



# *De la cosmologie avant toute chose...*

**Alain Bouquet**

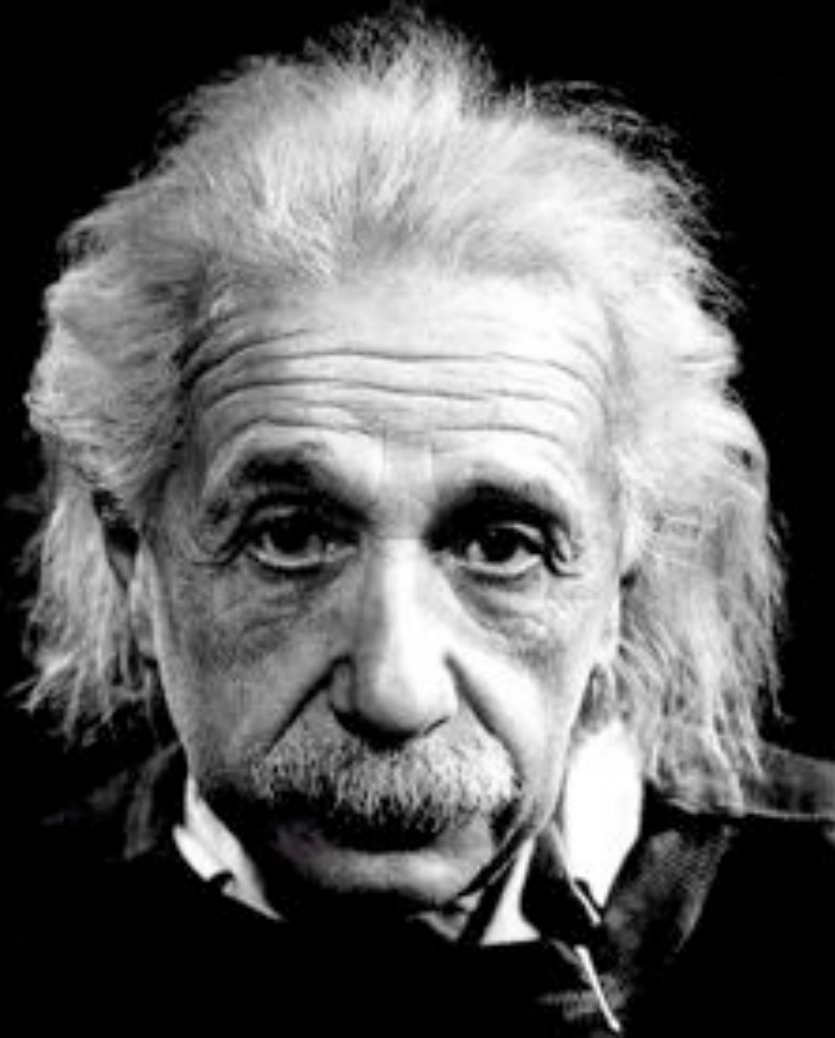
Laboratoire Astroparticule & Cosmologie

Collège de France

Université Paris 7 - CNRS - CEA - Observatoire de Paris



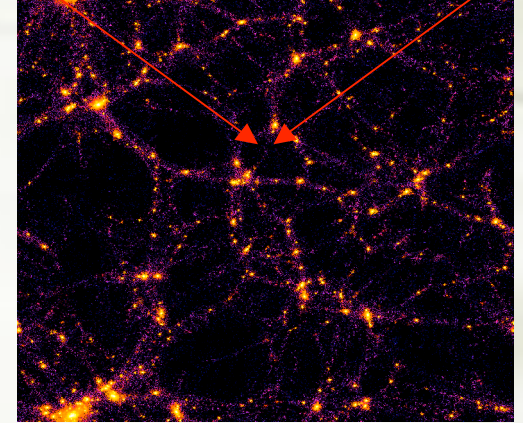
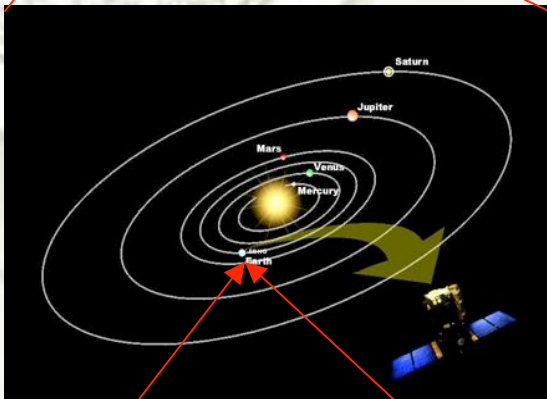
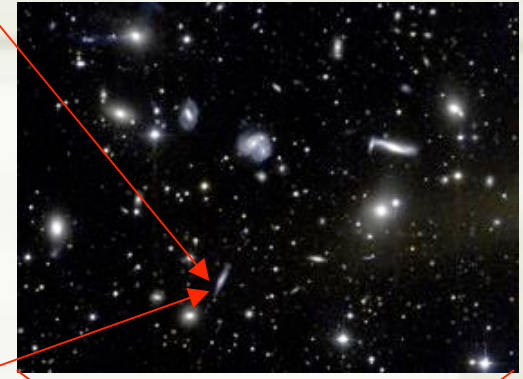
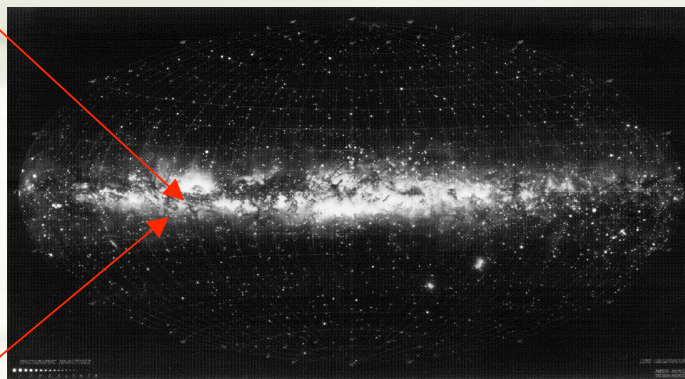
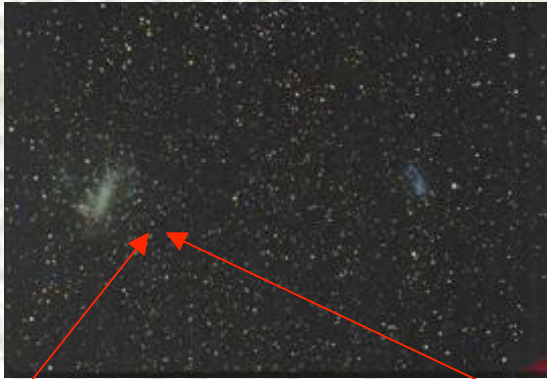
*La cosmologie a bientôt cent ans*



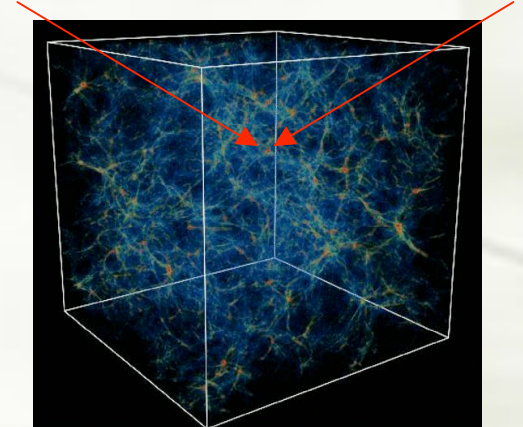
*et elle s'identifie aujourd'hui à la théorie du big bang*

