

ASTROPHYSIQUE

17 – LA THÉORIE DU BIG BANG



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



L'INVENTEUR DU BIG BANG



■ Alexandre Alexandrovitch Friedmann

- 1922 : solutions de courbure positive, expansion de l'univers à partir d'une singularité
- *Einstein* : « C'est faux ! »
- 1924 : solutions de courbure négative
- *Einstein* : « C'est abominable ! »
- 1925 : mort prématurée et oubli



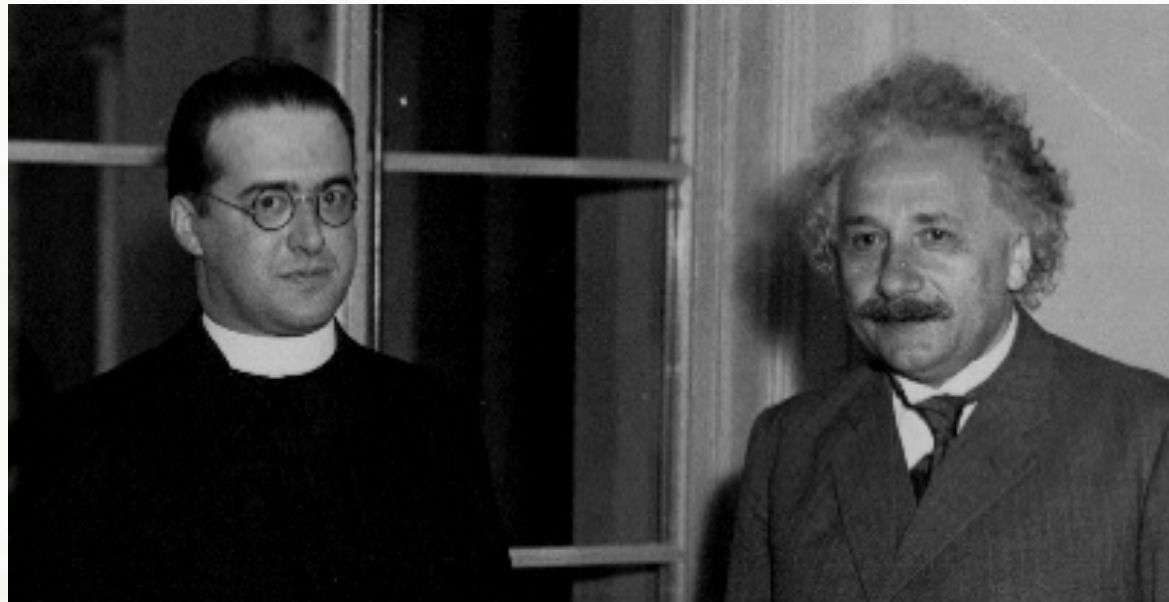
LE CO-INVENTEUR DU BIG BANG

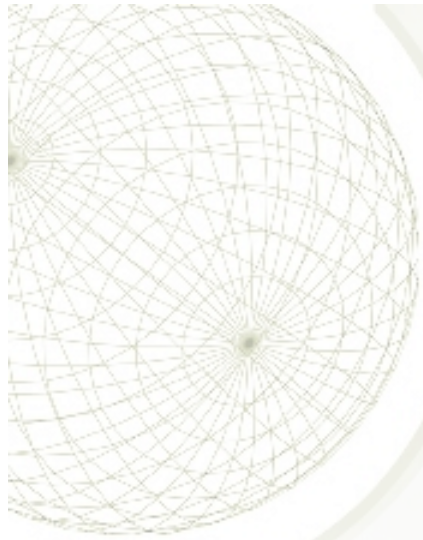
■ Georges Lemaître

- 1925 : premières solutions, explication du décalage vers le rouge par l'expansion de l'univers, prévision que $z \propto$ distance D

$$z = (H_0/c) D$$

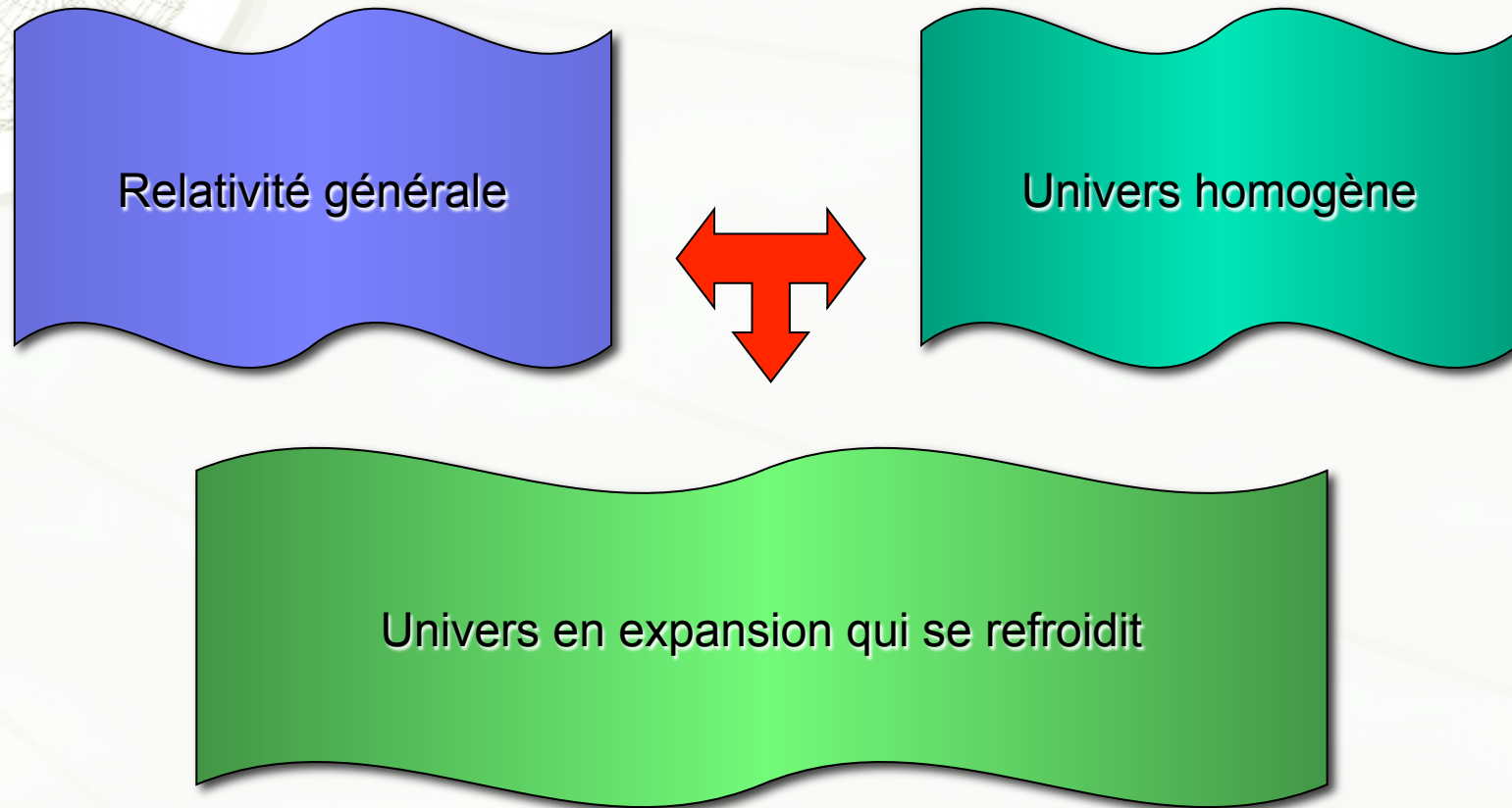
- 1927 : solutions de courbures positive et négative, avec et sans rayonnement, avec et sans constante cosmologique, estimation $H_0 \sim 600$ km/s/Mpc
- 1929 : loi de Hubble $z \propto$ distance, $H_0 \sim 540$ [aujourd'hui ~ 72]





LE BIG BANG EN 30 MN

LE THÉORICIEN



L' OBSERVATEUR

Décalages « vers le rouge »

Composition chimique de l' univers

Rayonnement à « 3 K »

Univers en expansion qui se refroidit

LA THÉORIE DU BIG BANG

- Ce qu'elle dit

- l'univers visible se dilate
- l'univers visible se refroidit

- C'est tout !

