

# Penser l'univers

*Le Big Bang face aux observations*

Jean-Philippe Uzan

Institut d'Astrophysique de Paris

Laboratoire de Physique Théorique, Orsay

# Plan

---

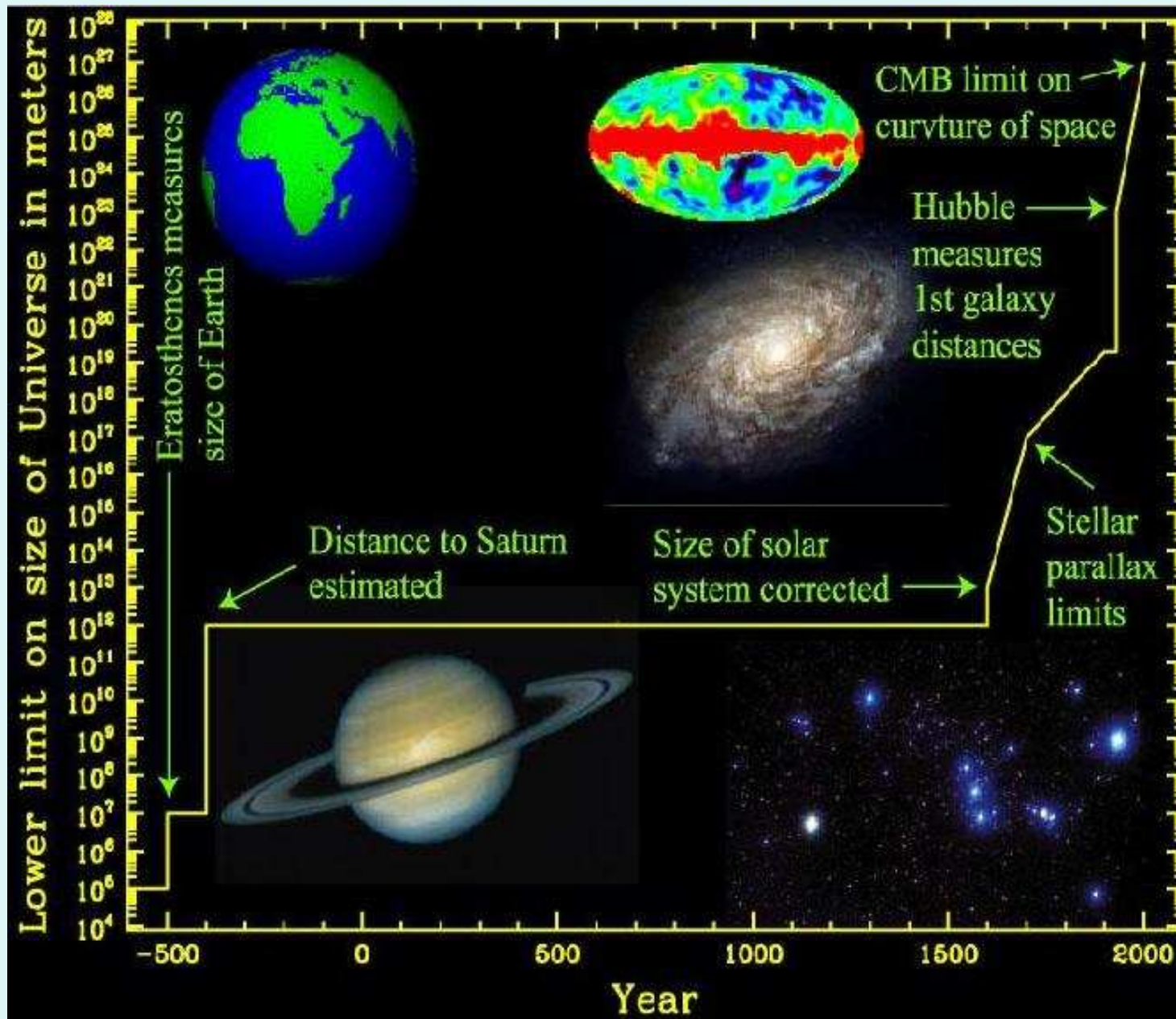
---

- Introduction : Penser l'univers  
(de l'antiquité à nos jours)
- Le modèle du Big Bang
- Penser le Bang
- Le Big Bang face aux observations
- Conclusion : un modèle satisfaisant ?

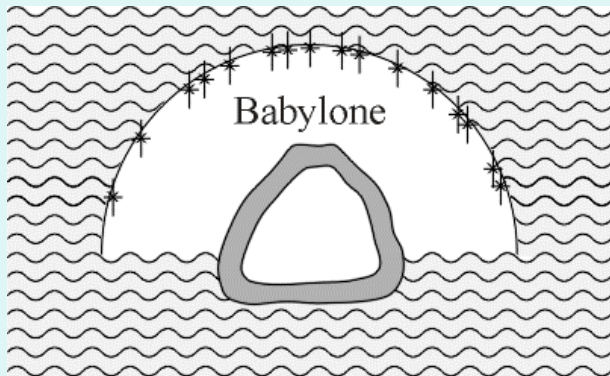
# Penser l'univers

*Une petite introduction historique  
par un non-historien...*

# Quelle taille a l'univers ?



# Jusqu'au VIe siècle avant notre ère



**Monde** = vaste boîte dont le fond est la Terre, la voûte le ciel et le bord un fleuve.

**Description** naive mais permettant de faire de bonnes **prédictions**:

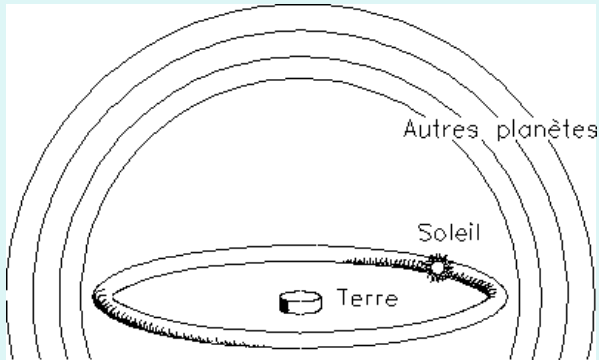
- ⌘ mouvement des corps célestes
- ⌘ durée de l'année à un millièmè près (-1700, Babylone).

**Instruments** :

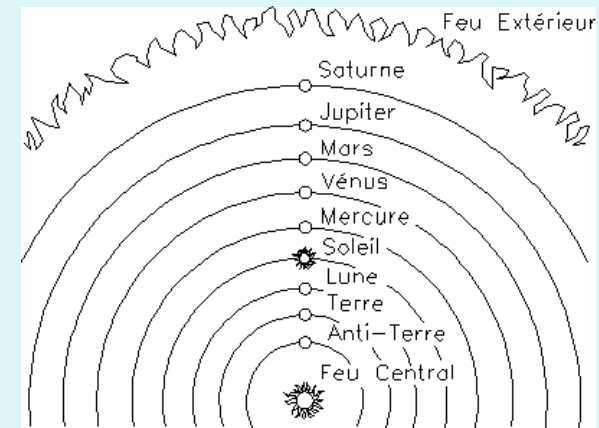
- ⌘ gnomon (cadran solaire)
- ⌘ clepsydre

# -VI à -III : que d'idées...!

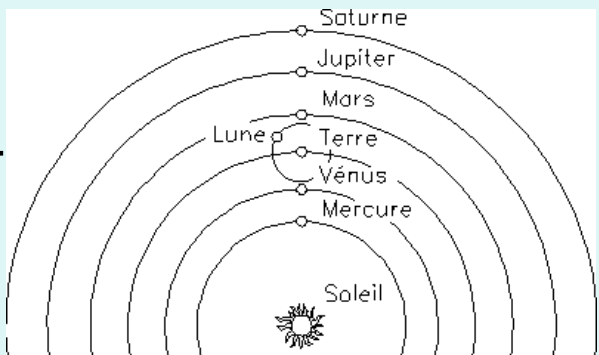
Anaximandre



Philolaos



Aristarque



**Acteurs** : Thalès, Anaximandre, Anaximène, Pythagore, Parménide, Anaxagore, Philolaos, Héraclide, Aristarque...

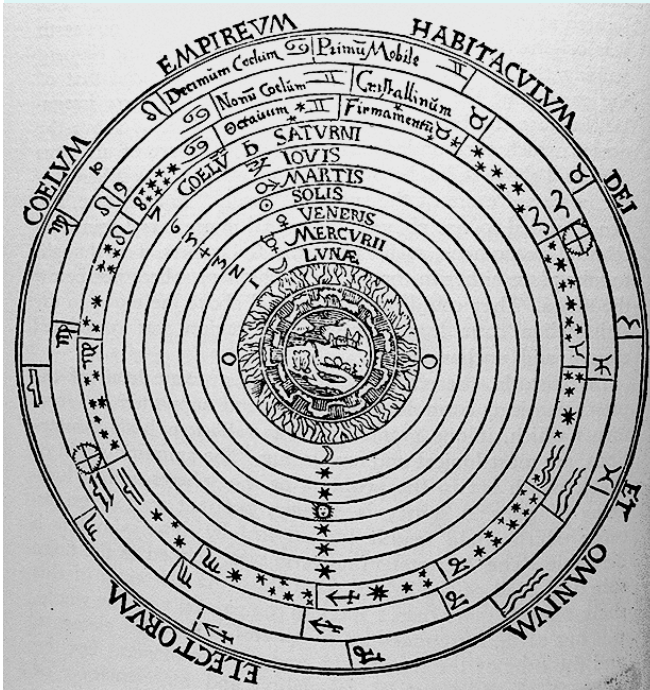
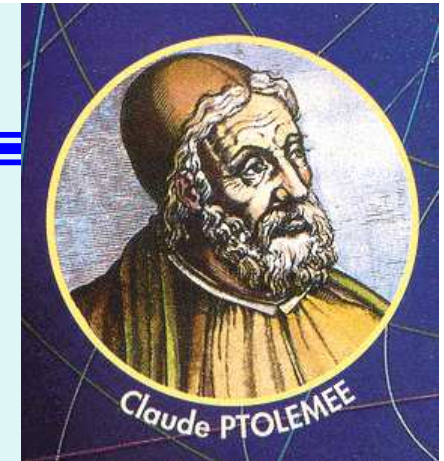
**Description** : devient quantitative, géométrique et de plus en plus précise.