# *Aristote: un monde plein et ordonné*





# *Les échelles dans l'univers*

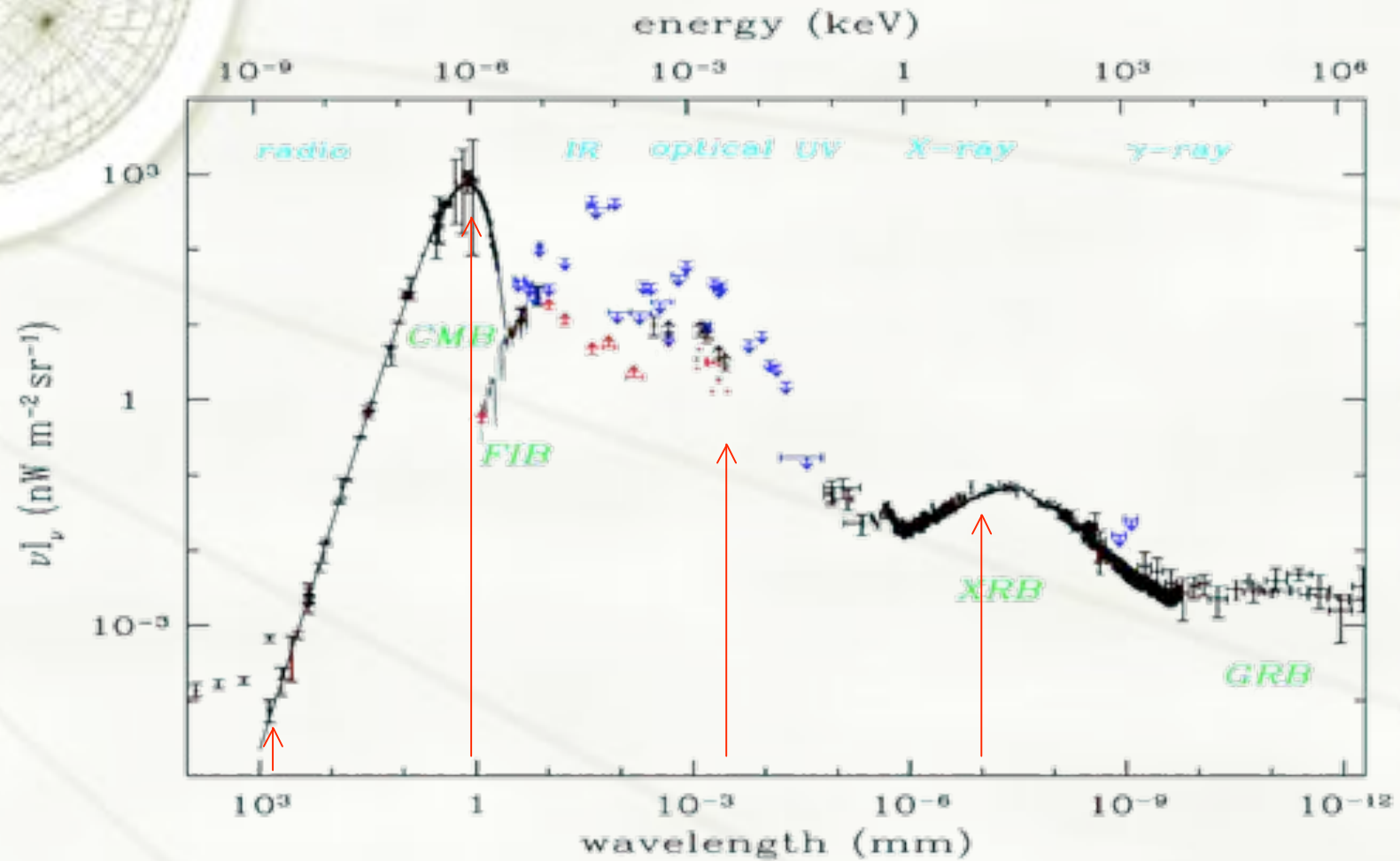


UIA Versailles - 12 octobre 2005

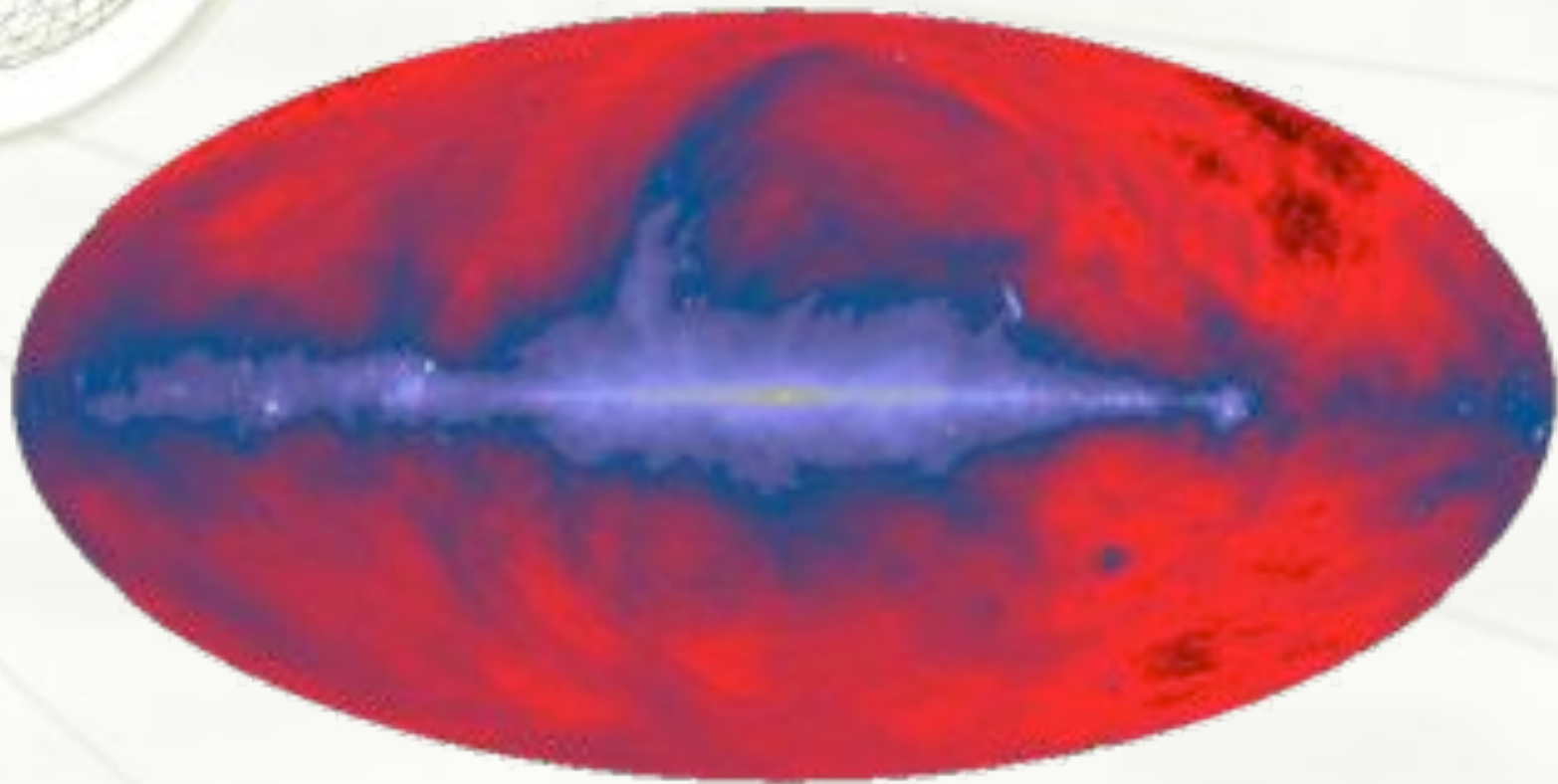
*Le ciel en optique:  
planètes, étoiles et galaxies*



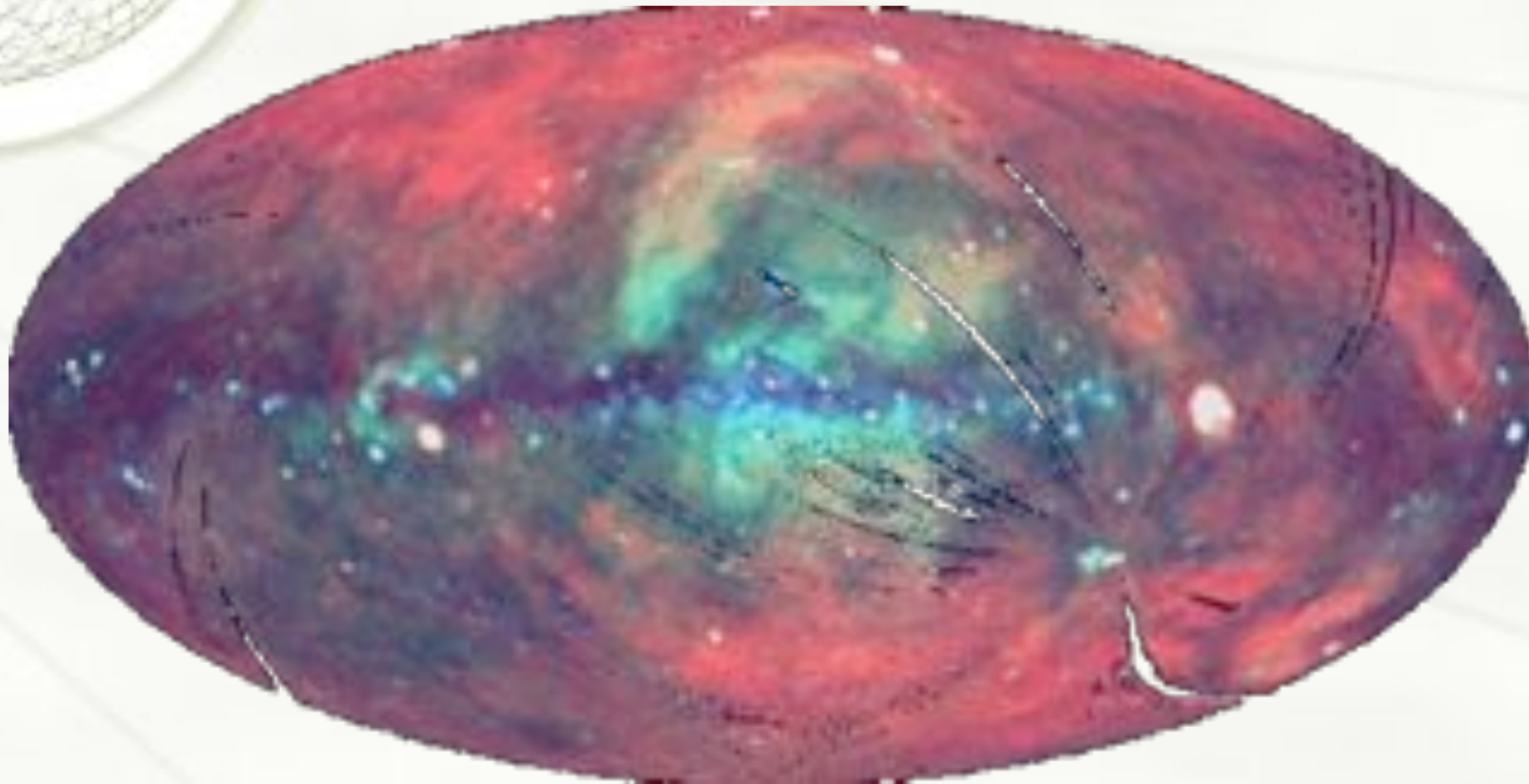
# Les sources de lumière



*Le ciel en radio ( $\lambda = 73 \text{ cm}$ )*



*Le ciel en rayons X ( $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$ )*







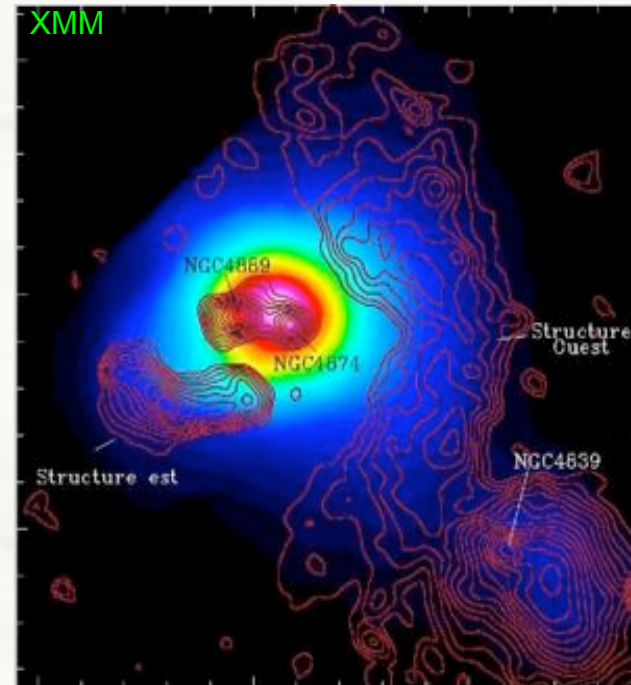
*Le ciel en radio ( $\lambda = 1 \text{ mm}$ )*

# *Nous vivons l'âge d'or de la cosmologie*

Les données viennent de sources de plus en plus variées



Elles sont de plus en plus précises

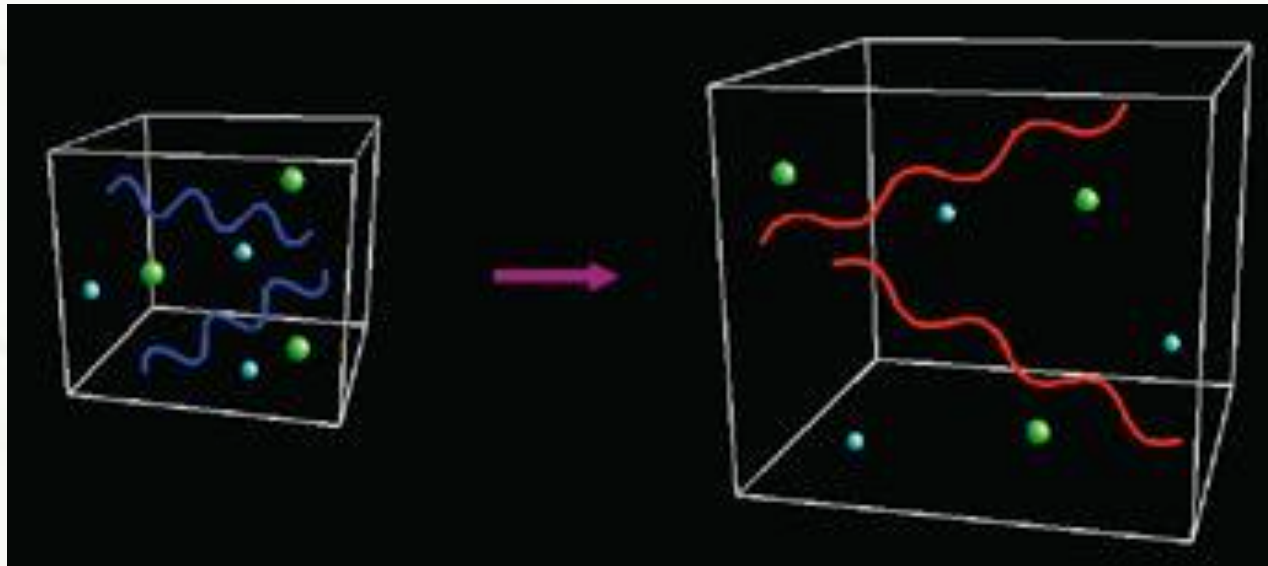


Elles confirment la théorie du big bang

- dans les grandes lignes
- mais aussi dans les détails

# La théorie du big bang

- ★ **1 - L'univers est en expansion**
  - ★ son contenu matériel est de plus en plus dilué
  - ★ la longueur d'onde du rayonnement augmente (décalage « vers le rouge »)
- ★ **2 - L'univers se refroidit**



- ★ Si les lois de la physique n'ont pas changé: **big bang** il y a 14 milliards d'années

# L'expansion *de* l'espace

- ✦ L'espace se dilate : les distances entre les objets augmentent avec le temps



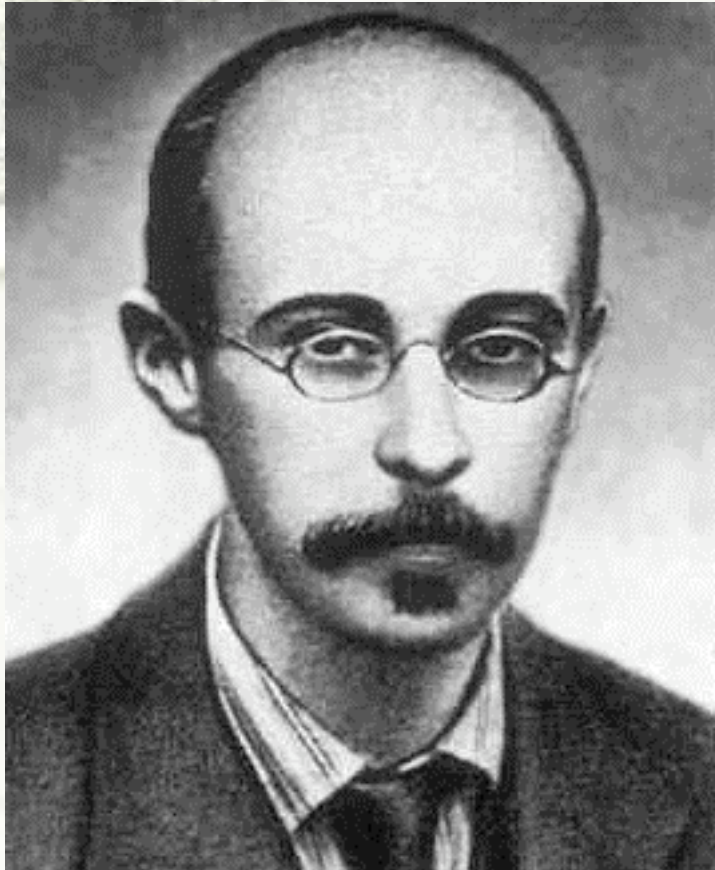
- ✦ Qu'est-ce que l'espace ?