- Ce qu'elle ne dit **pas**

- l'univers ne se dilate pas dans quelque chose
- ce n'est pas une explosion
- elle ne dit rien de la forme ni de la taille de l'univers
- elle ne dit rien de l'instant zéro, ni de « l'avant »

- Ce qu'elle dit, *mais avec des ajouts*

- les galaxies viennent d'inhomogénéités initiales
- celles-ci sont dues à des fluctuations quantiques
- et il faut de la matière noire pour rendre compte de leur ampleur actuelle

- Points de départ (théorie)

- l'univers est presque homogène
- il est dominé par la gravité
- celle-ci est décrite par la relativité générale

- Points de départ (observations)

- décalages vers le rouge
- abondance des éléments chimiques
- rayonnement micro-ondes
- la nuit est noire





LES QUATRE PILIERS DU BIG BANG

■ Le décalage vers le rouge

- presque toutes les galaxies présentent un décalage de leurs raies vers le rouge
- ce décalage est proportionnel à la distance de la galaxie

■ Les éléments chimiques

- l'hydrogène représente partout 90% des noyaux
- l'hélium en représente 9%
- plus un noyau est lourd, plus il est rare

■ Le rayonnement micro-ondes

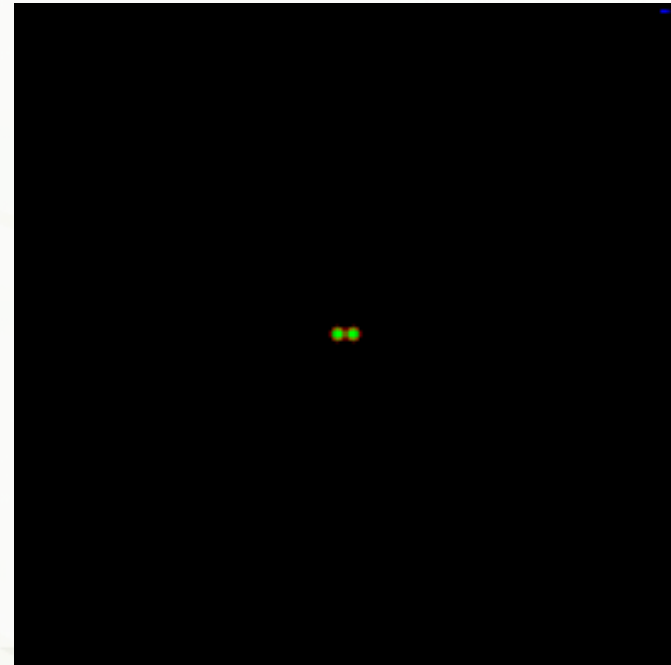
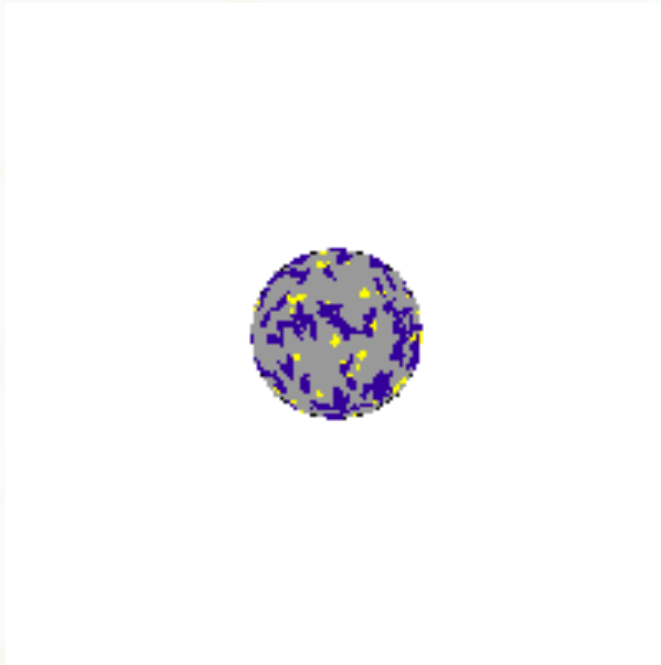
- rayonnement isotrope à 10^{-5} près
- rayonnement de corps noir à 2,73 K

■ La nuit est noire (paradoxe d'Olbers)

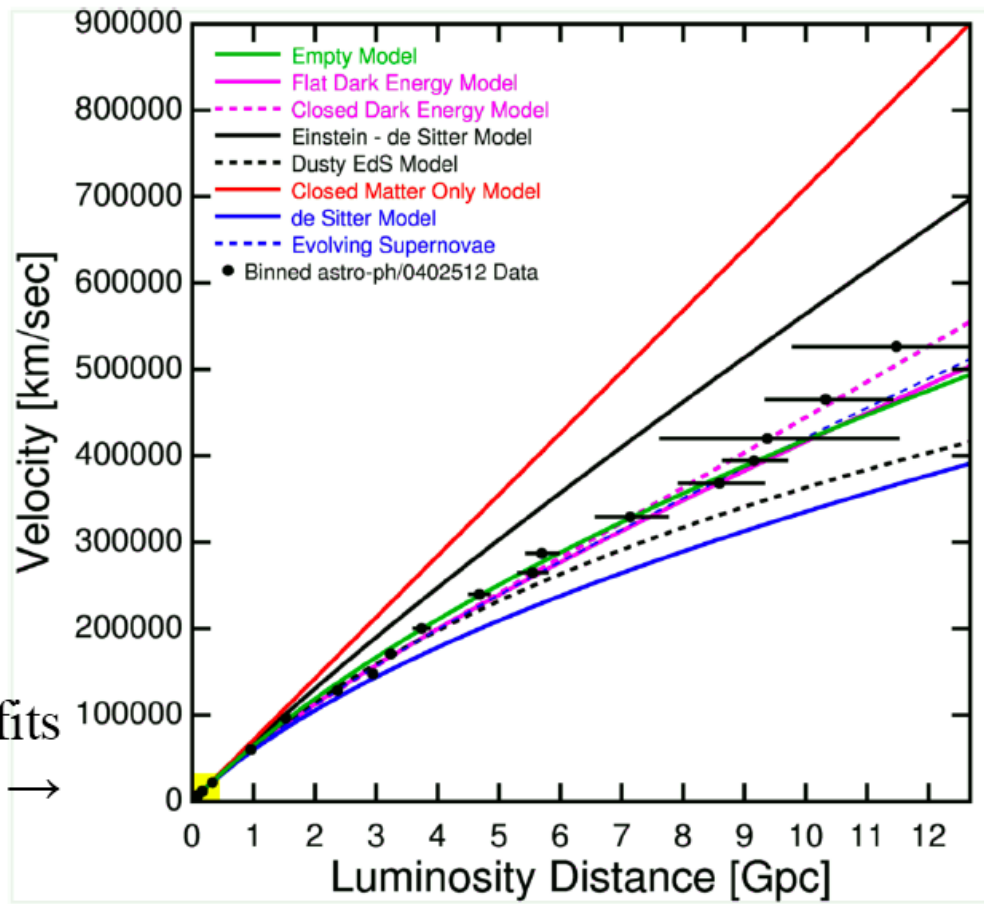
- si
 - les étoiles sont éternelles, et
 - l'univers infini
- alors
 - le ciel est partout aussi brillant que la surface du Soleil
- solution d'Edgar Poe
 - les étoiles n'ont pas toujours existé

EXPANSION DE L'UNIVERS

- L'**analogie** du ballon qui gonfle: l'univers se dilate, mais pas les galaxies (en jaune). Les photons sont décalés vers le rouge par l'expansion, mais ils se déplacent toujours à la vitesse de la lumière % leur environnement (© Ned Wright, UCLA)
- Un gaz de galaxies dans un univers en expansion, deux d'entre elles émettent une bouffée de photons: elles deviennent visibles l'une de l'autre au bout de 14 milliards d'années (© Ned Wright, UCLA)



