



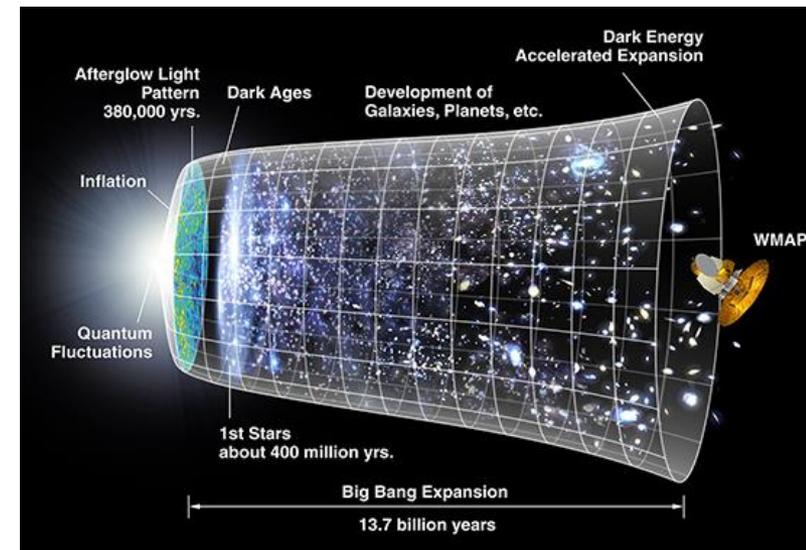
COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Comment le Big-Bang s'est imposé



James Peebles



Françoise Combes  
Observatoire de Paris

Janvier 2020

l'Observatoire  
de Paris



# Les galaxies existent-elles?

Au début du XXe siècle: **un grand débat en 1920**

Pour connaître la taille de notre Univers

Nébuleuses, Amas d'étoiles ou Galaxies?

*Entre Harlow Shapley et Heber Curtis*



Henrietta Leavitt

**Vesto Slipher** mesure des vitesses de qq 1000km/s  
de ces nébuleuses, par le **décalage vers le rouge**

En 1920, on connaissait la relation P-L des Céphéides  
pour connaître la distance (Leavitt, 1909)

Edwin Hubble

Hubble (1925-6) identifie des Céphéides dans M31, M33  
Ce sont des galaxies à part, distantes de ~1000kpc

Trouve une relation **vitesse**  $\propto$  **distance**

**Expansion de l'Univers, en 1929**





Galaxies qui  
s'éloignent  
Vitesse  $\propto$  Distance  
**Loi de Hubble-  
Lemaître**

Clairvoyance de Georges Lemaître:  
**L'Univers est en expansion**

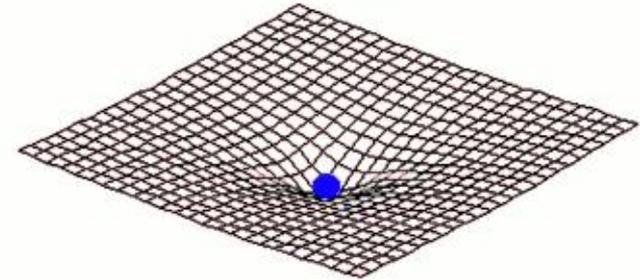


Décalage vers le rouge



# Quelques années auparavant

**1905:** Relativité restreinte, espace-temps,  $E=mc^2$



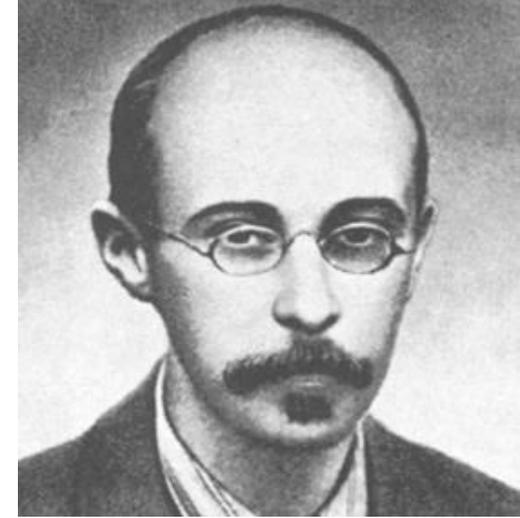
**1915:** Relativité générale

→ La gravitation comme déformation de l'espace

**1917:** on commence à exploiter la RG pour des modèles d'Univers  
A l'époque, on pensait l'Univers statique, stable, en équilibre  
Einstein propose donc une sphère, avec courbure positive  
et rajoute une **constante  $\Lambda$**  dans ses équations

**→ 1919:  $\Lambda$  est une nécessité, au détriment de la beauté de la théorie**

# Modèles de Friedman et Lemaître

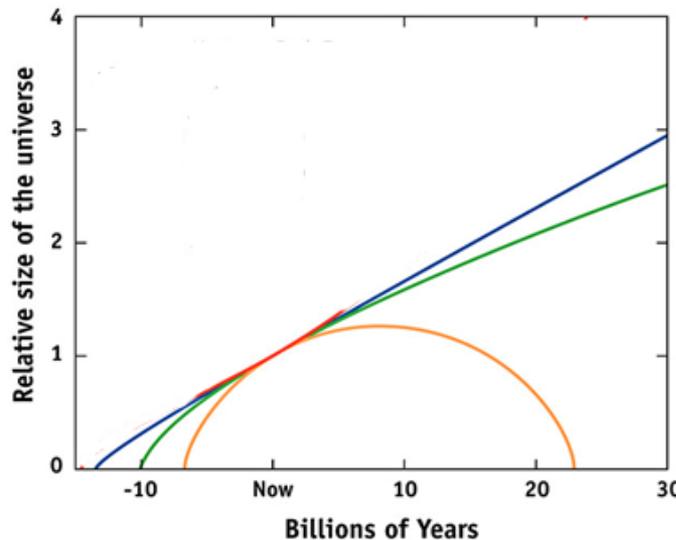


*Friedman*

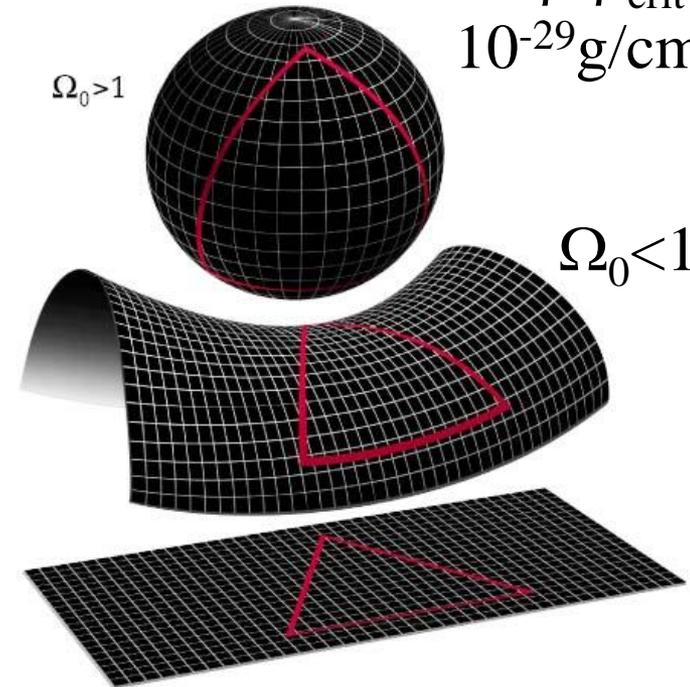
Plusieurs modèles non-statiques sont proposés durant la décennie suivante: Alexander Friedman (**1922**)

L'abbé Georges Lemaître résoud aussi les équations de Friedmann en **1927**, avec un univers en expansion

$$\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}} \\ 10^{-29} \text{g/cm}^3$$