- ✦ Le lieu où se trouvent les objets
- ✦ L'ensemble des relations entre les objets

*Newton*

*Aristote, Leibniz, Einstein*

## *Les inventeurs du big bang: Friedmann*



- ★ 1922 : prédiction **théorique** de l'expansion de l'univers
  - ★ Singularité initiale (*big bang*)
  - ★ Einstein : « C'est faux ! »
  - ★ Friedmann: « Mais non, regardez »
  - ★ Einstein : « Bon, c'est juste, mais sans aucun intérêt »
- ★ 1925 : mort prématurée et oubli

# *Les inventeurs du big bang: Lemaître*

- ★ 1925 : redécouvre l'expansion

- ★ Attribue à l'expansion de l'univers le décalage vers le rouge  $z$  observé par Slipher
- ★ Prévoit que  $z \propto \text{distance}$



- ★ 1927 : solutions complètes

- ★ courbures positive et négative, avec et sans rayonnement, avec et sans constante cosmologique, estimation  $H_0 \sim 600 \text{ km/s/Mpc}$
- ★ Einstein: « Vos calculs sont justes, mais votre intuition physique est abominable! »

- ★ 1929 : loi de Hubble

$z \propto \text{distance}$ ,  $H_0 \sim 540 \text{ km/s/Mpc}$

# *Les inventeurs du big bang: Gamow*

- ★ **Un univers plus dense dans le passé était nécessairement plus chaud**

- ★ L'univers se refroidit :  $T \propto 1 + z$

- ★  $T \propto 1/\sqrt{t}$

$t = 1 \text{ seconde} \quad T = 10^{10} \text{ }^\circ\text{C}$

=> **Fusions nucléaires possibles**

- ★ Gamow et ses élèves estiment en 1948 qu'aujourd'hui  $T \sim 5 \text{ à } 10 \text{ K}$
- ★ Observation (1965)  $T \sim 3 \text{ K } (-270^\circ\text{C})$
- ★ *Mais la température de quoi ?* Des photons!  
pas des baryons, ni des neutrinos...



# *Brève histoire de l'univers: expansion et refroidissement*



**Instant zéro   1 minute   400 000 ans   500 millions d'années   9 milliards d'années   14 milliards d'années**



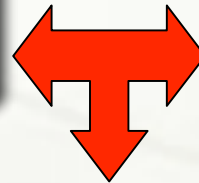
# *Méditons sur les mystères de l'univers*



# *Le théoricien*

Relativité générale

Univers homogène

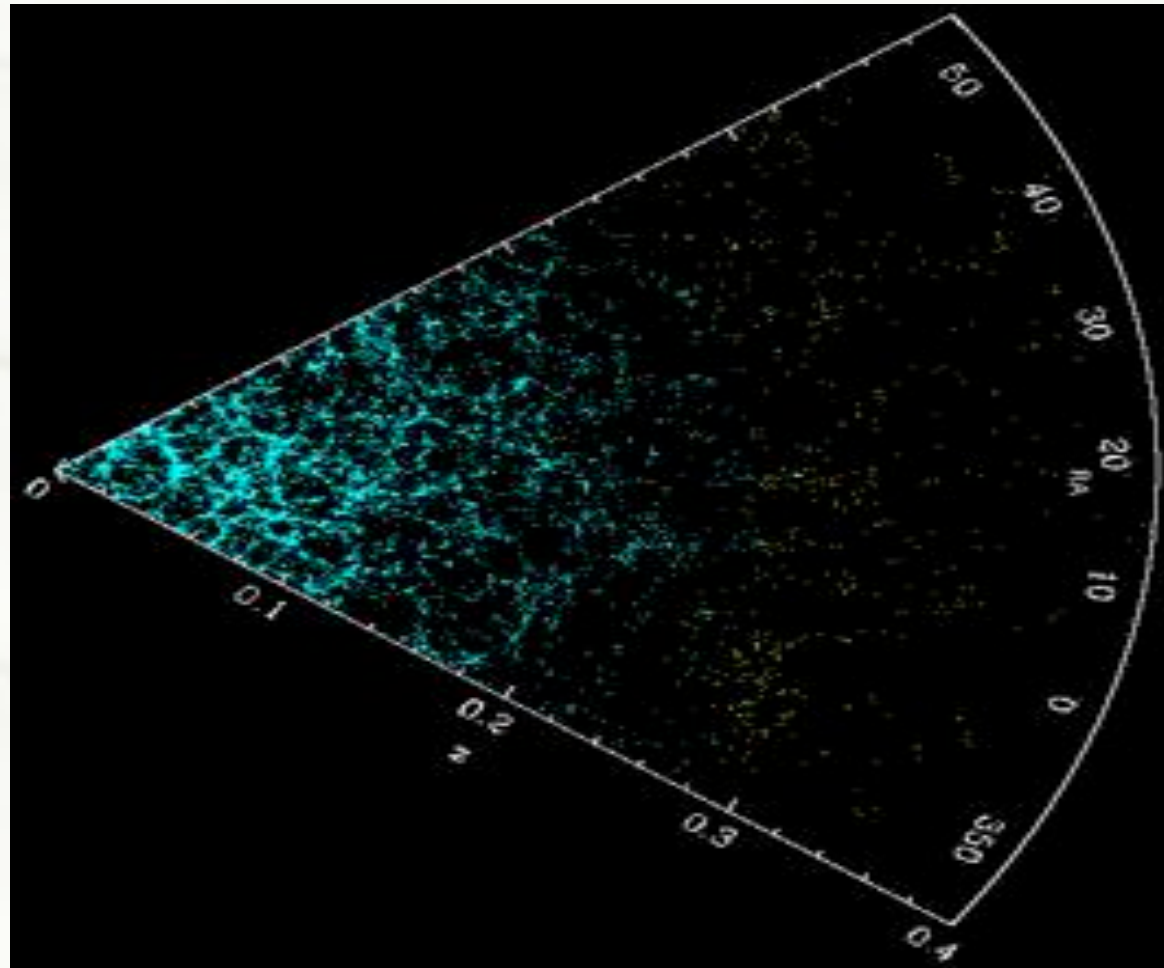


Univers en expansion qui se refroidit

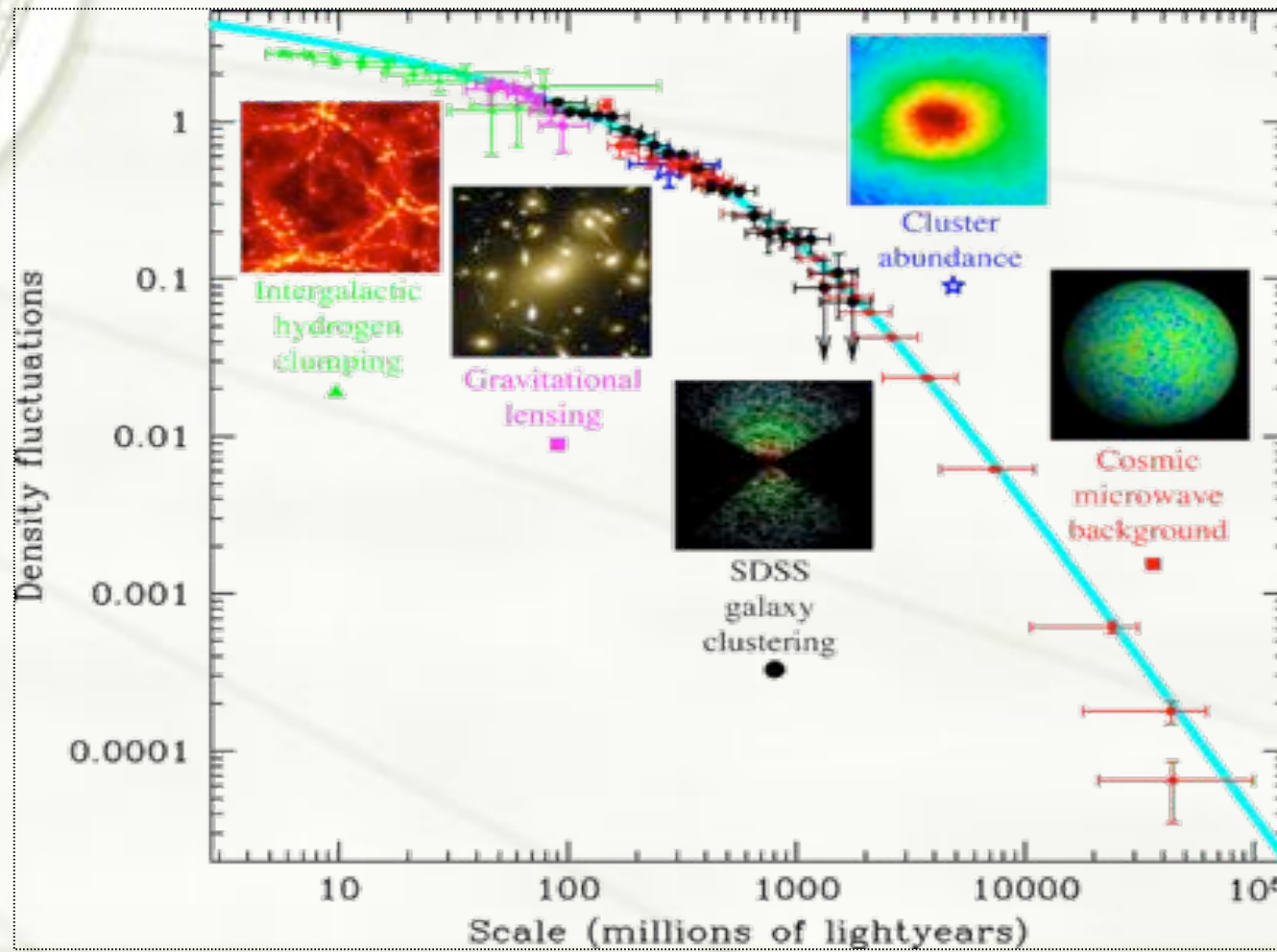
# 1- La relativité générale est un jeu d'enfant