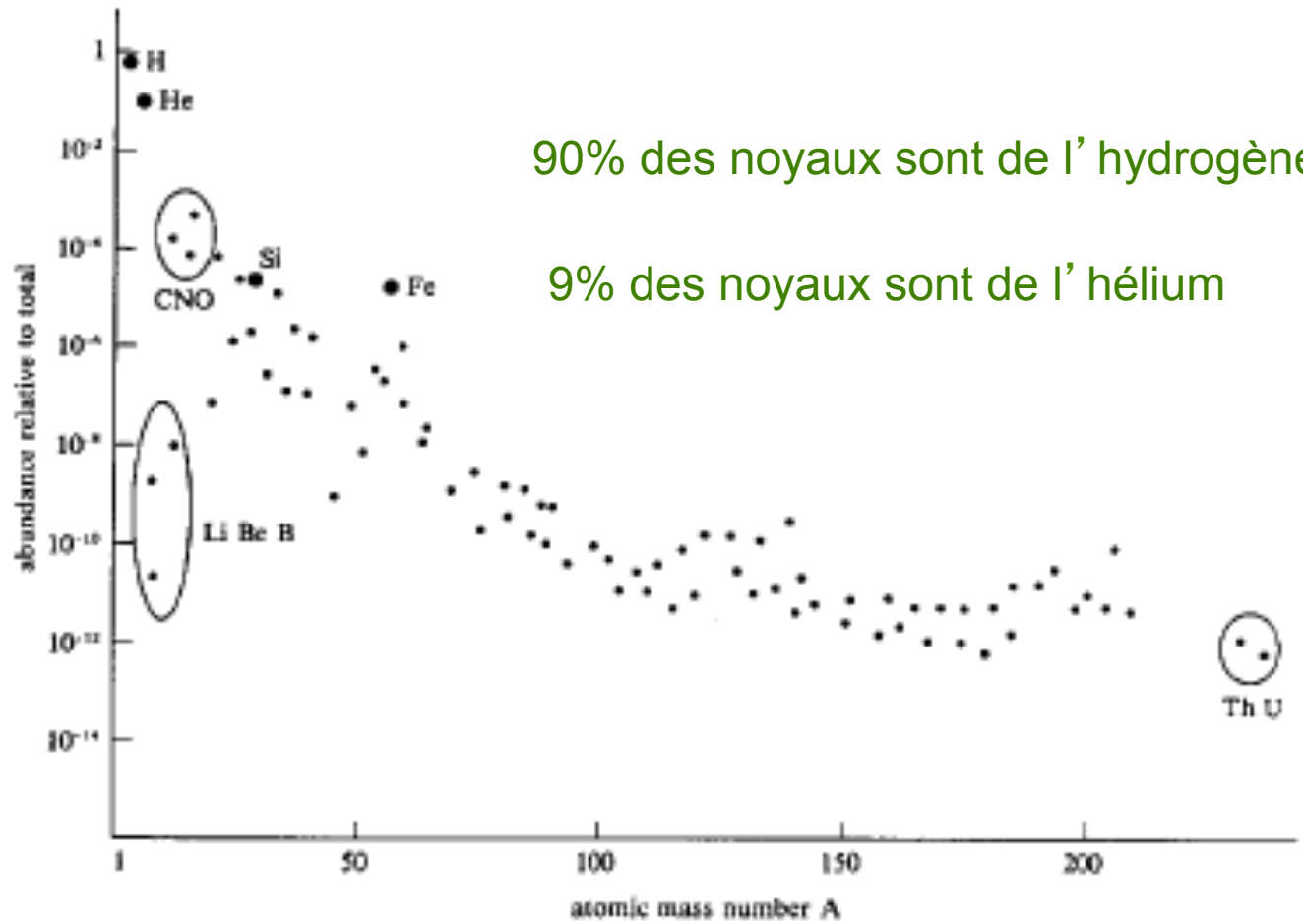
LOI DE HUBBLE



1995 data fits
in here →

$$v = cz$$

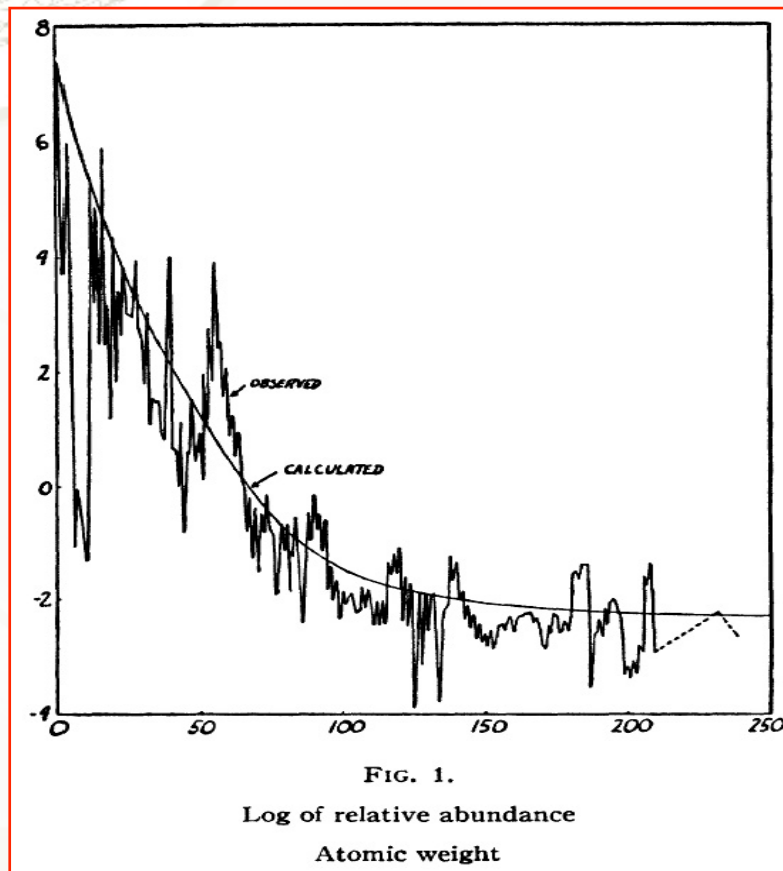
ABONDANCE DES ÉLÉMENTS DANS L'UNIVERS



GAMOW ET LA SYNTHÈSE DES ÉLÉMENTS



- Alpher, Bethe, Gamow (1^o avril 1948)
« L'origine des éléments chimiques »



- Expansion ⇔ refroidissement
 - donc passé plus chaud
 - température > 10 milliards de kelvins
 - ≈ énergie de liaison nucléaire
 - impossibilité de noyaux
 - uniquement neutrons et protons
 - puis fusions nucléaires
 - He → C → Fe ?
 - OK pour l'hélium, pas au-delà (Hoyle)
- Un fond thermique micro-ondes ?
 - passé chaud ⇔ équilibre thermique avec les photons
 - toujours présents mais refroidis
 - corps noir à $T \approx 5$ à 50 K ?

DICKE, PENZIAS & WILSON : LE RAYONNEMENT MICRO-ONDES

- Robert Dicke (1916-1999)



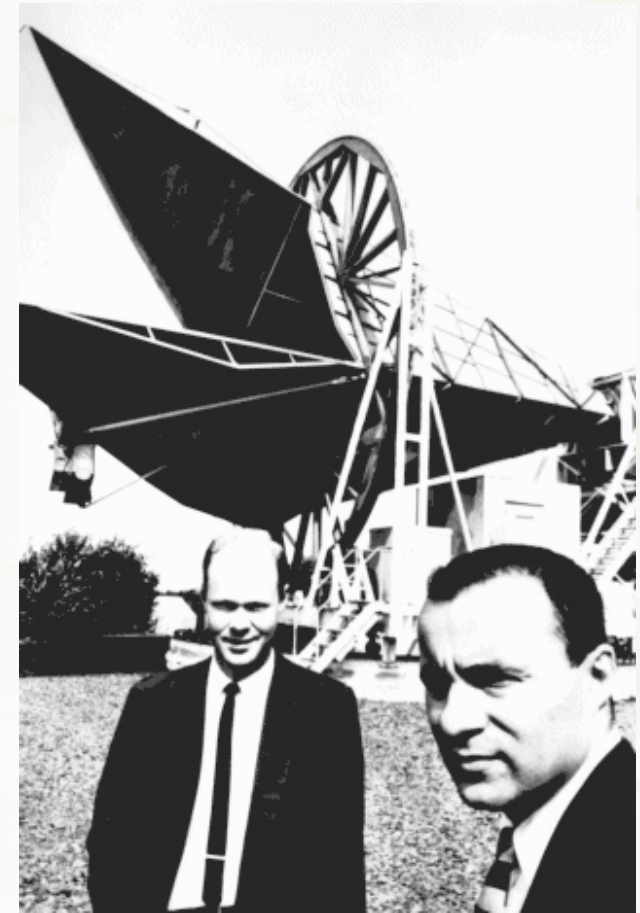
« Mesure d'une température d'antenne excessive à 4080 MHz » Penzias & Wilson

« Rayonnement cosmologique de corps noir » Dicke et al.

« Ne croyez jamais une observation qui n'est pas expliquée par une théorie. »
A.S. Eddington

- 1946 : $T_{\text{ciel}} < 20\text{K}$
- 1960 : tests de la RG, théorie de Brans-Dicke
- 1965 : cosmologie, radiomètre ultrasensible

