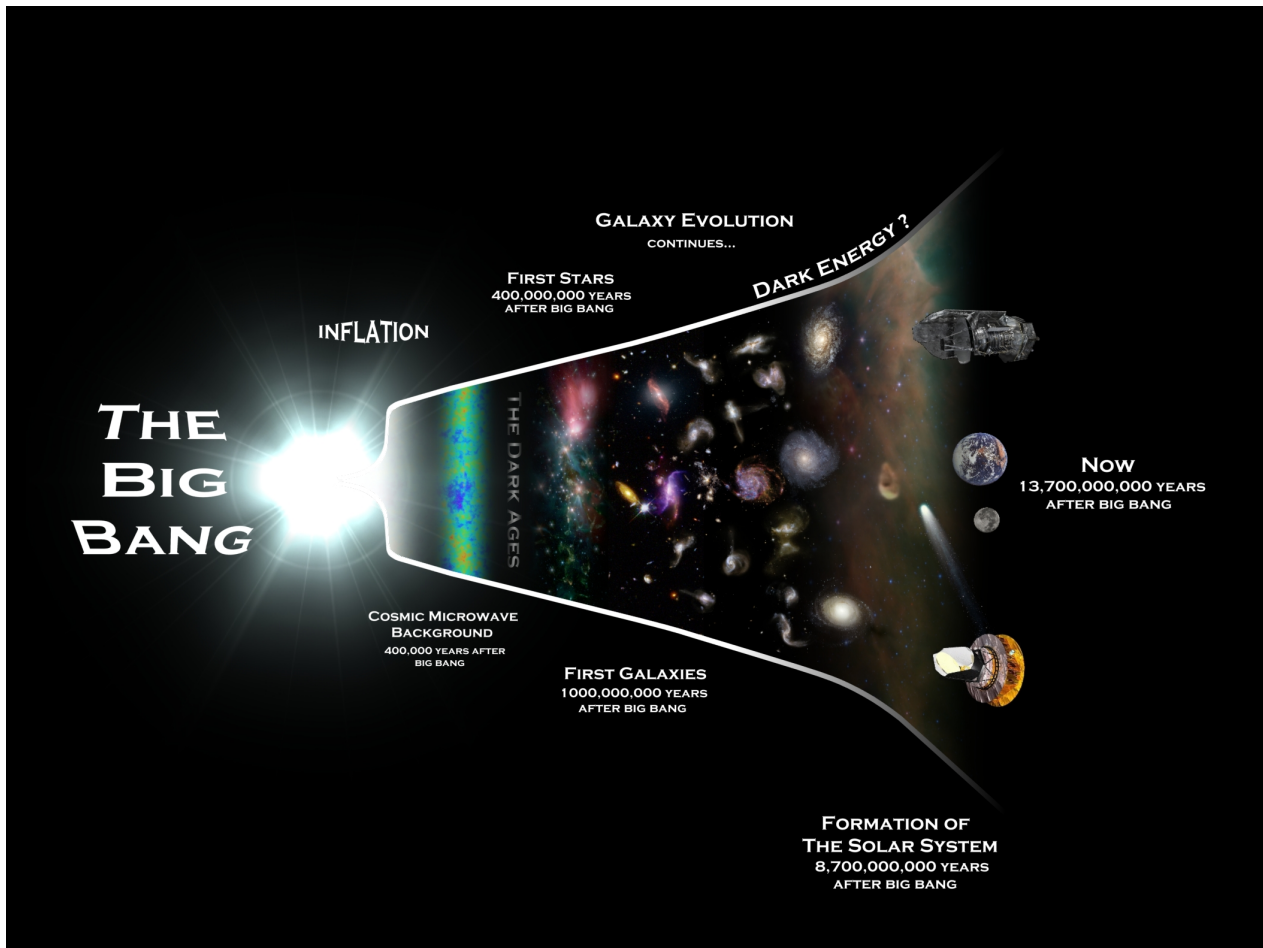
1. **Matière noire** (27% de la densité d'énergie de l'Univers) et **énergie noire** (68%) : la matière ordinaire représente seulement 5% de l'Univers!
2. Physique non connue en deçà du temps (10^{-44} s) et de la longueur (10^{-35} m) de Planck : **théorie de la gravitation quantique**



1. Expansion (loi de Hubble)
2. La solution du paradoxe d'Olbers (âge fini de l'univers)
3. Rayonnement fossile
4. Nucléosynthèse primordiale

Questions ouvertes

1. **Matière noire** (27% de la densité d'énergie de l'Univers) et **énergie noire** (68%) : la matière ordinaire représente seulement 5% de l'Univers!
2. Physique non connue en deçà du temps (10^{-44} s) et de la longueur (10^{-35} m) de Planck : **théorie de la gravitation quantique**
3. **Inflation cosmique** (fluctuation quantique? origine?) et problème de **l'horizon cosmologique** (pourquoi Univers si homogène?)