**Instruments** :

- α bâton de Jacob
- α sphère armillaire



# La cosmologie grecque



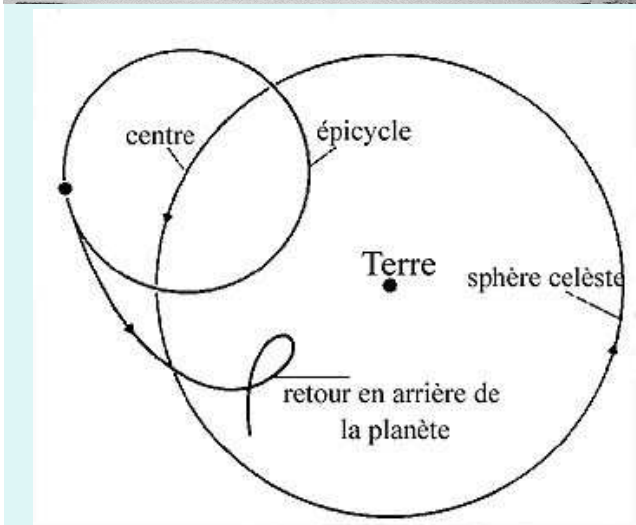
Une philosophie : Platon  
Une physique : Aristote  
Une géométrie : Euclide

La terre est au **centre** de l'univers qui est divisé en un monde **sub-lunaire** et les **cieux**.

Nécessité d'introduire de plus en plus d'**épicycles**.

**Ptolémé** : ... une grande horloge

Observations d'**Hipparque**.



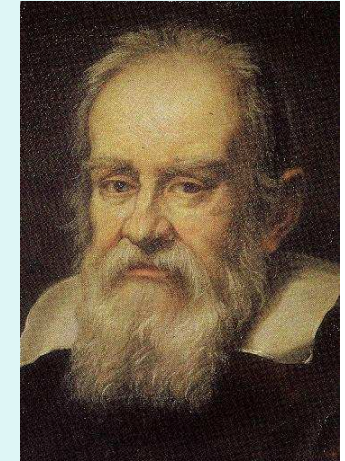
# Du monde clos à l'univers infini



**Une physique : Galilée**

**Une géométrie : Descartes**

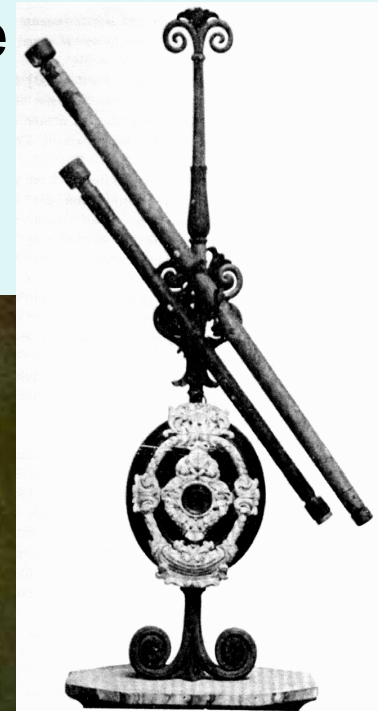
Le Soleil revient au centre du monde  
**(Copernic)**



**Observations fines de Tycho Brahé**  
invention de la lunette



**Lois de Kepler : le circulaire devient elliptique**





# La cosmologie newtonienne



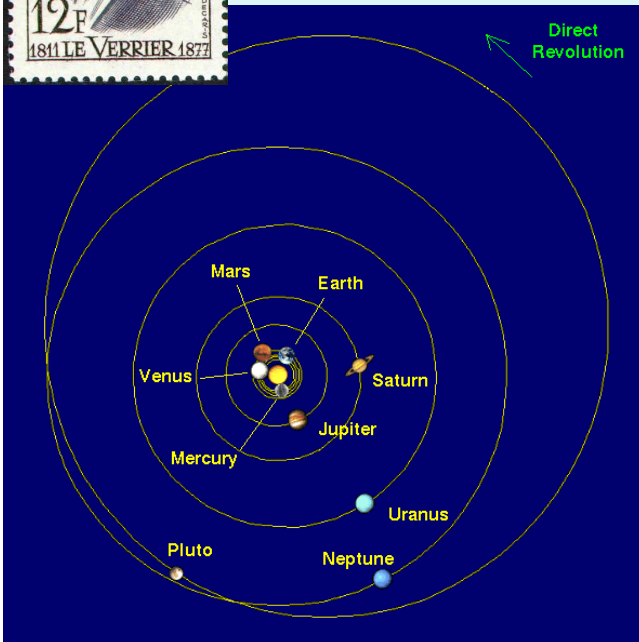
Les lois de la gravitation universelle (**Newton**)

Les succès de la mécanique céleste :

- ✕ découverte de Neptune (**le Verrier**)
- ✕ trajectoire des comètes (**Halley, Clairaut...**)



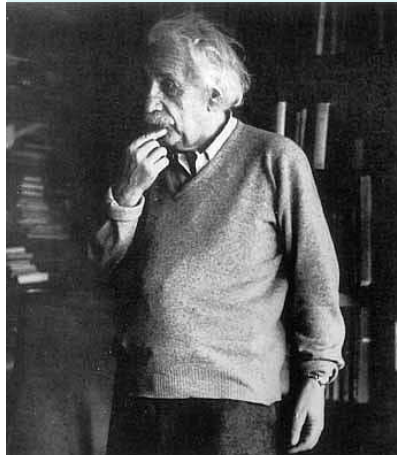
**Observations** : télescope à miroir  
montres de précision



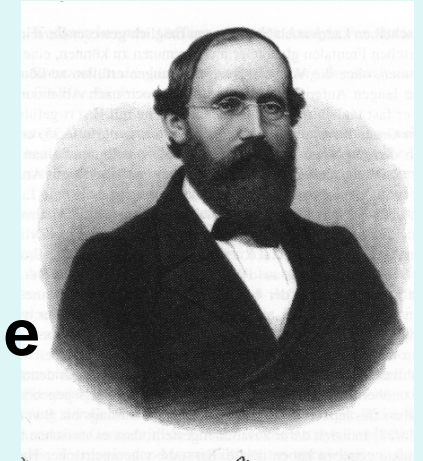
Naissance de la cosmologie newtonienne (**Kant,...**)

**MAIS, Mercure...!**

# La cosmologie relativiste



Une physique : Einstein  
Une géométrie : Riemann

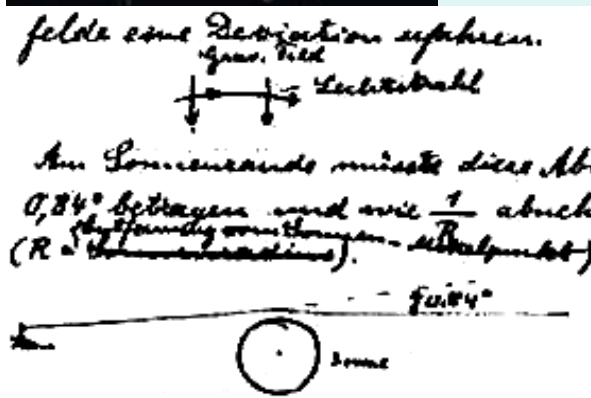


Formulation de la **relativité générale**  
nombreux succès...



Premiers modèles cosmologiques:  
statique ou en évolution ?

**Modèle du big bang chaud**



Lemaître

# La cosmologie actuelle

---

---

Le modèle du big bang chaud a **évolué**

## EXPÉRIMENTALEMENT ET THÉORIQUEMENT

⌘ Boom des observations, de la modélisation et des simulations

⌘ Problème de l'origine des structures

non expliquées dans le modèle original,  
apport de la mécanique quantique: **INFLATION**

**matière noire, énergie sombre : progrès ou épicycles ?**

La cosmologie est un **discours**

Elle demande de définir le cadre de son étude :

## Qu'est-ce que l'univers?

Elle est énoncée dans un **cadre géométrique** précis  
(Euclide, Descartes, Riemann,...)

qui sert de banc d'essai aux **nouvelles théories physiques**  
(Aristote, Newton, Einstein, ...)