- Robert Wilson & Arno Penzias



LE FOND DE RAYONNEMENT MICRO-ONDES

- Ce rayonnement est isotrope
- Son spectre est un spectre de Planck

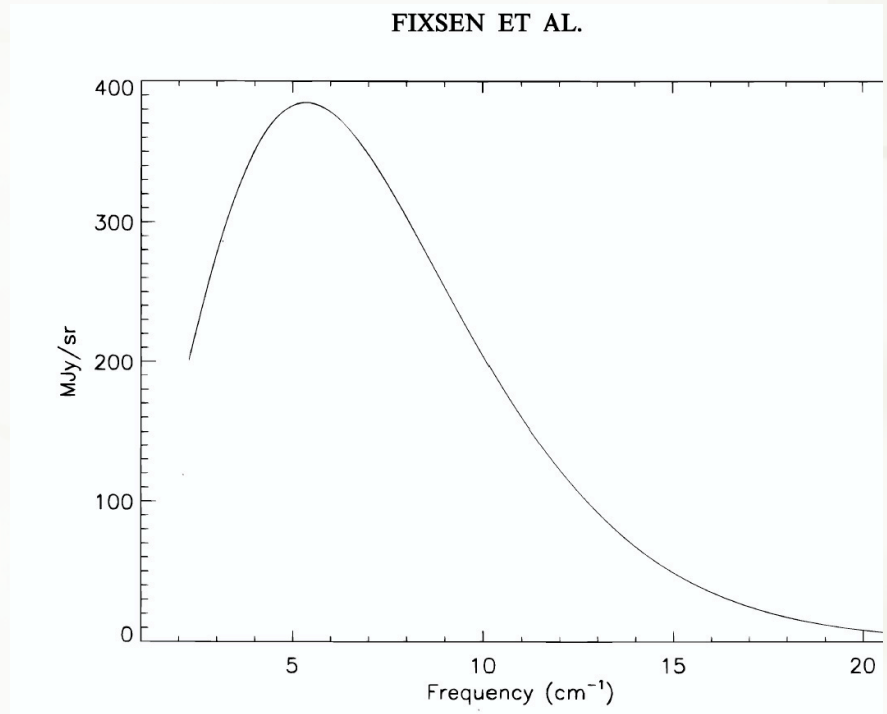
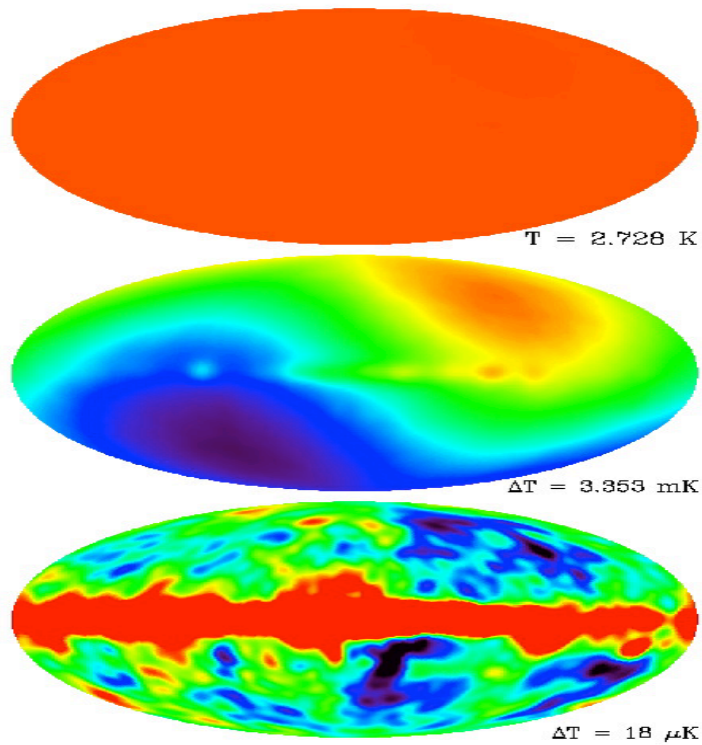
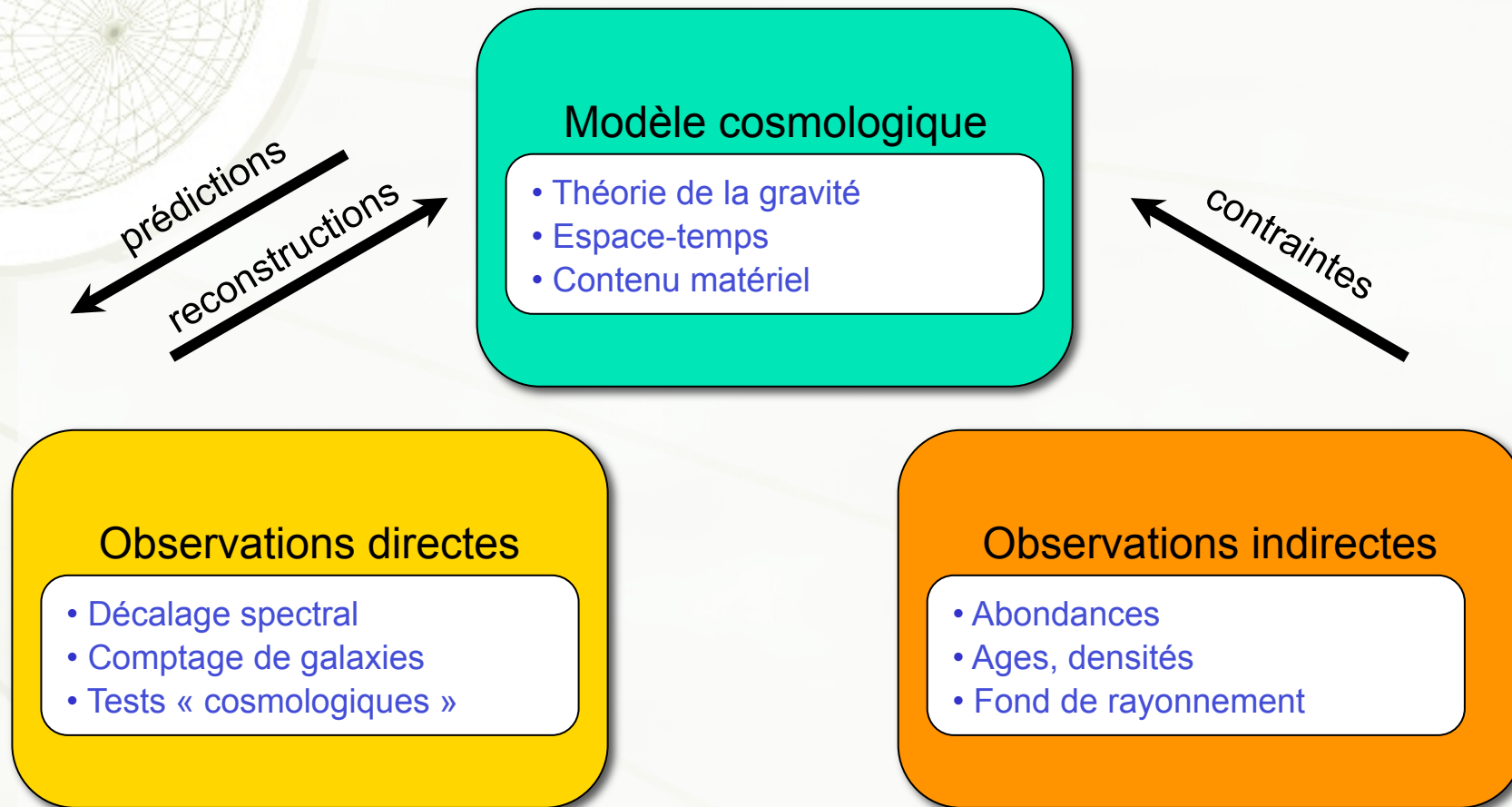


FIG. 4.—Uniform spectrum and fit to Planck blackbody (T). Uncertainties are a small fraction of the line

LA COSMOLOGIE N' EST PAS UNE THÉOLOGIE...



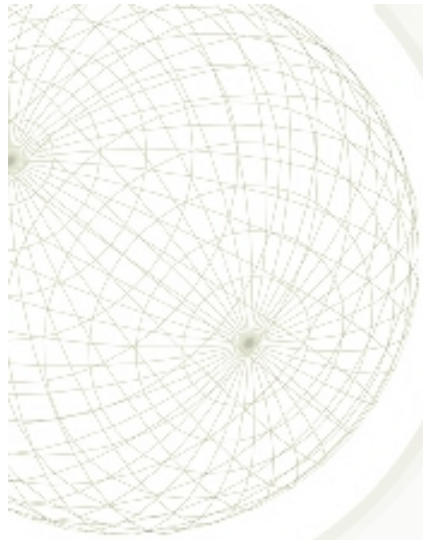
d'après Peter et Uzan

CE QU'ON NE COMPREND PAS

- L'origine de la matière ordinaire (baryonique)
- L'origine et la nature de la matière noire
- L'origine et la nature de l'énergie noire
- L'origine des structures (amas, galaxies, étoiles...)
- L'origine de l'univers

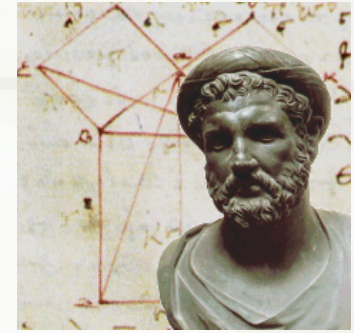
Bref, si on sait (à peu près) **comment** les choses se sont passées, on ne sait pas du tout **pourquoi** elles se sont passées comme ça!





GÉOMÉTRIE

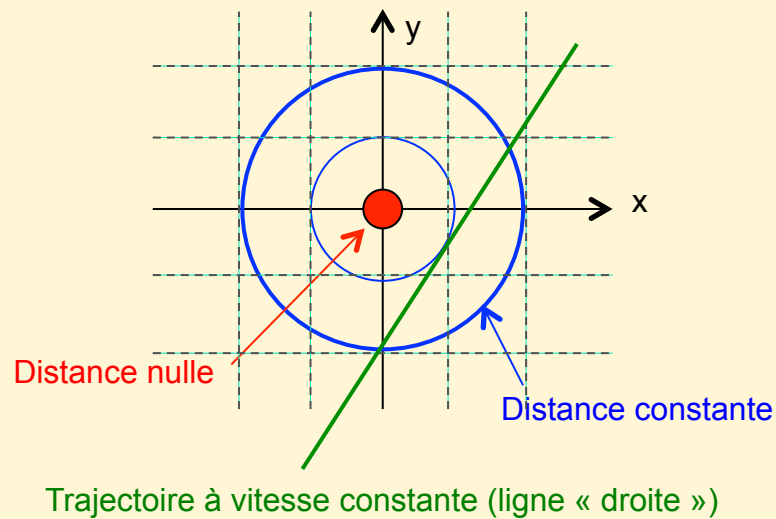
EUCLIDE, PYTHAGORE, RIEMANN



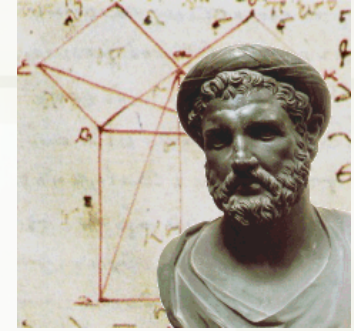
■ Géométrie (Euclide) ⇔ Algèbre (Pythagore, Oresme, Descartes...)

■ Théorème de Pythagore

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$



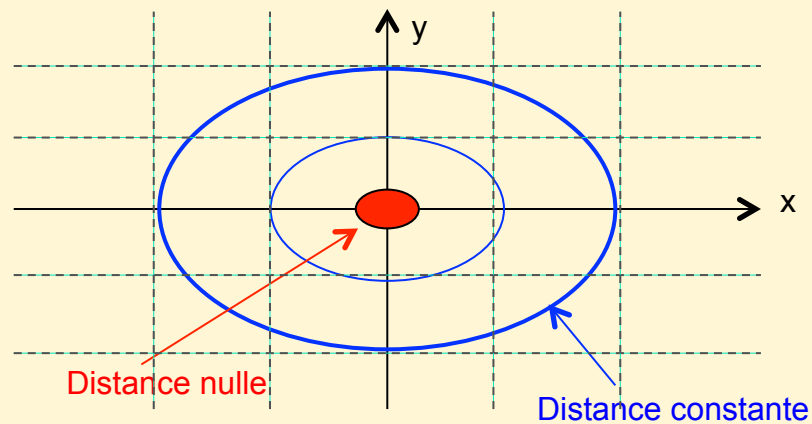
EUCLIDE, PYTHAGORE, RIEMANN



■ Géométrie (Euclide) \Leftrightarrow Algèbre (Pythagore, Oresme, Descartes...)