$\Omega_0 > 1$



$\Omega_0 < 1$

$\Omega_0 = 1$

# Modèle de Willem de Sitter



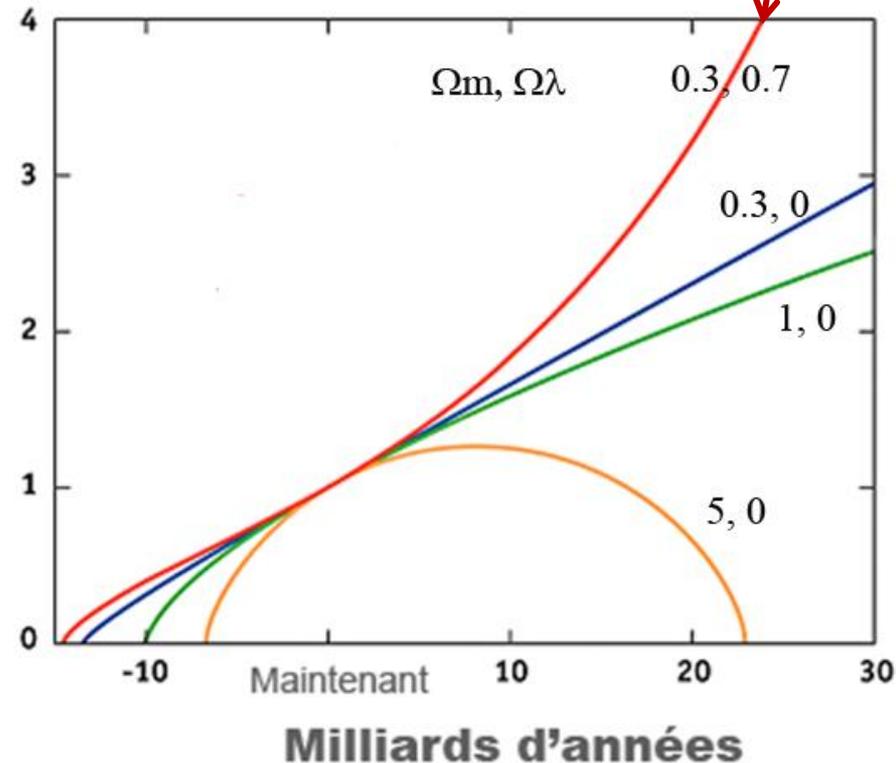
De Sitter en 1917 développe à partir de  $\Lambda$  un Univers en expansion, complètement vide, **sans matière**

Contraire aux idées de Mach, où la courbure de l'Univers est due à son contenu

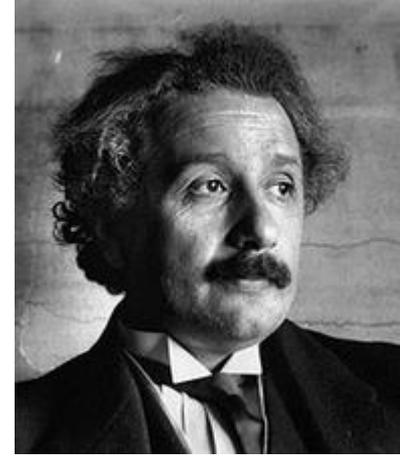
→ Einstein tourne en dérision le modèle de Willem de Sitter



Taille de l'Univers



# Einstein réalise son « erreur »



**1931**: après l'observation de l'expansion de l'Univers Einstein écrit que **la constante  $\Lambda$  est inutile**

Avec de Sitter, il signe en **1932** un modèle sans courbure, sans constante cosmologique, où le rayon de l'Univers est relié à la densité de matière

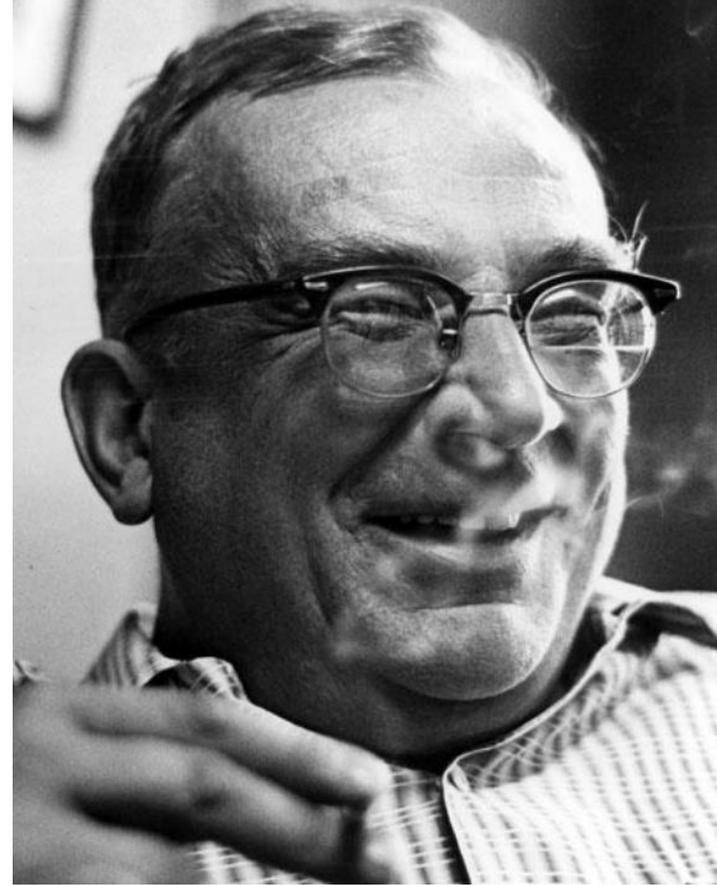
Ce modèle **Einstein-de Sitter** resta populaire pendant le XXe siècle, et bien que de nombreux chercheurs utilisaient la constante  $\Lambda$ , Einstein ne voulut plus jamais en entendre parler!

**L'abbé Lemaître par contre a bien vu l'utilité de la constante**

# La contribution de Gamow

C'est George Gamow, qui a plusieurs reprises (conférences, publications) parle de « **the biggest blunder** » reconnue par Einstein

Il montre que les abondances des éléments légers (He, D, Li) ne peuvent être formés que dans le premier 1/4heure de l'Univers



*George Gamow*

**Soupçonne qu'il doit rester un fond diffus**

Gamow avait un grand sens de l'humour

Ajout de Hans Bethe dans son papier avec Ralph Alpher, pour faire « Alpher, Bethe, Gamow » papier sur la nucléosynthèse primordiale

# La théorie du Big-Bang

**1929:** Il existe des galaxies, et elles s'éloignent !

**vitesse proportionnelle à leur distance (Hubble-Lemaître)**

## **L'espace est en expansion**

Conforme aux équations de la relativité générale (1915)

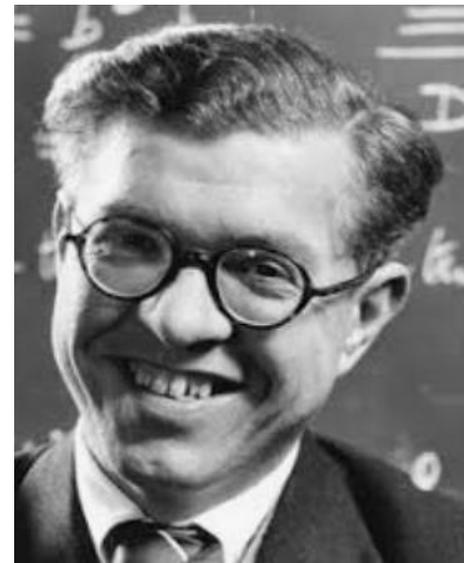
→ Pas besoin de  $\Lambda$

Georges Lemaître propose une origine de l'Univers  
**très dense et très chaud (1927)**

Qualifié de **Big-Bang** par Fred Hoyle (BBC, 1949!)

**1965:** découverte du fonds cosmologique microonde  
**Penzias & Wilson (Nobel 1978)**

*Fred Hoyle*



# Le fonds microonde

**Découvert par hasard** en 1965, comme un bruit de fond gênant!

Alors que des théoriciens commençaient à le prévoir ( $T < 40K$ )