## 2 - *Un univers (presque) homogène*



# *Ampleur des variations de densité*

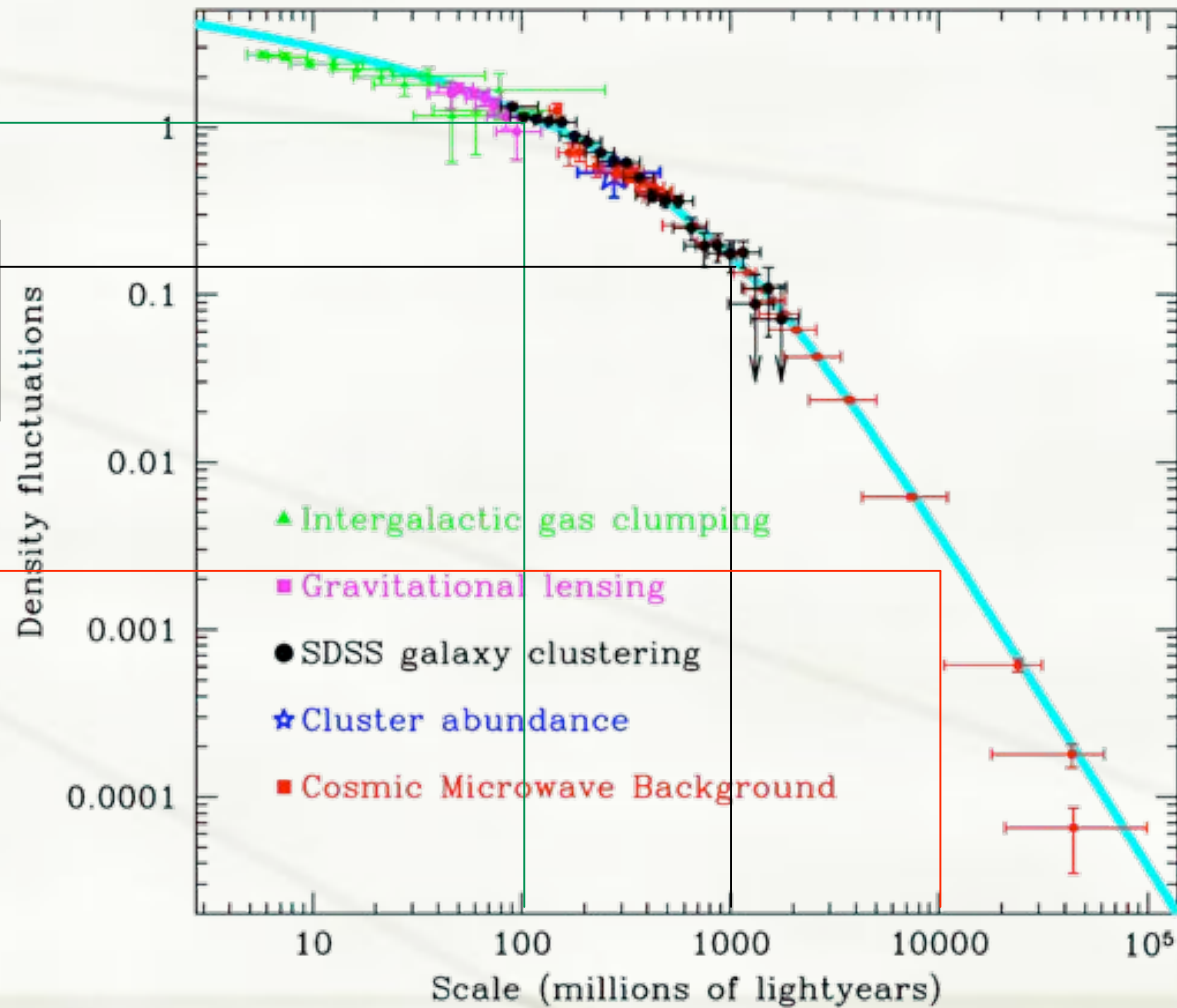


# Un univers (presque) homogène

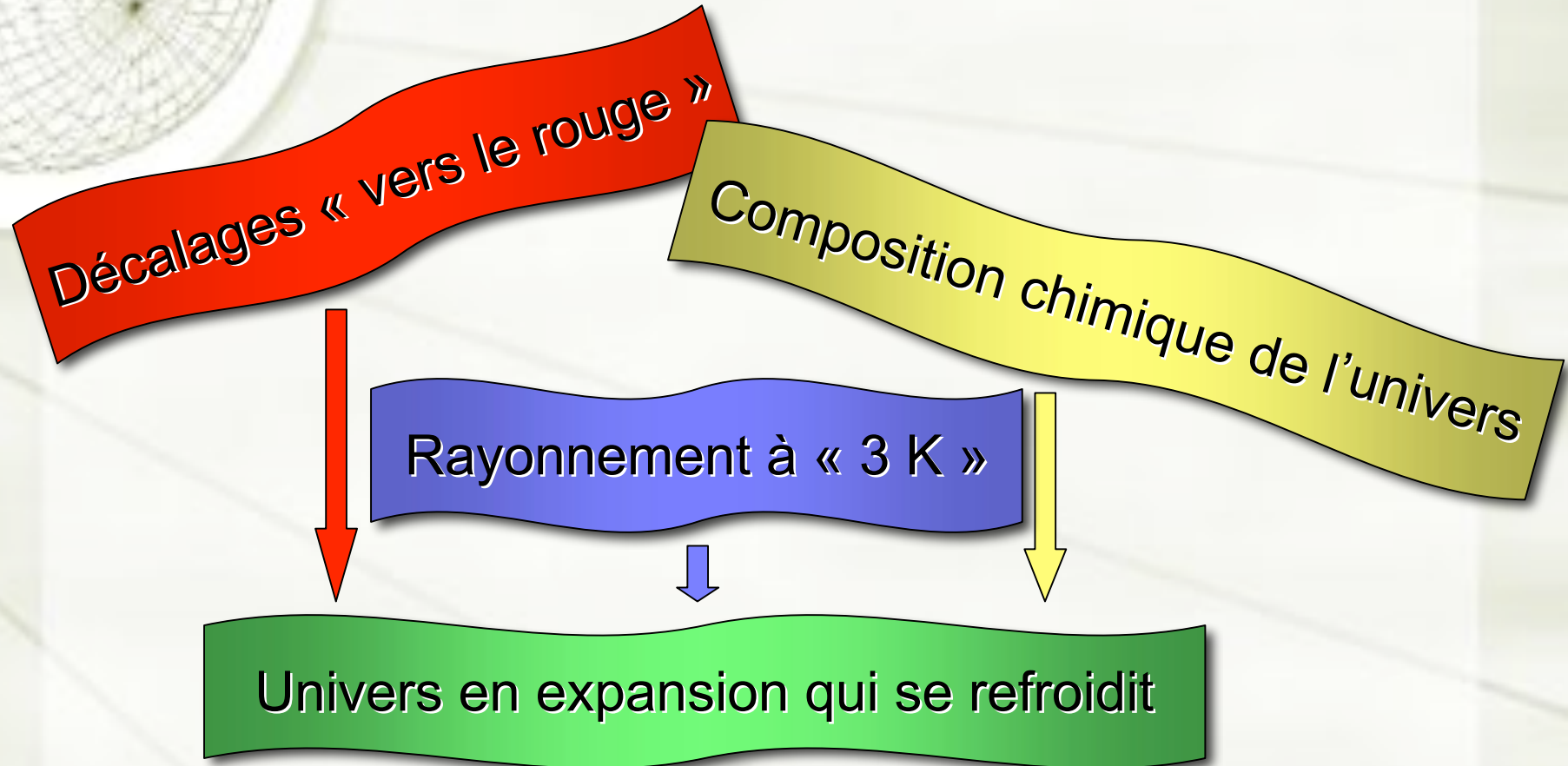
Localement, inhomogénéité forte : galaxies et amas

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

A très grande échelle, homogénéité quasi parfaite

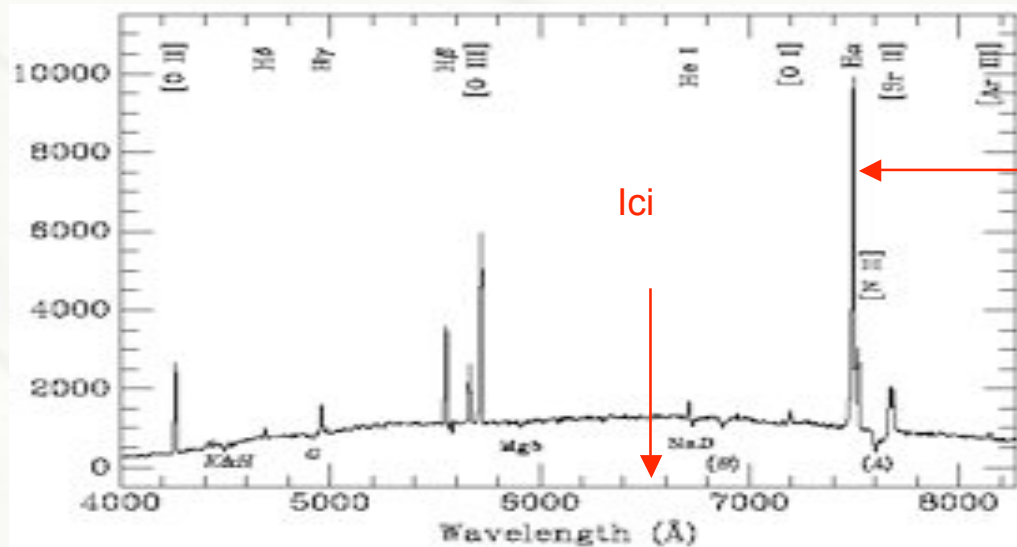


# L'observateur



# 1 - Les décalages vers le rouge

- ★ Les spectres des galaxies sont presque tous décalés « vers le rouge »
- ★ Ce décalage  $z$  mesure la variation des échelles de longueur entre l'instant d'émission et celui de détection
- ★ Il est le même pour tous les rayonnements et toutes les longueurs d'onde



Normalement la raie  $H_{\alpha}$  est à 656 nm

$$z = (750-656)/656 = 0.14$$



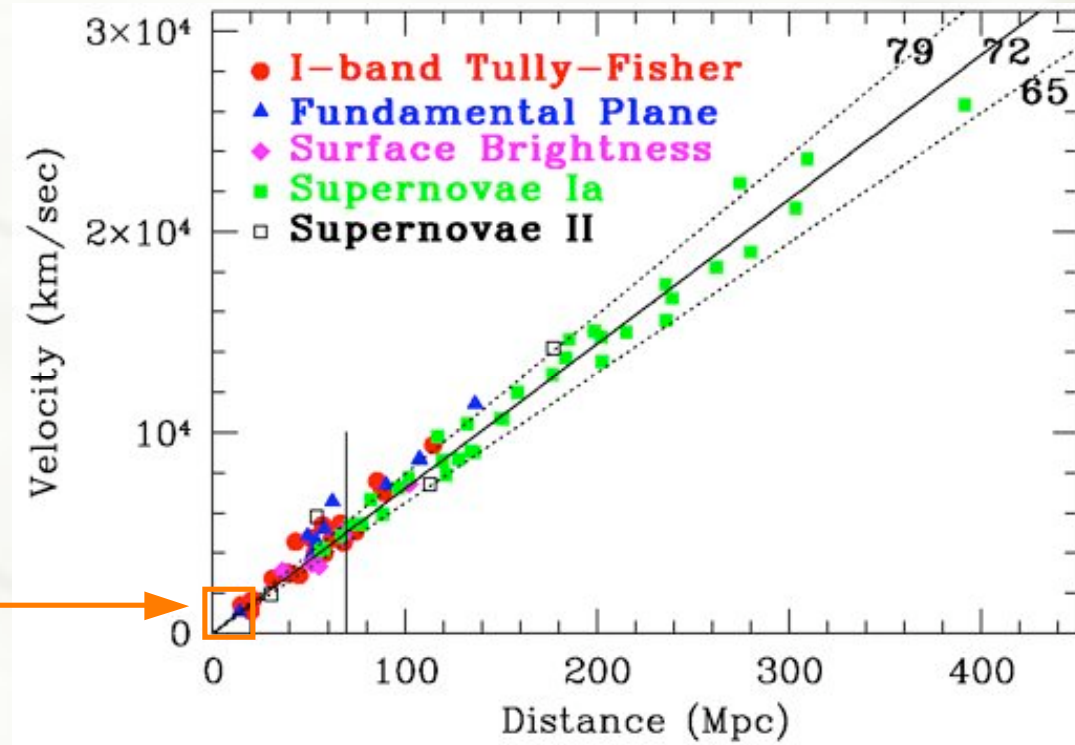
# Loi de Hubble

- Le décalage  $z$  des raies spectrales vers les grandes longueurs d'ondes est **proportionnel à la distance  $D$**  de la source

- $z = D H_0 / c$

$$z = \frac{\lambda_{\text{réception}} - \lambda_{\text{émission}}}{\lambda_{\text{émission}}}$$