La Structure de l'Univers

Théorie du Big Bang

Modèle cosmologique standard

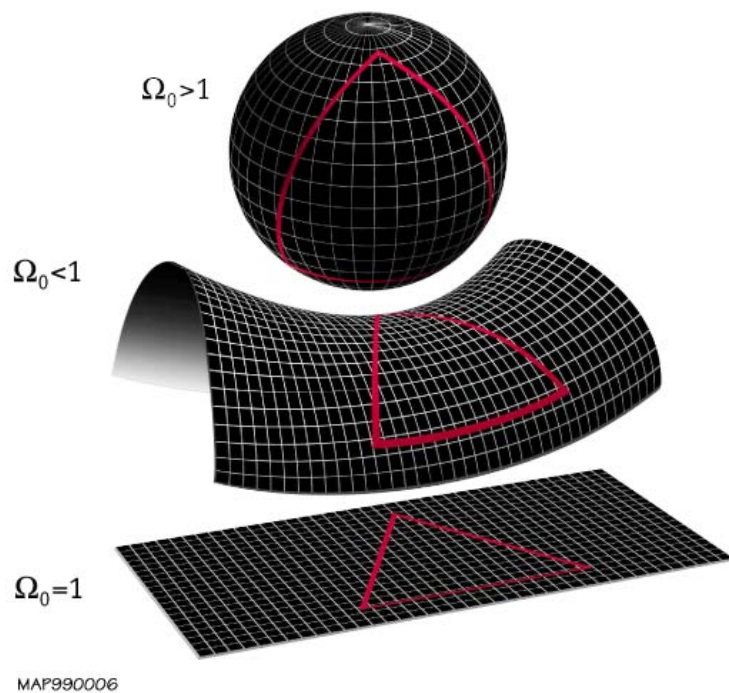
Evidences en faveur du Big Bang

1. Expansion (loi de Hubble)
2. La solution du paradoxe d'Olbers (âge fini de l'univers)
3. Rayonnement fossile
4. Nucléosynthèse primordiale

Questions ouvertes

1. **Matière noire** (27% de la densité d'énergie de l'Univers) et **énergie noire** (68%) : la matière ordinaire représente seulement 5% de l'Univers!
2. Physique non connue en deçà du temps (10^{-44} s) et de la longueur (10^{-35} m) de Planck : **théorie de la gravitation quantique**
3. **Inflation cosmique** (fluctuation quantique? origine?) et problème de **l'horizon cosmologique** (pourquoi Univers si homogène?)
4. **Topologie de l'Univers**