→ **R. Dicke & Jim Peebles à Princeton**

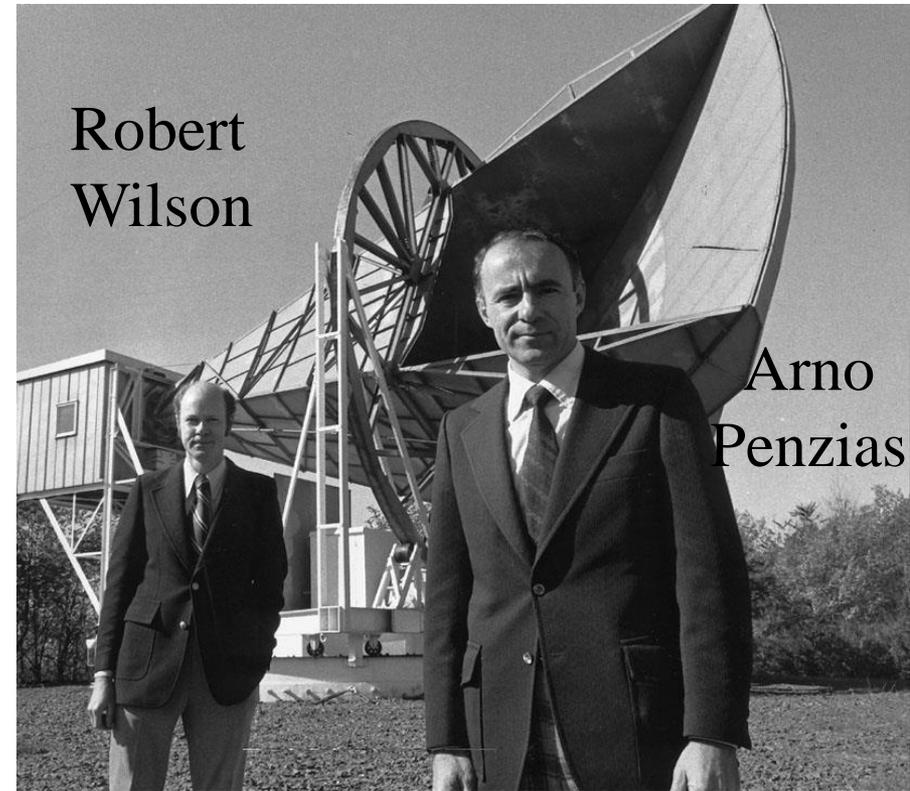
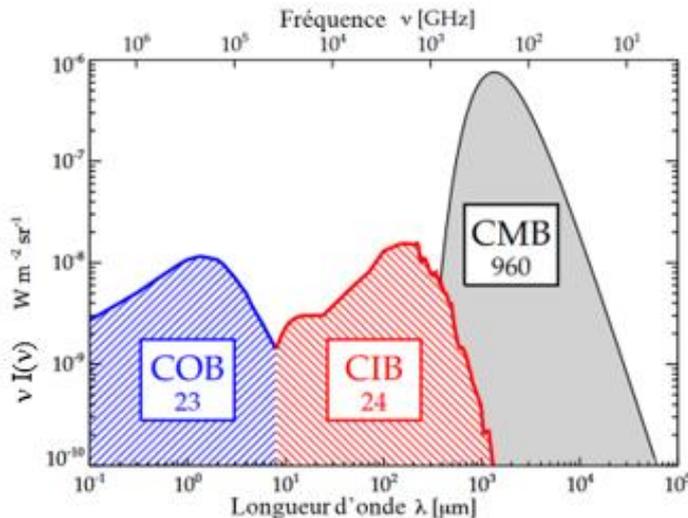
1962: Jim Peebles vient du Canada  
faire un PhD avec R. Dicke

$400\text{ph/cm}^3$

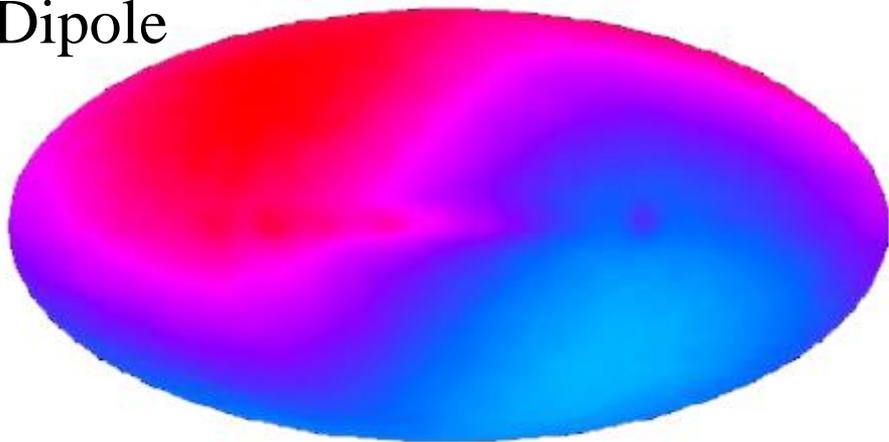
$10^{13} / \text{cm}^2/\text{s}$

**$T = 2,73K$**

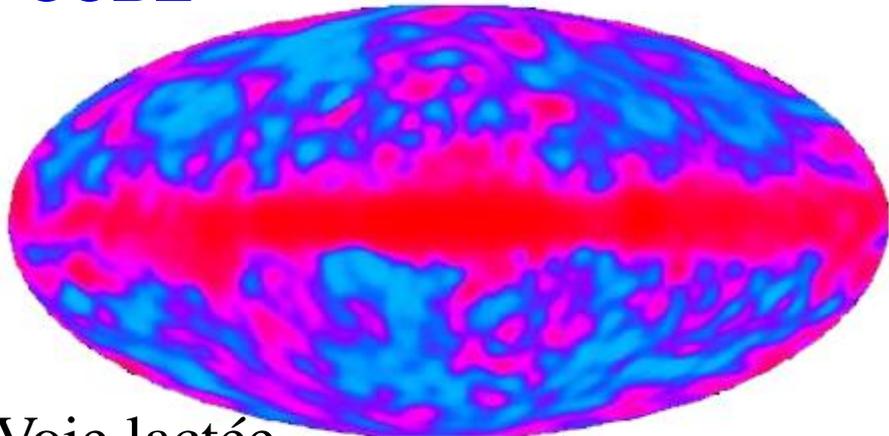
*Dicke, R., Peebles, P. J. E., Roll, P.,  
Wilkinson, D.: 1965, ApJ 142, 414*  
*Penzias, A, Wilson, R. ApJ, 142, 419*



