

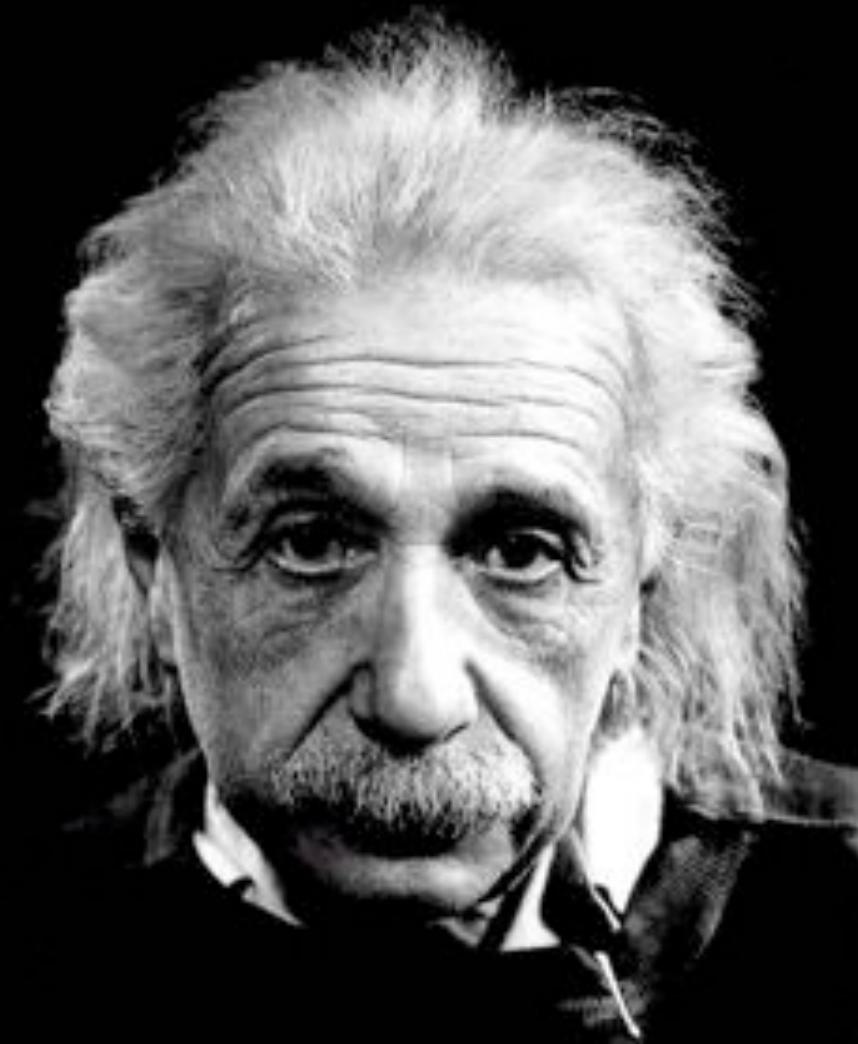
De la cosmologie avant toute chose...

Alain Bouquet

Laboratoire Astroparticule & Cosmologie
Collège de France
Université Paris 7 - CNRS - CEA - Observatoire de Paris