Les **observations** permettent de trancher, de faire évoluer  
(mouvement des planètes, rayonnement de fond...)

**Plus important**, les observations ne peuvent en général pas être interprétées en dehors du cadre choisi (géométrie, théorie physique...)

Ce que l'on recherche, c'est

**Une adéquation entre toutes les observations connues et le modèle cosmologique**

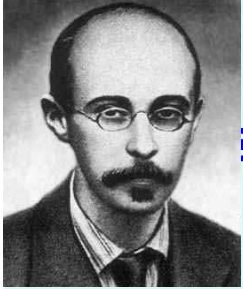
Conséquence:

**Changer de cadre théorique, implique une réinterprétation globale de toutes les observations**

**Aucune observation ne permettra de prouver qu'un modèle cosmologique est « vrai ».**



# Le modèle du Big Bang chaud



# Des hypothèses raisonnables



- α **gravitation** est décrite par la relativité générale,
- α les lois de la physique sont universelles
- α nous n'occupons pas une position privilégiée dans l'univers :  
**principe cosmologique**
  
- α la **matière** est constituée de :
  - \* radiation
  - \* poussière (fluide de galaxies sans pression)

L'univers à grande échelle est donc lisse (homogène et isotrope)

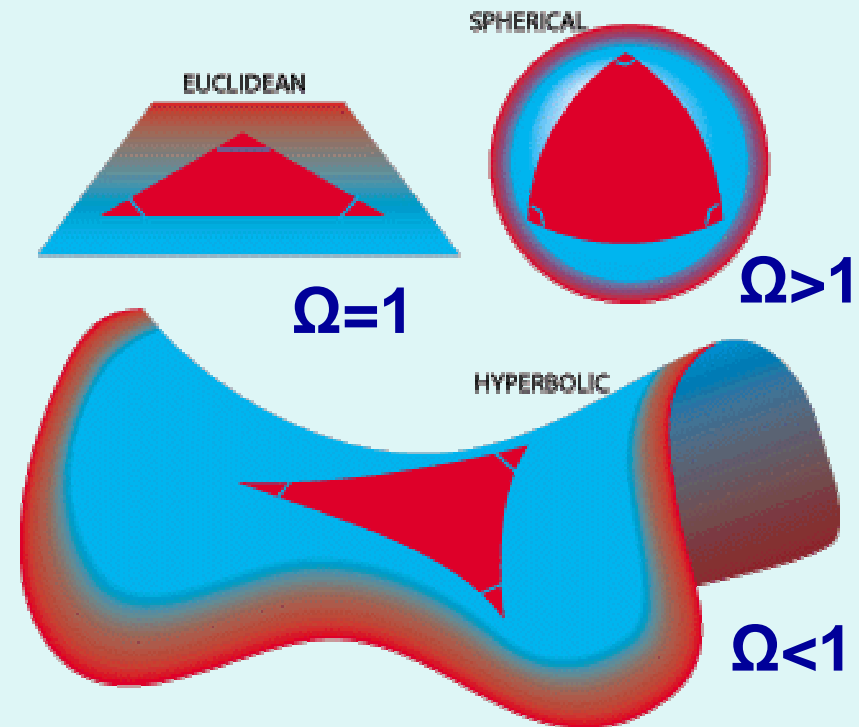
# Les modèles de F.-L.

**Dynamique de l'univers** : une fonction (facteur d'échelle)

**Géométrie de l'espace** : trois possibilités, dépend du contenu total de matière dans l'univers ( $\rho$ ).

$\rho_{\text{crit}}$  : densité de matière nécessaire pour que l'espace soit plat.

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



# Les trois « piliers » historiques

---

---

Le modèle du big bang chaud a été soutenu par trois évidences observationnelles :

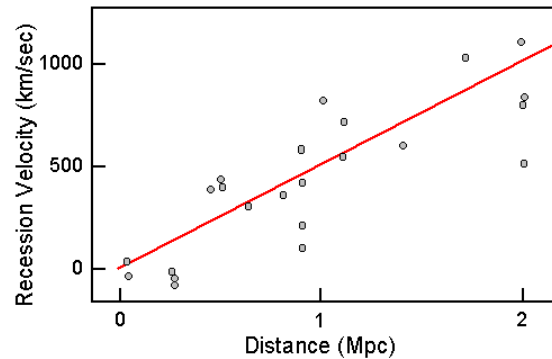
L'expansion de l'univers,

La nucléosynthèse primordiale,

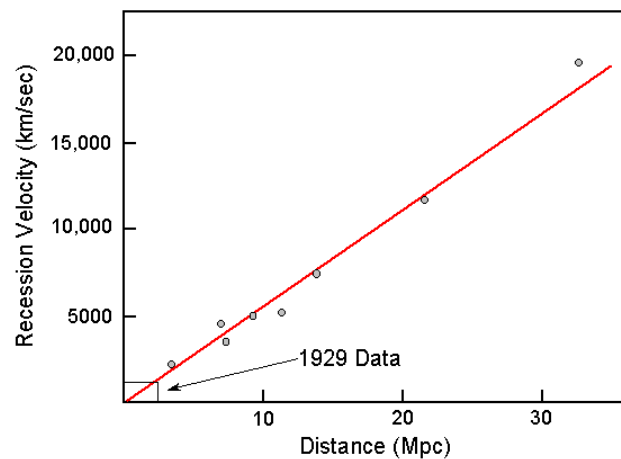
L'existence d'un fond diffus électromagnétique

# L'expansion de l'univers

Hubble's Data (1929)

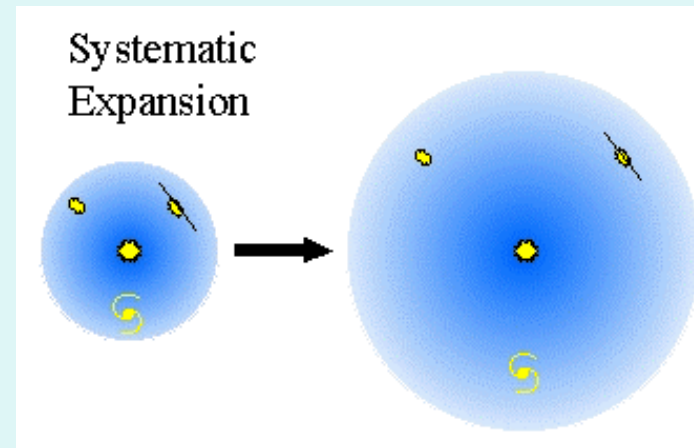


Hubble & Humason (1931)



Les hypothèses de Friedmann et Lemaître impliquent que

**l'univers est en expansion**



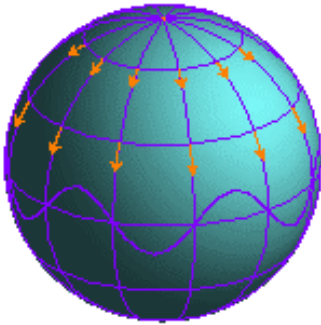
Cela sera vérifié en 1929 par Edwin Hubble