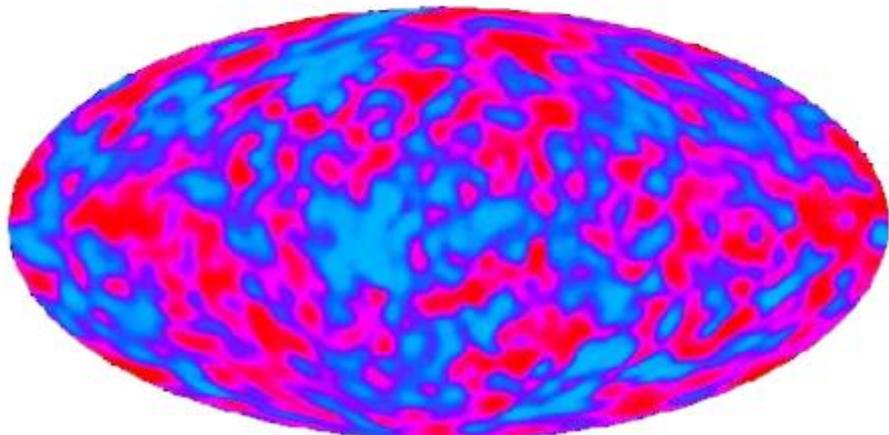
Dipole



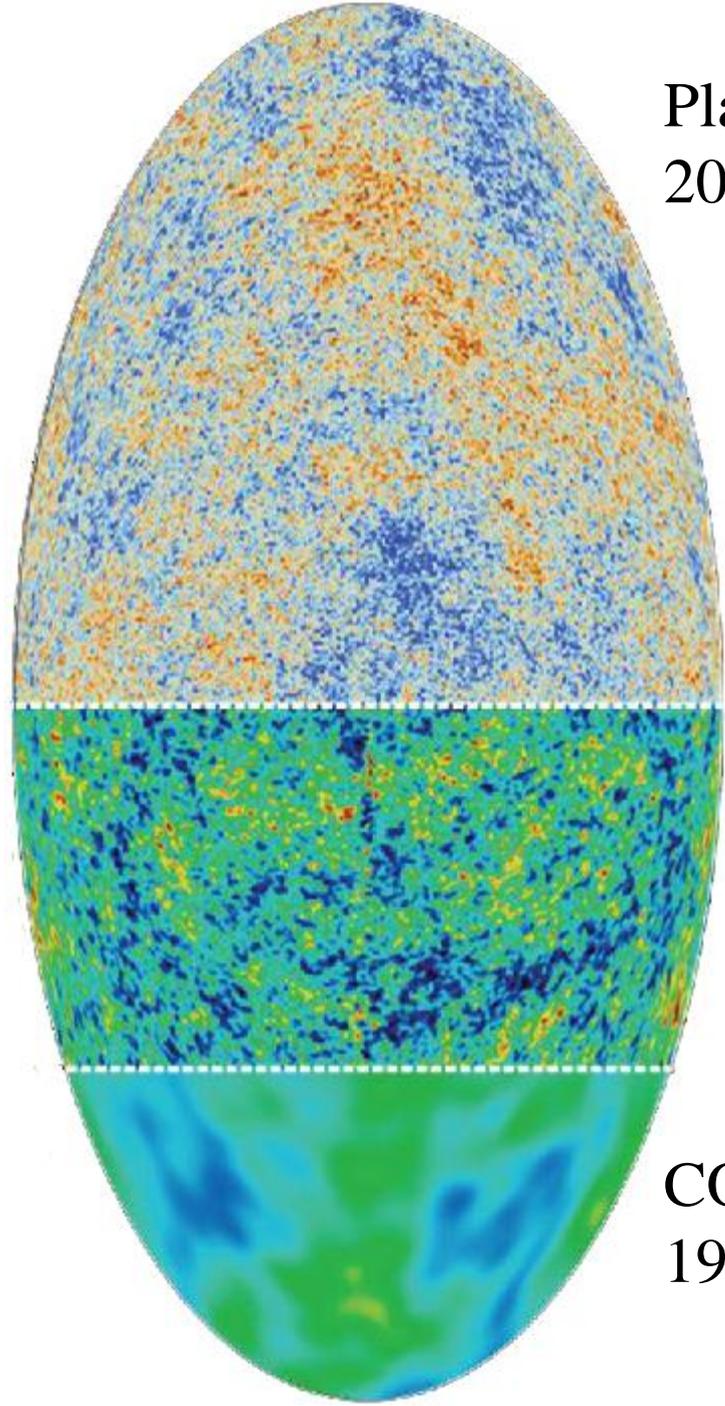
COBE



Voie lactée



Planck  
2013



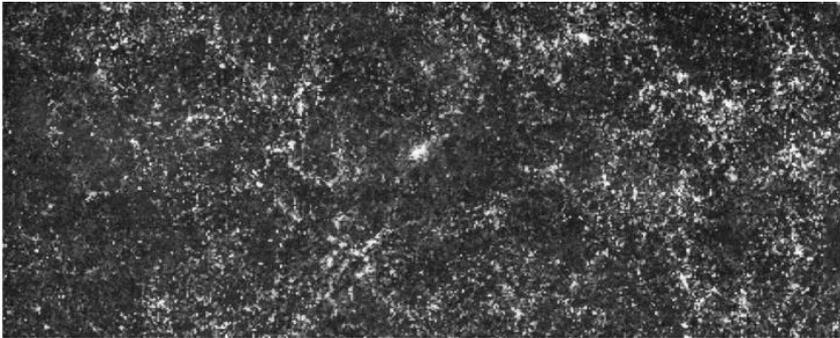
WMAP  
2003

COBE  
1992

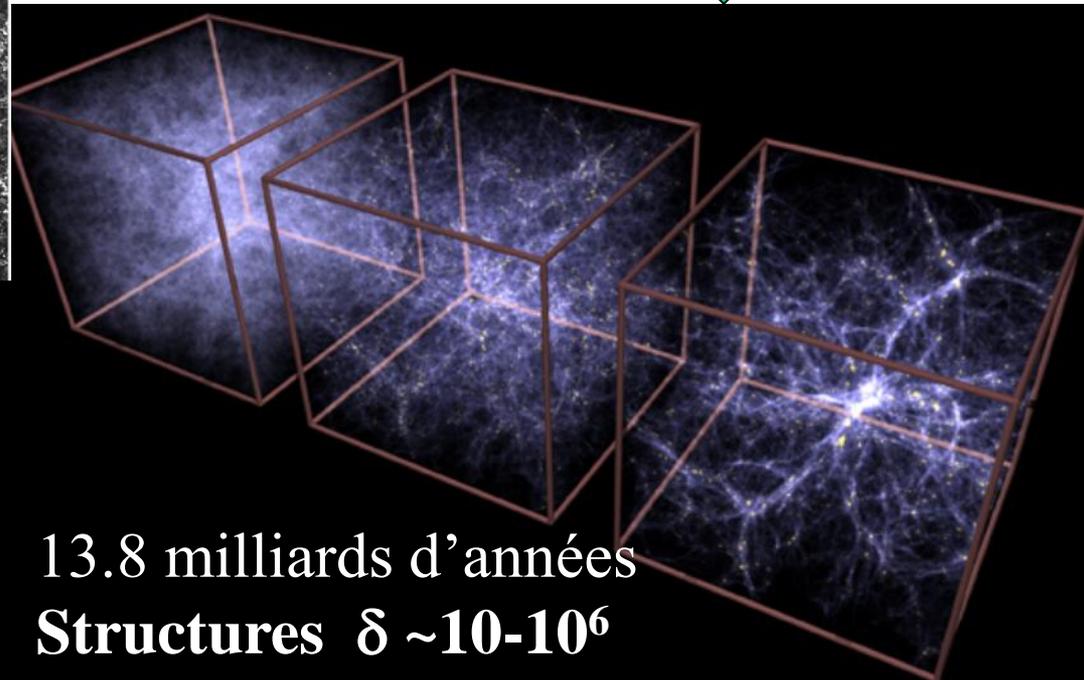
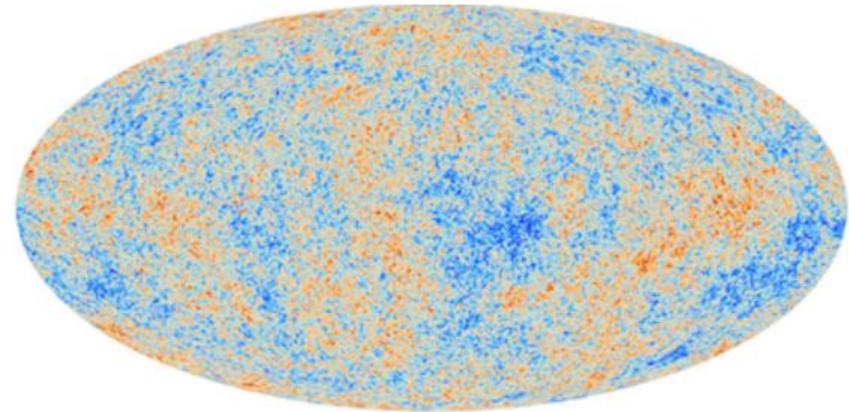
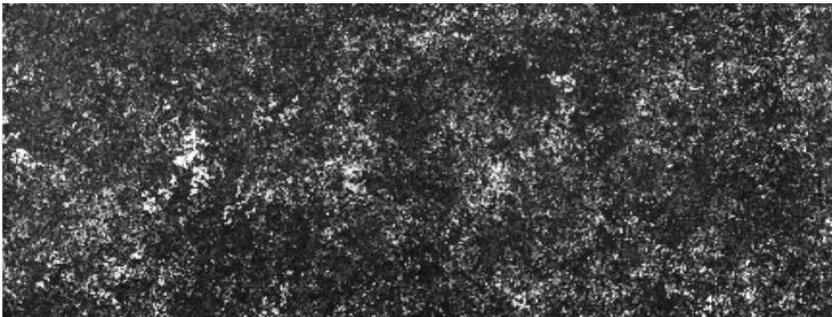
# D'où viennent les structures?

380 000 ans après le Big-Bang  
 $\delta = \delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$

Lick data



Modèle



Simulations non-dynamiques  
de 7 millions de galaxies

$$\xi(\mathbf{r}) \propto r^{-\gamma} \quad \gamma=1.7$$

*Soneira & Peebles 1978*

13.8 milliards d'années

**Structures  $\delta \sim 10^{-10^6}$**

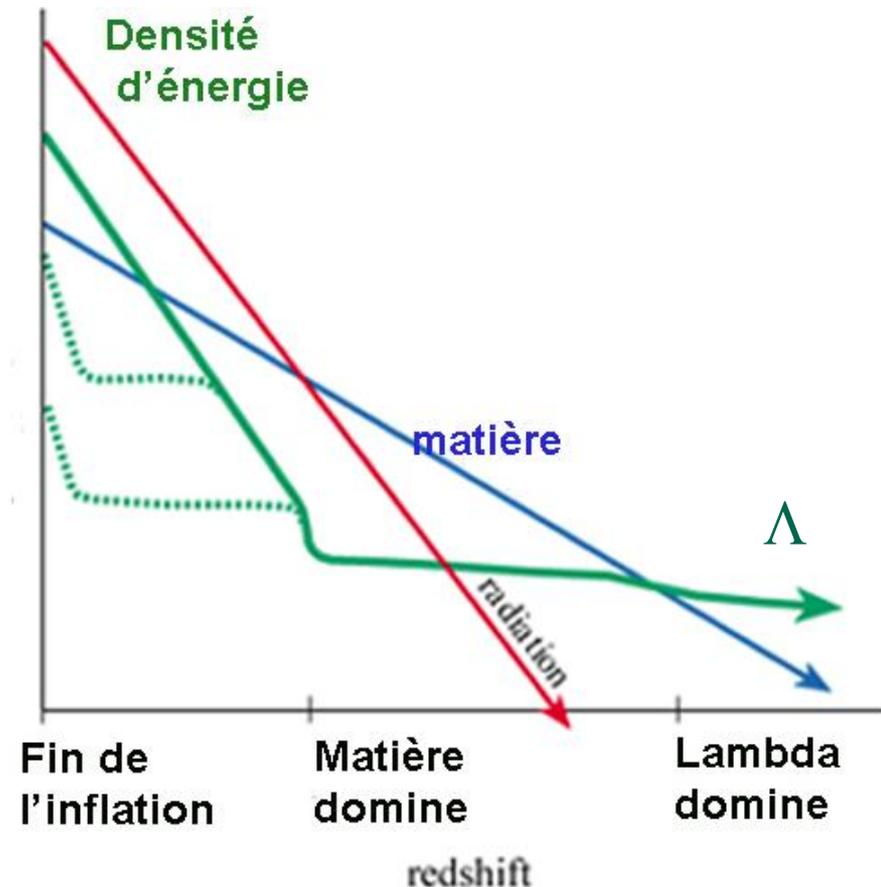
# Constante cosmologique - quintessence

- L'inflation pourrait aussi être une **constante  $\Lambda$ , ou champ  $V(\phi)$**
- Une constante équivaut à un champ scalaire  $\phi = \Lambda$  qui garde la même valeur en tout point de l'espace et du temps
- Donne une pression  $p = -\Lambda$
- Lien entre les deux champs ?