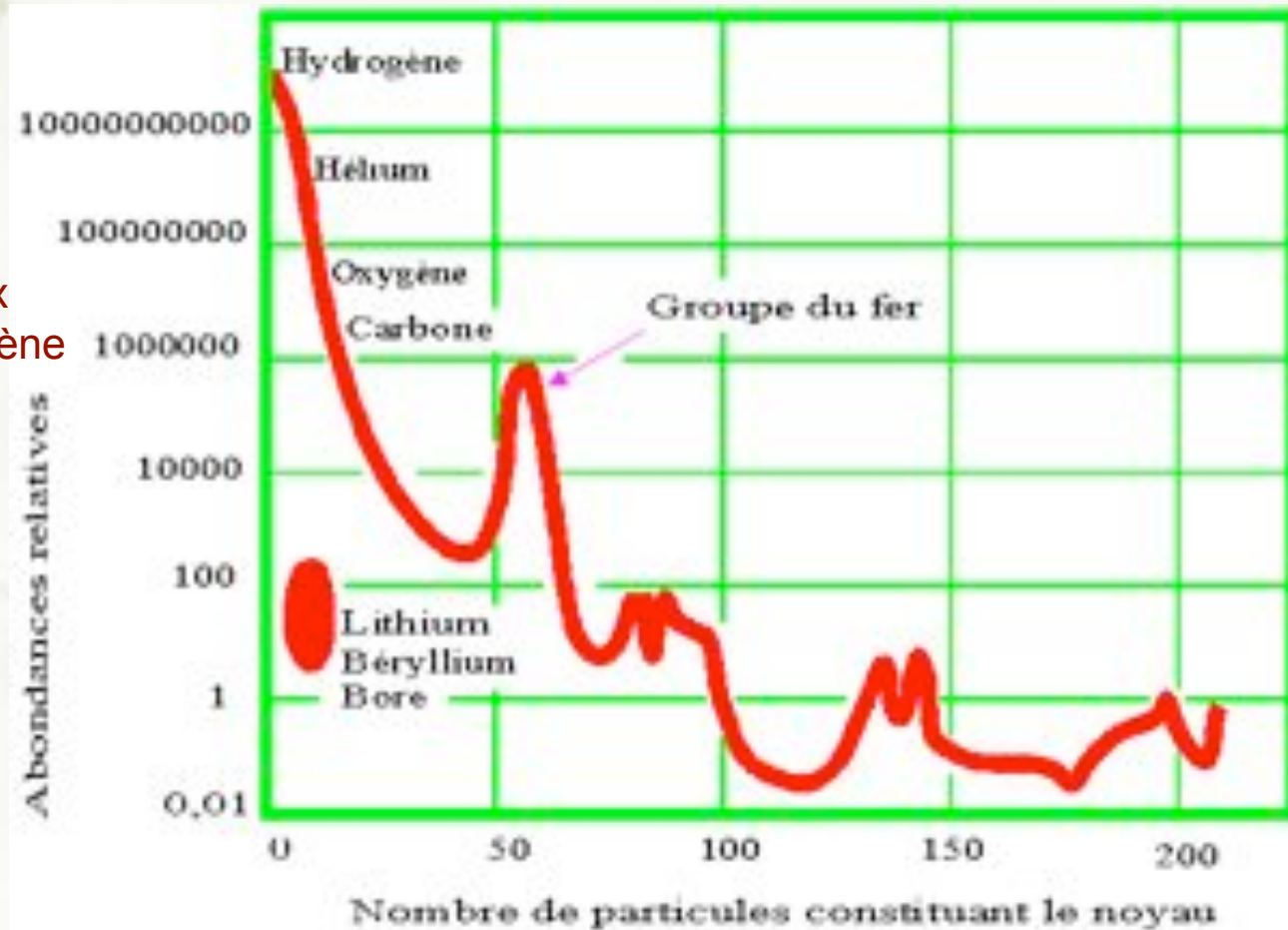
Loi de Hubble en 1929



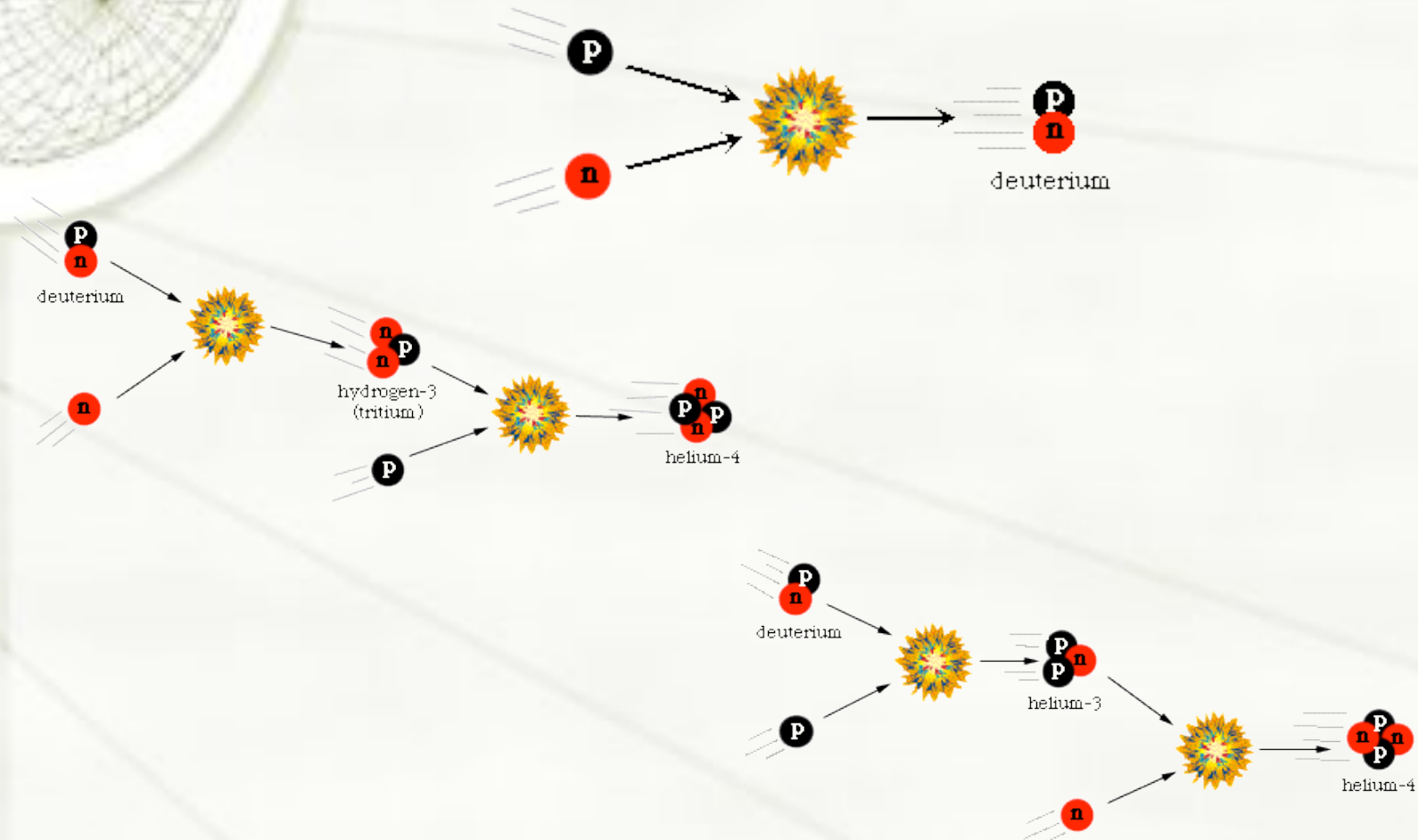
## 2 - Composition chimique de l'univers