# Le décalage vers le rouge

**Facteur d'échelle :  $a(t)$**



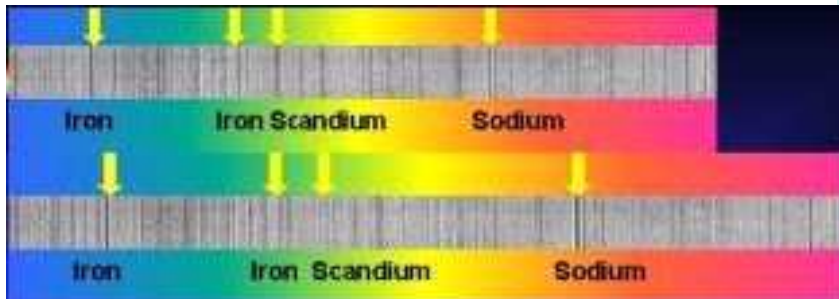
Les distances croissent comme  $a$

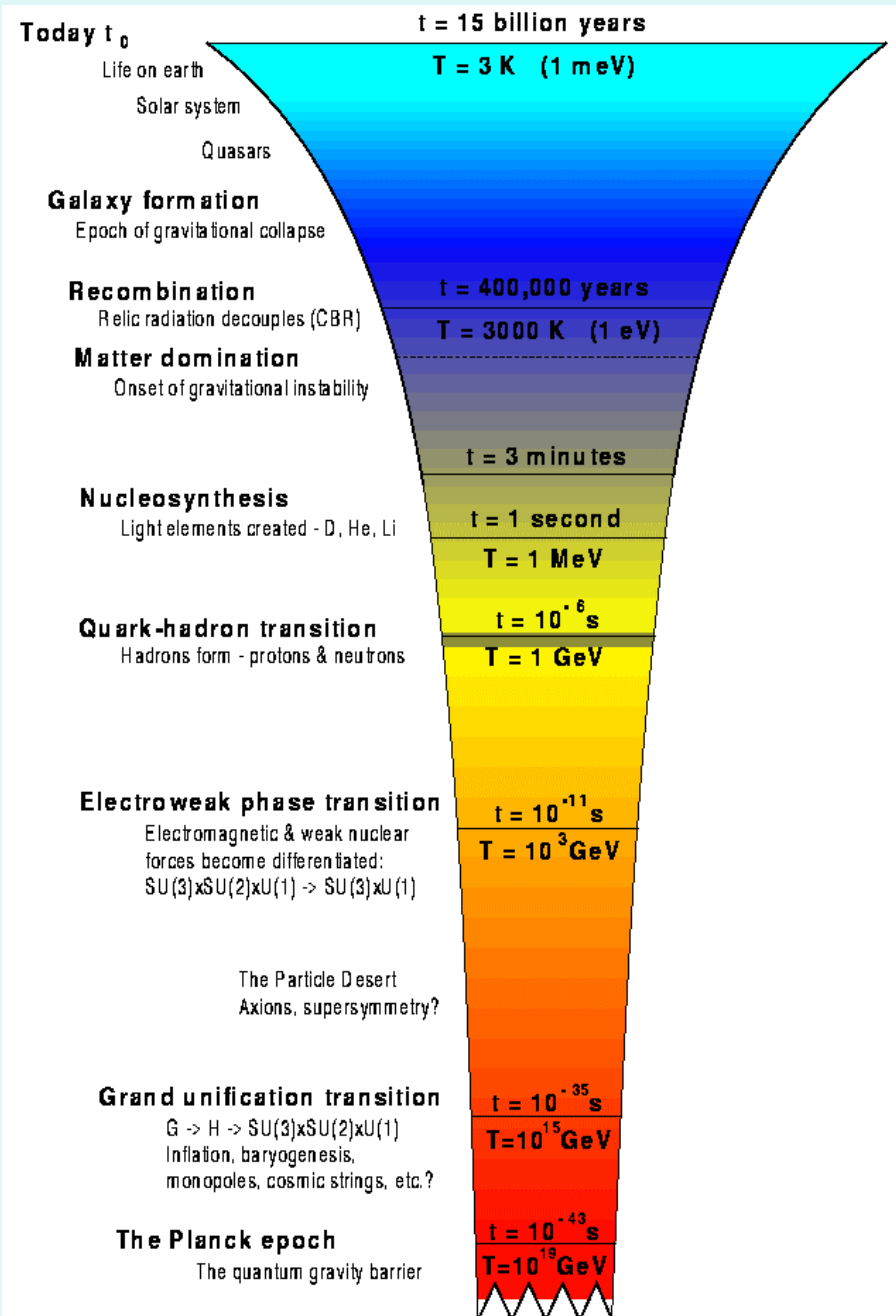
Les fréquences diminuent comme  $1/a$

L'énergie diminue comme  $1/a$

La densité de matière diminue selon  $1/a^3$

La densité de la radiation diminue selon  $1/a^4$





L'univers a débuté par un **big bang** chaud

«  **$a=0$**  »

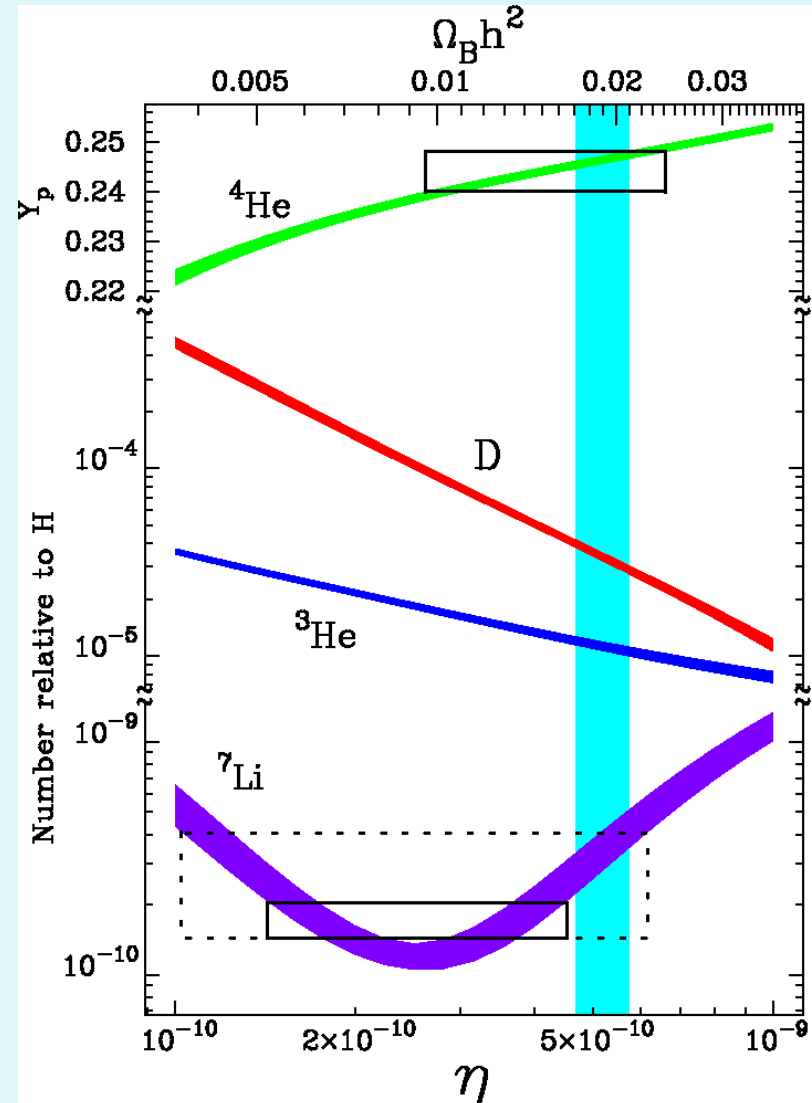
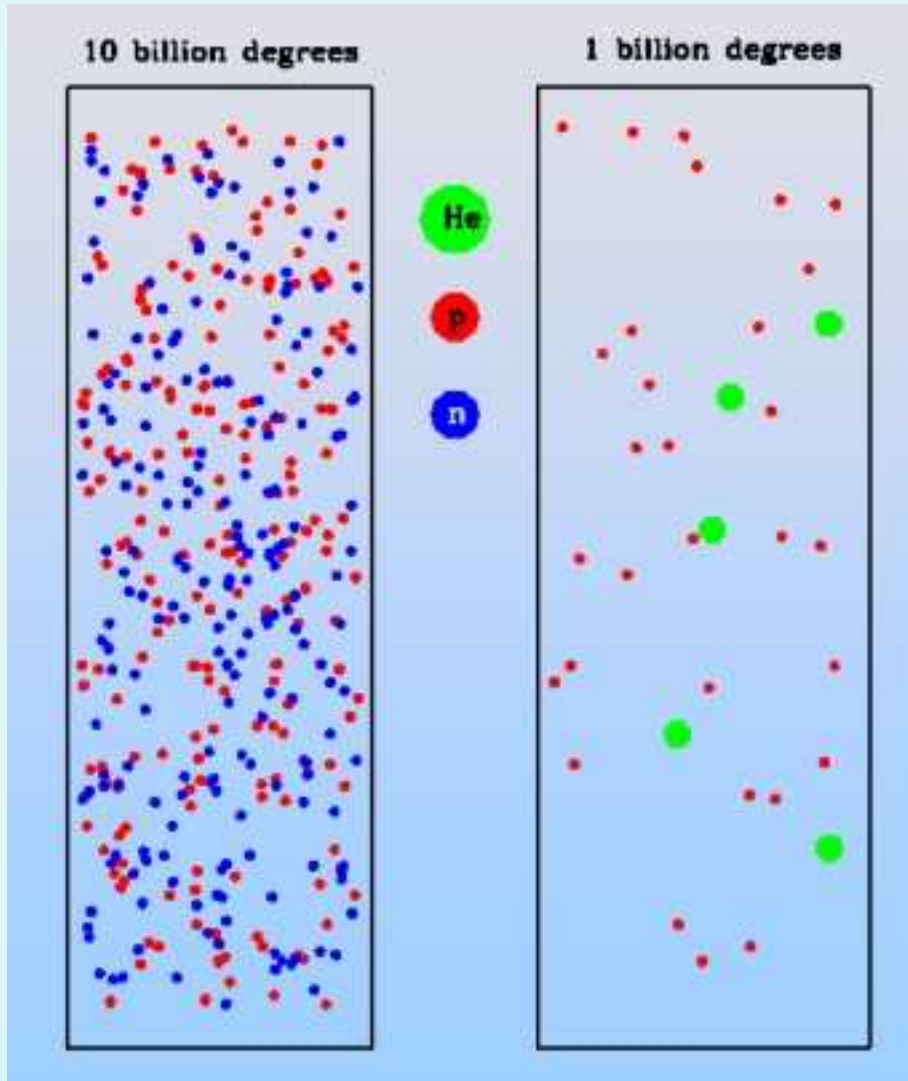
L'univers a une *histoire thermique* (Gamow, Herman, Alpher) :