Durées  $10^{-32}$  s et Gyrs

Energies  $10^{15}$  Gev 1 milli-eV

Taux d'expansion  $10^{50} \times$



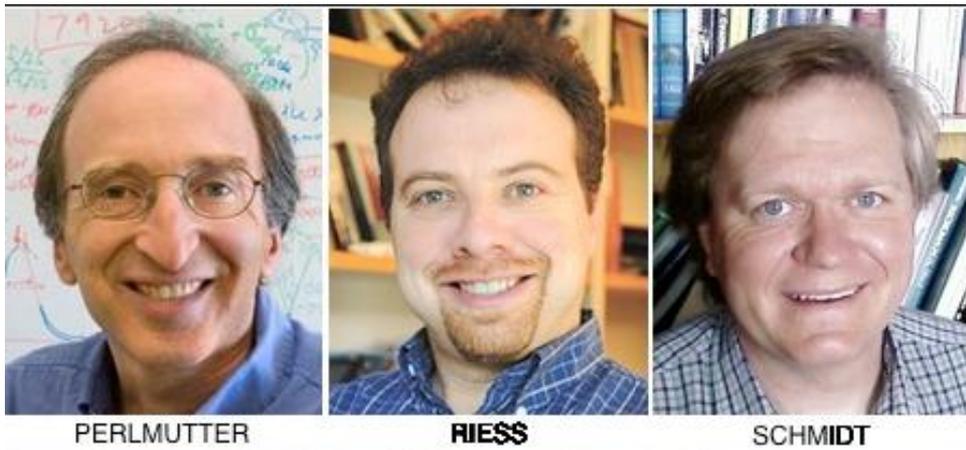
# 1998: Découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers

→ Prix Nobel en 2011 à 2 équipes

- **Saul Perlmutter**, *The Supernova Cosmology Project*, Berkeley
- **Adam Riess** (Baltimore) et **Brian Schmidt** (Australie)

*The High-z Supernova Search Team*

Au total environ 50 SN Ia avec une courbe de lumière bien calibrée,



**Constante  $\Lambda$**   
**Le retour!**

# Energie du vide



**Wolfgang Pauli en 1920:** énergie du vide en mécanique quantique, Rapprochement avec  $\Lambda \rightarrow$  action gravitationnelle

Ses calculs montrèrent que le rayon de l'univers d'Einstein n'arrivait pas à la Lune!

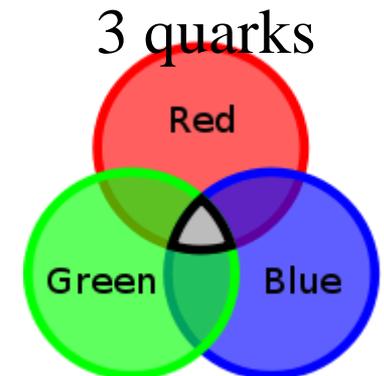
Sommation de l'énergie fondamentale de chaque degré de liberté jusqu'à une fréquence  $\nu_{\max}$  correspondant au rayon de l'électron

$\rightarrow$  densité d'énergie si grande que le **rayon de l'univers d'Einstein**  $a(t)$  est de 31km!

$$\Lambda = c^2/a^2$$

**Années 1960-70**, approche théorie des champs, chromodynamique quantique (QCD)

**Encore entre 60 et 110 ordres de grandeur!**



# Contenu de l'Univers

- Matière ordinaire 5%

Baryons (protons, neutrons)

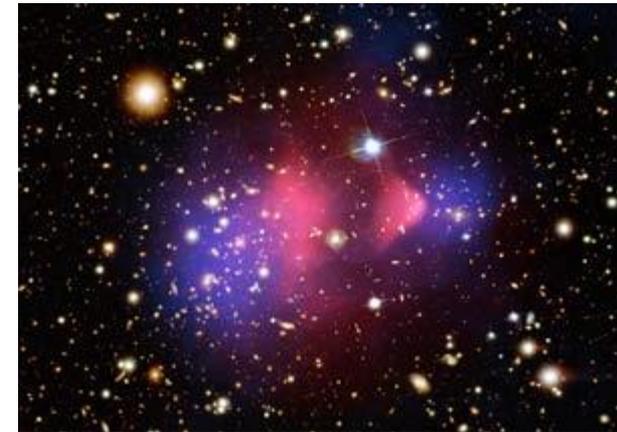
$\Omega_b$



- Matière noire exotique 25%

non baryonique

$\Omega_{DM}$



- Energie noire 70%

$\Omega_\Lambda$



$$\Omega = \rho / \rho_{crit}$$

$$\rho_{crit} = 10^{-29} \text{g/cm}^3$$

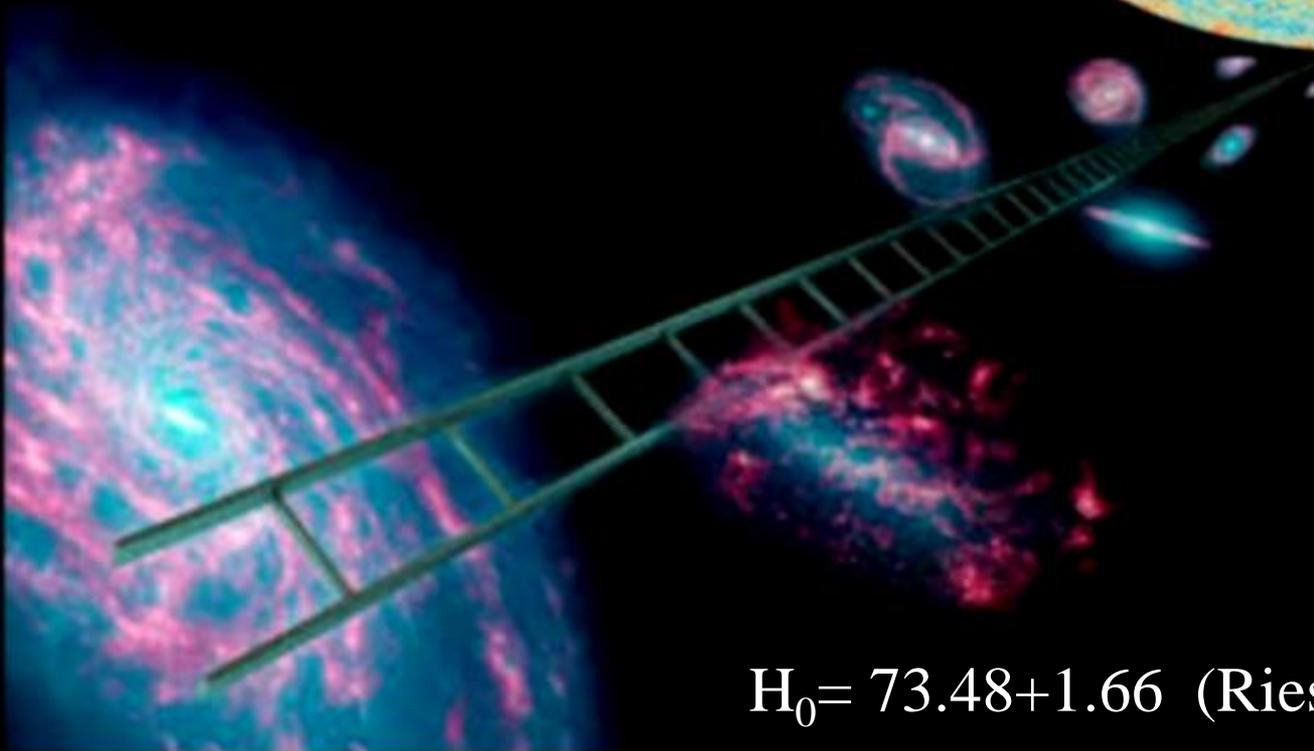
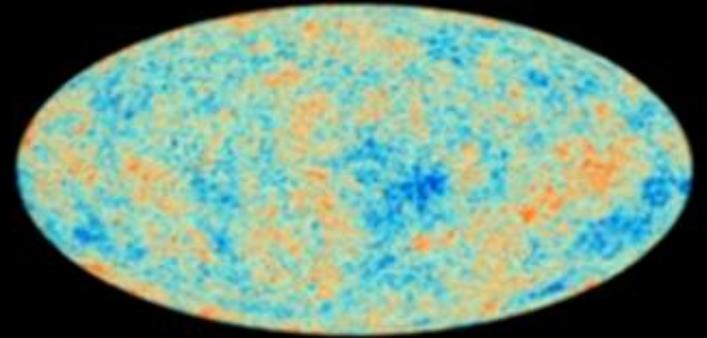
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

ou constante cosmologique  $\Lambda$

$H_0 = 67.8 \pm 0.9$  (Planck coll 2016)