■ Théorème de Pythagore

$$ds^2 = dx^2 + a^2 dy^2$$

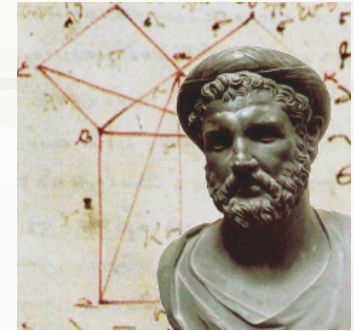


■ Géométrie « elliptique »

■ Généralisation

$$ds^2 = g_{xx}(x,y)dx^2 + g_{xy}(x,y)dxdy + g_{yy}(x,y)dy^2$$

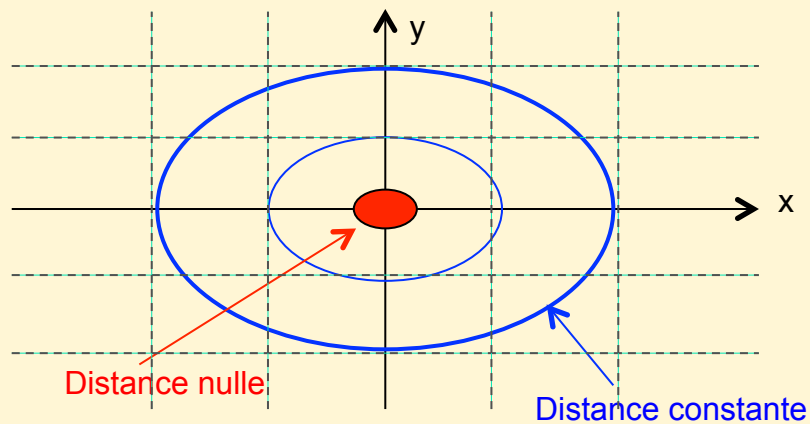
EUCLIDE, PYTHAGORE, RIEMANN



■ Géométrie (Euclide) ⇔ Algèbre (Pythagore, Oresme, Descartes...)

■ Théorème de Pythagore

$$ds^2 = dx^2 + a^2 dy^2$$



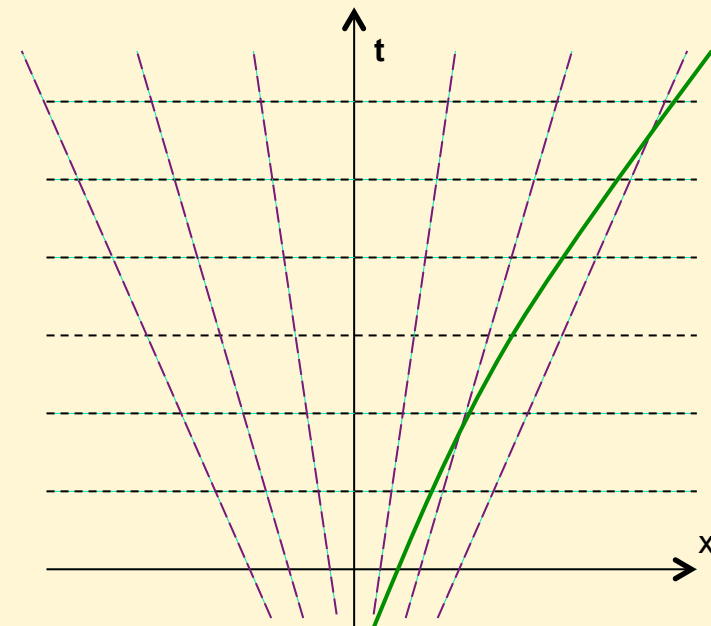
■ Géométrie « elliptique »

■ Généralisation

$$ds^2 = g_{xx}(x,y)dx^2 + g_{xy}(x,y)dxdy + g_{yy}(x,y)dy^2$$

■ Un modèle

$$ds^2 = dt^2 + a^2(t)dx^2$$



Trajectoire à vitesse constante (ligne « droite »)

ESPACE-TEMPS

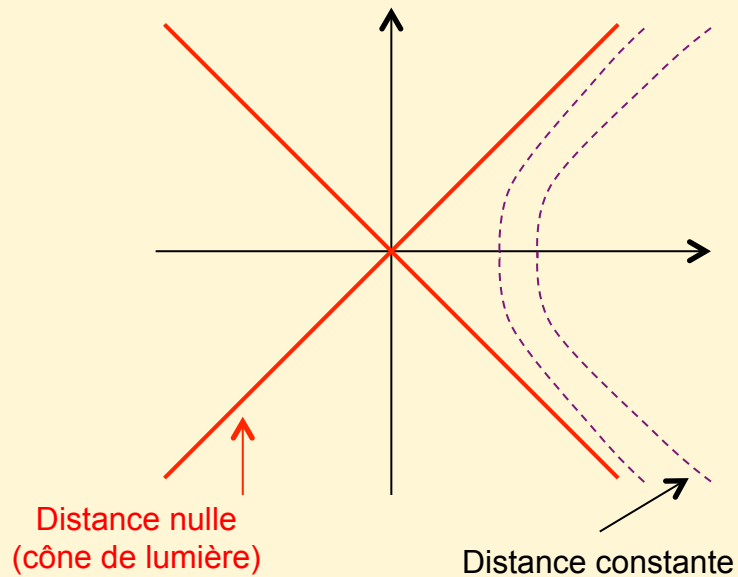
- 3 dimensions d'espace + 1 de temps



Espace-temps

- Minkowski

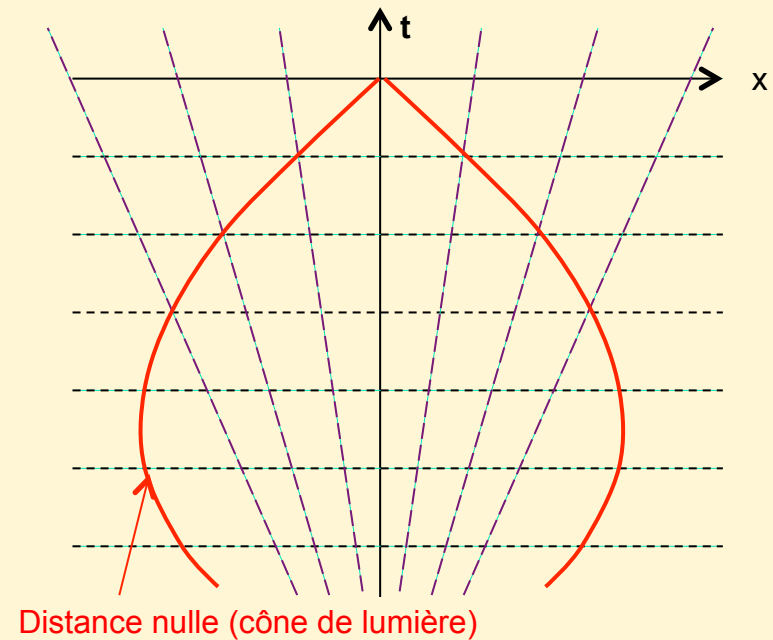
$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2$$



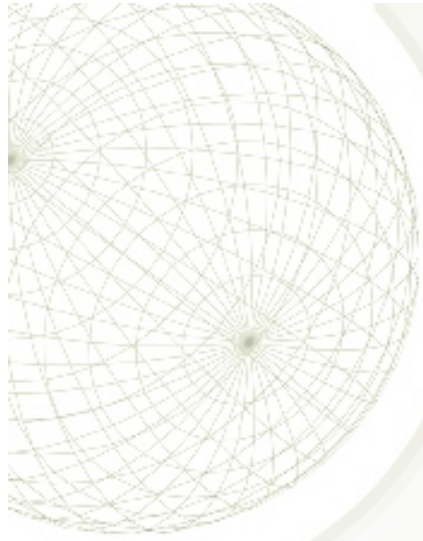
- Géométrie « hyperbolique »

- Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dx^2$$

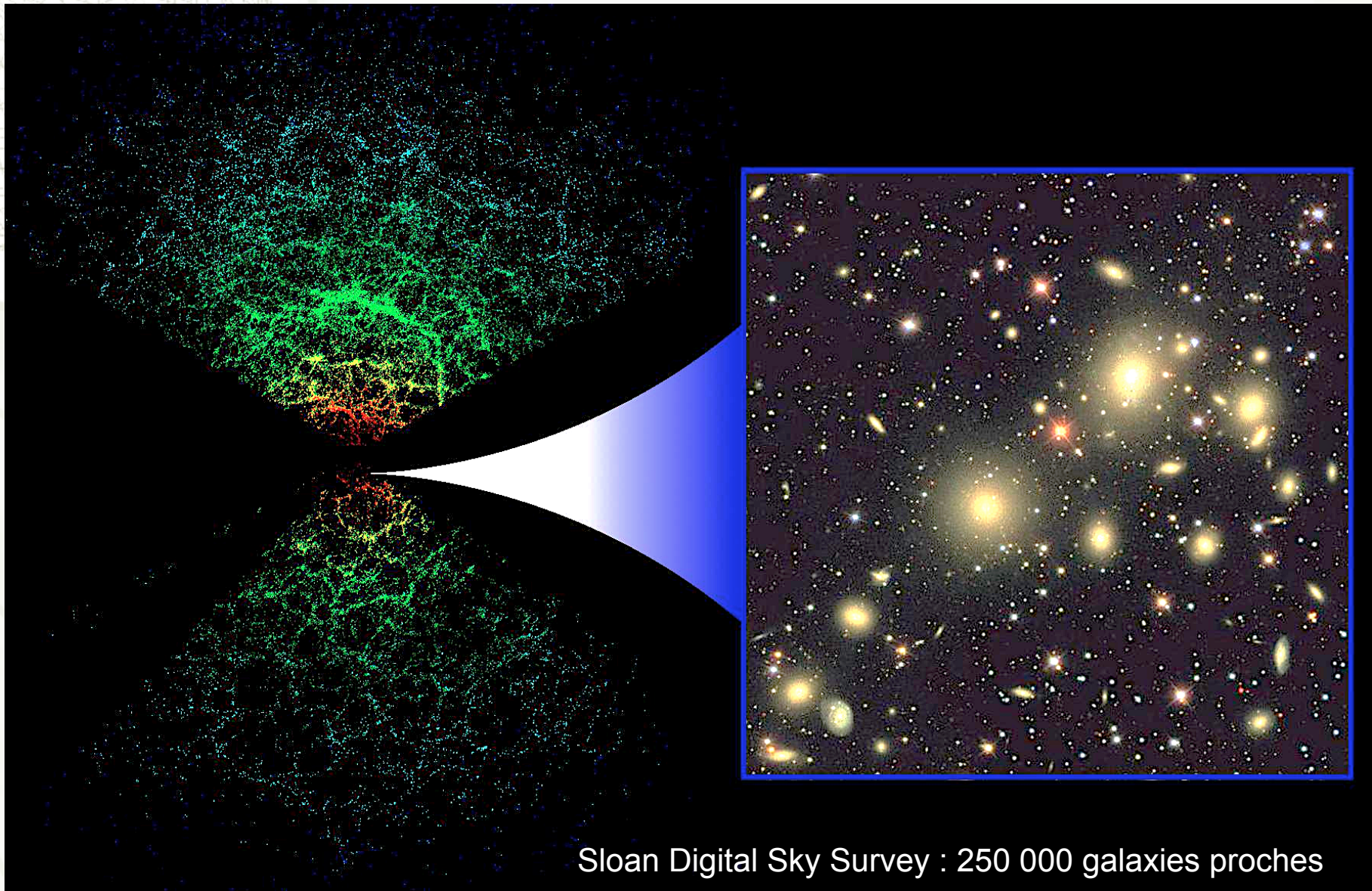


- Expansion de l'espace



PRINCIPE COSMOLOGIQUE

L'UNIVERS EST-IL HOMOGENÈNE ?



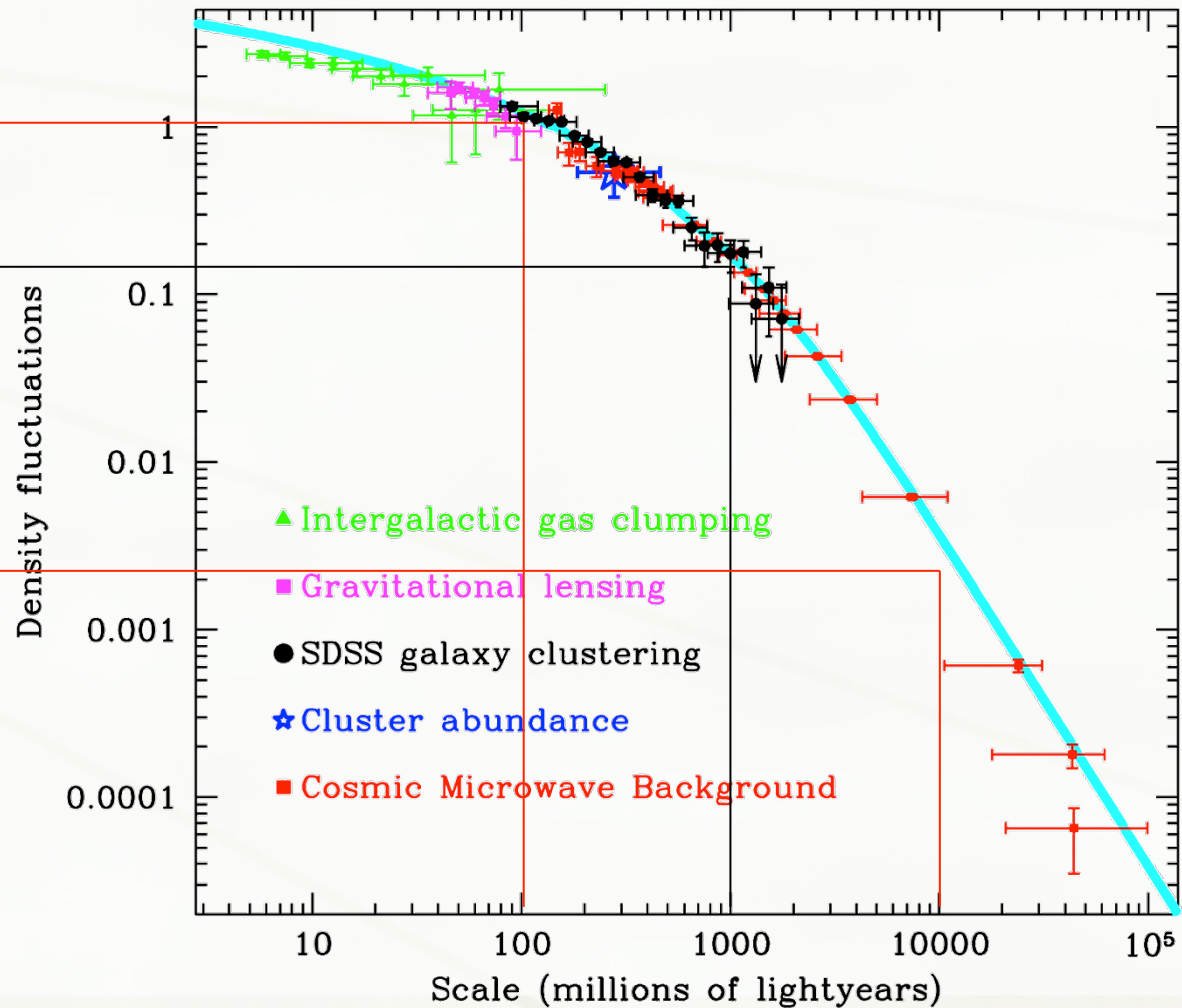
Sloan Digital Sky Survey : 250 000 galaxies proches

UN UNIVERS (PRESQUE) HOMOGENÈME

Localement, inhomogénéité forte : galaxies et amas

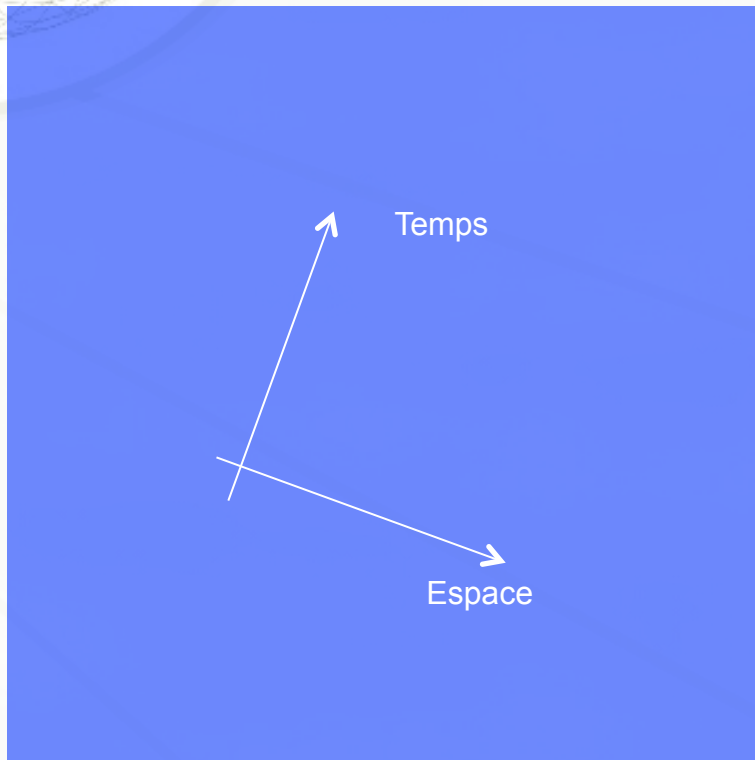
Les très grandes structures (murs, filaments, vides) ne correspondent qu'à de faibles contrastes de densité