- \* existence d'un fond relique de photons
- \* nucléosynthèse primordiale

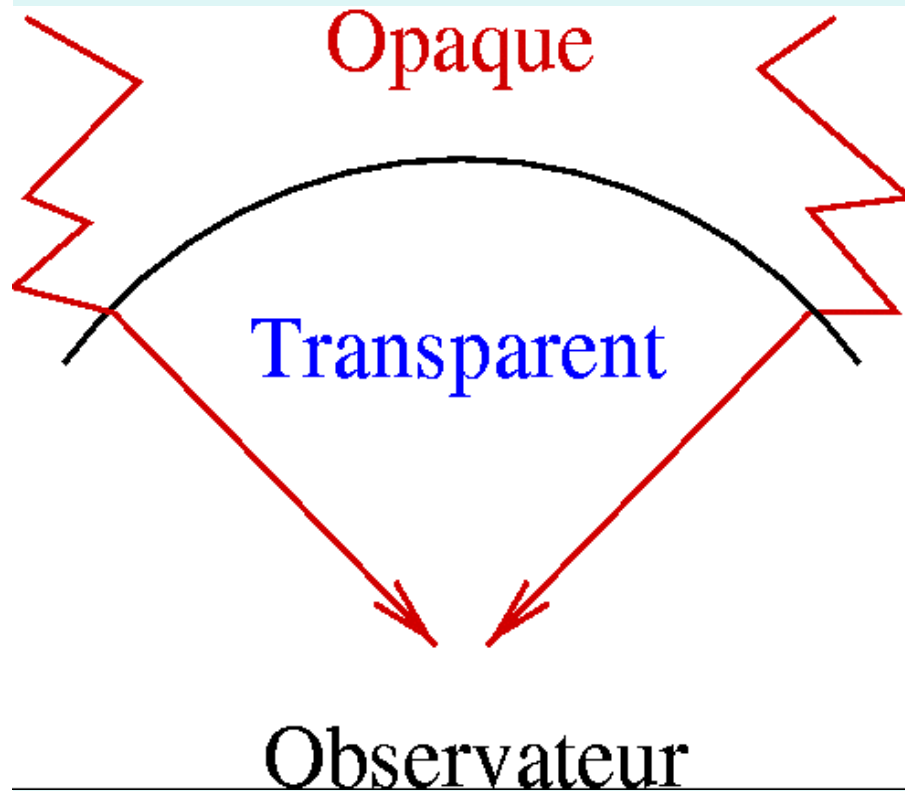
Conclusions ne dépendant que de

- \* l'expansion
- \* physique nucléaire et atomique

# La nucléosynthèse primordiale



# Le fond diffus cosmologique



411 photons/cm<sup>3</sup>,  
T = 2.726 K  
Z ~ 1000  
T ~ 300.000 ans

Dans le passé, la matière était **ionisée** :  
**l'univers est opaque**

**Recombinaison** ( $e+p \rightarrow H$ )

Prédit par **Gamow** (1948)

Découvert par **Penzias** et **Wilson** (1964)

Clef de voute de la cosmologie contemporaine.

# Mais... des problèmes !!

---

---

## **L'univers a un âge fini :**

«  $a=0$  » correspond à 15 milliards d'années

## **Singularité initiale :**

«  $a=0$  » ne peut pas être évité dans le cadre de la RG avec de la matière ordinaire.

## **Problème de l'horizon :**

pourquoi l'univers est-il si homogène sur des échelles qui n'ont pas été en contact causal ?

## **Problème de l'origine des grandes structures :**

l'univers n'est pas homogène

**Le modèle du big-bang chaud est incomplet !**



# Penser le Bang

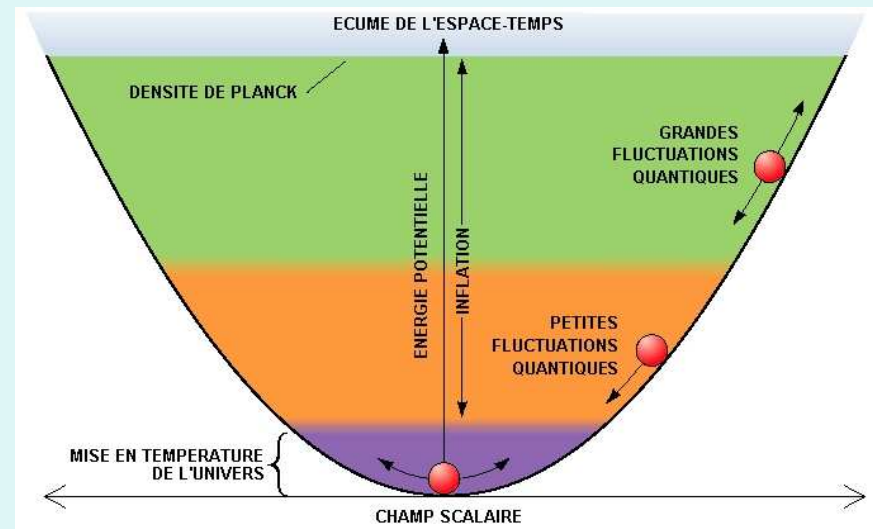
*Où on se rend compte que tous les problèmes peuvent se résoudre d'un seul coup !*

# L'inflation

Dans une phase primordiale, la dynamique de l'univers est dominée par un type de matière  $P = -\rho$ .

**Exemple** : un champ scalaire en roulement lent

$$(\rho = K+V, P=K-V)$$

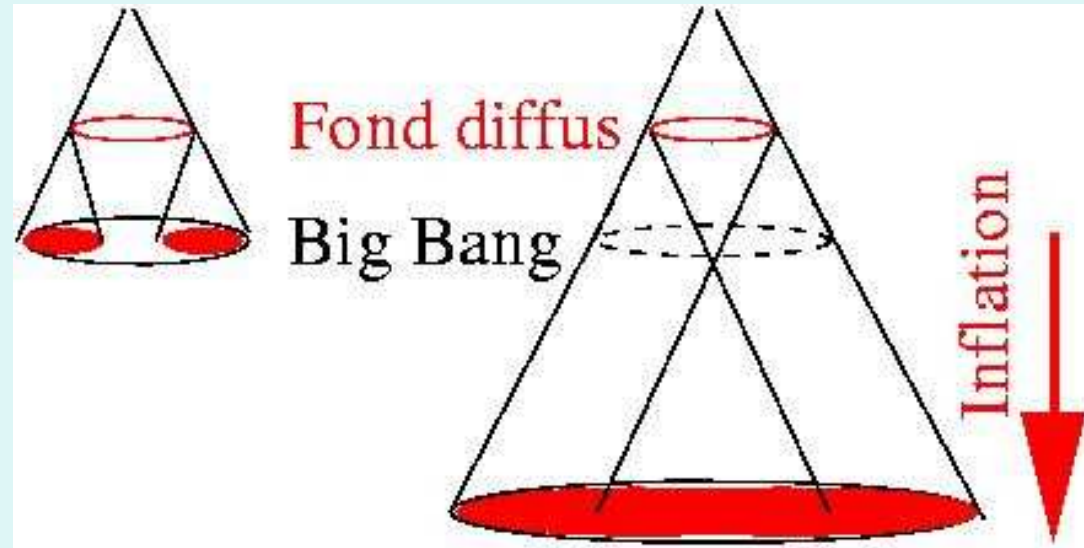
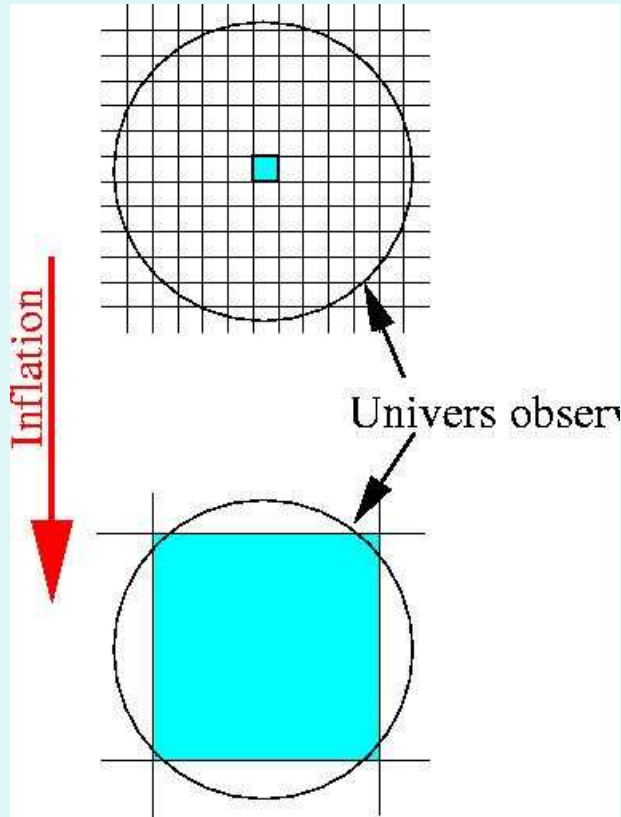