90% des noyaux  
sont de l'hydrogène

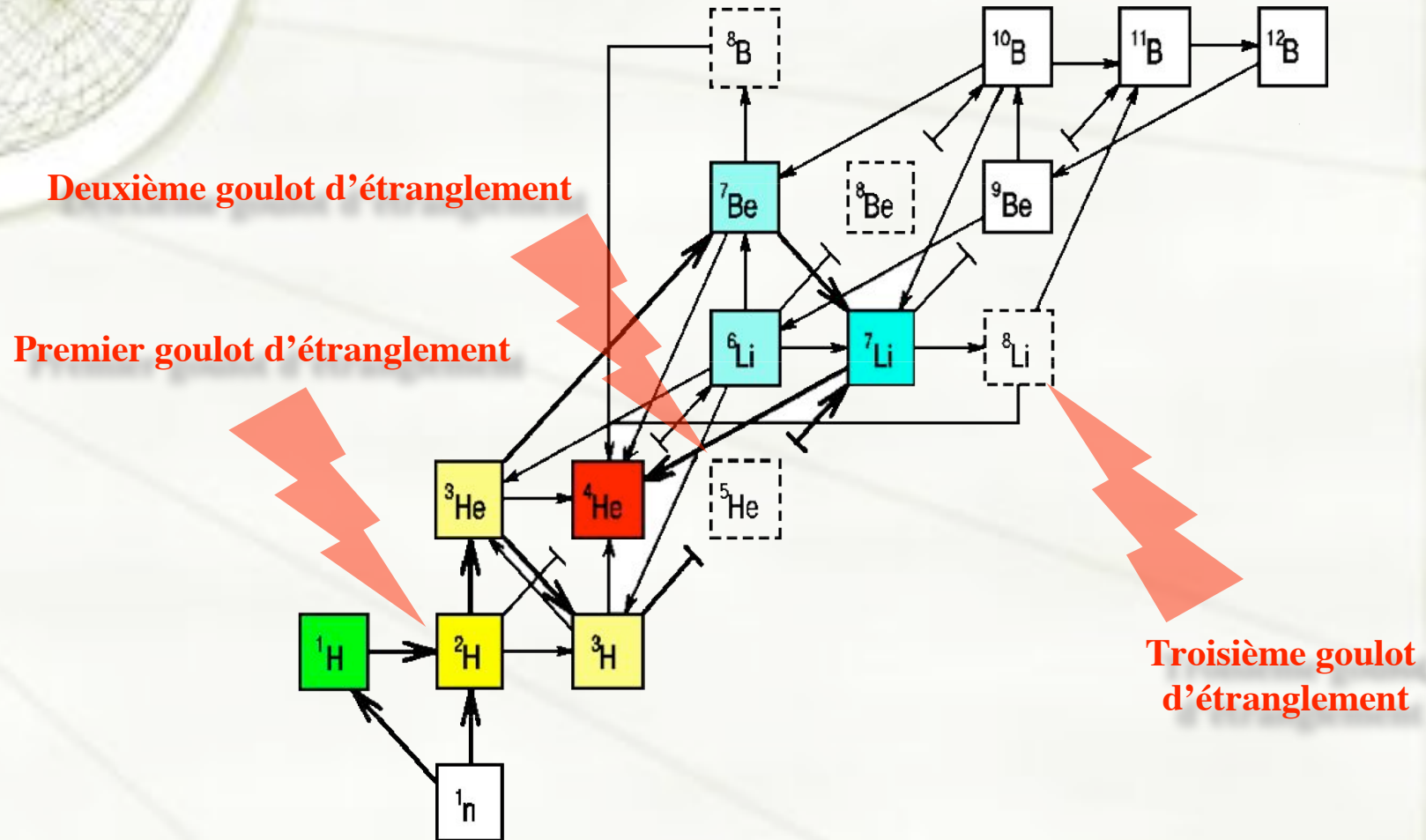
9% des noyaux  
sont de l'hélium



# Réactions de fusion



# Le réseau nucléaire



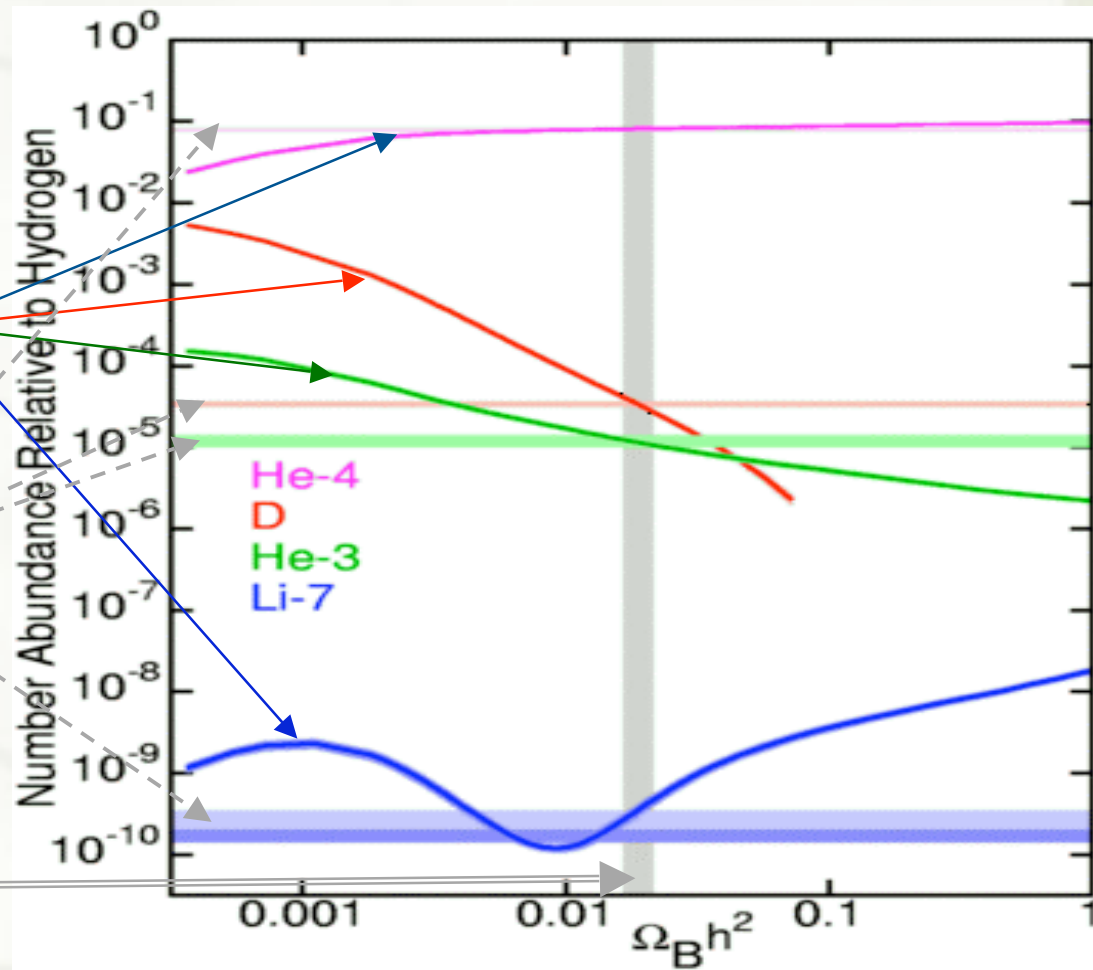
# Théorie et observations

★ Accord global entre

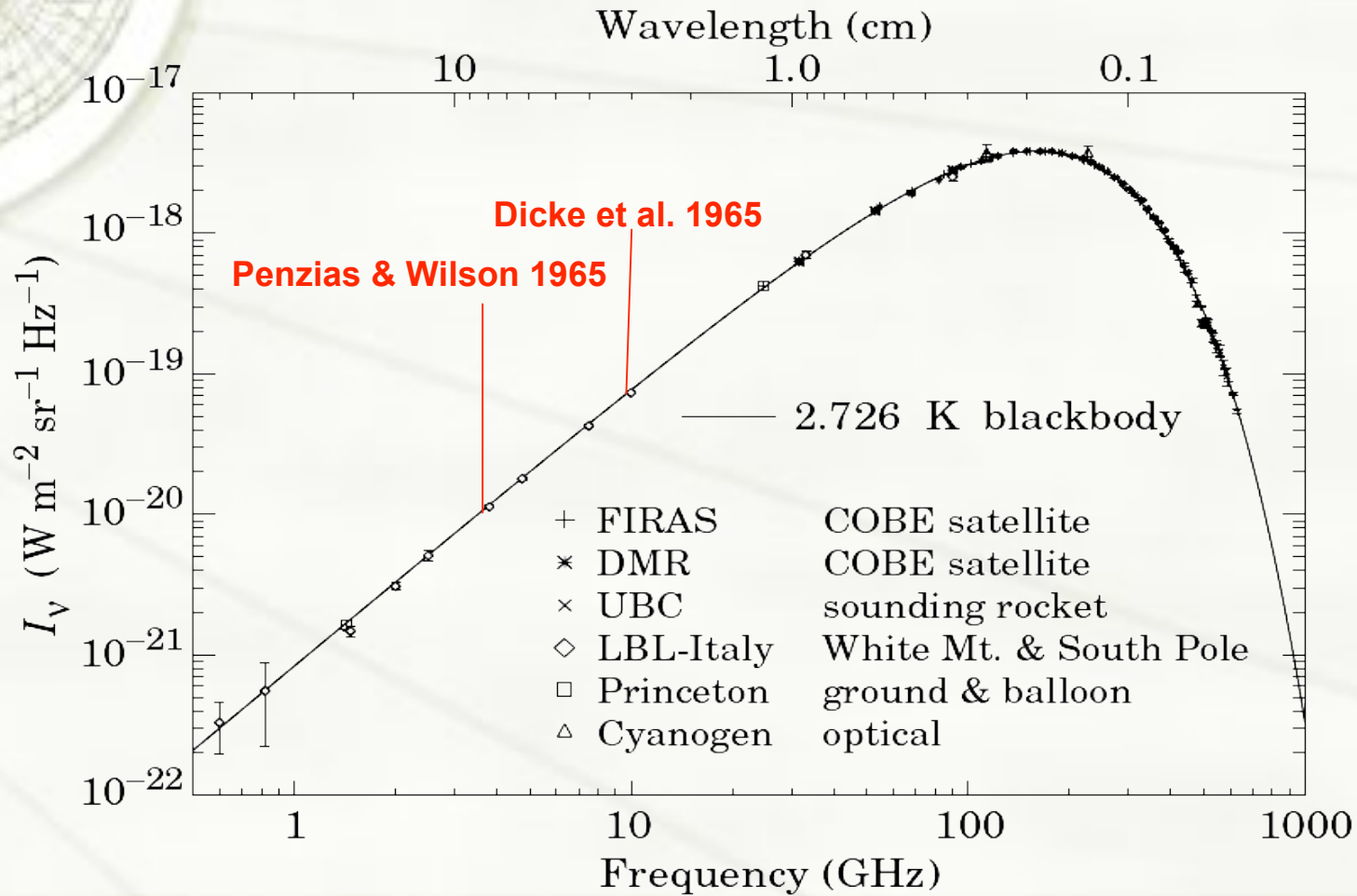
les prédictions théoriques

et les observations

pour un intervalle  
réduit de la densité  
de baryons  $\Omega_B$

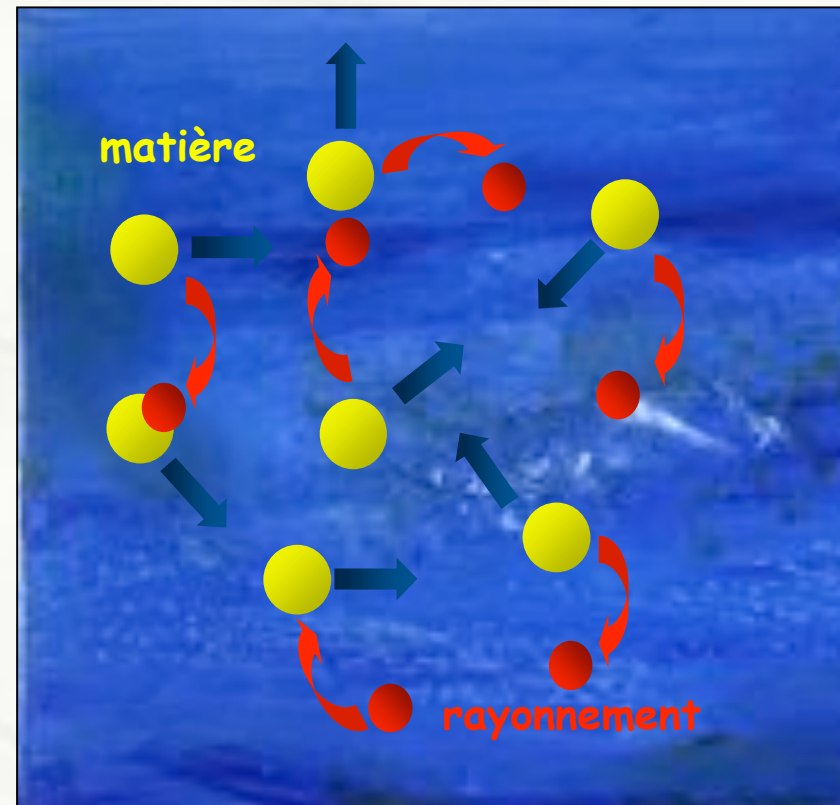


# 3 - *Le fond de rayonnement cosmologique*

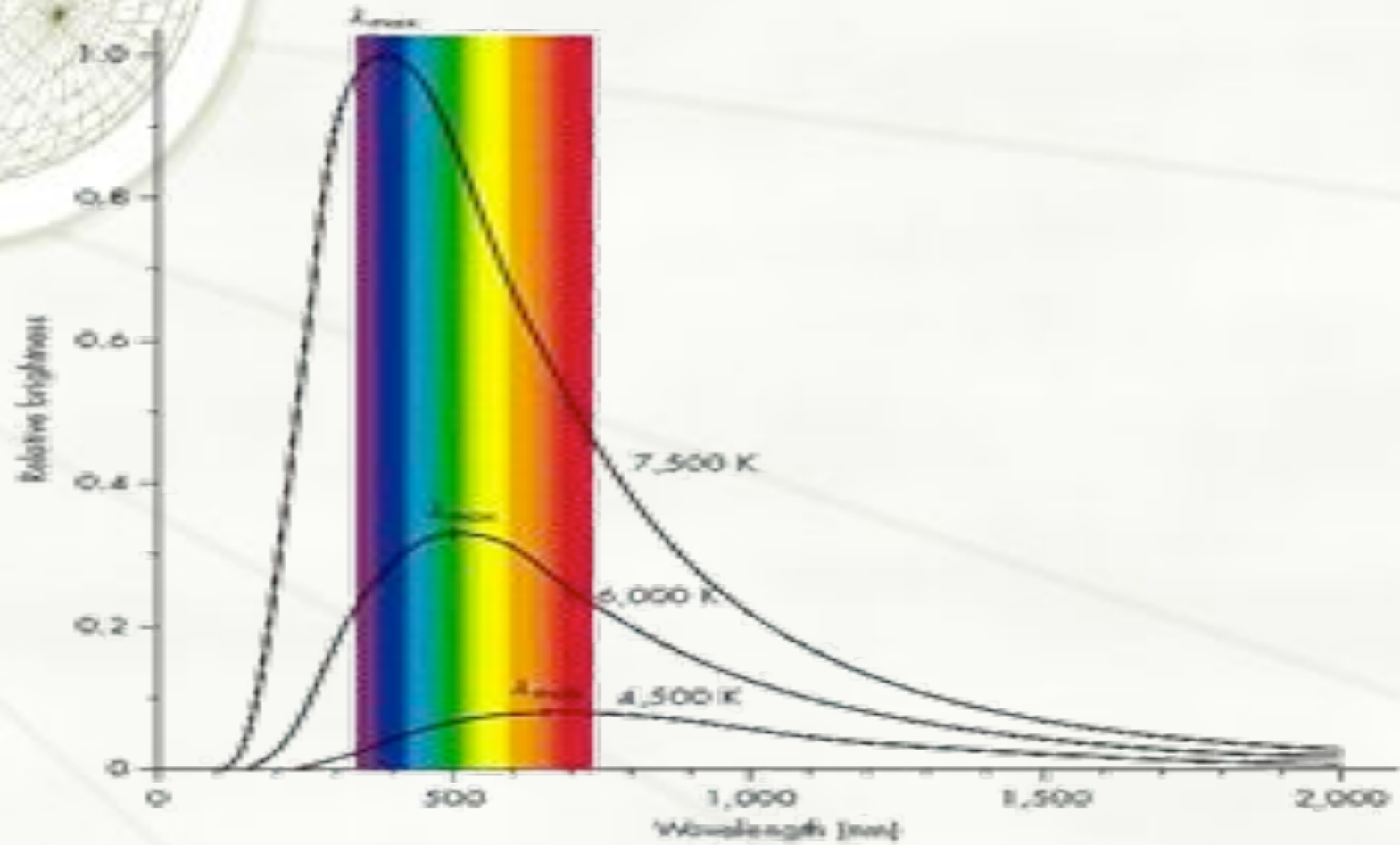


# Equilibre matière-rayonnement

- ✦ A haute température, les atomes sont dissociés en électrons et ions
- ✦ Les photons interagissent fortement avec les électrons et les ions
- ✦ Equilibre thermodynamique : « distribution de corps noir »



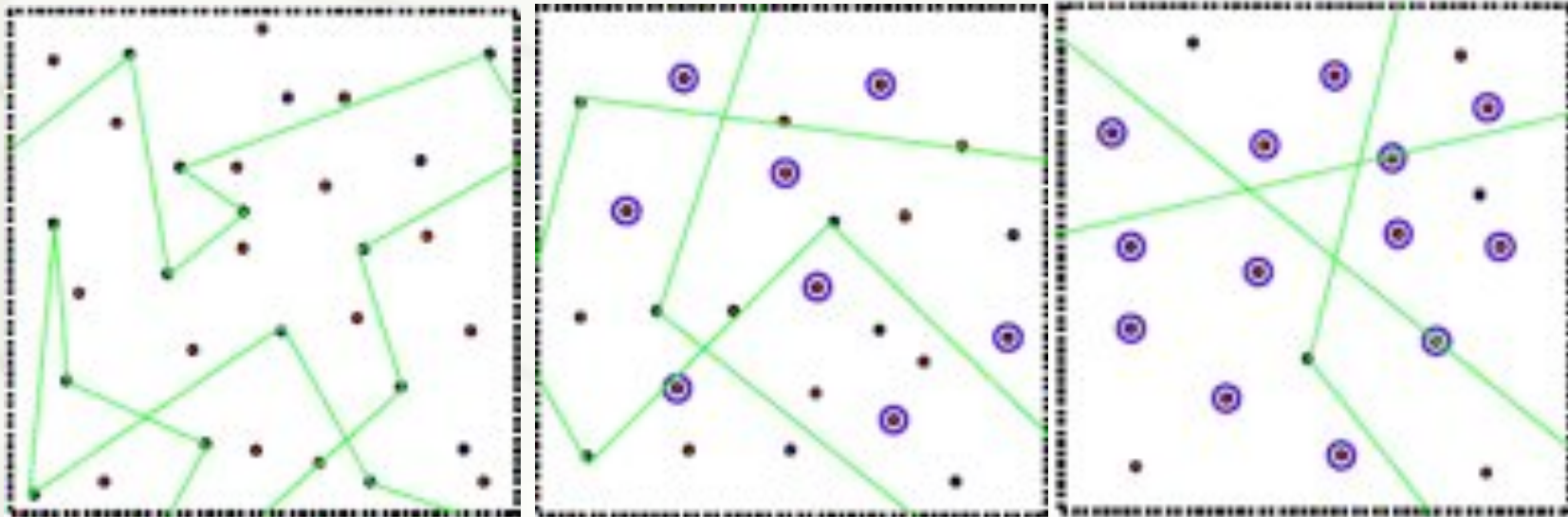
# *Distribution de corps noir*





# Découplage matière-rayonnement

- ★ Quand la température baisse, électrons et ions se **recombinent** en atomes
- ★ Les photons n'interagissent plus: **l'équilibre thermodynamique demeure « figé »**



© F. Bouchet (IAP)