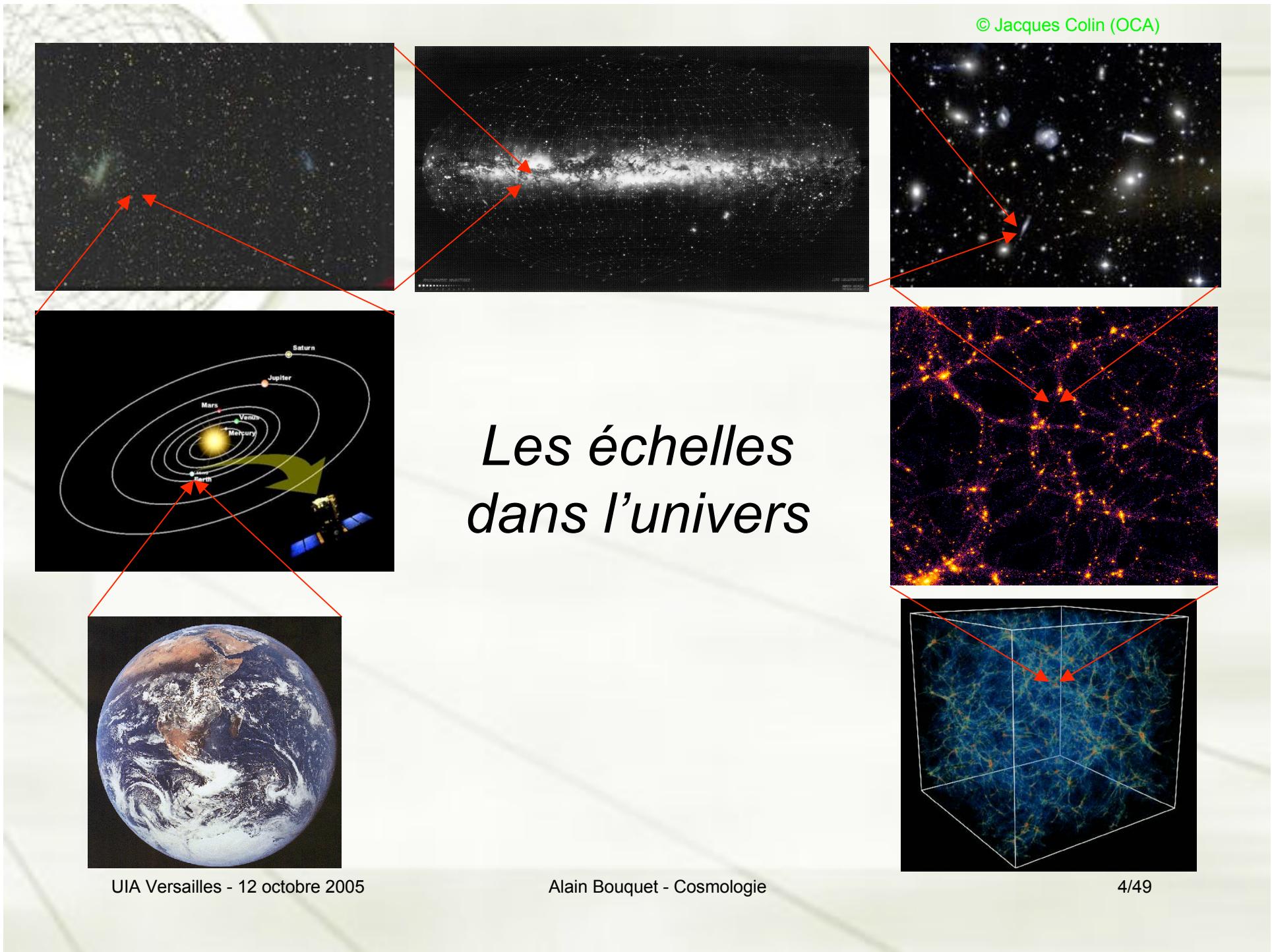
La cosmologie a bientôt cent ans

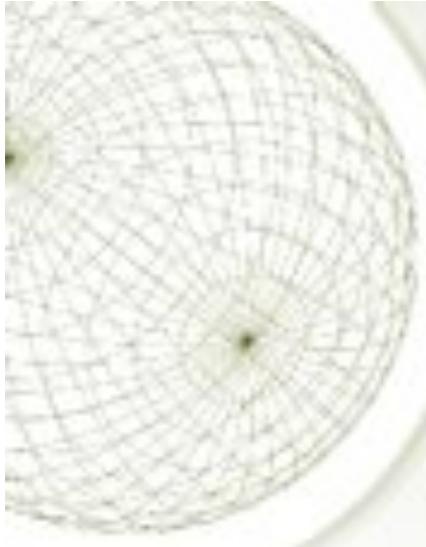


et elle s'identifie aujourd'hui à la théorie du big bang

Aristote: un monde plein et ordonné



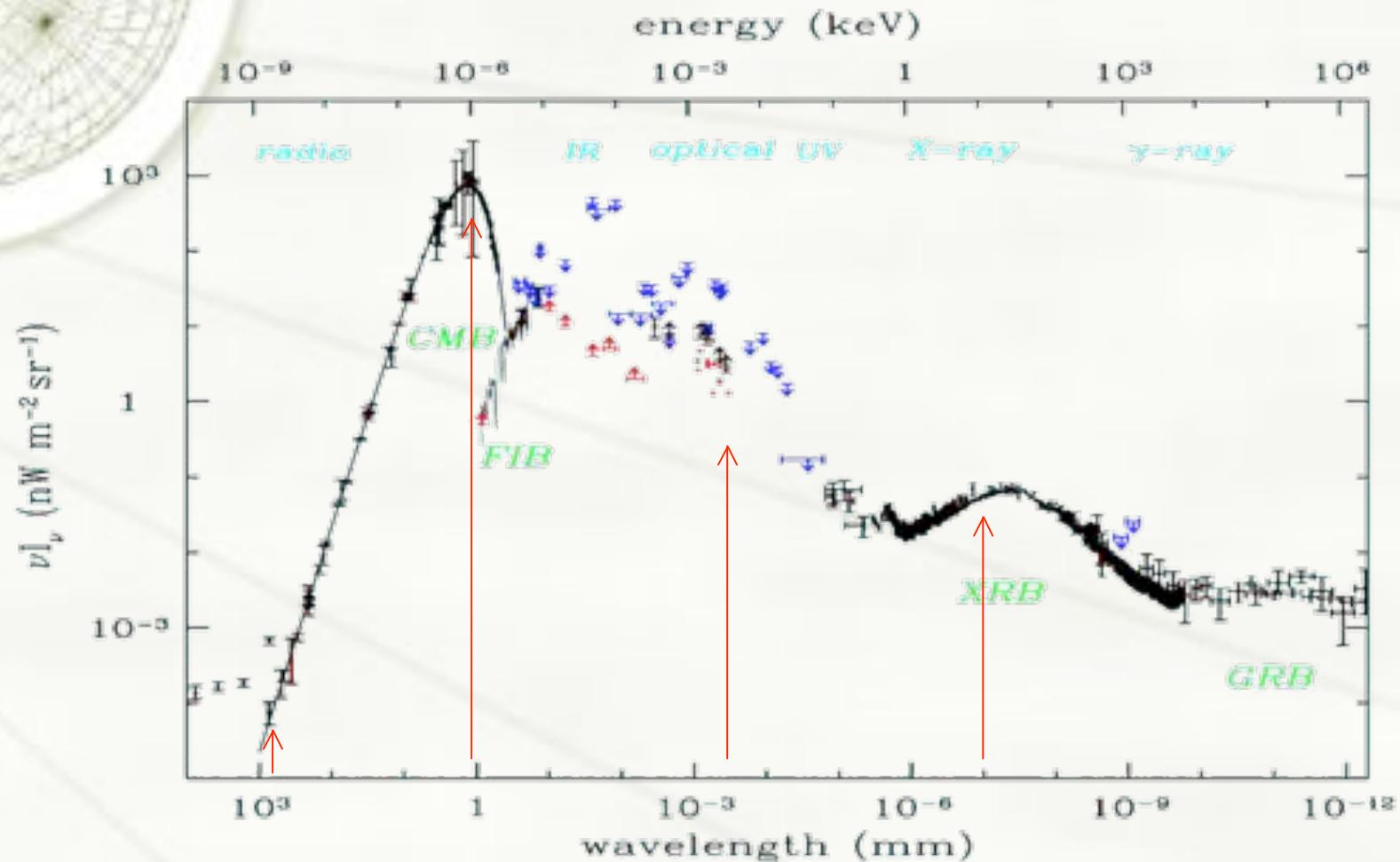




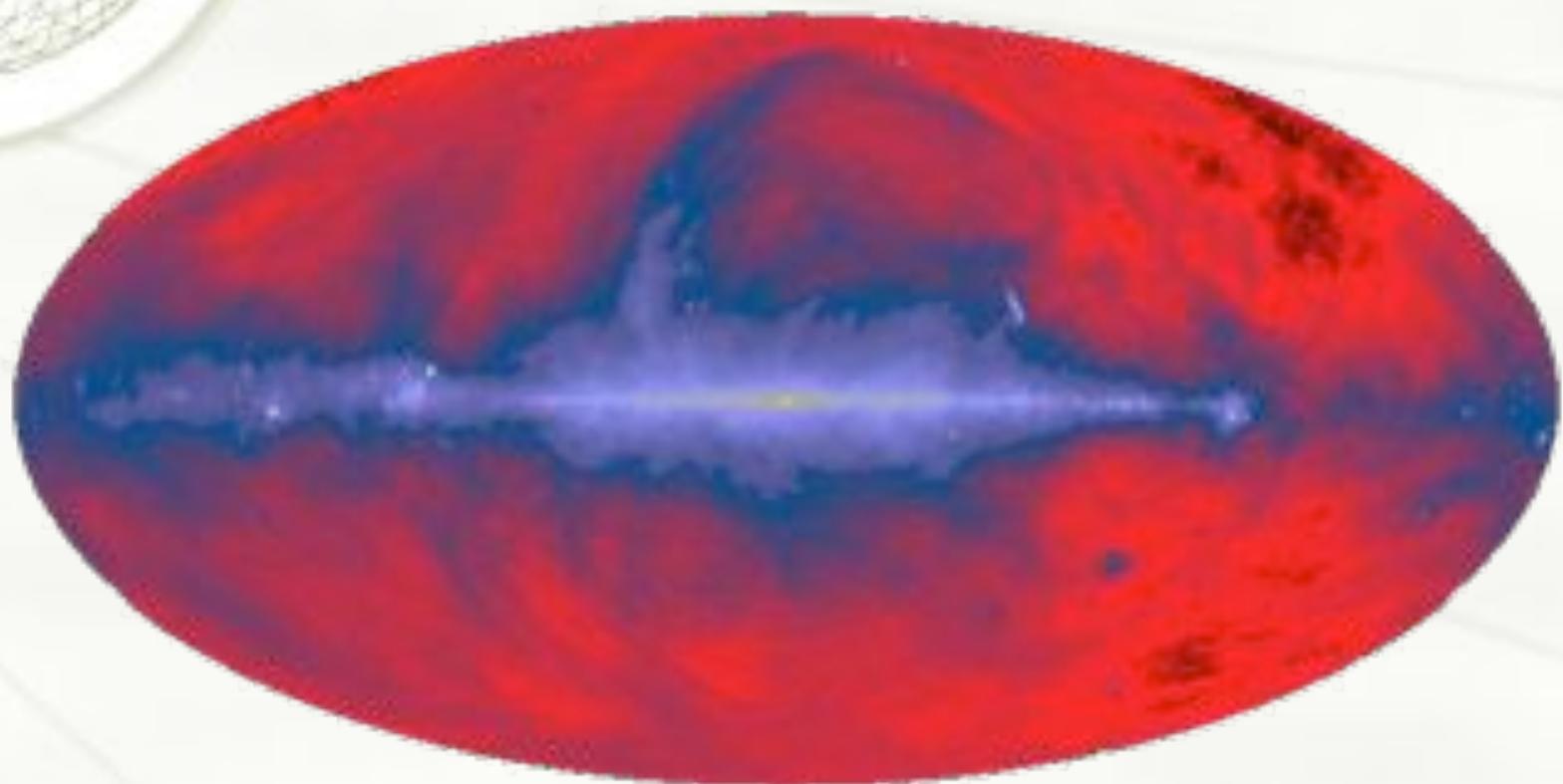
Le ciel en optique: planètes, étoiles et galaxies



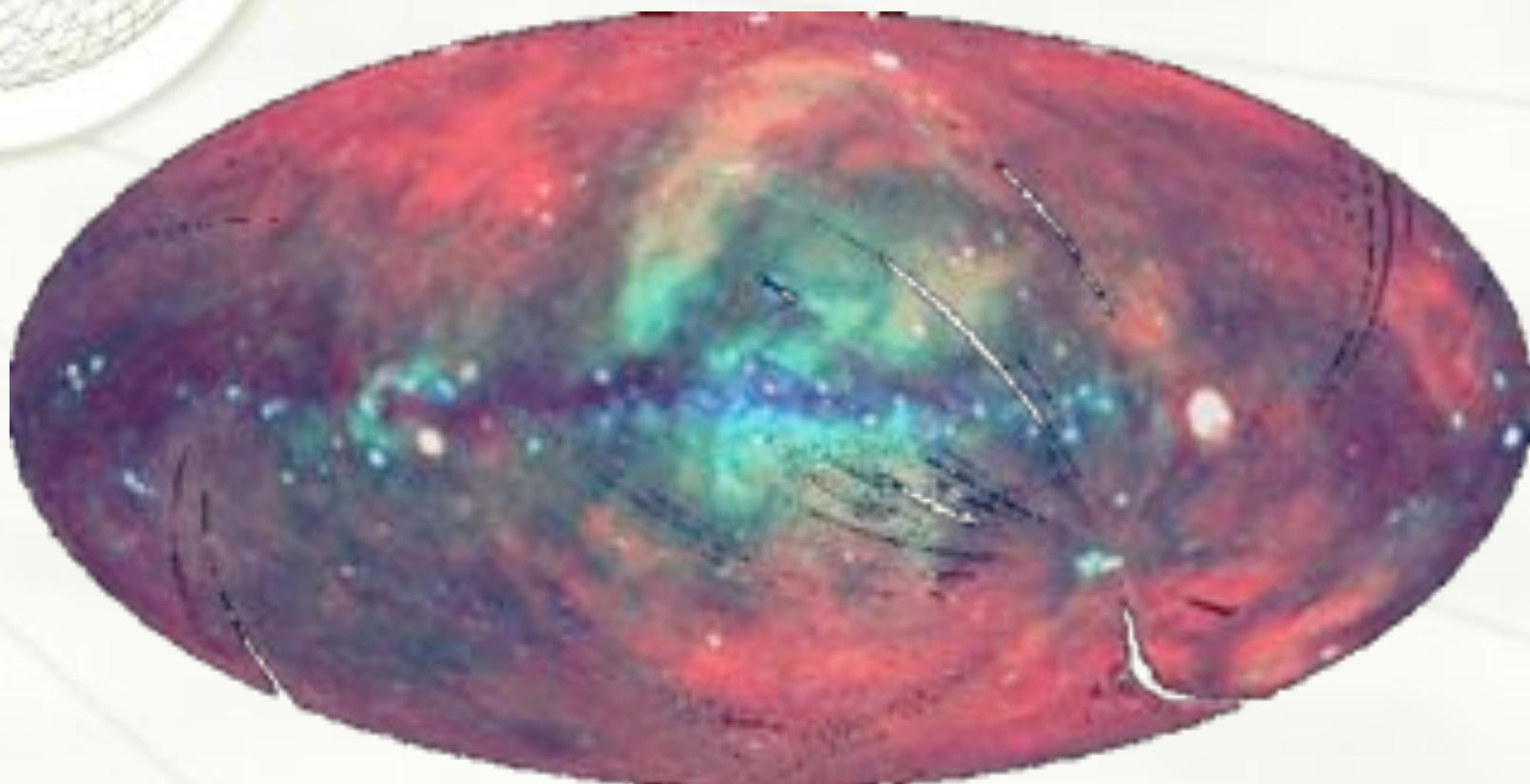
Les sources de lumière



Le ciel en radio ($\lambda = 73$ cm)



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





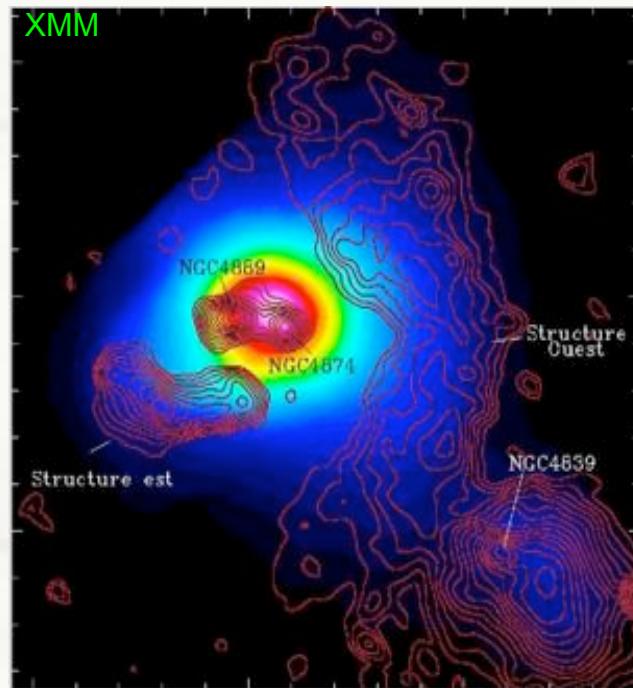
Le ciel en radio ($\lambda = 1 \text{ mm}$)

Nous vivons l'âge d'or de la cosmologie

Les données viennent de sources de plus en plus variées



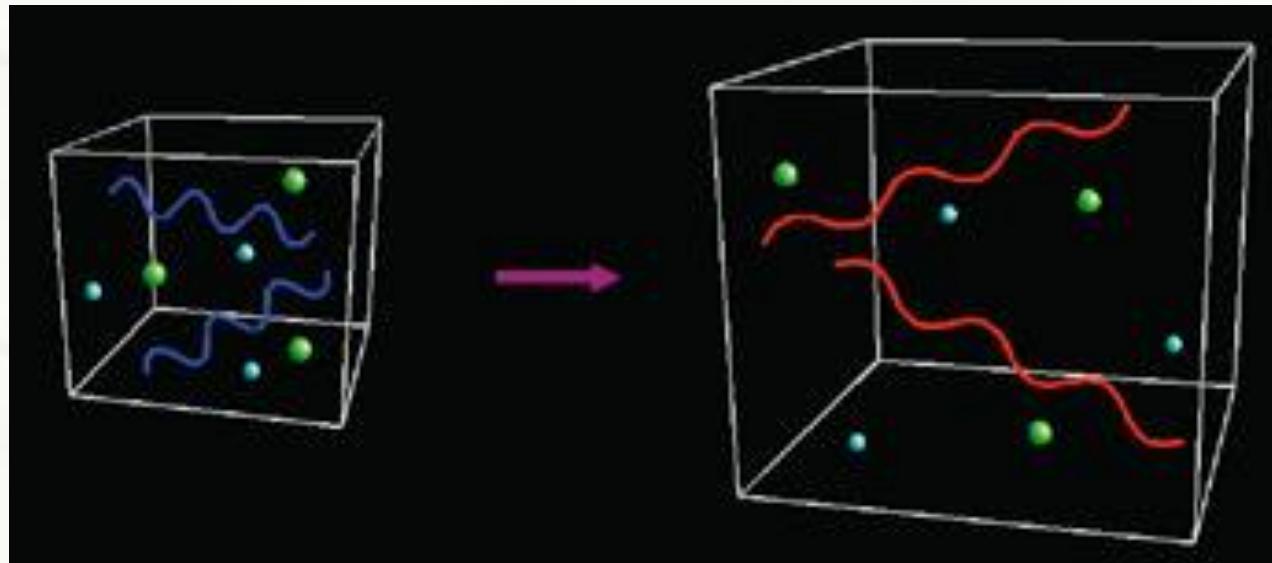
Elles sont de plus en plus précises



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

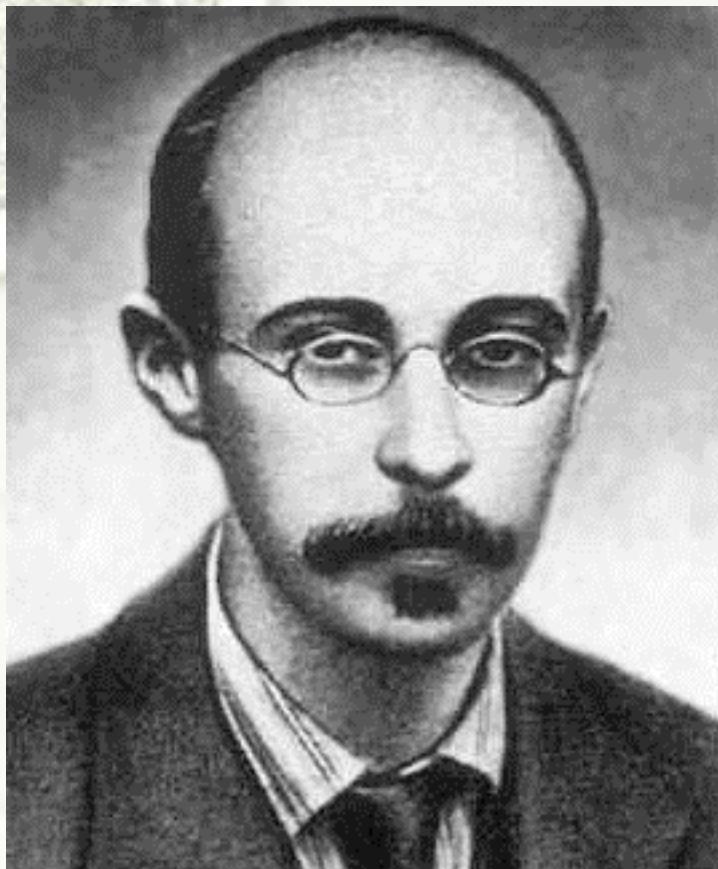


- ❖ Qu'est-ce que l'espace ?