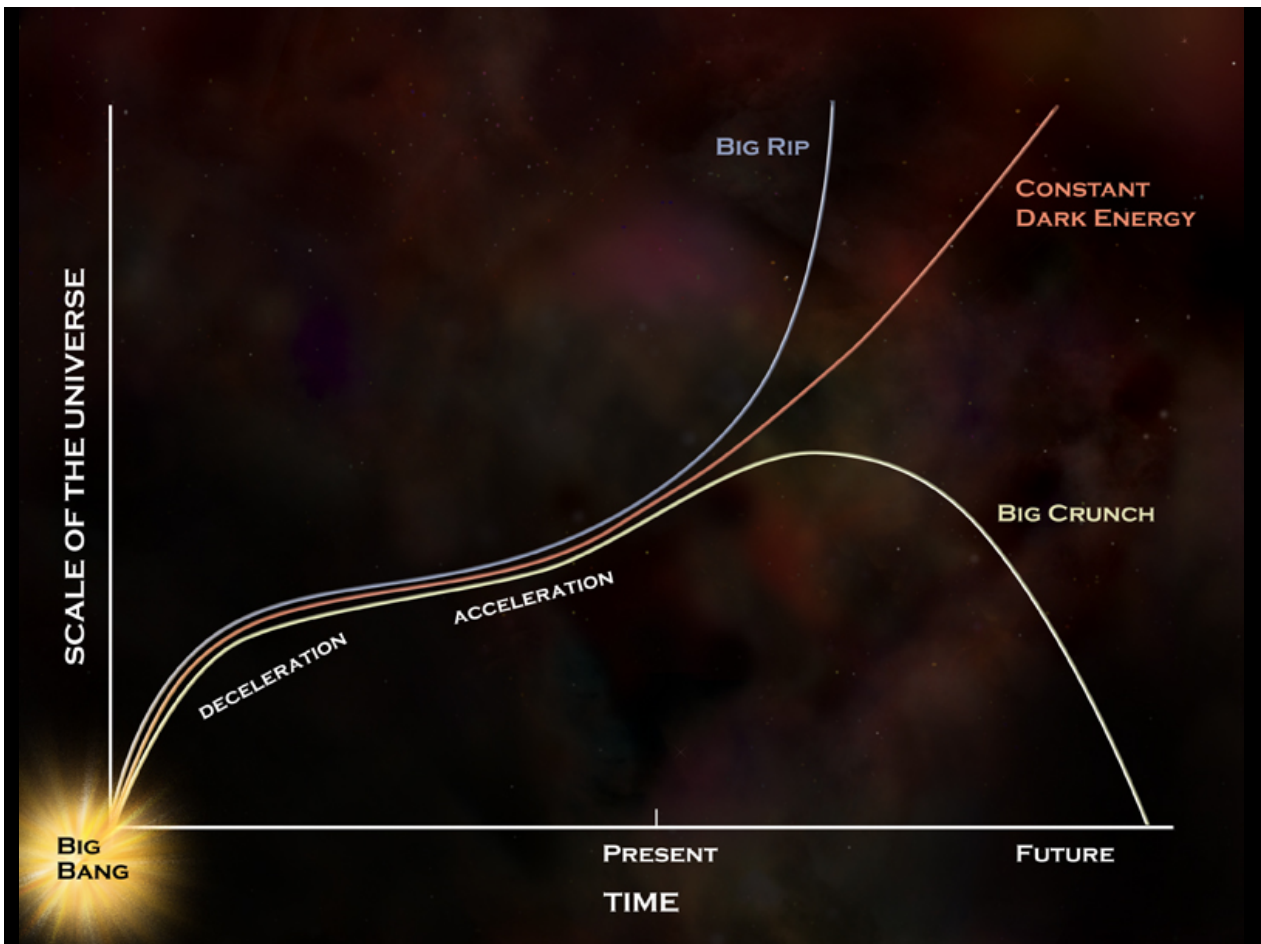
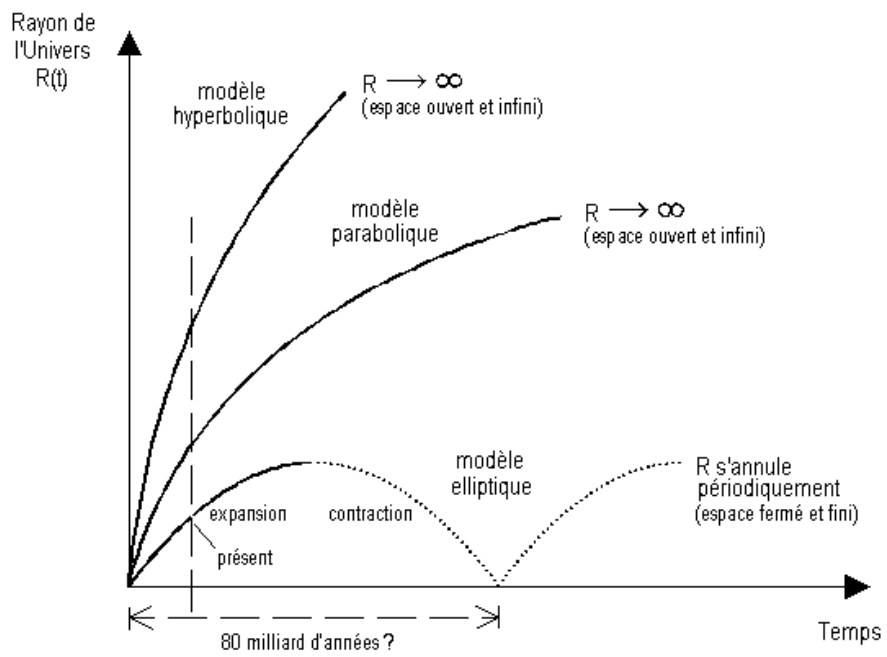
masse volumique univers réel
 $W = \frac{\text{masse volumique univers réel}}{\text{masse volumique univers plat}}$