# *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

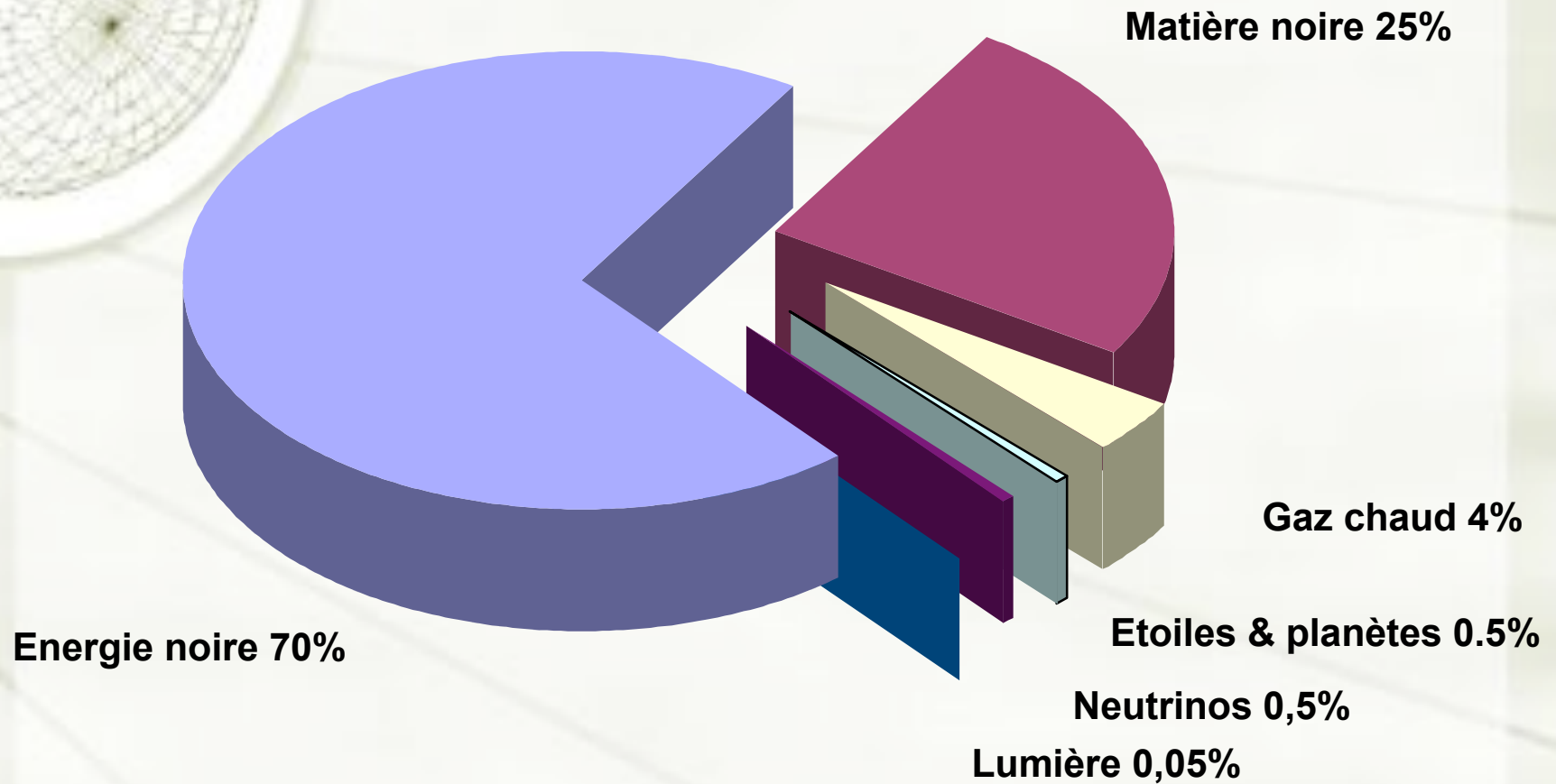
Bref, si on sait (à peu près) **comment** les choses se sont passées, on ne sait pas du tout **pourquoi** elles se sont passées comme ça!



# *Méditons sur les mystères de l'univers*



## *Etonnant inventaire ...*





*95% d'inconnu, est-ce raisonnable?*

✦ **Oui !**

✦ **Non !**



Les cosmologistes sont  
parfois dans l'erreur,  
mais jamais dans le  
doute

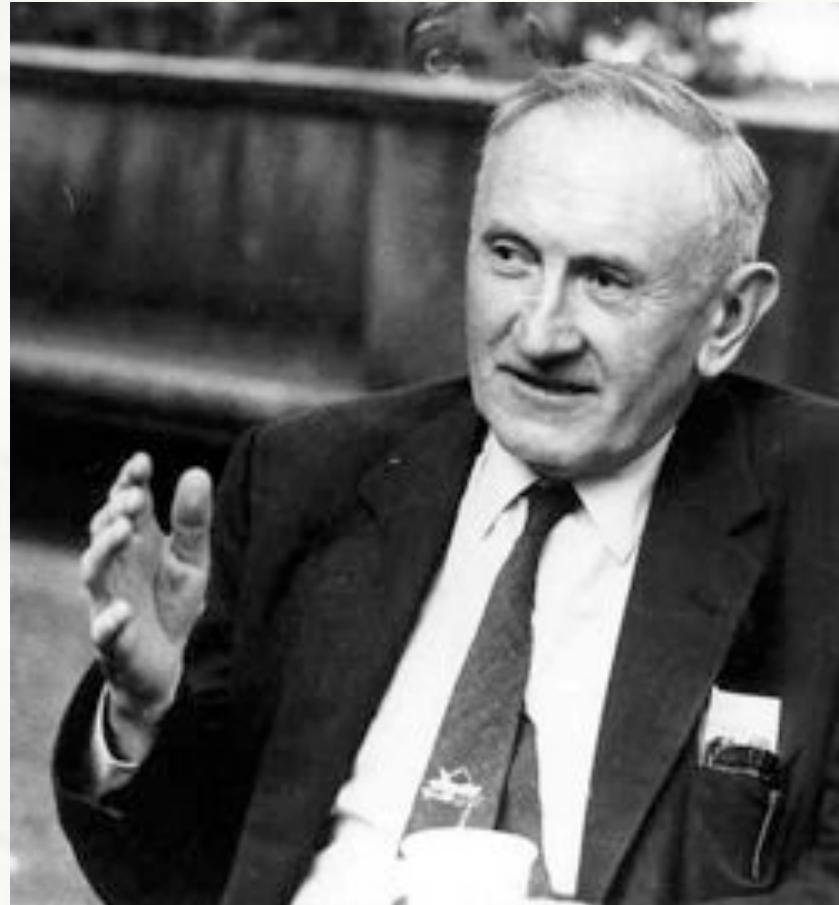


*Le côté sombre de l'univers*

# *La matière noire, un vieux problème...*

★ 1933 : Fritz Zwicky

★ 1970 : Vera Rubin



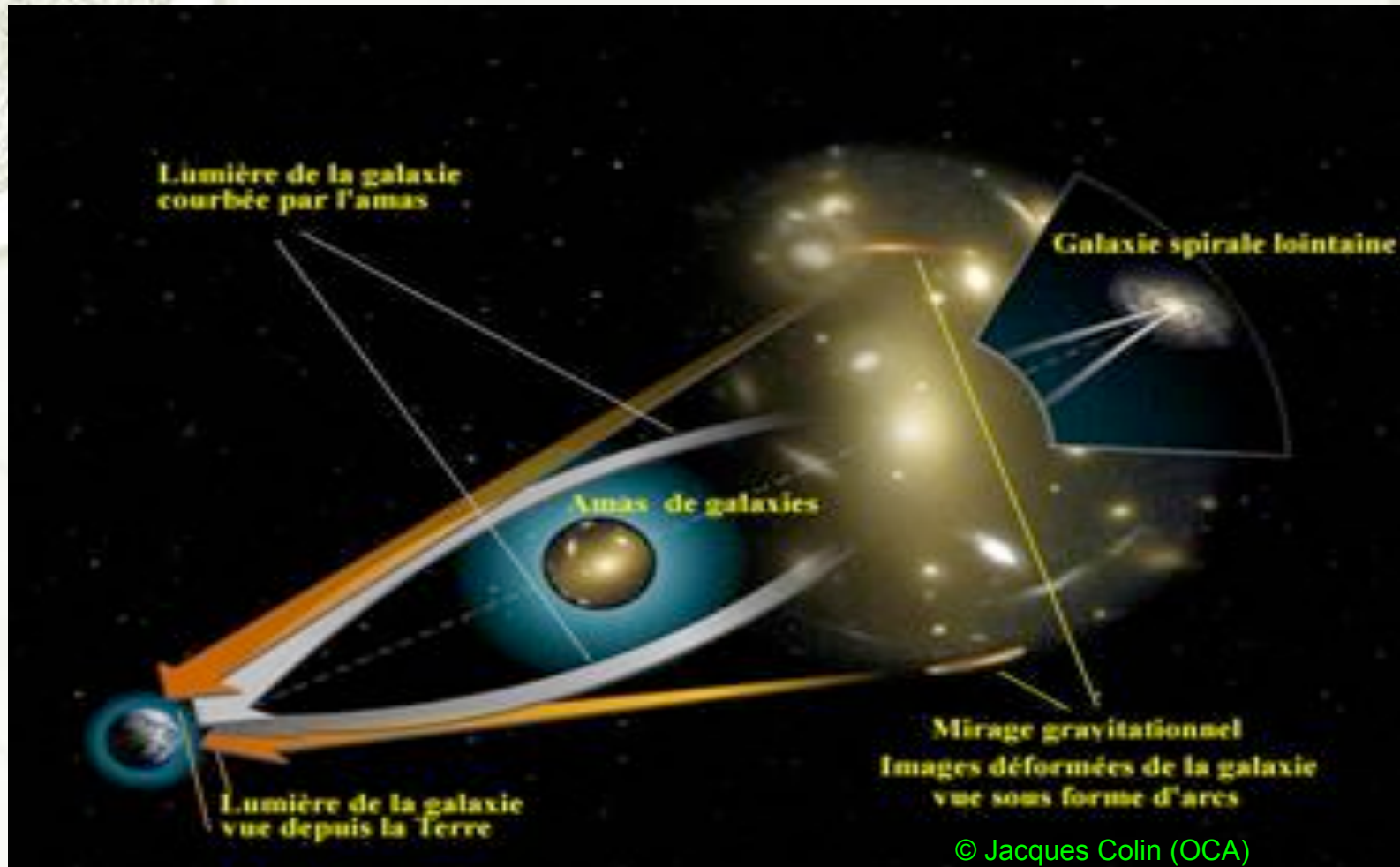
# *Lentilles gravitationnelles*



Amas de galaxies Abell 1689 (HST)



# *Lentilles gravitationnelles*



# Quelle est la nature de la matière noire?

- ✦ De la matière « normale » mais obscure?

- ✦ poussières?
- ✦ planètes, astéroïdes?
- ✦ étoiles noires, brunes, blanches?
- ✦ trous noirs stellaires?
- ✦ trous noirs géants?

Machos

- ✦ Neutrinos?

- ✦ Un nouveau type de particule élémentaire stable?

- ✦ très légère et très abondante?
- ✦ très lourde et très rare?

Axions

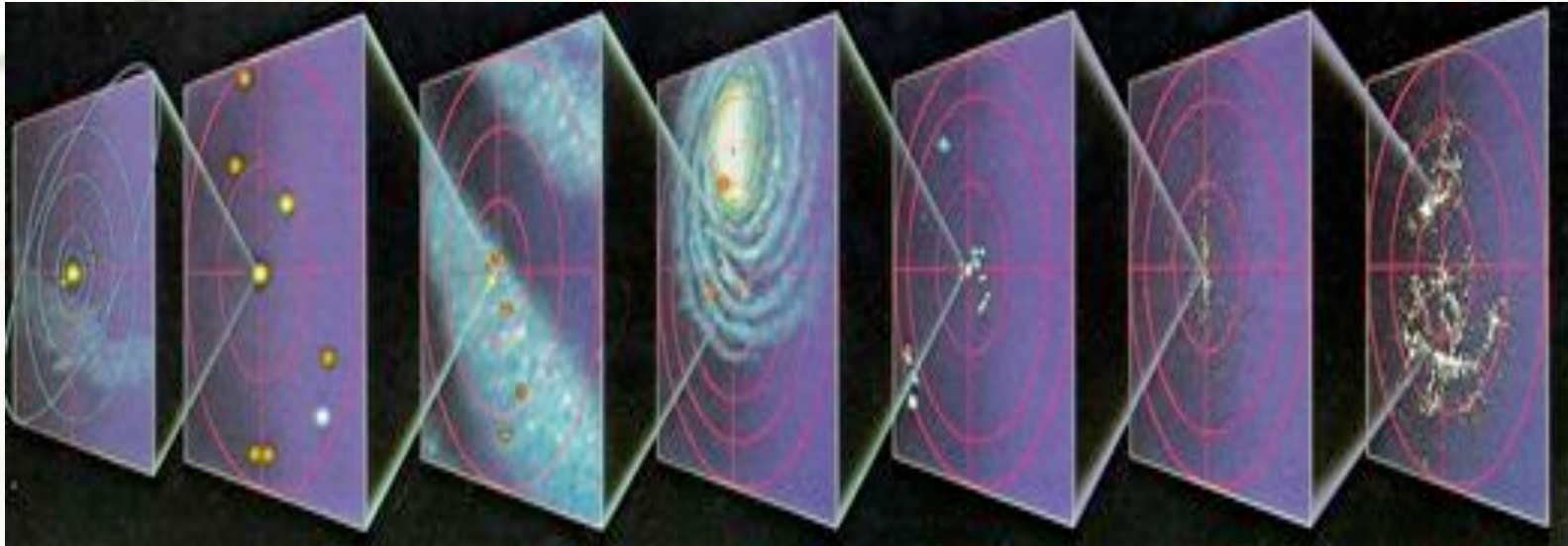
Mauviettes (*wimps*)