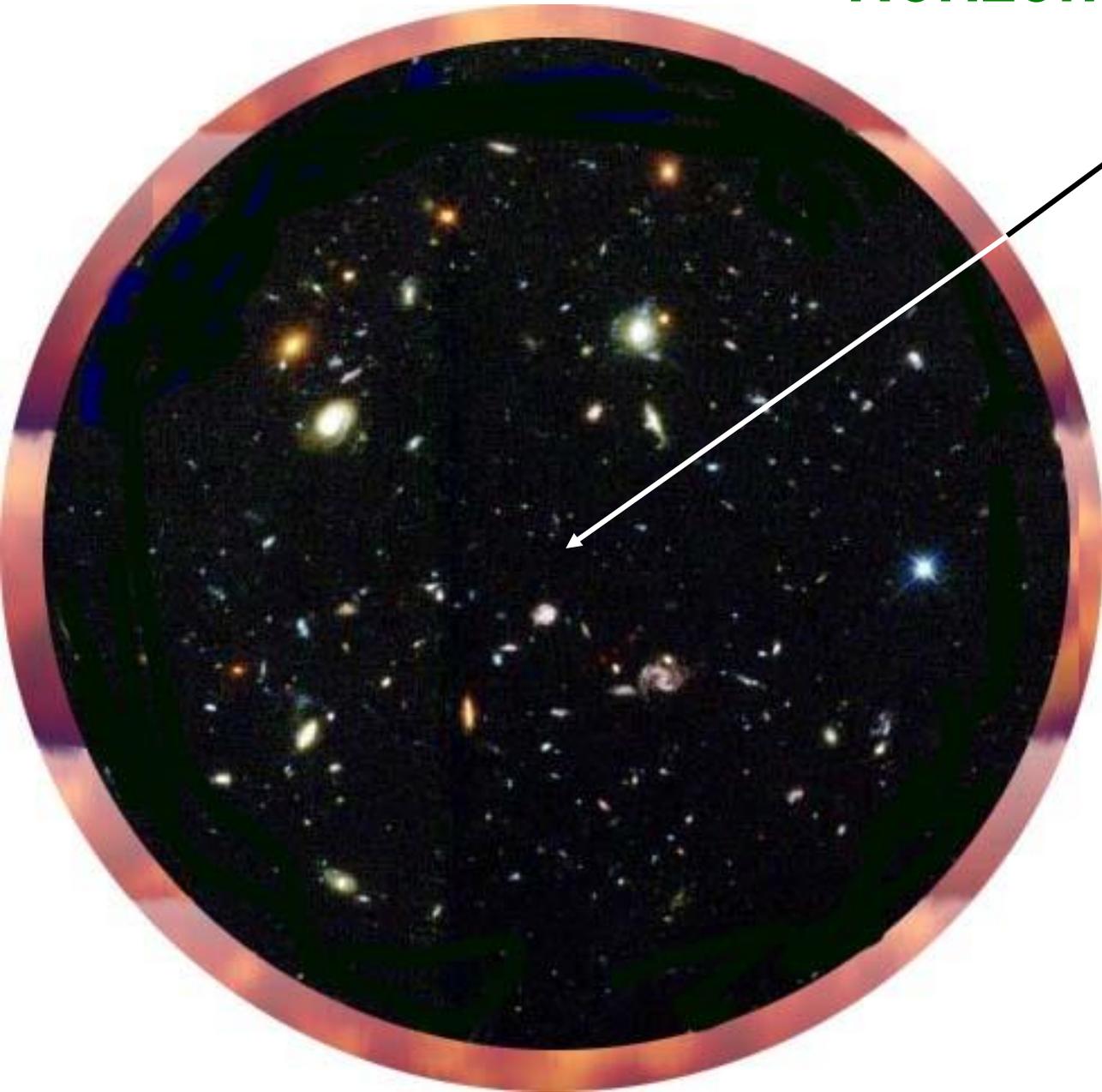
# The $H_0$ challenge

Aujourd'hui, écart à  $4.4 \sigma$



$H_0 = 73.48 \pm 1.66$  (Riess et al 2018)

# Horizon de l'Univers

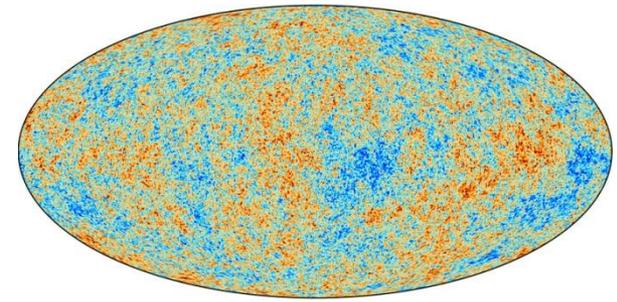


**Vous êtes ICI**

Regarder loin  
revient à remonter  
le temps

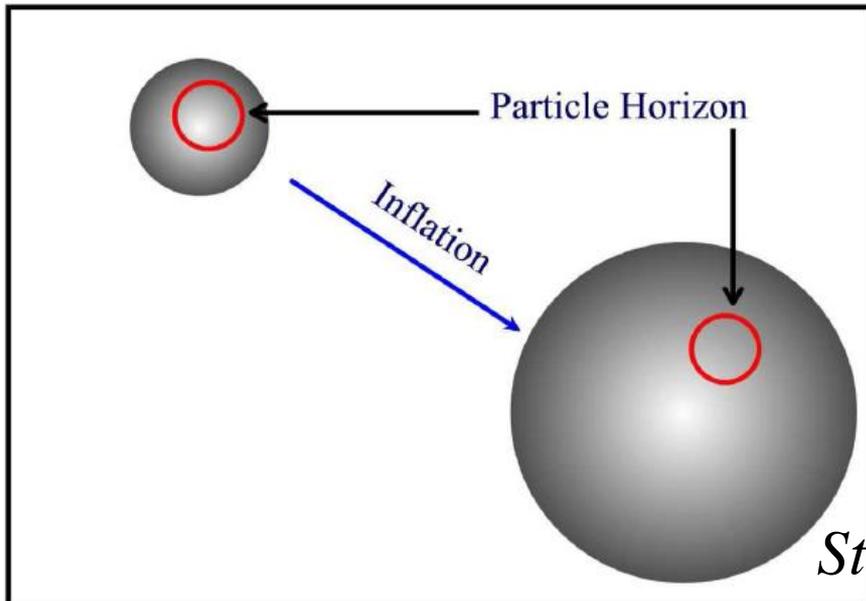
**Jusqu'au Big-Bang  
il y a 13.8 milliards  
d'années**

# Théorie de l'inflation: Problème de l'horizon



- L'horizon à l'époque du CMB était  $< 2^\circ$
- Pourquoi  $T_{\text{CMB}}$  est la même à  $10^{-5}$  près partout?  
(régions non causalement reliées)