L'expansion de l'univers est **exponentielle**,

L'univers devient **très très plat...**

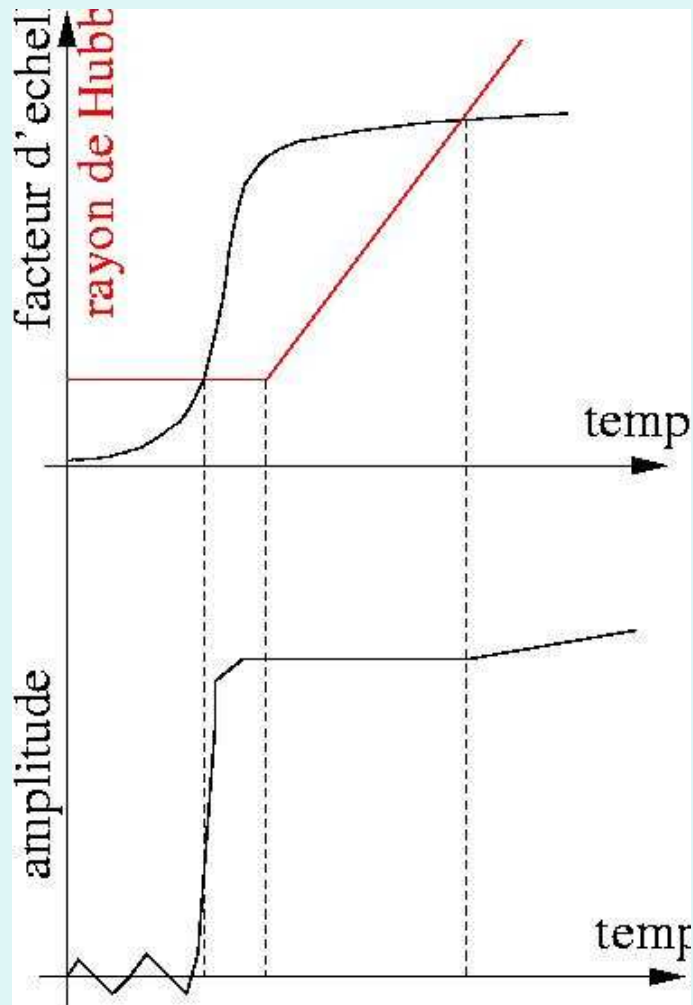
# Résolution des problèmes

**Problème de l'horizon** : notre univers observable vient d'une seule région causalement connectée.



Toutes les inhomogénéités classiques sont diluées,  
En se désintégrant, l'inflaton produit la matière ordinaire.

# L'origine des structures

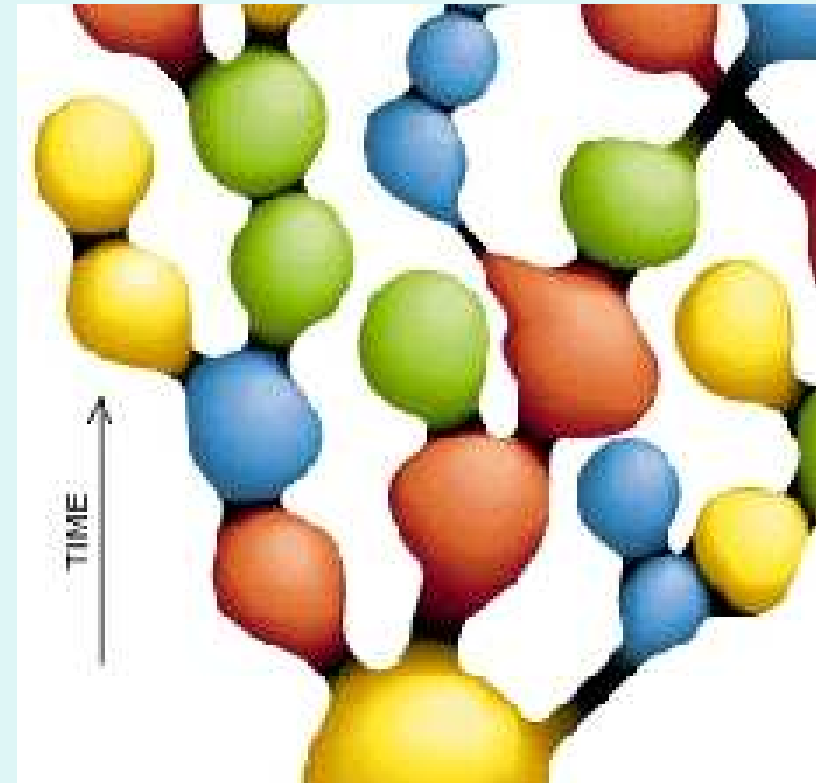
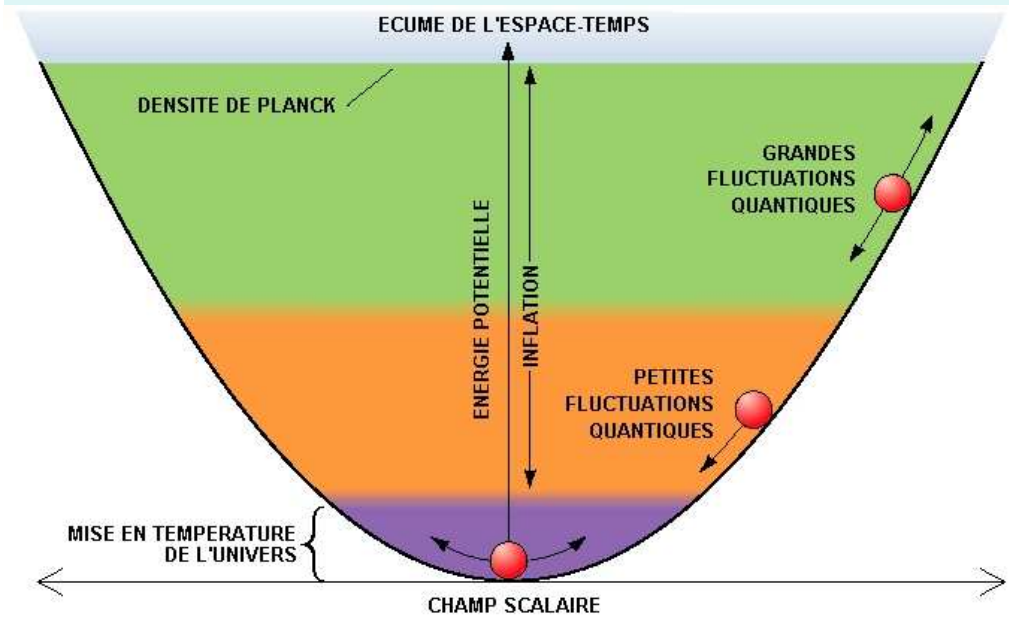


L'inflaton a des fluctuations quantiques  
∝ amplifiées et étirées à des échelles cosmologiques  
∝ spectre et amplitude dépendent du modèle

**Fluctuations « gelées » tant que**

**longueur d'onde > rayon de Hubble**

# Structure de l'espace



Notre univers observable n'est qu'une **infime partie** d'un **univers-île** qui n'est plus en inflation

**L'inflation est éternelle**



# Des implications radicales

---

---

L'univers est toujours en inflation et le sera toujours

- ⌘ structure au delà de l'univers observable,
- ⌘ ouvre de nombreuses perspectives.