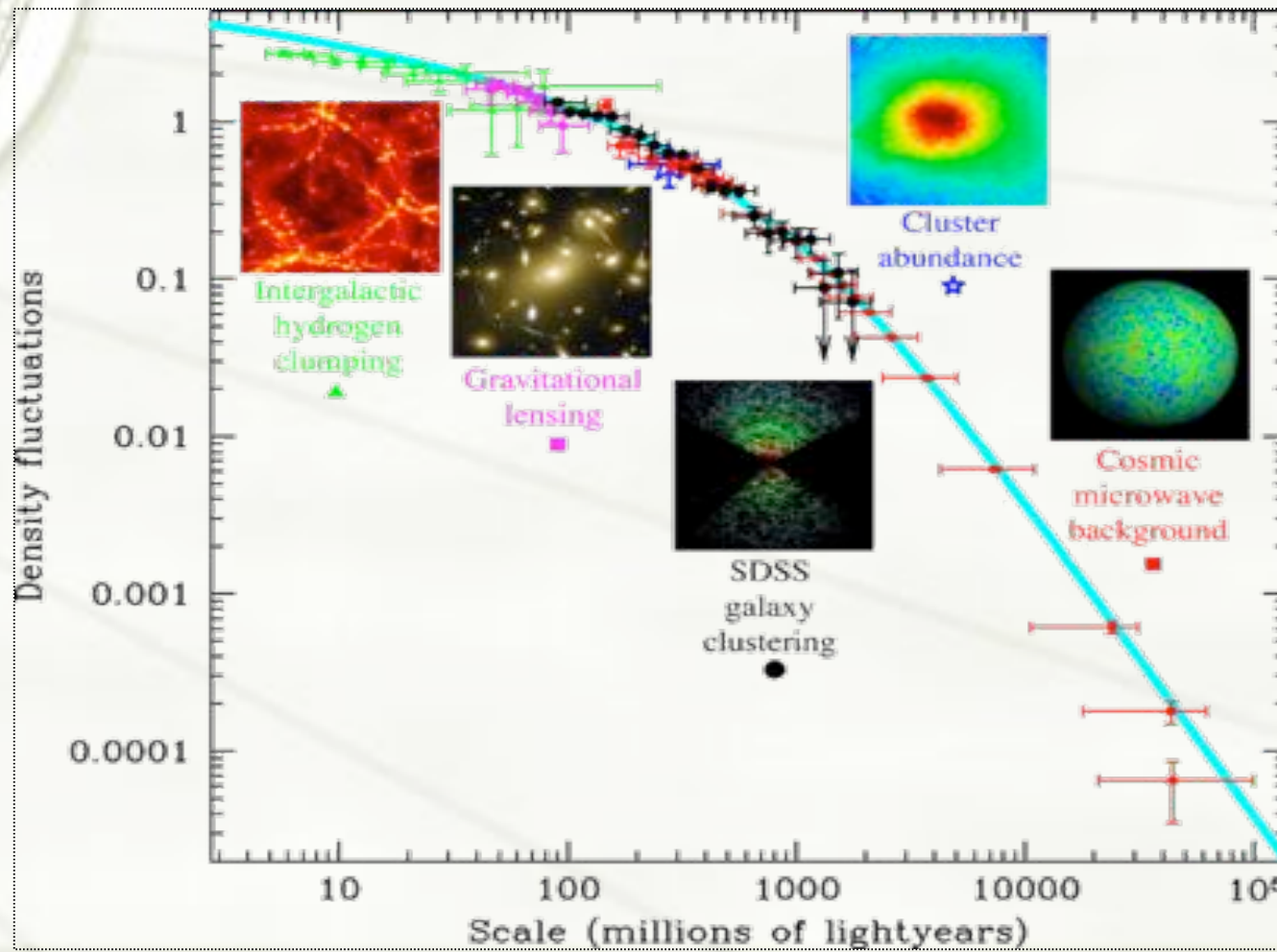
## *Formation des « structures »*

- ★ Le terme « (grande) structure » désigne en général les galaxies et les amas de galaxies



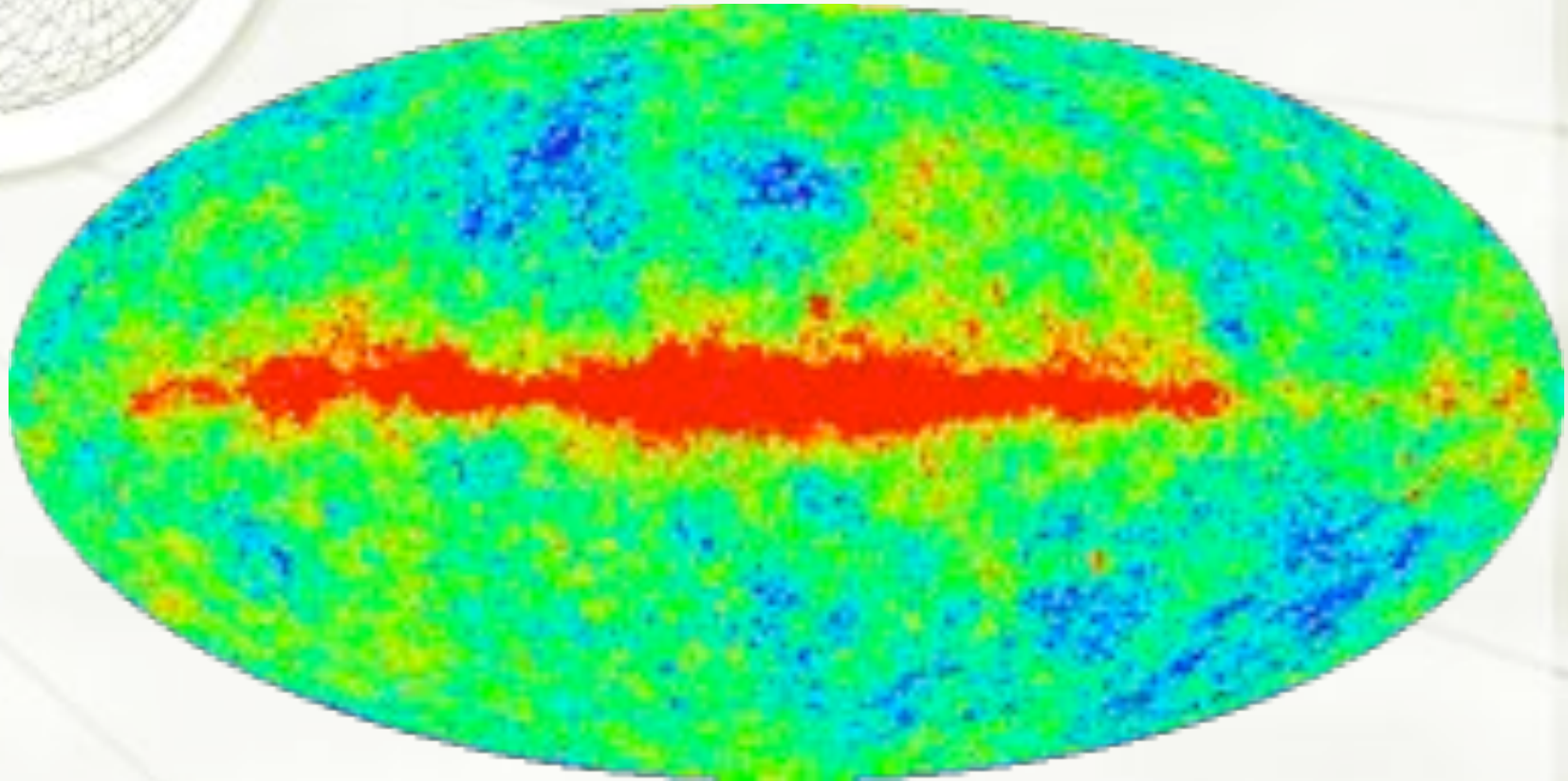
mais il est parfois étendu aux amas d'étoiles et aux étoiles, dont la formation est « facile » à comprendre, quand celles des galaxies l'est

# Ampleur des variations de densité



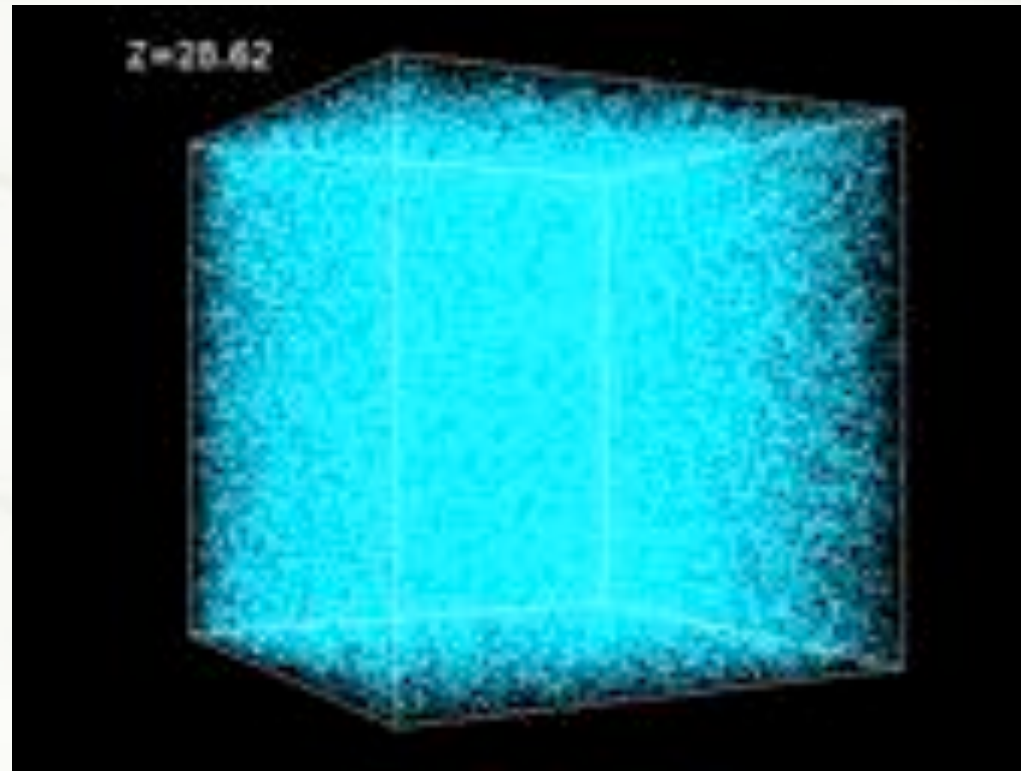
# *Le fond de rayonnement cosmologique*

Rayonnement **de corps noir** pratiquement isotrope



# Formation des galaxies et des étoiles

- ★ Les faibles inhomogénéités initiales ( $1/100\ 000$ ) croissent par **instabilité gravitationnelle**



# *L'origine de l'univers*

- ✦ La relativité générale prédit une **singularité** initiale (température, densité, pression infinies)
- ✦ Les lois connues ne s'appliquent plus
- ✦ Mais la théorie quantique ne peut plus être oubliée dans ces conditions
- ✦ Mais une théorie quantique de la gravité manque depuis 80 ans
- ✦ Multiples voies explorées
  - ✦ Théorie des cordes
  - ✦ Théories des boucles
  - ✦ ...



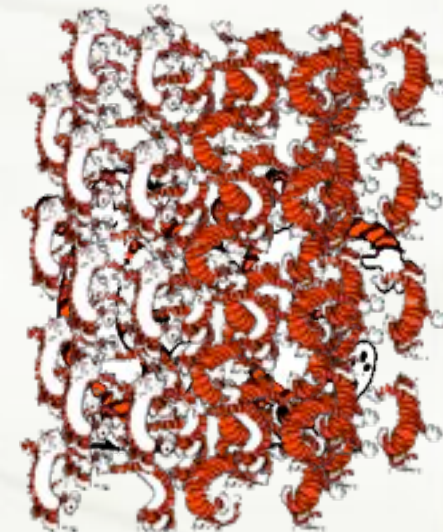
# *L'espace est une scène de théâtre*



**Newton (+MQ)**  
espace rigide  
uniforme  
illimité  
extérieur



**Einstein (RG)**  
espace déformé  
par son contenu



**Gravité quantique**  
espace inexistant  
hors de son contenu

**Le théâtre est illusion**



*Merci de votre attention*



Et de votre patience !