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

*Newton
Aristote, Leibniz, Einstein*

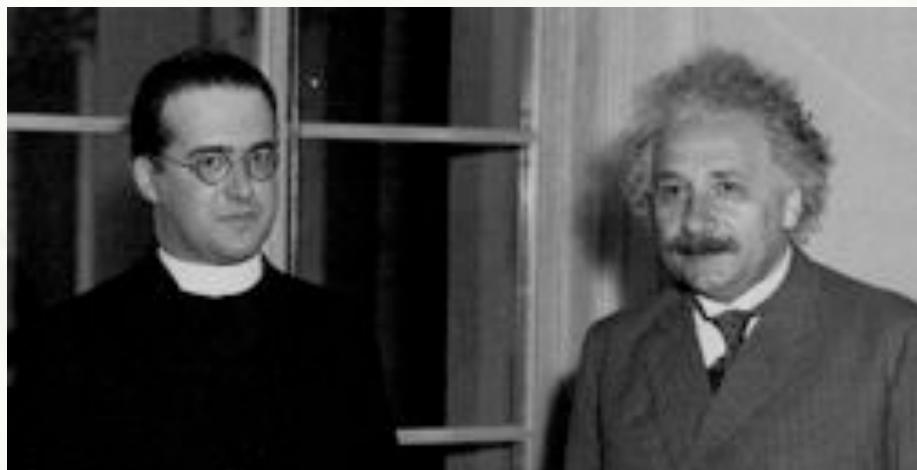
Les inventeurs du big bang: Friedmann



- ❖ 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 $z \propto$ distance
- ◆ 1927 : solutions complètes
 - ◆ courbures positive et négative, avec et sans rayonnement, avec et sans constante cosmologique, estimation $H_0 \sim 600$ km/s/Mpc
 - ◆ Einstein: « Vos calculs sont justes, mais votre intuition physique est abominable! »
- ◆ 1929 : loi de Hubble $z \propto$ distance, $H_0 \sim 540$ 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°C)
 - ❖ *Mais la température de quoi ? Des photons!*
pas des baryons, ni des neutrinos...



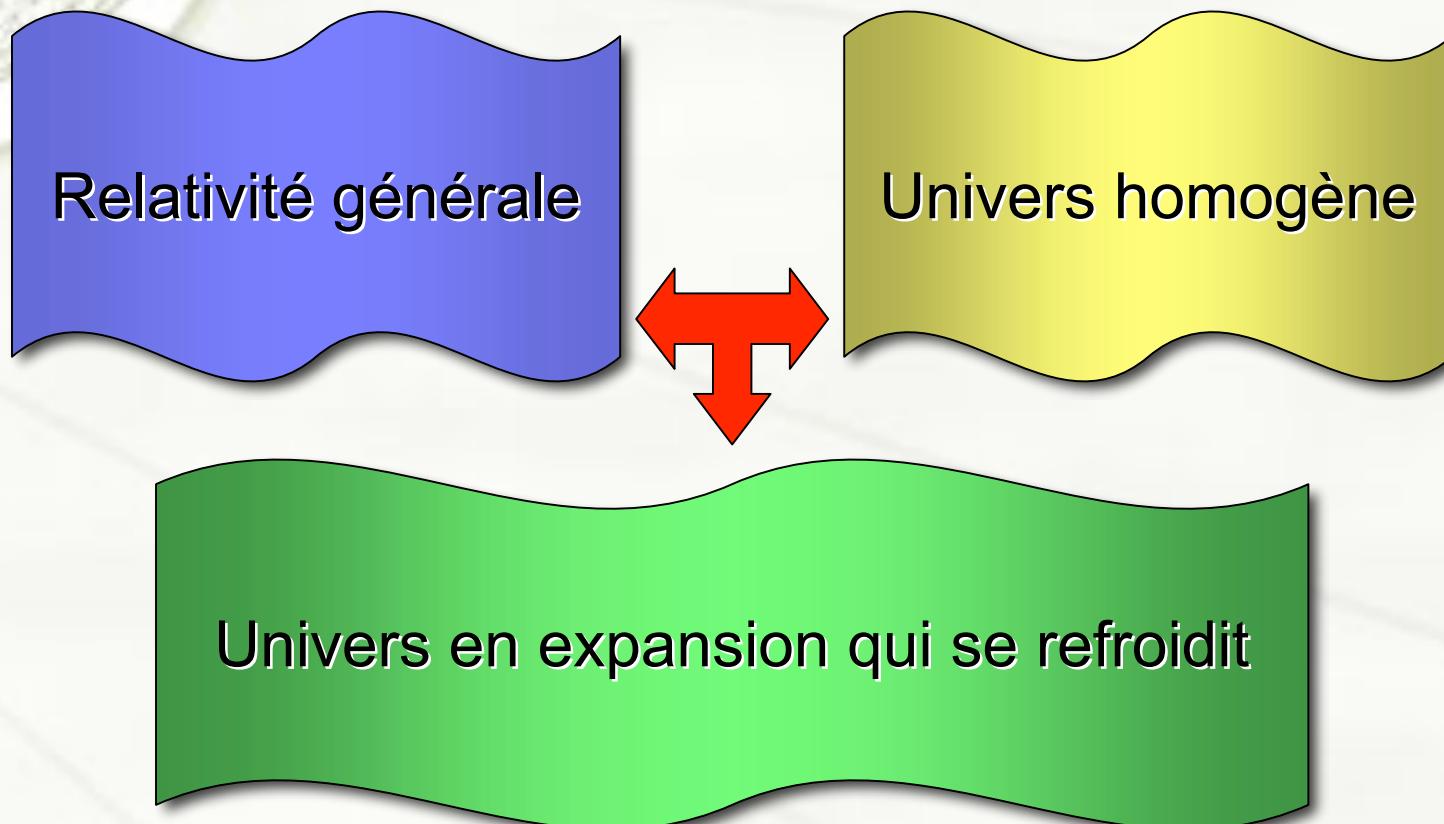
Brève histoire de l'univers: expansion et refroidissement



Méditons sur les mystères de l'univers



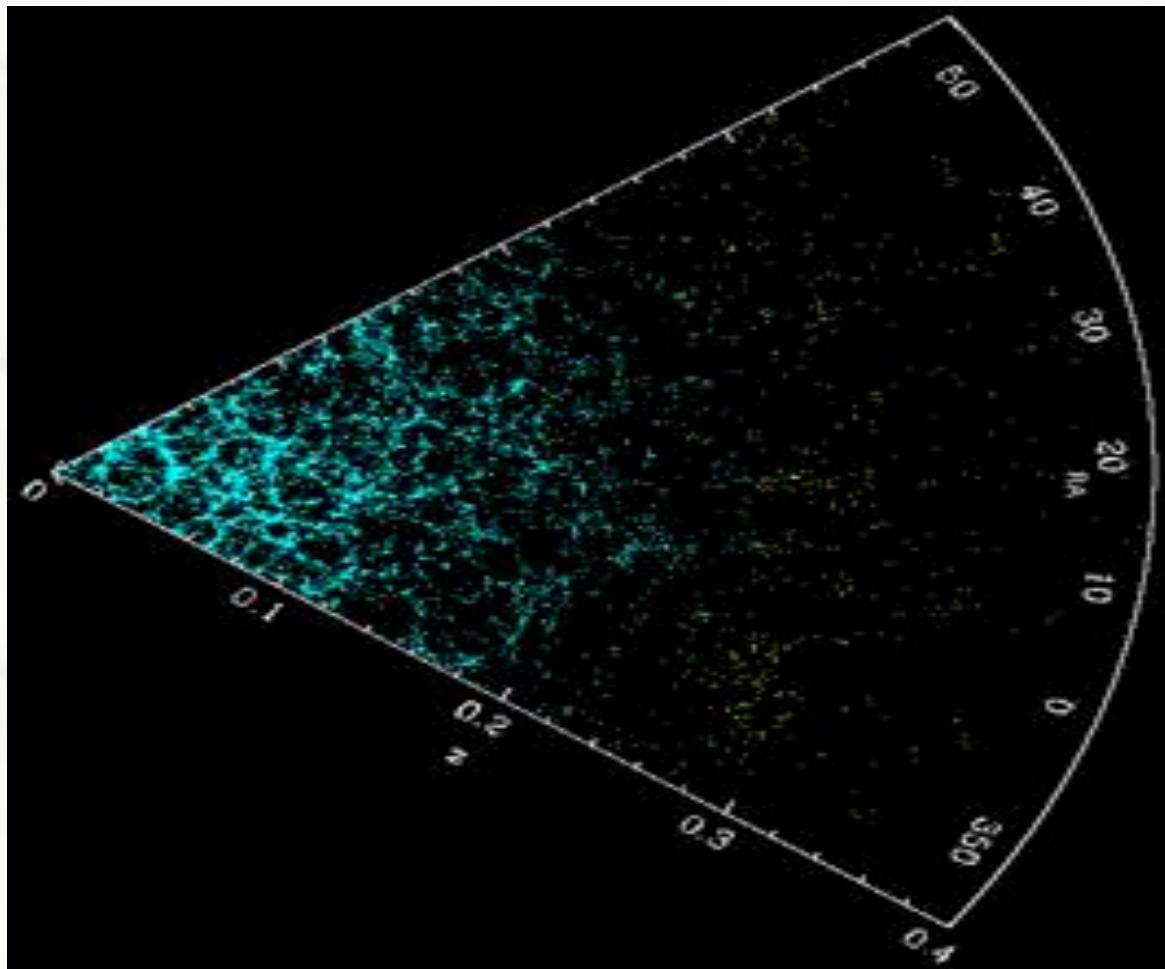
Le théoricien



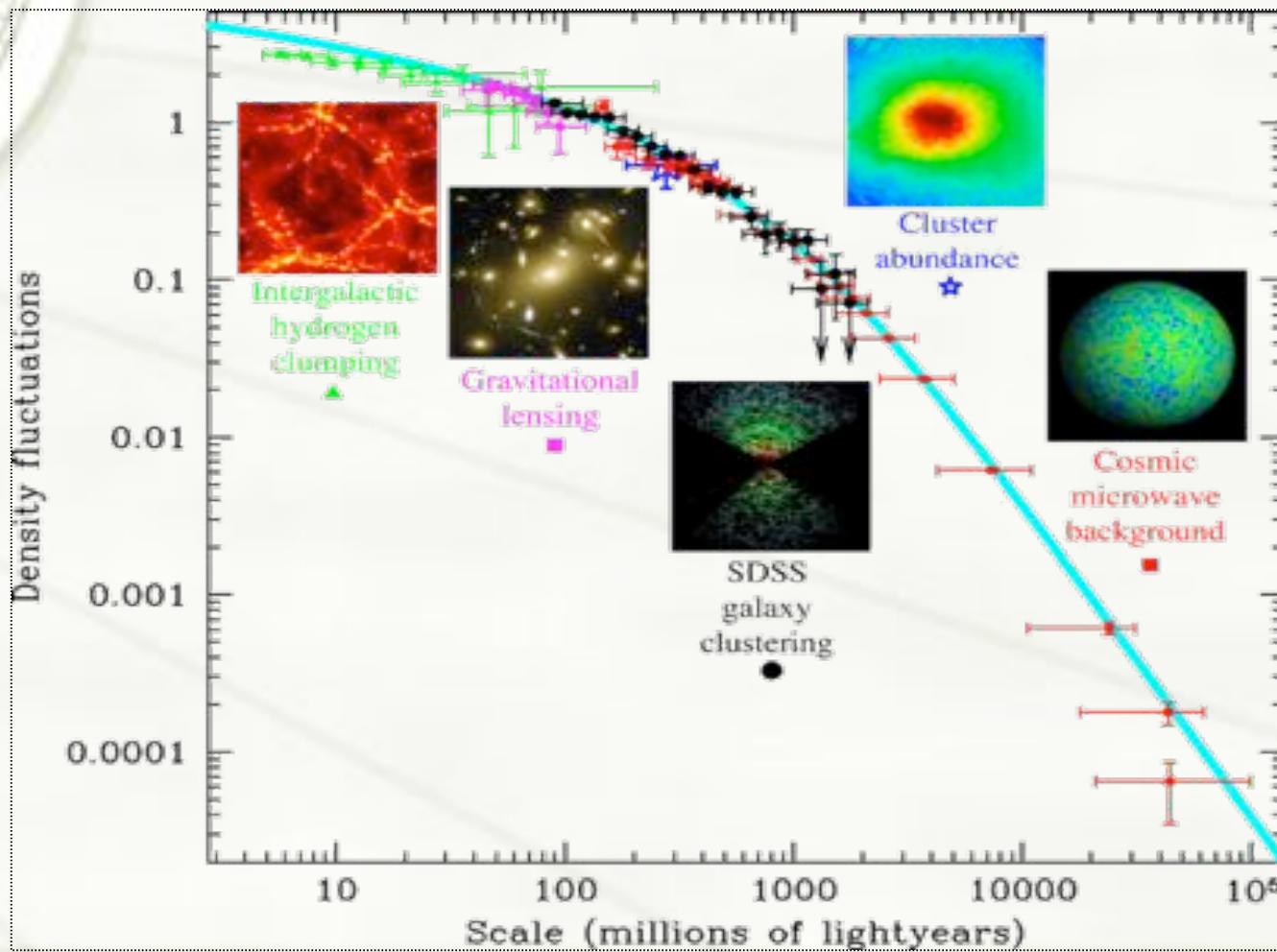
1- La relativité générale est un jeu d'enfant