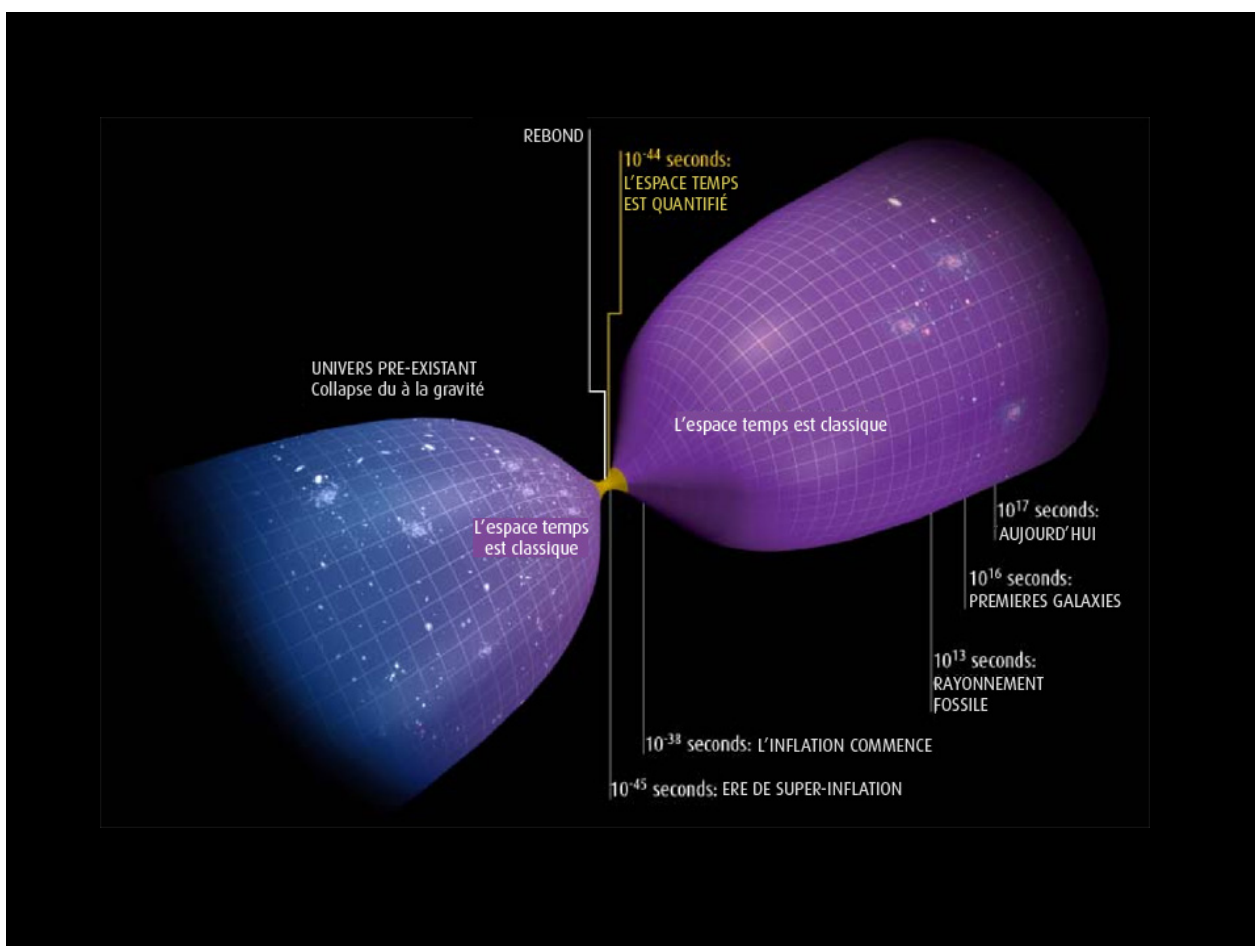
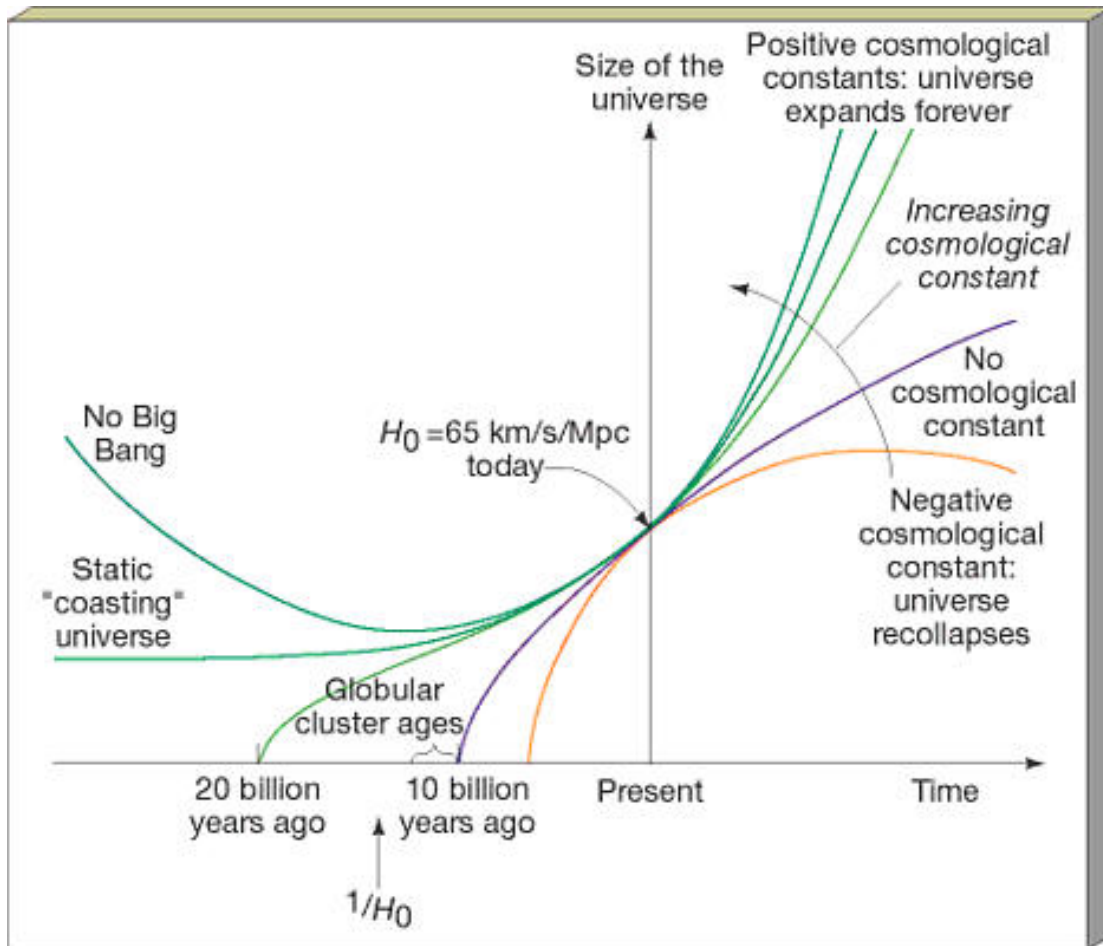