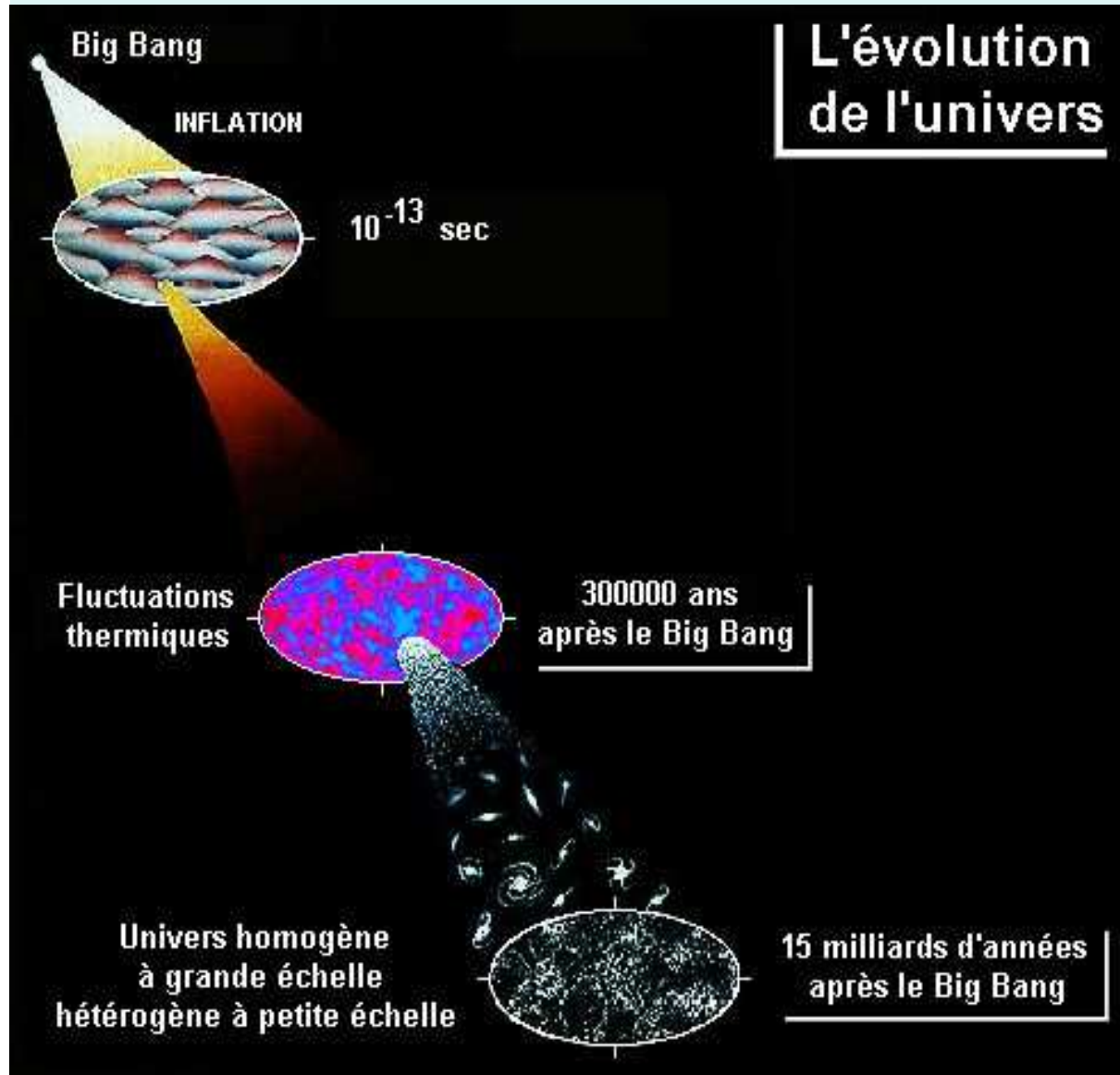
Grandes structures ont une origine quantique

Des prédictions claires et testables

- ⌘ fluctuations de densité (spectre, statistique...)
- ⌘ ondes gravitationnelles
- ⌘ falsifiables (relation d'auto-cohérence)
- ⌘ lien avec les observations pas direct

Seul modèle cohérent et compétitif...

# Le modèle « moderne »



Fluctuations générées lors de l'inflation :

**Inflation - conditions initiales**



**Evolution** : effondrement gravitationnel



**Observables:** FDC, catalogues de galaxies, ...

# Méthodologie

---

---

Le modèle du **big-bang chaud + inflation** offre un modèle complet pour décrire l'univers.

Les **conditions initiales** (inflation) et la **dynamique** (évolution De l'univers + dynamique gravitationnelle) sont liées !

Prédiction théoriques sont **statistiques** :  
**comment les comparer à une seule réalisation de l'univers?**

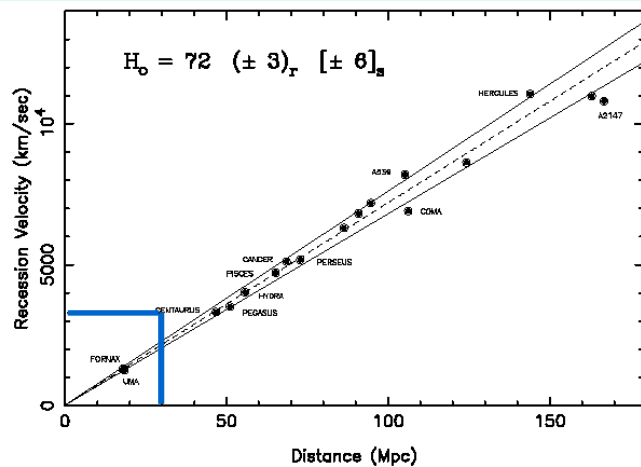
Nécessité de **combiner** diverses observables

# Le Big Bang face aux observations

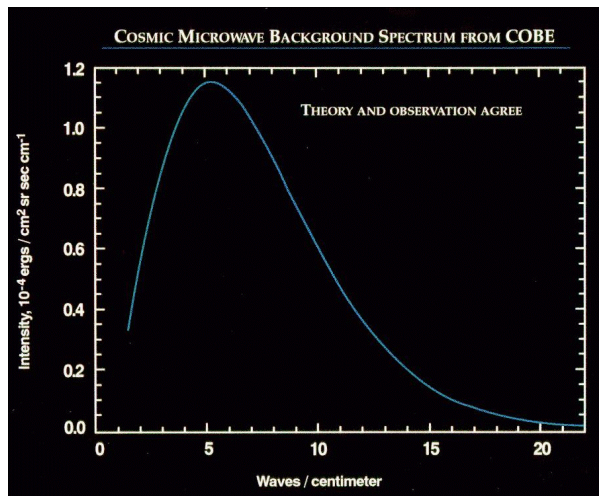
*Comment teste t'on le modèle du big-bang et le scénario de l'inflation ?*

# Renforcement des piliers !

**Nucléosynthèse** : mesure des abondances améliorées, en particulier D dans systèmes à  $z \sim 2-3$  !



**Constante de Hubble** : enfin mesurée à 5-10 % près.  
Fin de 30 ans de controverse !



**Fond diffus** : COBE (1989) a fourni son spectre : c'est un corps noir !

une des mesures les plus précises de la physique !

# Bilan de la matière

Ensemble des données cosmologiques :  $\Omega \sim 1$

## Radiation :

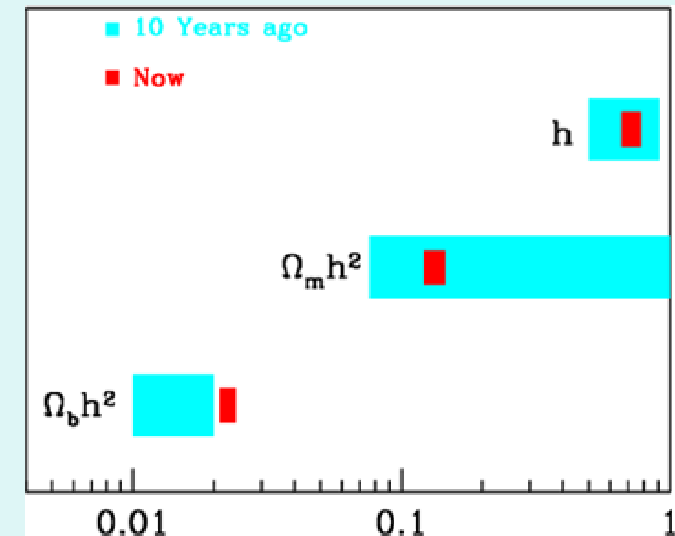
photons  $\Omega \sim 5 \cdot 10^{-5}$

neutrinos  $\Omega \sim 4 \cdot 10^{-4}$

## Matière :

baryons  $\Omega \sim 0.04 \pm 0.01$

visible  $\Omega \sim 0.002$



**99,8% de la matière est invisible**

**95% de la matière est d'une nature inconnue**

**Toute matière (même invisible) se fait trahir par ses effets gravitationnels**

# La matière noire

**1933** : dans les galaxies, une grande partie de la matière n'est pas lumineuse (**Zwicky**)

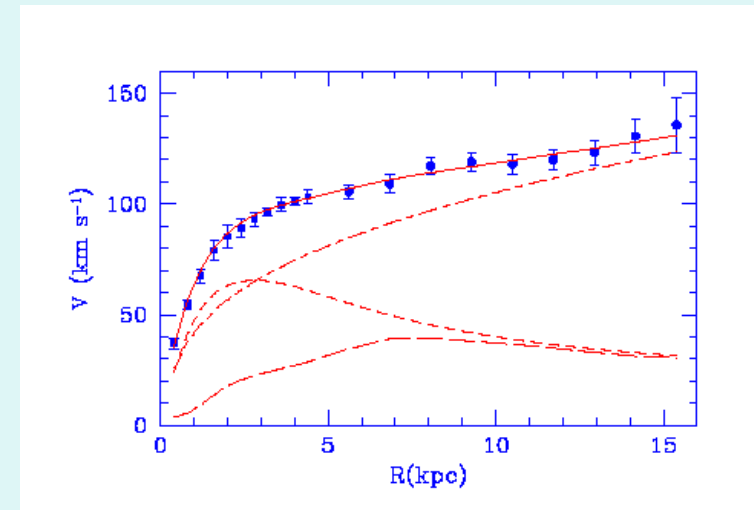
**Nucléosynthèse** : sensible au rapport entre la densité de radiation et de baryon : mesure de la densité baryonique.