2 - Un univers (presque) homogène



Amplitude des variations de densité

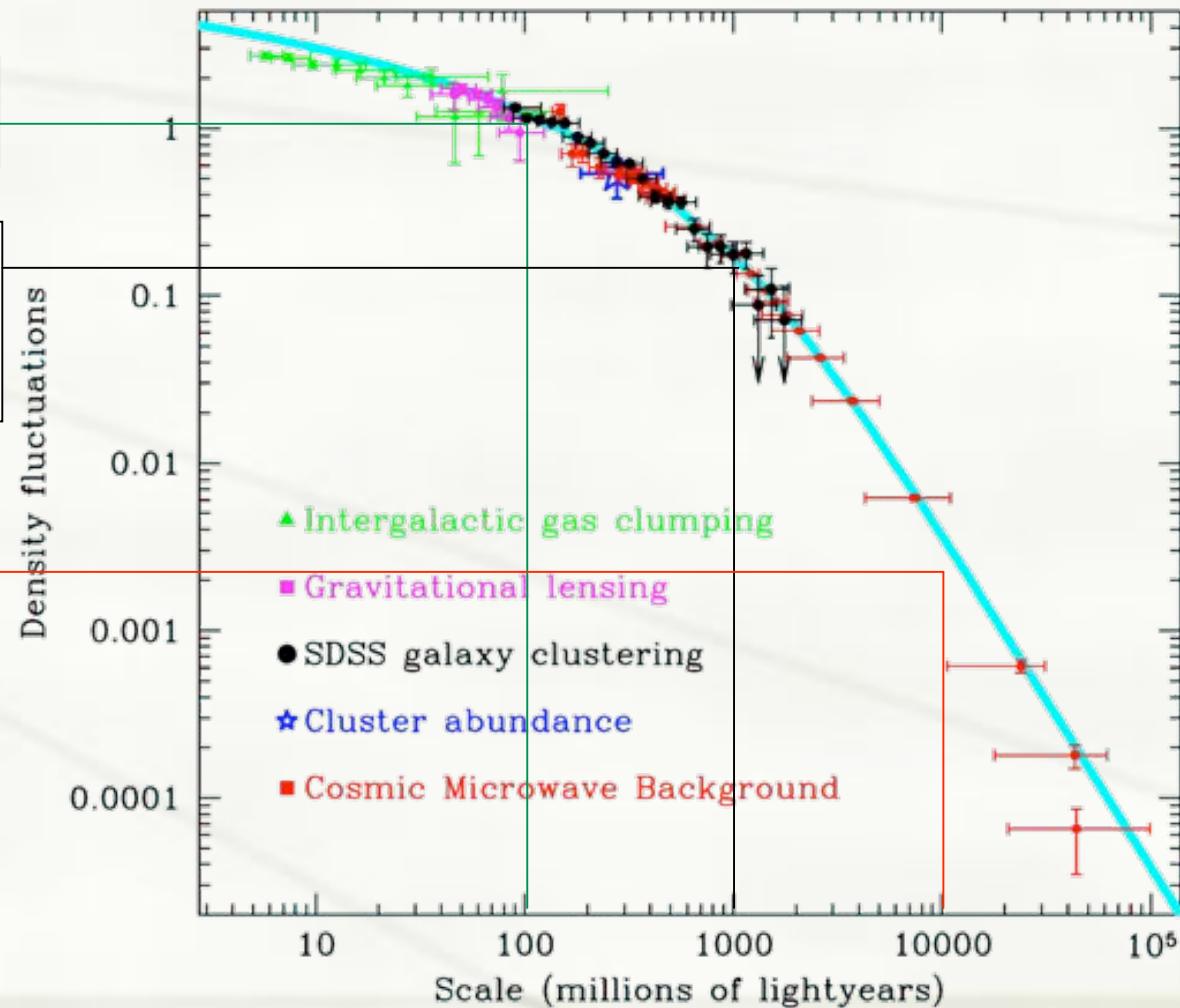


Un univers (presque) homogène

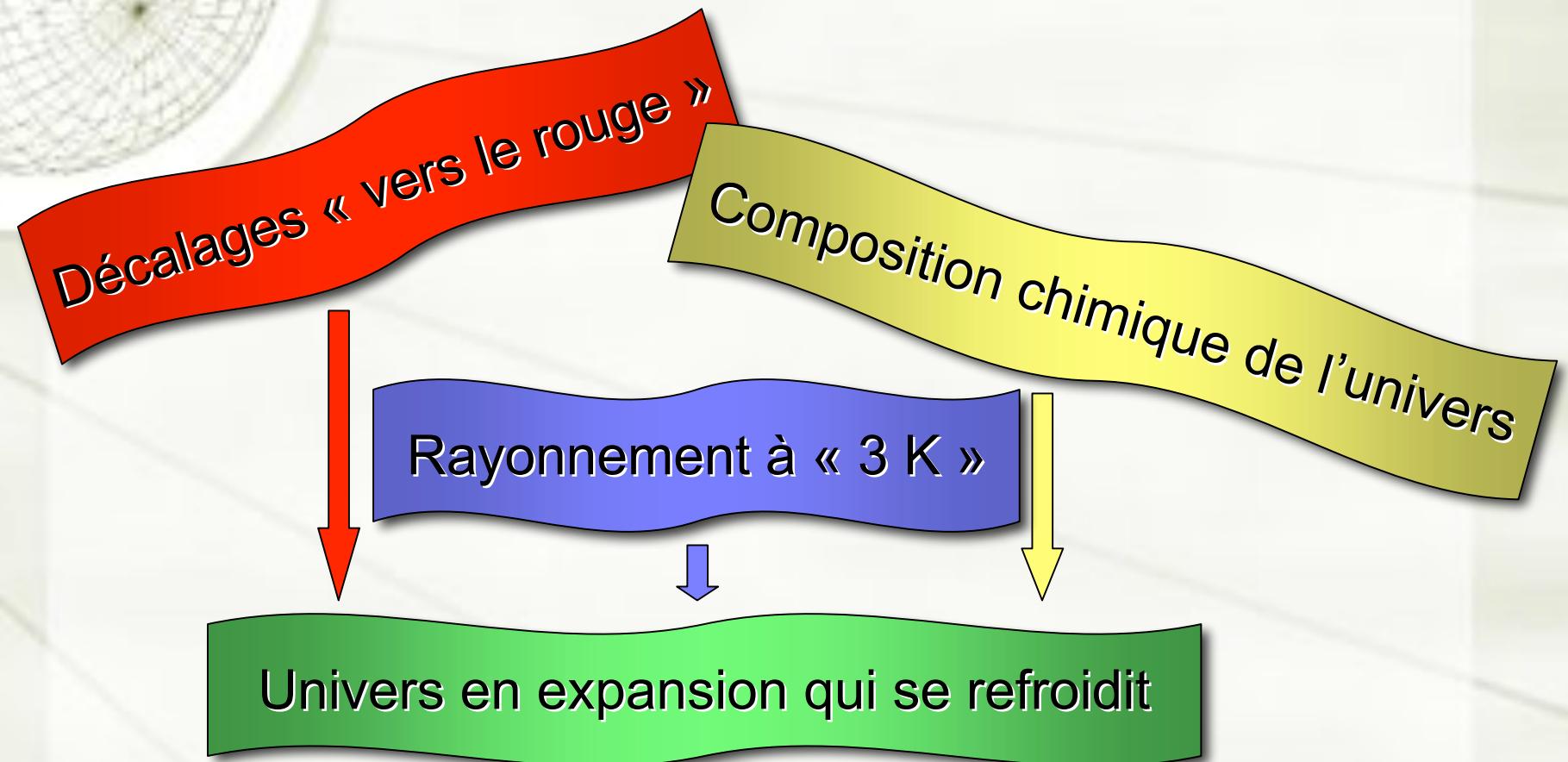
Localement, inhomogénéité forte : galaxies et amas

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

A très grande échelle, homogénéité quasi parfaite

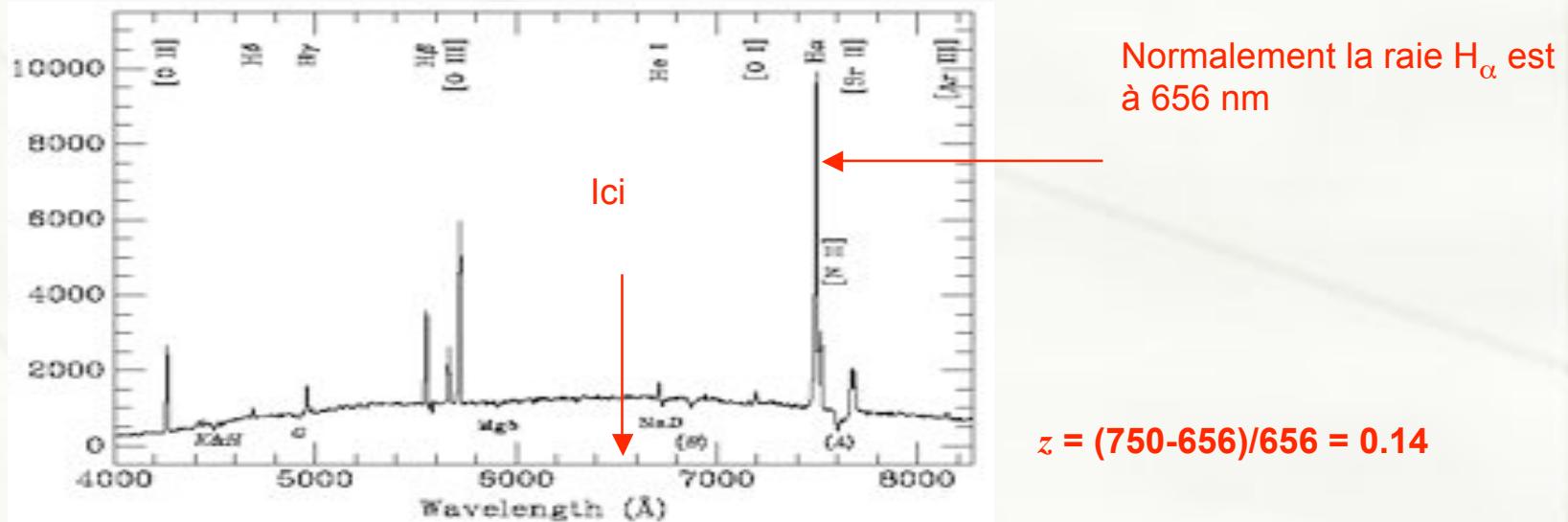


L'observateur



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

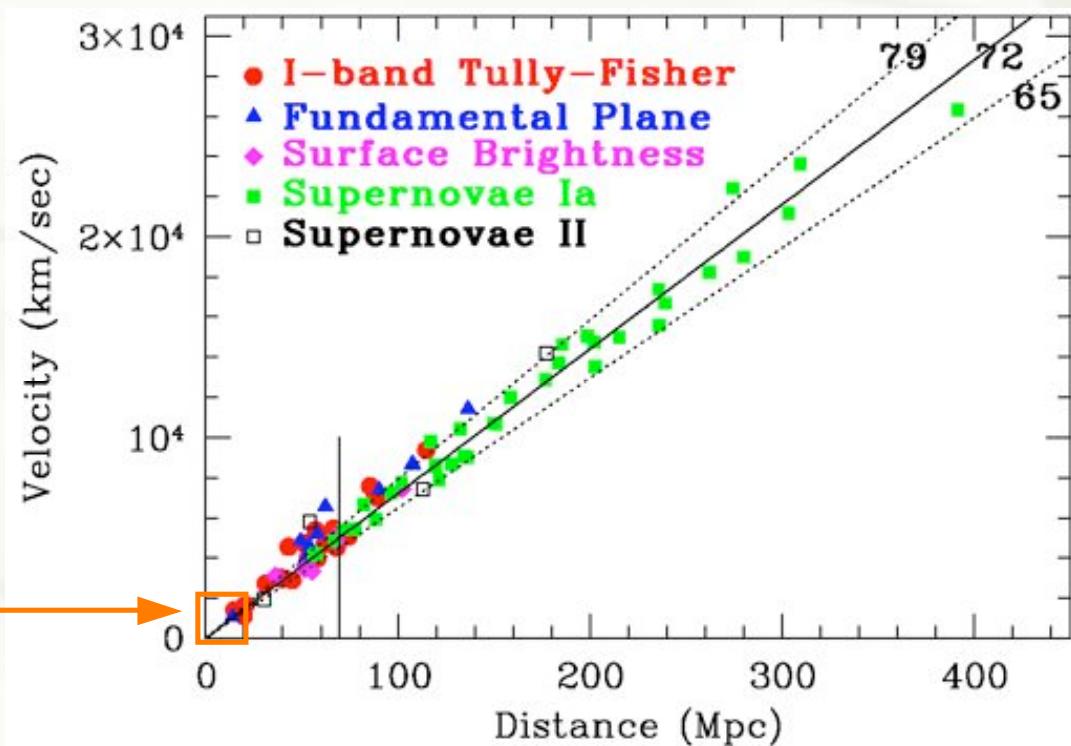


Loi de Hubble

- Le décalage z des raies spectrales vers les grandes longueurs d'ondes est **proportionnel à la distance D** de la source
- $z = D H_0 / c$