A très grande échelle, homogénéité quasi parfaite



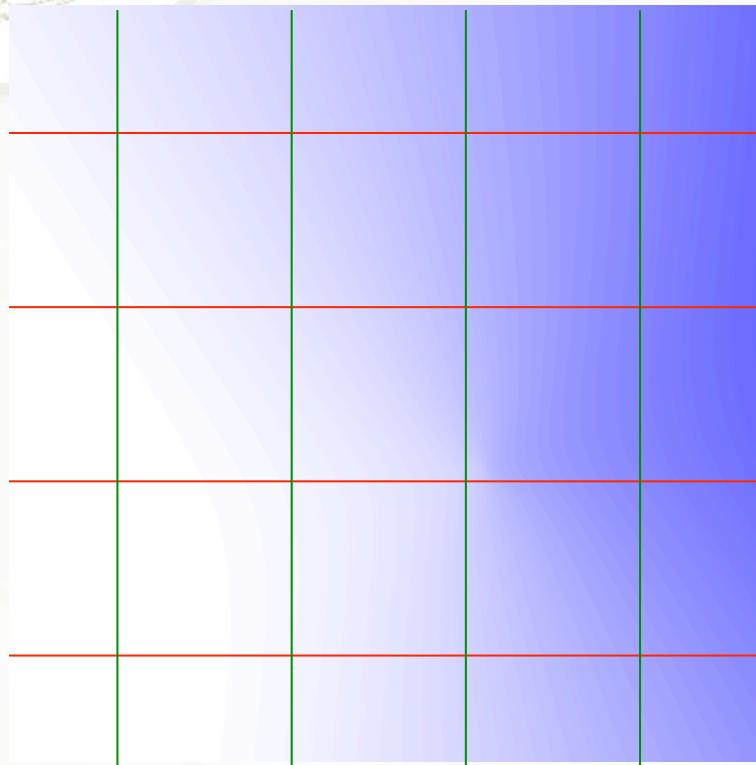
PRINCIPE COSMOLOGIQUE

- Principe cosmologique parfait
- Univers \pm chaotique

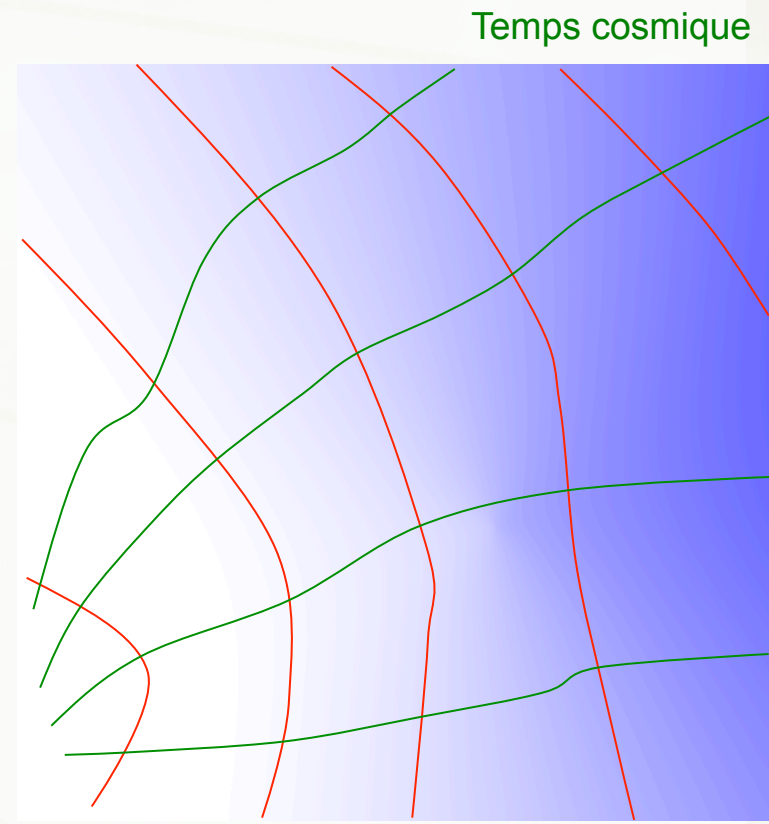


PRINCIPE COSMOLOGIQUE

- Observation

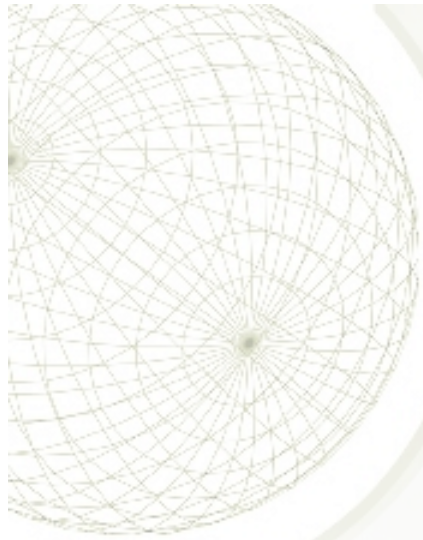


- Coordonnées naturelles



MÉDITONS SUR LES MYSTÈRES DE L'UNIVERS





PARAMÈTRE D'ÉCHELLE

LA MÉTRIQUE DE ROBERTSON ET WALKER

- Espace homogène

$$\Rightarrow ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \{ dx^2 + S^2(\chi) [d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2] \}$$

Paramètre d'échelle

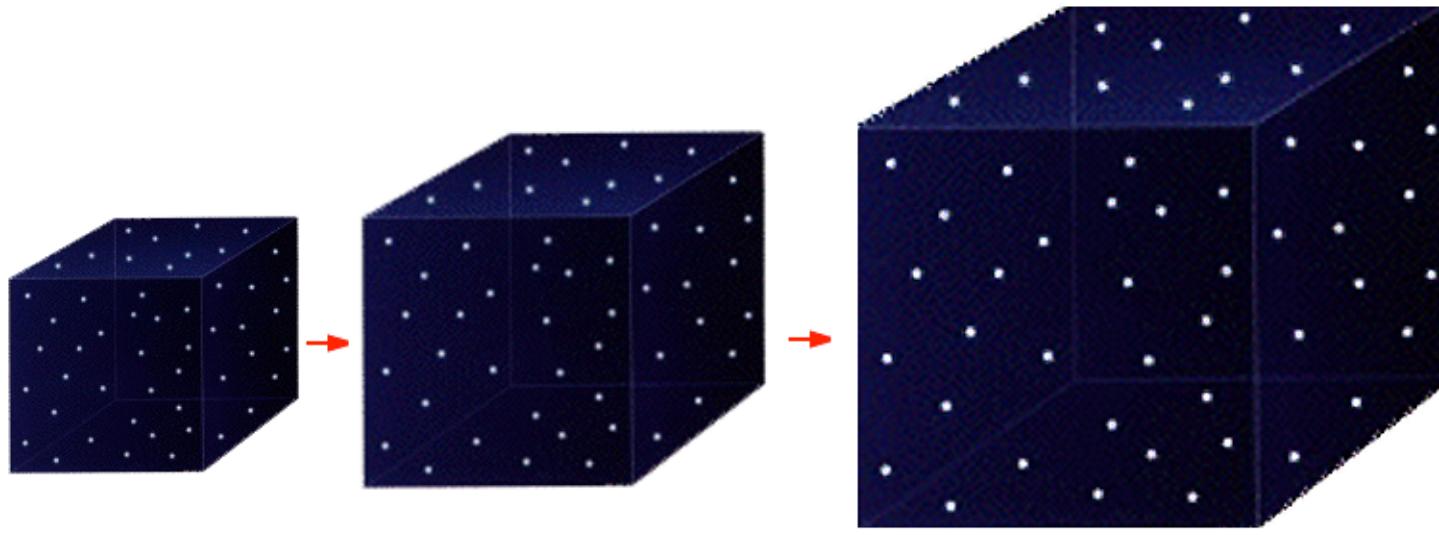
Selon la courbure spatiale
 $S(\chi) = \chi$ courbure nulle
 $S(\chi) = \sin\chi$ courbure positive
 $S(\chi) = \text{sh}\chi$ courbure négative

Métrie habituelle de l'espace 3D
(en coordonnées sphériques)

Coordonnées **comobiles**

LE PARAMÈTRE D'ÉCHELLE

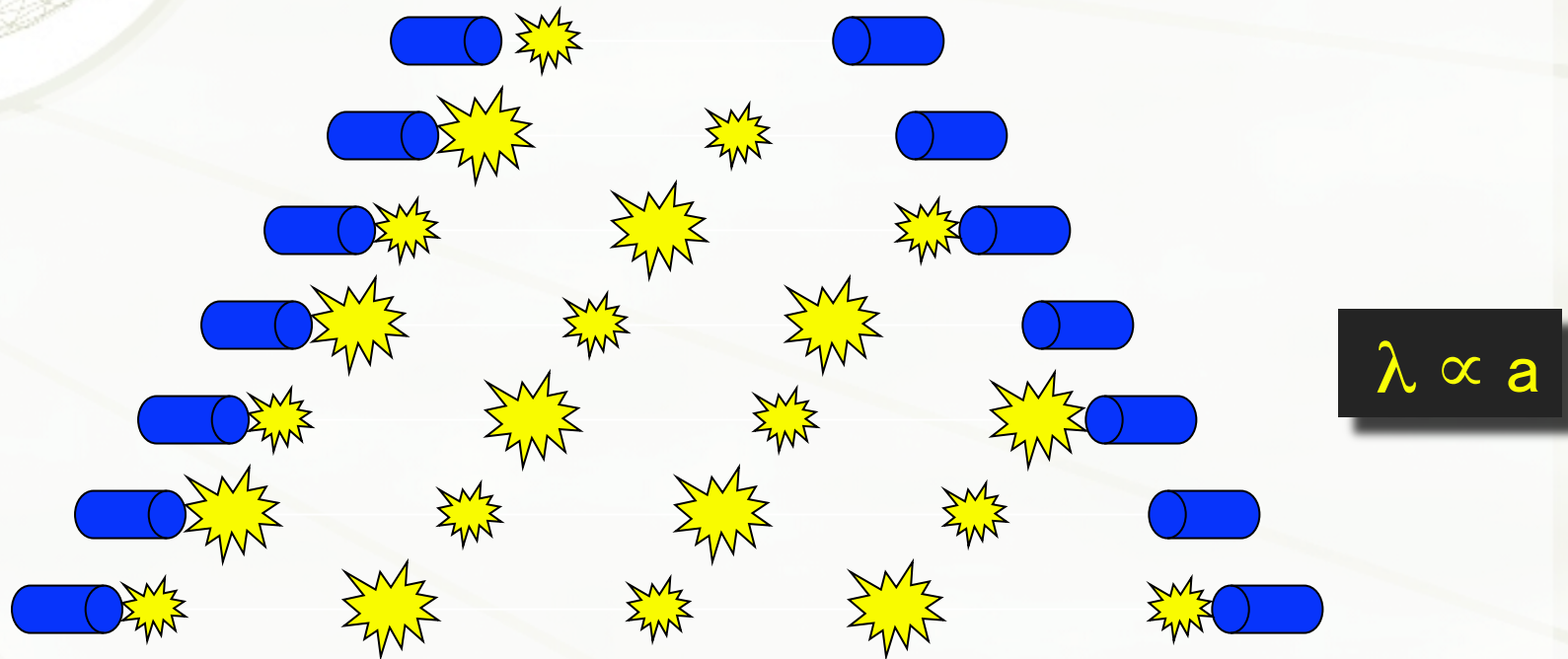
- Une distance physique $D = a(t) \Delta\chi$ augmente avec le temps
- Cette dilatation de l'espace est identique pour tous les points



- Les coordonnées comobiles χ , θ et ϕ ne changent pas avec le temps
- On retrouve automatiquement la loi de Hubble