**Homogénéité**



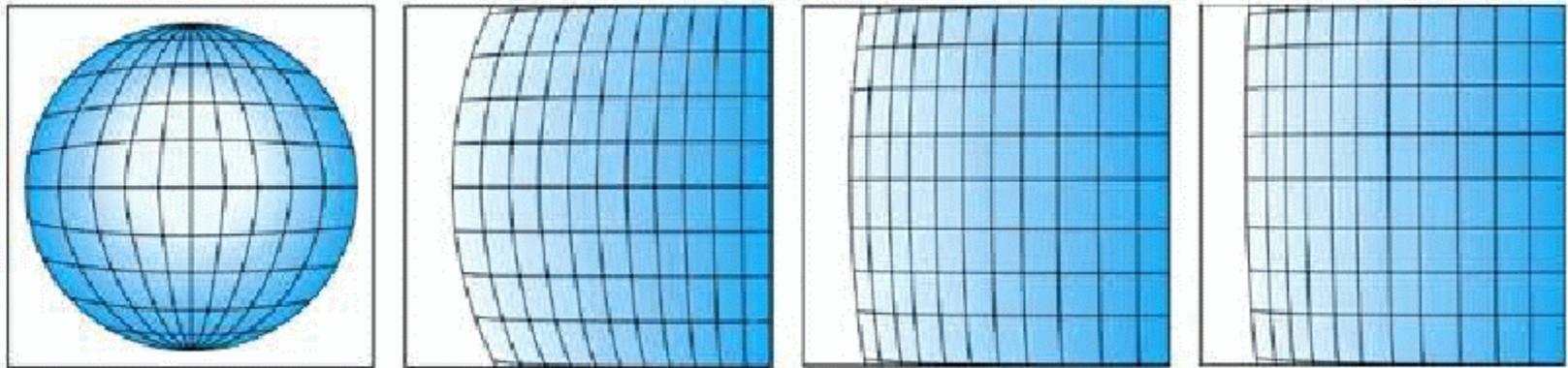
## Référentiel au repos

L'observateur accompagne  
l'inflation de l'espace  
L'horizon est constant

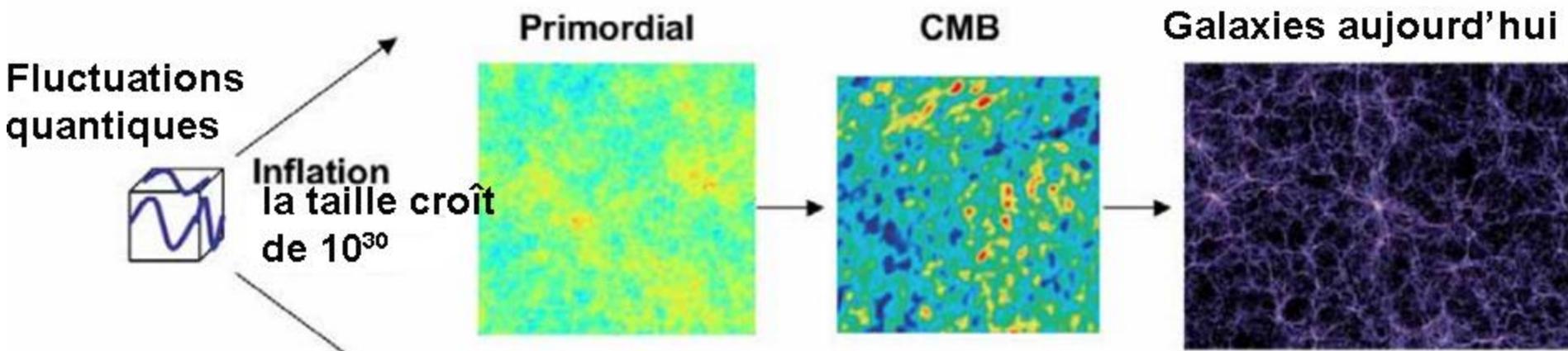
Tailles croissent de  $10^{30}$  en  $10^{-32}$ s

*Starobinski 1979, Guth 1980, Linde 1981*

# L'inflation résoud le problème de la platitude



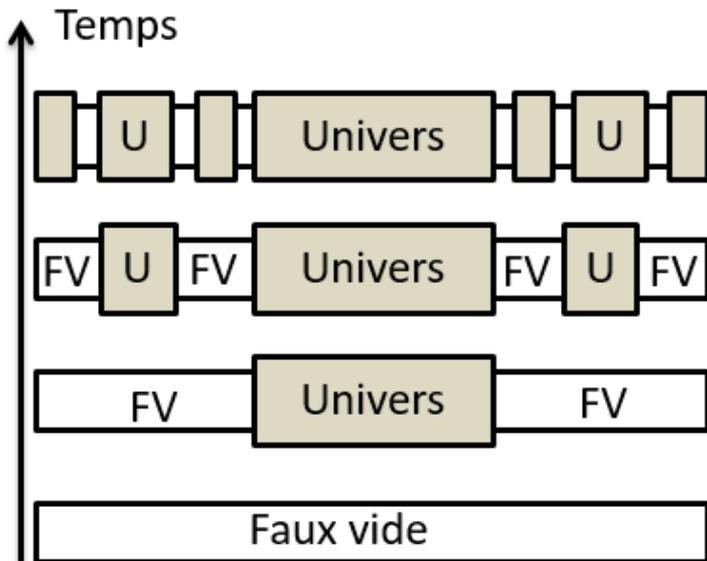
**Inflation, source des fluctuations à  $t < 10^{-32}$ s**



# Inflation chaotique ou éternelle

Difficile d'arrêter l'inflation partout: On peut l'arrêter dans une bulle en particulier, avoir un ré-chauffement, et la création de particules, **mais l'espace continue son expansion ailleurs**

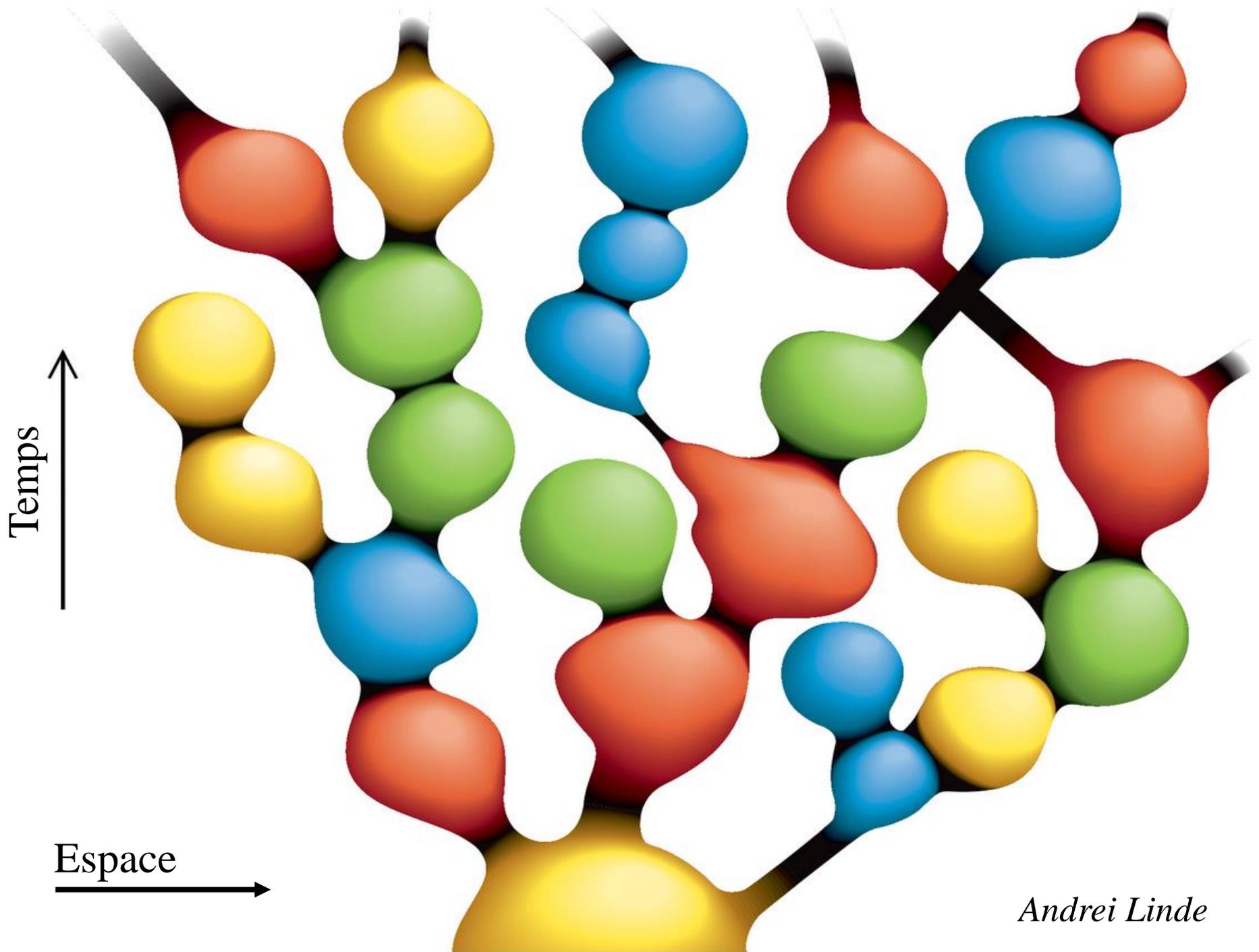
L'inflation s'auto-entretient, d'une façon chaotique, et indéfinie  
Il n'y a plus de début ni de fin → inflation éternelle (Linde 1986)