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

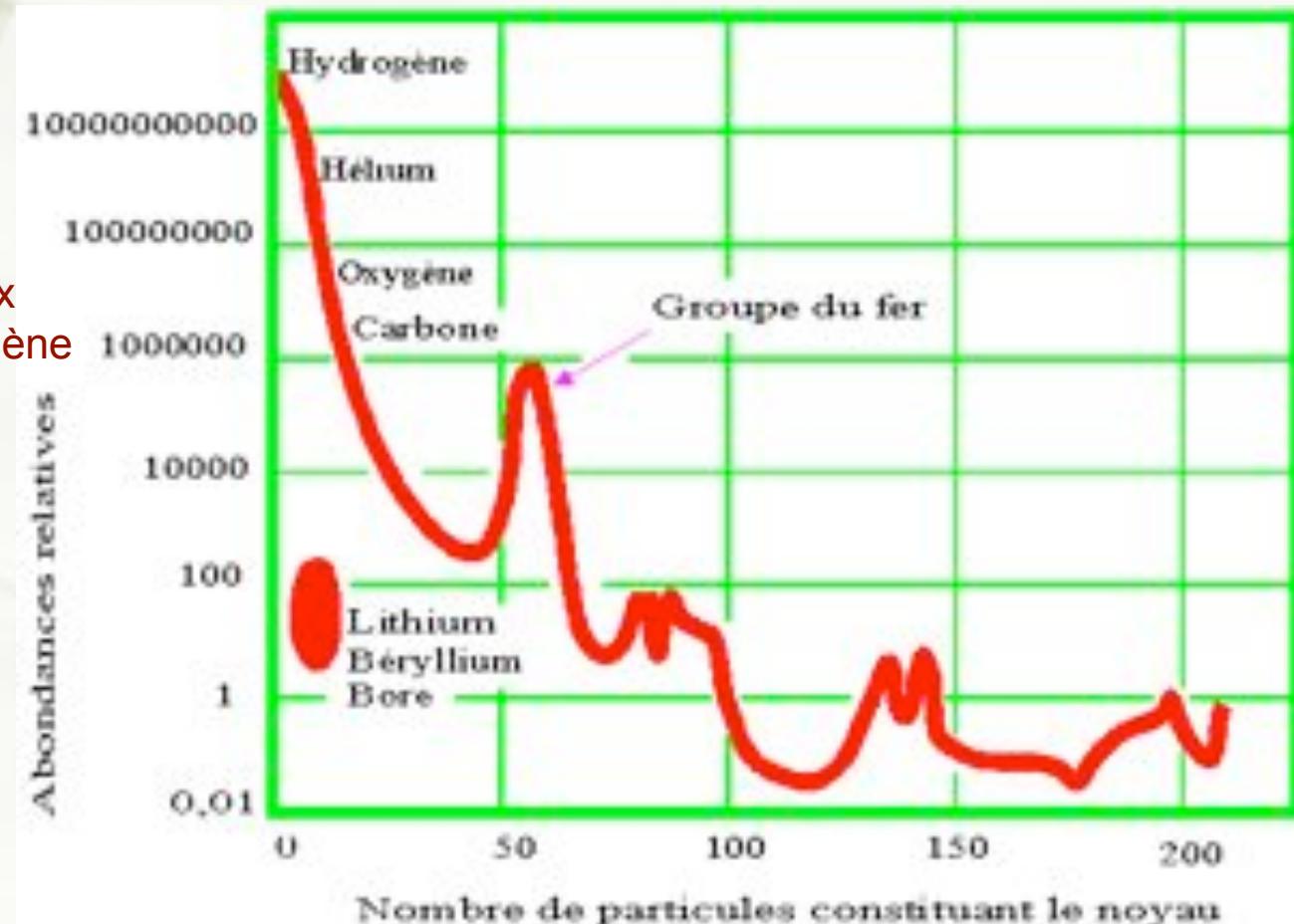
Loi de Hubble en 1929



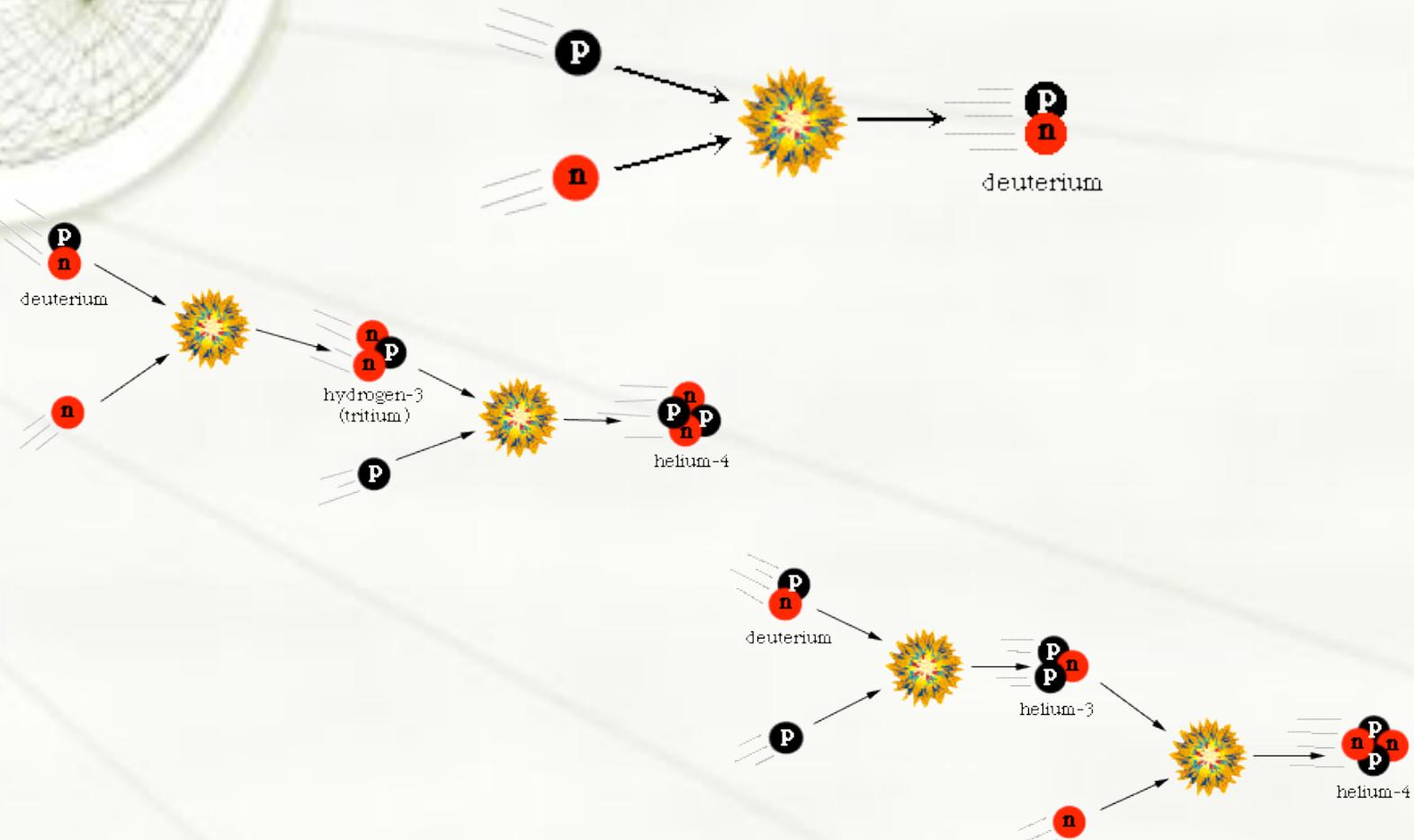
2 - Composition chimique de l'univers

90% des noyaux
sont de l'hydrogène

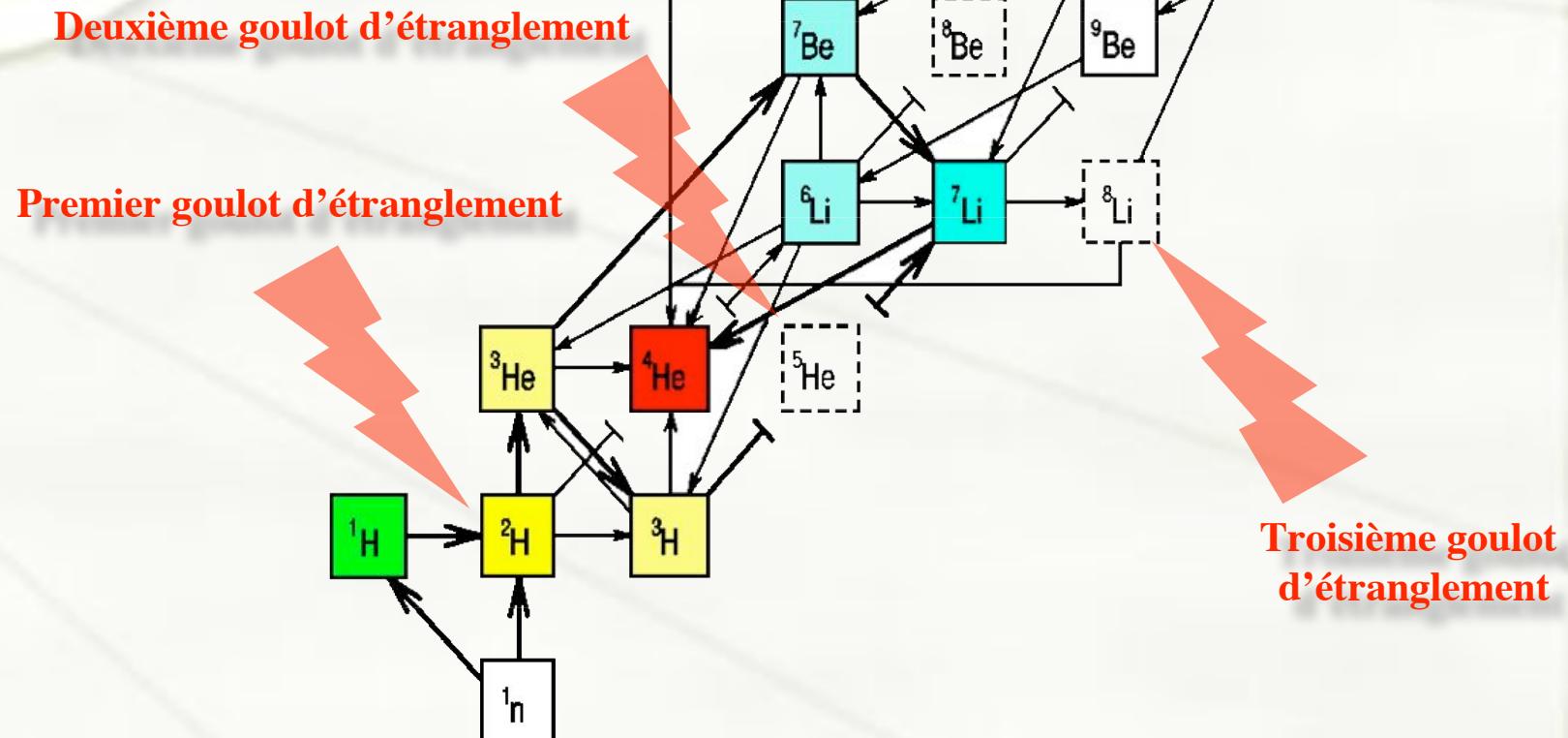
9% des noyaux
sont de l'hélium



Réactions de fusion



Le réseau nucléaire



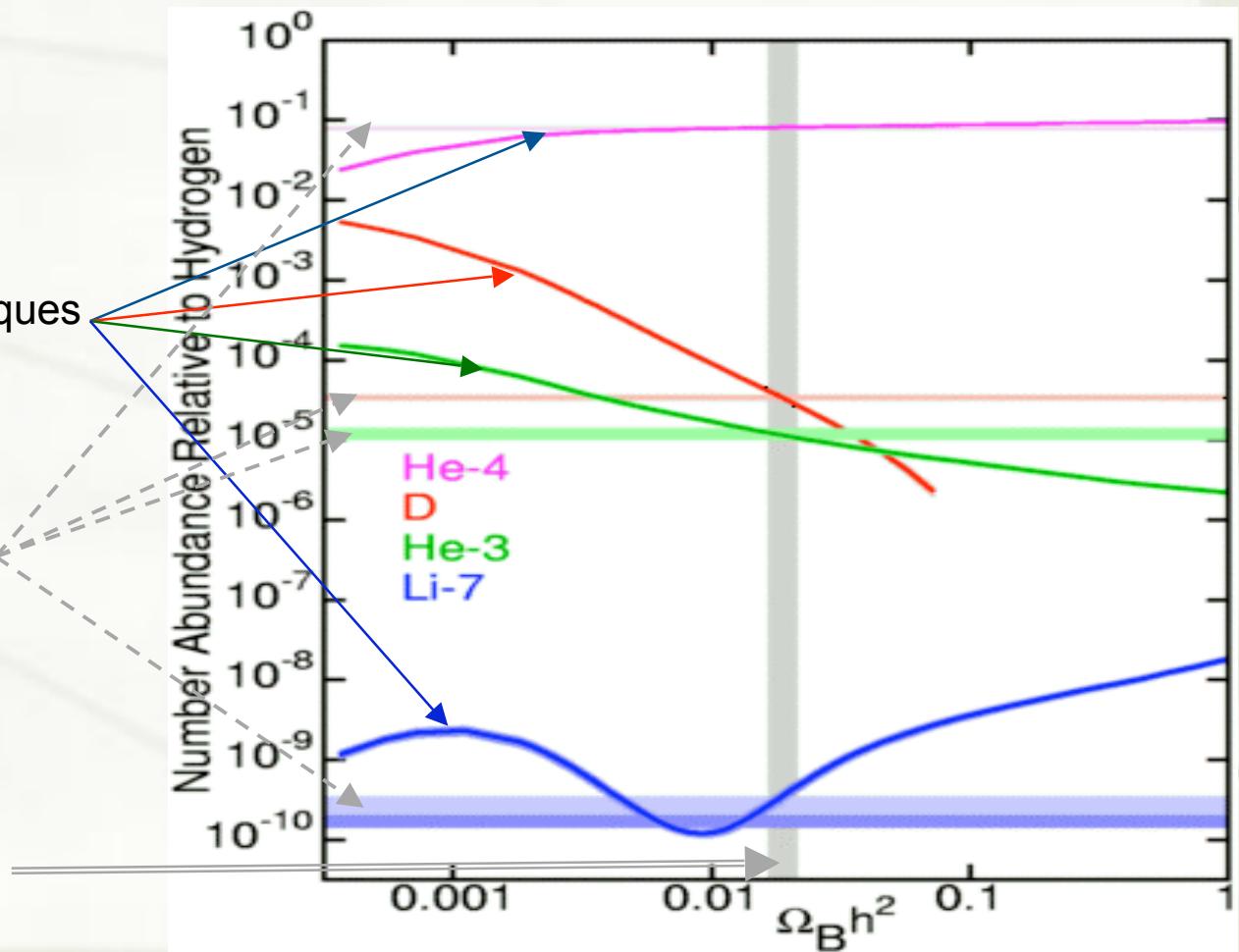