1. Expansion (loi de Hubble)
2. La solution du paradoxe d'Olbers (âge fini de l'univers)
3. Rayonnement fossile
4. Nucléosynthèse primordiale

Questions ouvertes

1. **Matière noire** (27% de la densité d'énergie de l'Univers) et **énergie noire** (68%) : la matière ordinaire représente seulement 5% de l'Univers!
2. Physique non connue en deçà du temps (10^{-44} s) et de la longueur (10^{-35} m) de Planck : **théorie de la gravitation quantique**
3. **Inflation cosmique** (fluctuation quantique? origine?) et problème de **l'horizon cosmologique** (pourquoi Univers si homogène?)
4. **Topologie de l'Univers**
5. **Destin de l'Univers**: Big Freeze, Big Rip, Big Crunch, Big Bounce ?





Théorie du Big Bang

Modèle cosmologique standard

Evidences en faveur du Big Bang

1. Expansion (loi de Hubble)
2. La solution du paradoxe d'Olbers (âge fini de l'univers)
3. Rayonnement fossile
4. Nucléosynthèse primordiale

Questions ouvertes

1. **Matière noire** (27% de la densité d'énergie de l'Univers) et **énergie noire** (68%) : la matière ordinaire représente seulement 5% de l'Univers!
 2. Physique non connue en deçà du temps (10^{-44} s) et de la longueur (10^{-35} m) de Planck : **théorie de la gravitation quantique**
 3. **Inflation cosmique** (fluctuation quantique? origine?) et problème de **l'horizon cosmologique** (pourquoi Univers si homogène?)
 4. **Topologie de l'Univers**
 5. **Destin de l'Univers**: Big Freeze, Big Rip, Big Crunch, Big Bounce ?
- encore beaucoup de travail pour futurs physiciens, informaticiens, mathématiciens, chimiste, biologistes, géologues, etc... !