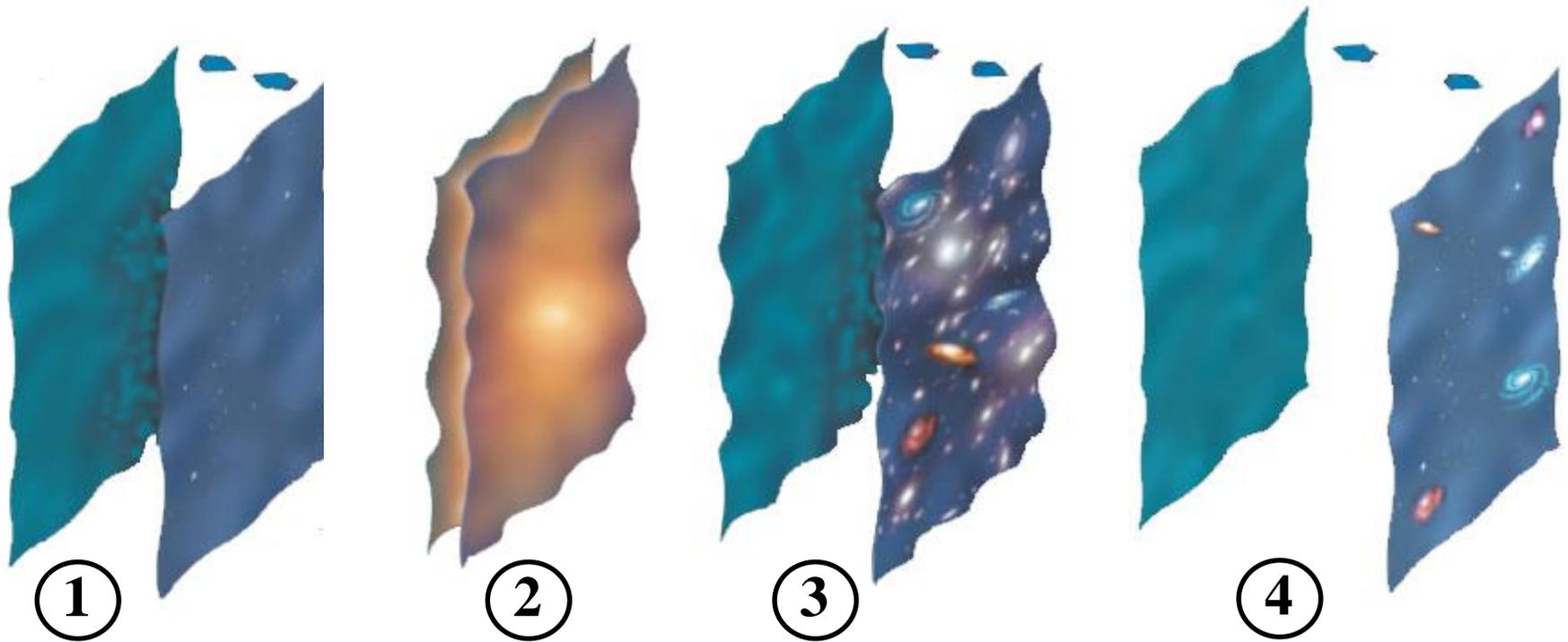
*Inévitable!*



*Guth 2007*



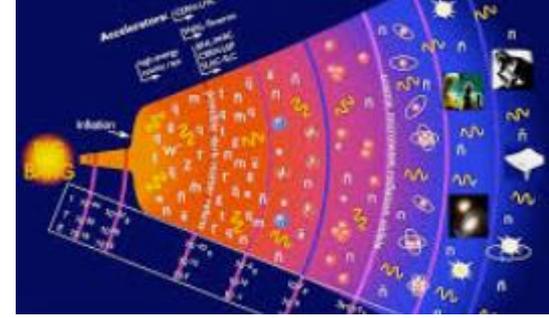
*Andrei Linde*



## **Théorie cyclique de l'Univers ekpyrotique**

- (1) 2 branes se dirigent l'une vers l'autre (espace en contraction)
- (2) elles collisionnent: énergie cinétique → matière et rayonnement
- (3) le rebond : l'espace en expansion décélérée
- (4) L'attraction entre les branes les ralentit  
→ Mouvement inverse → (1)

# L'histoire n'est pas terminée !



L'inflation est **privilegiée** par les observations

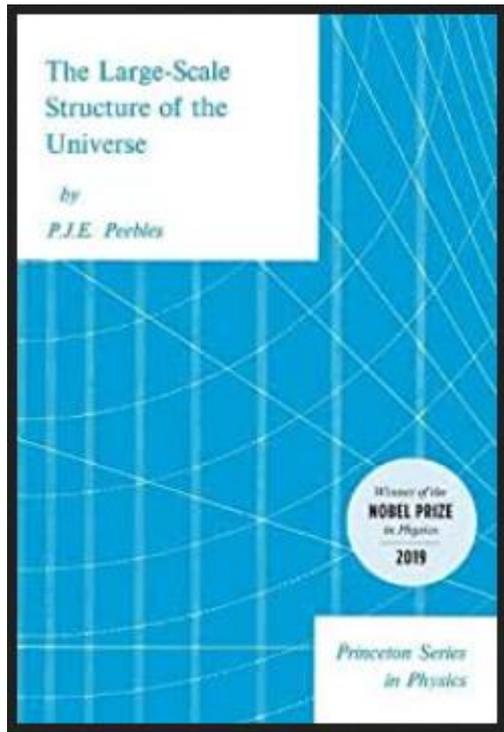
- résoud les problèmes de platitude, d'horizon, d'homogénéité
- fournit des fluctuations quantiques initiales → Structures

**Problèmes:** inflation éternelle, multiples univers

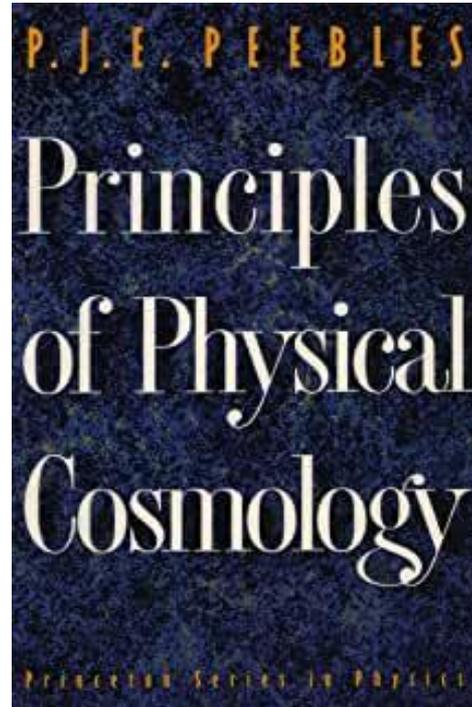
**Observations:** inflations à un seul champ favorisées par **Planck**

**→ En attente: futures observations des ondes gravitationnelles Primordiales, preuves de l'inflation**

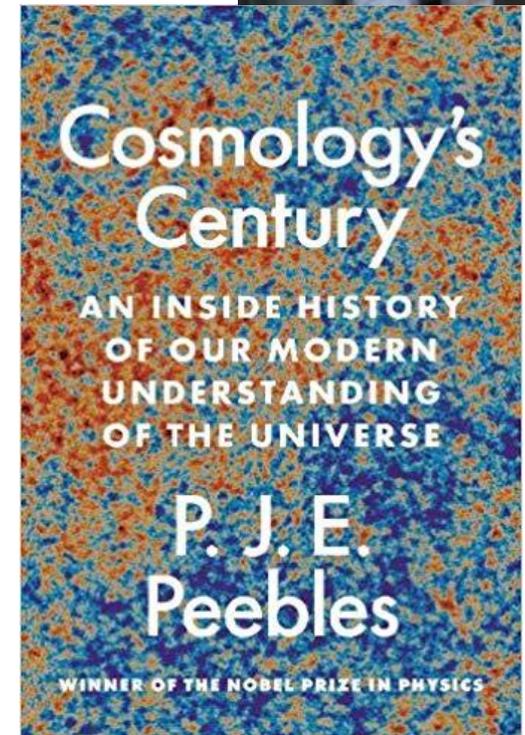
# Ouvrages de référence



The Large-Scale Structure of the Universe - **1980**



Principles of Physical Cosmology - **1993**



Cosmology's Century - **Juin 2020**