Théorie et observations

◆ Accord global entre

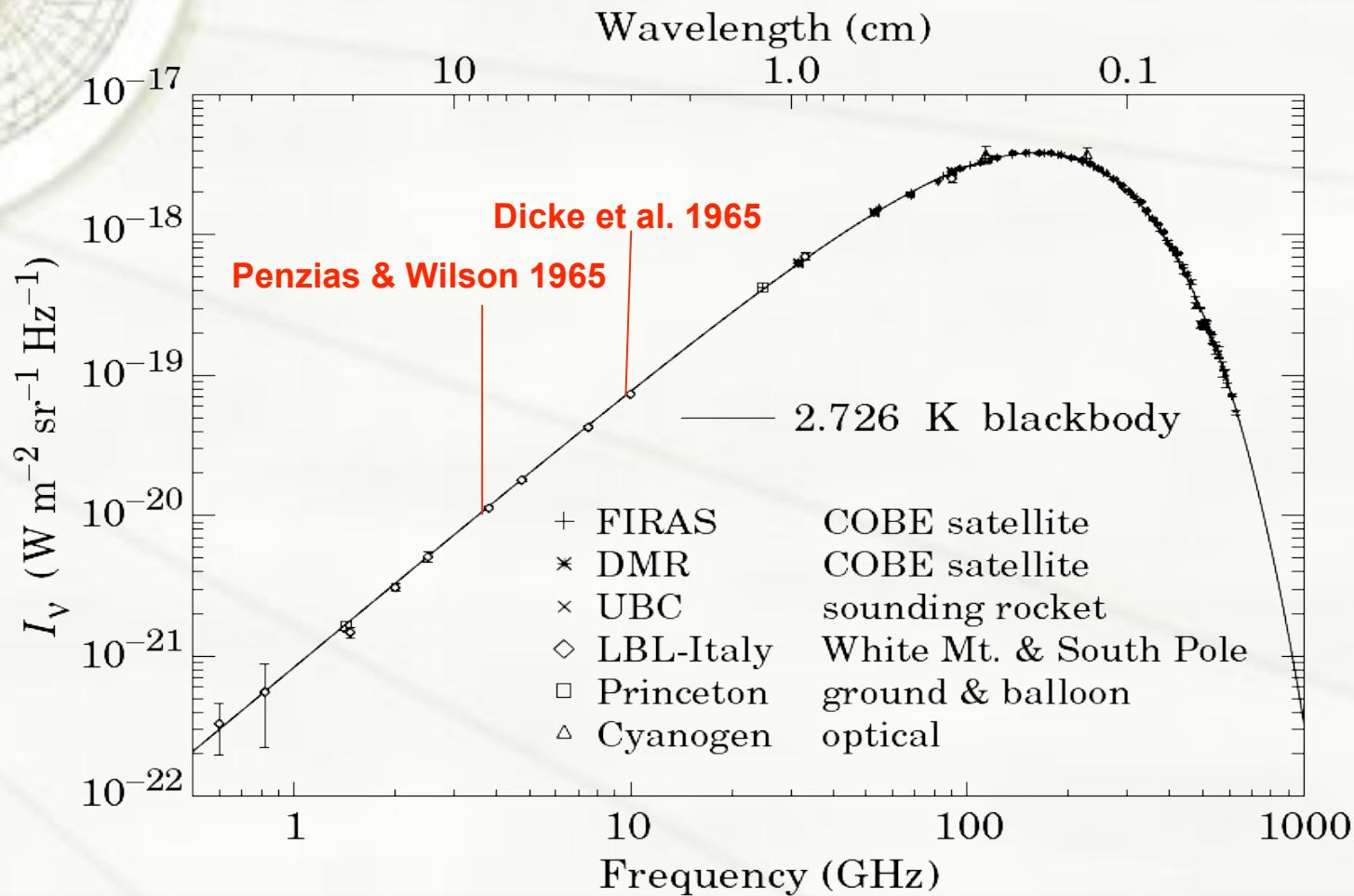
les prédictions théoriques

et les observations

pour un intervalle
réduit de la densité
de baryons Ω_B

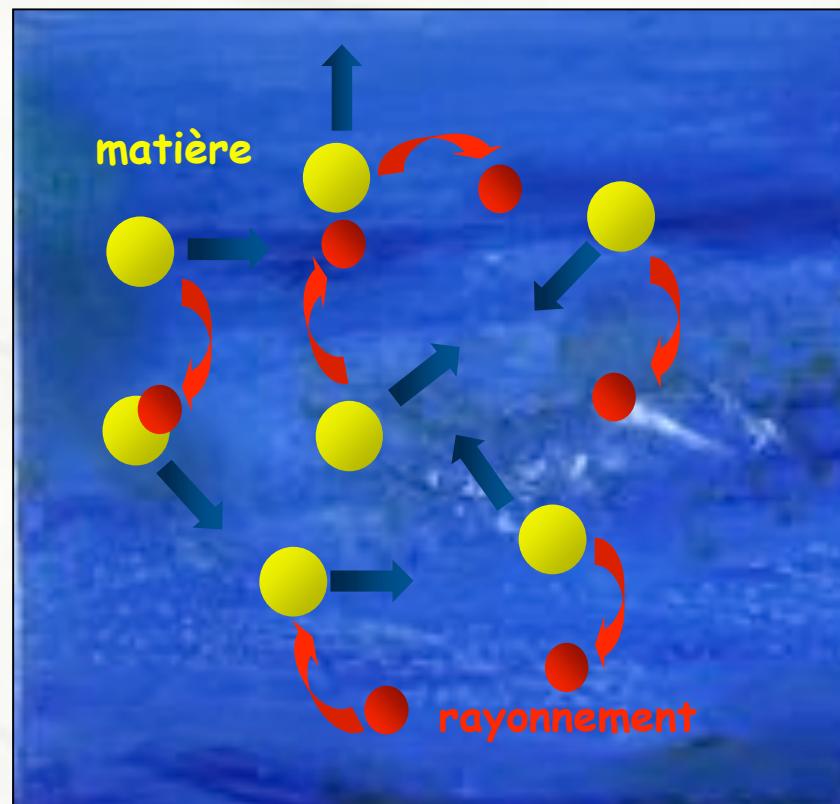


3 -Le fond de rayonnement cosmologique

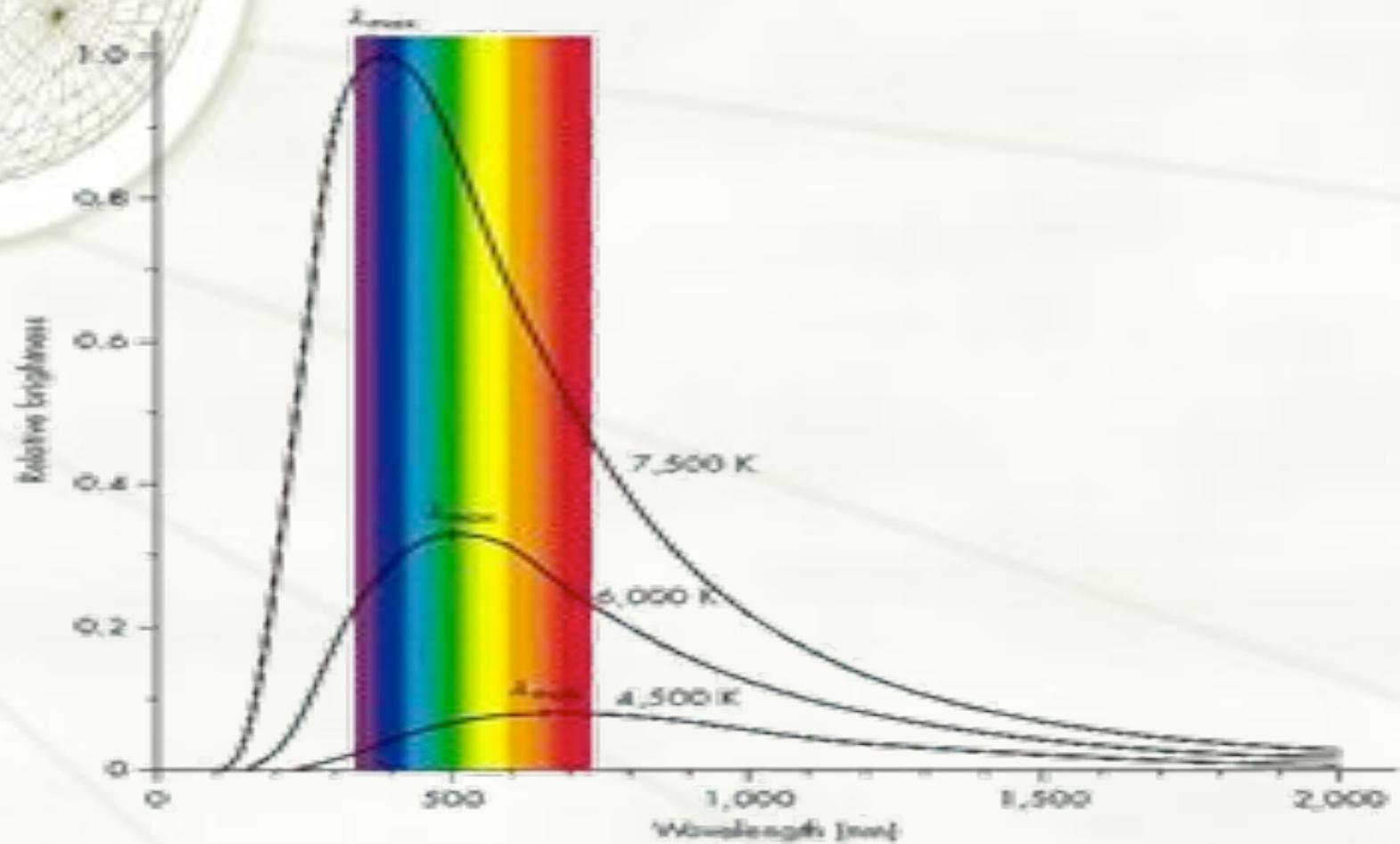


Equilibre matière-rayonnement

- ◆ 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 »