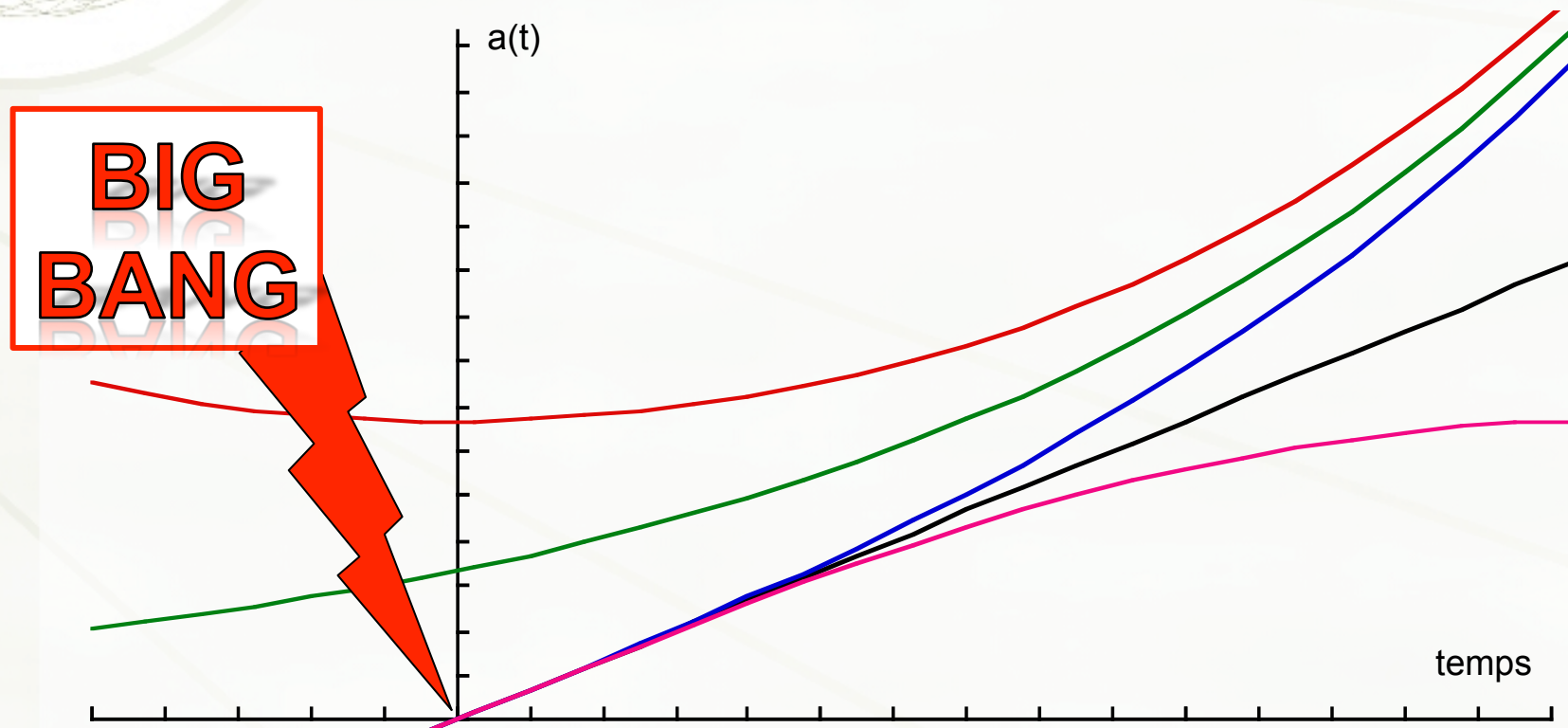
LE DÉCALAGE VERS LE ROUGE

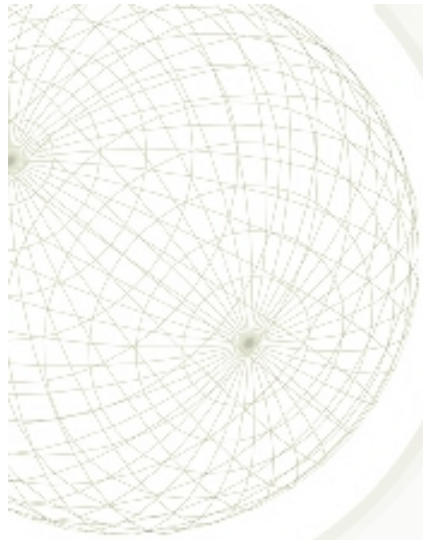
L'expansion de l'espace augmente la longueur d'onde d'un rayonnement et diminue sa fréquence



ÉVOLUTION AU COURS DU TEMPS

- Le paramètre d'échelle $a(t)$ varie au cours du temps selon une loi qui dépend du **contenu** de l'univers (matière, rayonnement, énergie noire...)





DYNAMIQUE

ÉQUATION D'EINSTEIN

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (R - \Lambda) = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Tenseur de courbure
(Ricci)

Construit à partir du tenseur
métrique $g_{\mu\nu}$ et de ses dérivées

Constante cosmologique Tenseur énergie-impulsion

<i>densité d'énergie</i>	<i>flux d'énergie</i>	<i>flux d'énergie</i>	<i>flux d'énergie</i>
<i>flux d'énergie</i>	<i>pression</i>	<i>cisaillement</i>	<i>cisaillement</i>
<i>flux d'énergie</i>	<i>cisaillement</i>	<i>pression</i>	<i>cisaillement</i>
<i>flux d'énergie</i>	<i>cisaillement</i>	<i>cisaillement</i>	<i>pression</i>

L'ÉQUATION DE FRIEDMANN-LEMAÎTRE

- Pour un espace homogène (densité uniforme ρ) l'équation d'Einstein devient la **très simple équation** de Friedmann-Lemaître

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (R - \Lambda) = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$
$$3 \frac{\dot{a}^2 + k}{a^2} - \Lambda = 8\pi G \rho$$

Géométrie de l'espace-temps

Contenu matériel de l'espace-temps

$$\dot{a} \equiv da / dt$$

$$\left[\frac{\dot{a}}{a} \right]^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

L'ÉQUATION DE FRIEDMANN-LEMAÎTRE

$$\left[\frac{\dot{a}}{a} \right]^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Expansion de l'espace =
« constante » de Hubble

Contenu matériel de l'espace-temps

- Matière ordinaire
- Matière noire
- Neutrinos
- Rayonnement électromagnétique
- Particules de tout type...

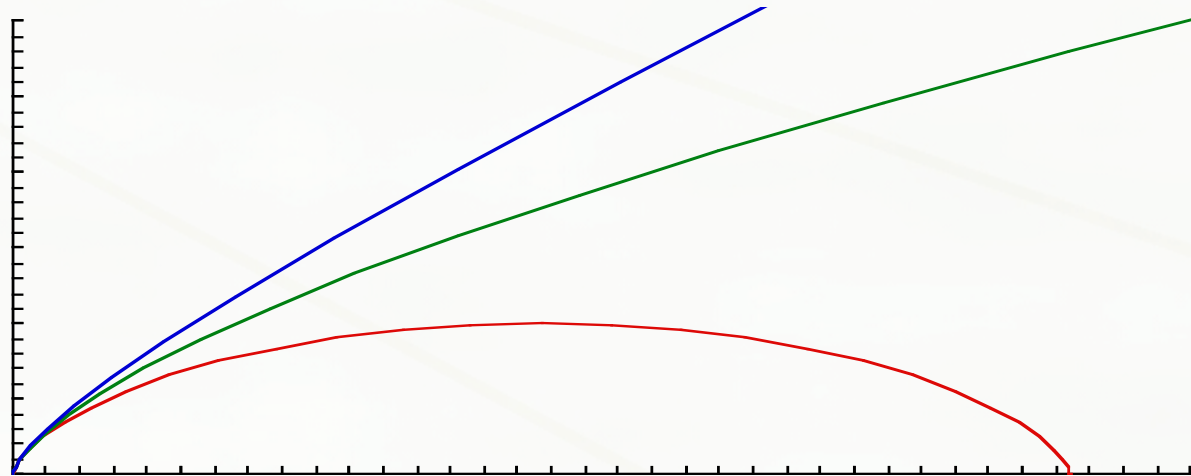
Courbure de l'espace

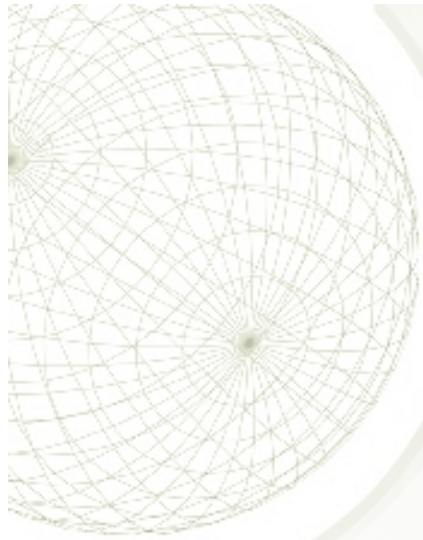
Constante cosmologique /
Énergie noire, énergie du vide

⇒ équation différentielle à résoudre pour calculer $a(t)$

L'ÉQUATION DE FRIEDMANN-LEMAÎTRE

- Solutions simples quand un seul terme domine dans le terme de droite
 - matière non relativiste $a(t) \sim t^{2/3}$
 - rayonnement $a(t) \sim t^{1/2}$
 - courbure $a(t) \sim t$
 - constante cosmologique $a(t) \sim e^{Ht}$ ($H = \sqrt{\Lambda/3}$)
 - si la courbure de l'espace est positive ($k = +1$) et si $\Lambda = 0$, l'expansion s'arrête quand $\dot{a} = 0$ et devient une contraction





Merci de votre attention !