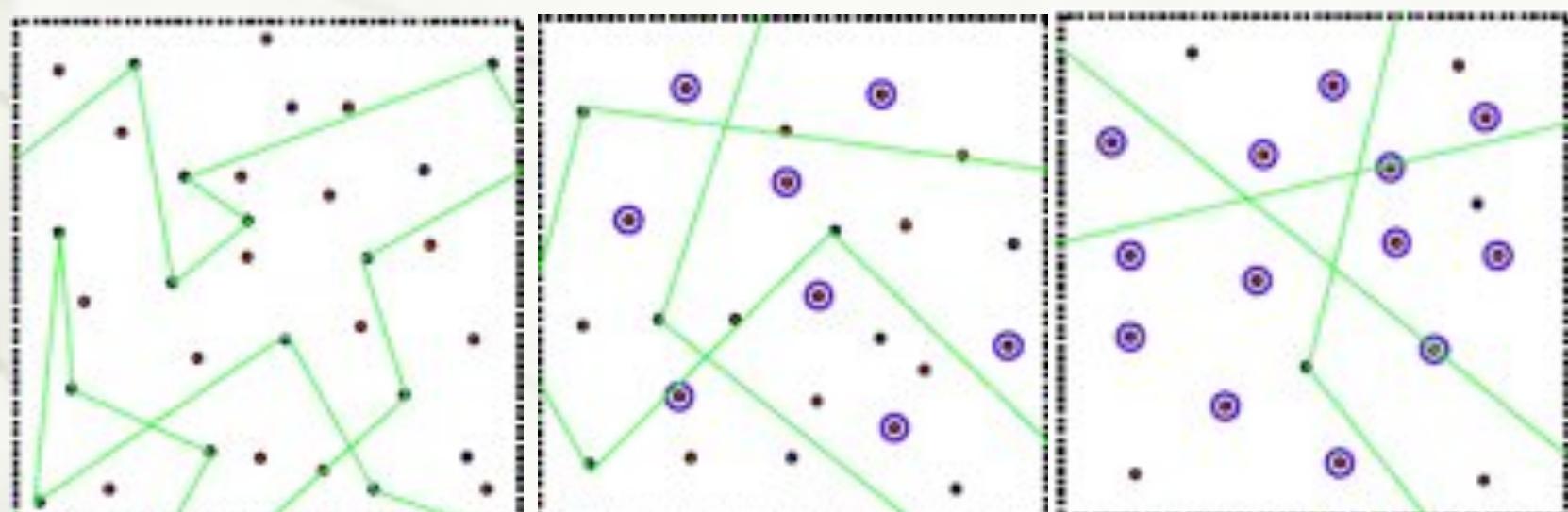


Distribution de corps noir



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

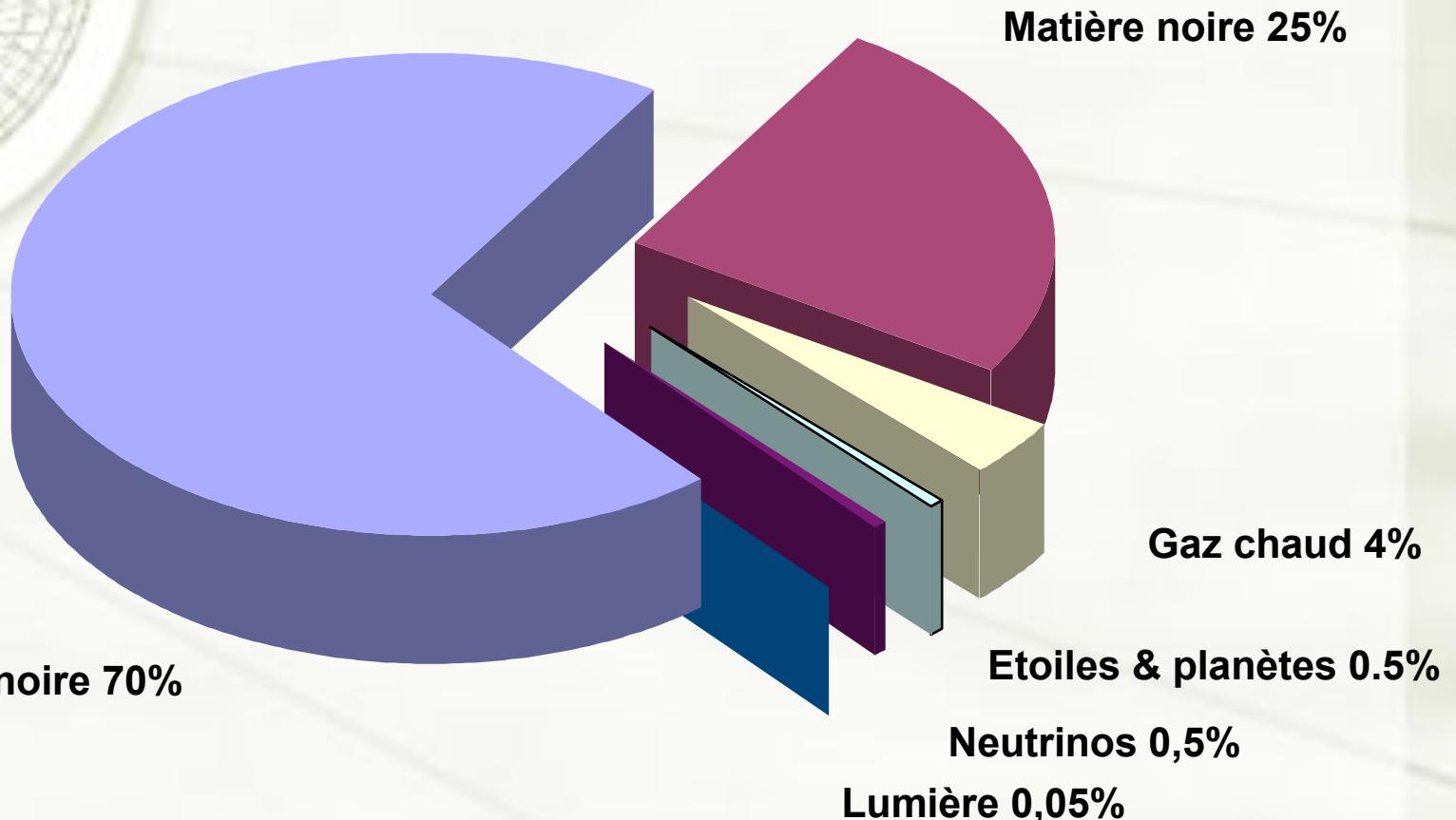
Bref, si on sait (à peu près) **comment** les choses se sont passées, on ne sait pas du tout **pourquoi** elles se sont passées comme ça!



Méditons sur les mystères de l'univers



Etonnant inventaire...



95% d'inconnu, est-ce raisonnable?

❖ Oui !

❖ Non !



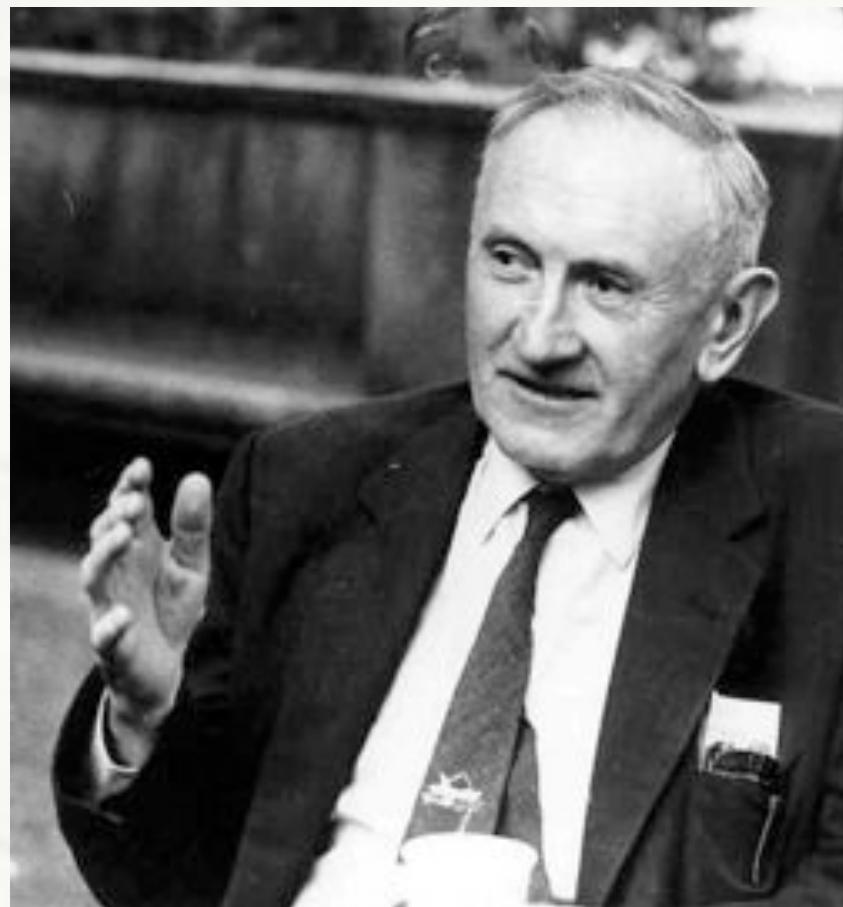
**Les cosmologistes sont
parfois dans l'erreur,
mais jamais dans le
doute**



Le côté sombre de l'univers

La matière noire, un vieux problème...

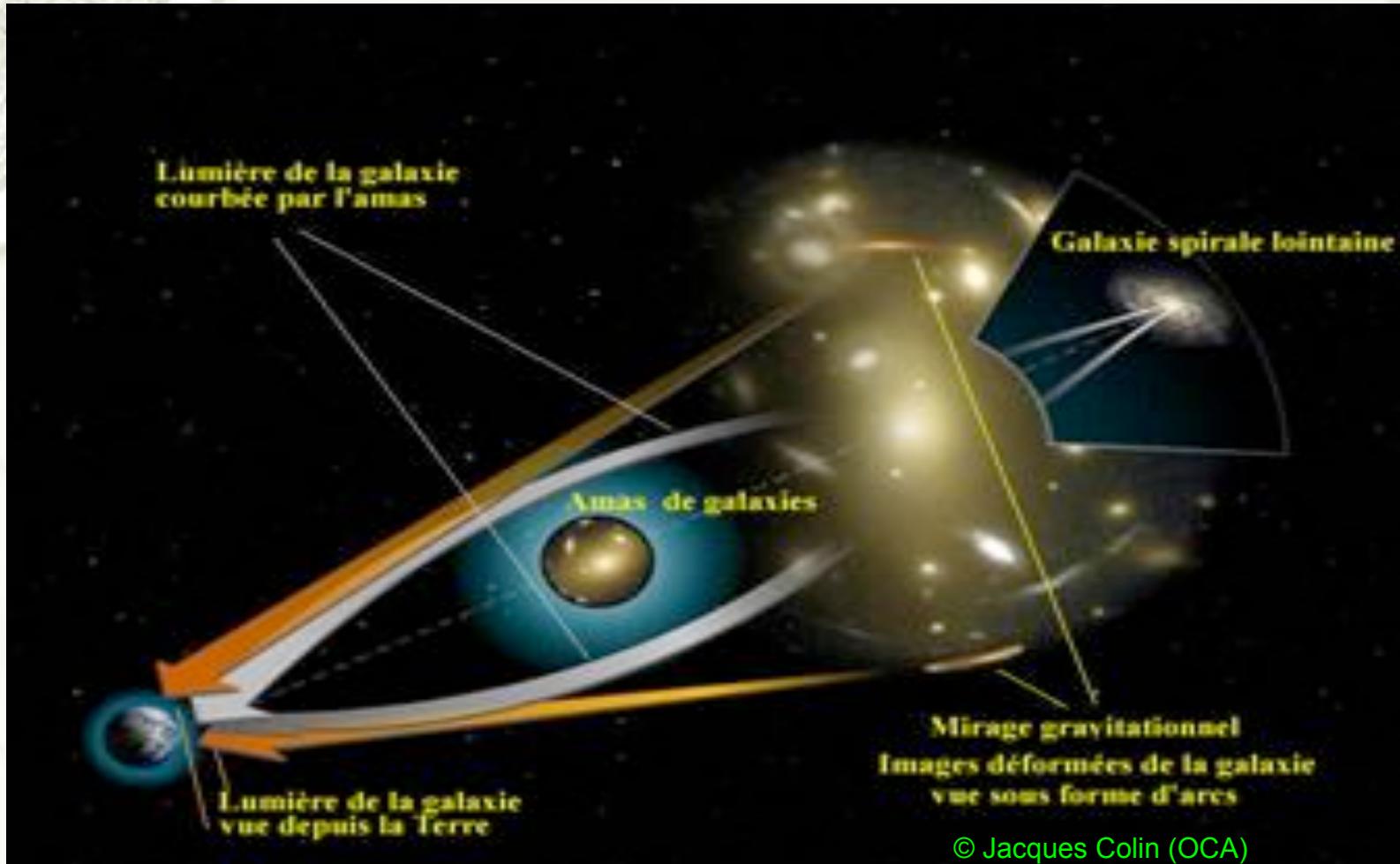
- ◆ 1933 : Fritz Zwicky
- ◆ 1970 : Vera Rubin



Lentilles gravitationnelles



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?
- ❖ Neutrinos?
- ❖ Un nouveau type de particule élémentaire stable?
 - ❖ très légère et très abondante?
 - ❖ très lourde et très rare?

Machos

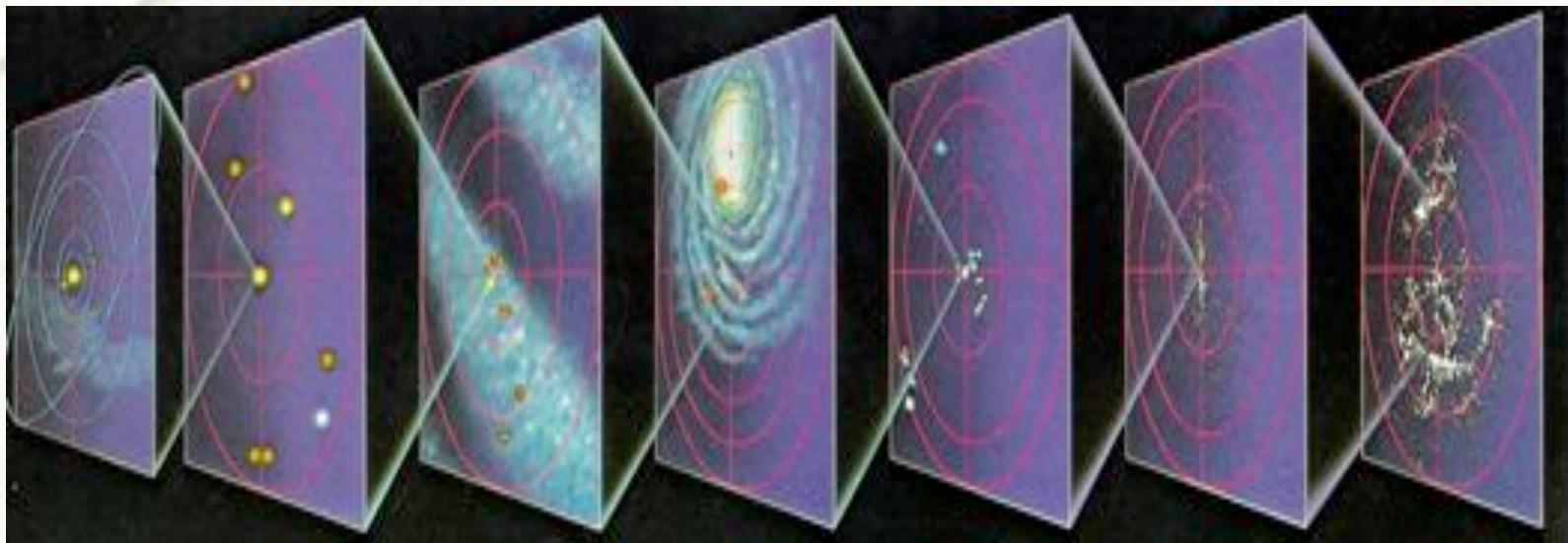
Axions

Mauviettes (*wimps*)



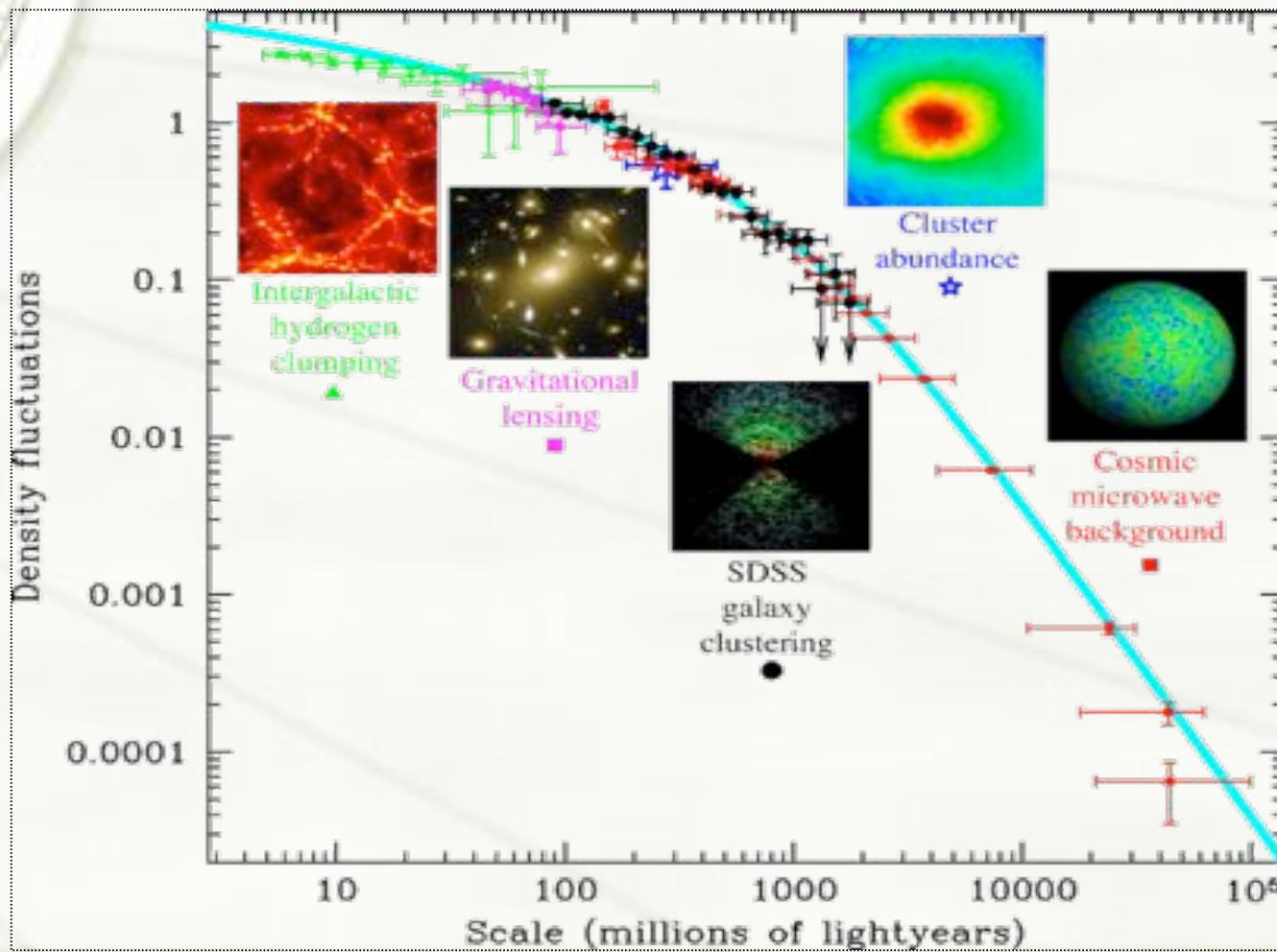
Formation des « structures »

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



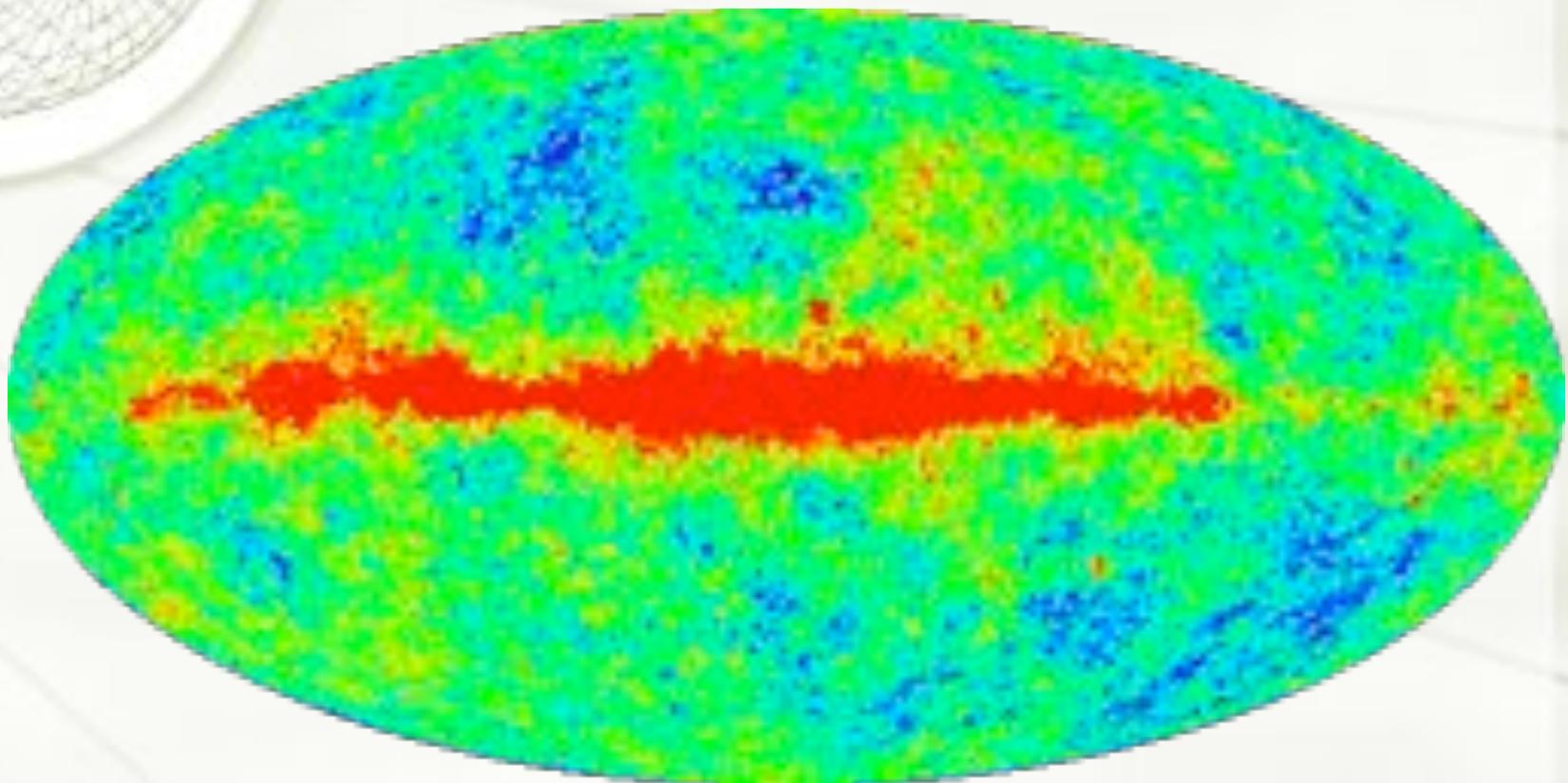
mais il est parfois étendu aux amas d'étoiles et aux étoiles, dont la formation est « facile » à comprendre, quand celles des galaxies l'est

Ampleur des variations de densité



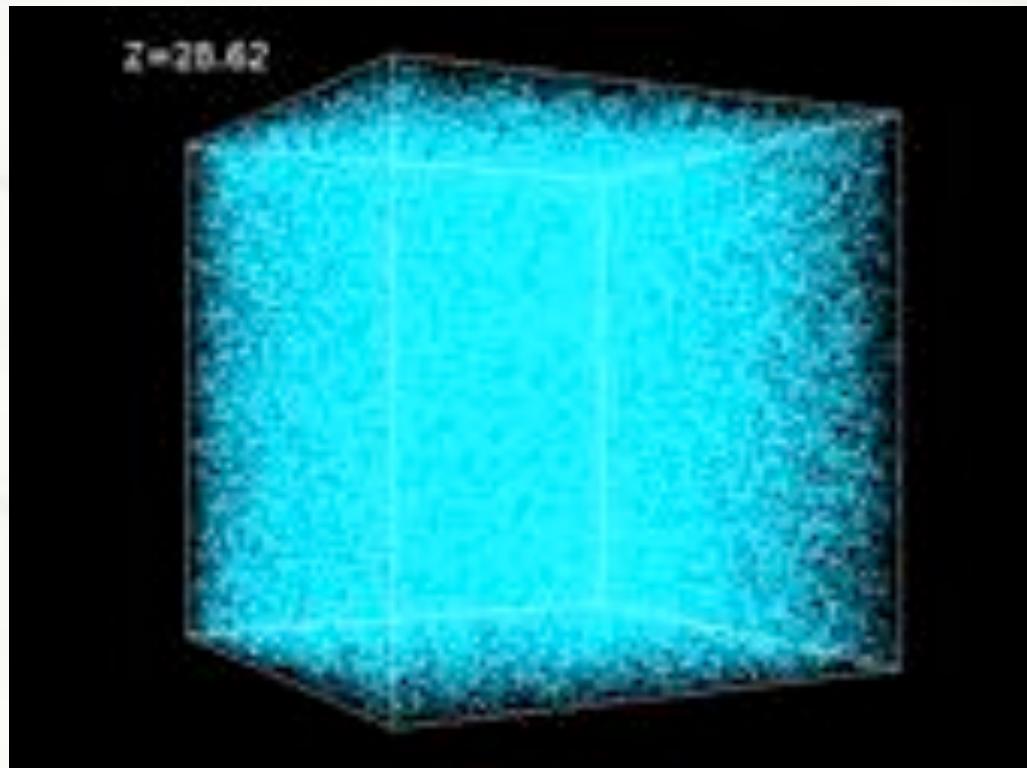
Le fond de rayonnement cosmologique

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
 - ◆ ...



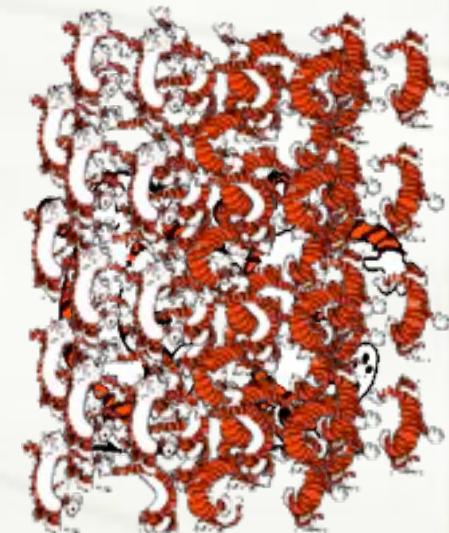
L'espace est une scène de théâtre



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 !