Dynamique des groupes de galaxies (10-100)

Champs de vitesse

Formation des grandes structures

Lentilles gravitationnelles



$$\Omega \sim 0.3 \pm 0.1$$



# La matière noire : candidats

Quelle est cette matière ? Où se trouve t'elle ?

La physique des particules propose de **nombreux candidats** :  
particules supersymétrique (neutralino...)  
axions  
neutrinos massifs...

## **Mais aussi**

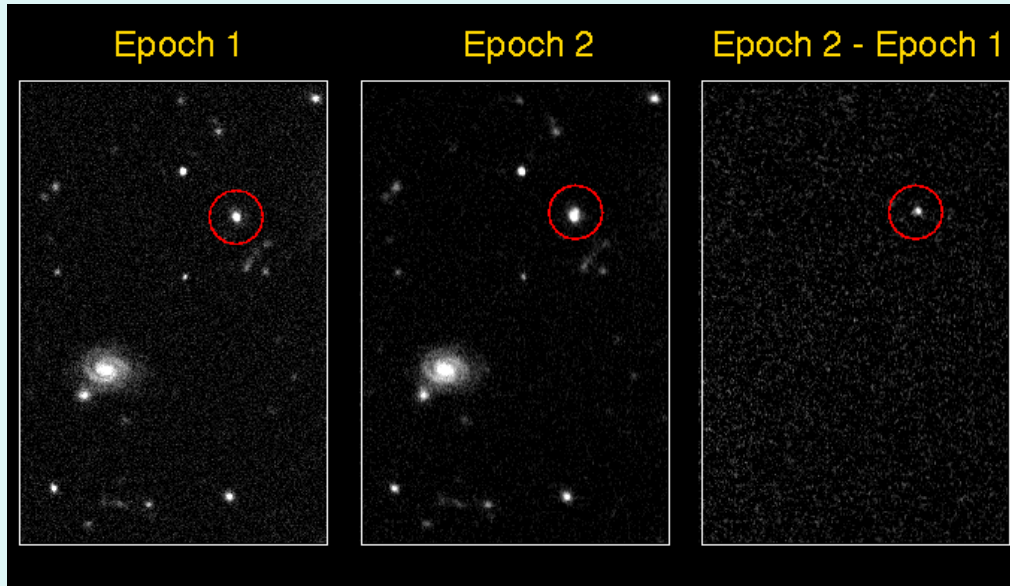
micro trous noirs,  
vortons  
modification de la théorie de la gravité...

**Recherche astrophysique, détection terrestres, accélérateurs**

# L'énergie sombre

---

---



**1998** : données de SN Ia ( $z \sim 1$ ), meilleure détermination des distances et donc de la loi d'évolution de l'univers.

**L'univers est en train d'accélérer !**

**Autres évidences** : lentilles, fond diffus ...

A quelle point maîtrise t'on la physique des supernovae ?

# L'énergie sombre : c'est quoi ?

$$\Omega \sim 0.7 \pm 0.1$$

Nécessite soit une modification de la R.G. soit de la matière non ordinaire ( $P < 0$ )

Constante cosmologique ...

Quintessence ...

Dimensions supplémentaires...

# Inventaire cosmique



# Le fond diffus cosmologique



Lancé le 19 novembre 1989 par la NASA  
A réalisé la première cartographie totale du fdc

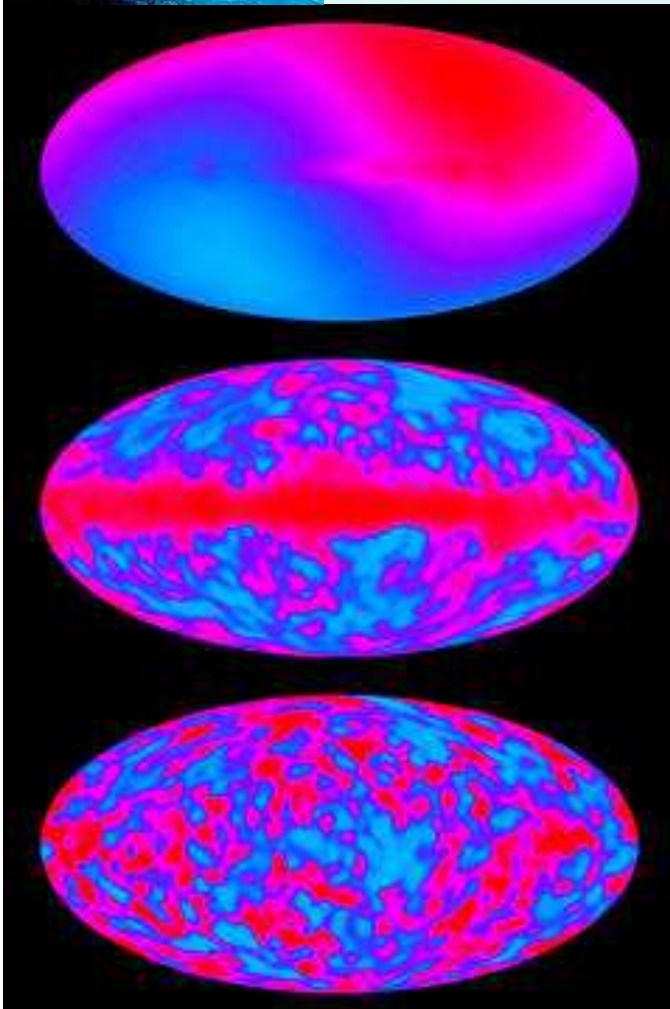
Résolution  $\sim 7$  deg.

Confirme les mesures terrestres,  
Mesure du spectre,

Met en évidence l'existence de  
fluctuations de température

Preuve de l'existence de fluctuations  
primordiales

Spectre en accord avec l'inflation....



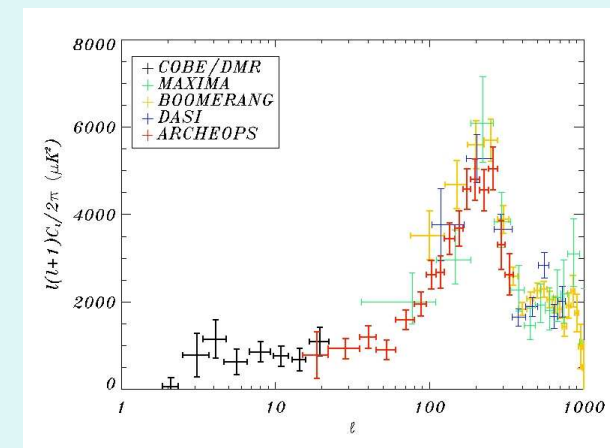
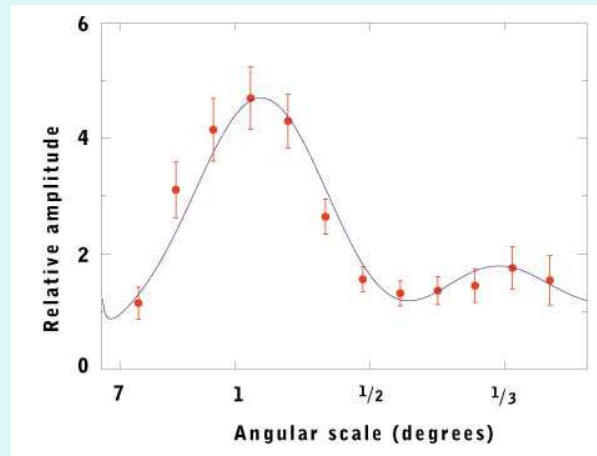
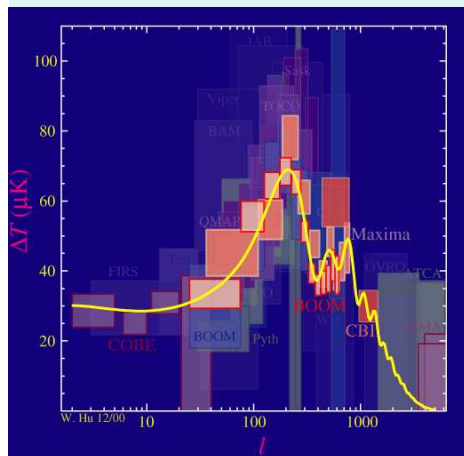
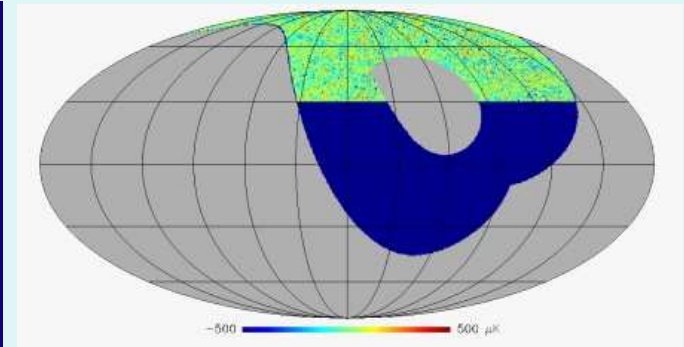
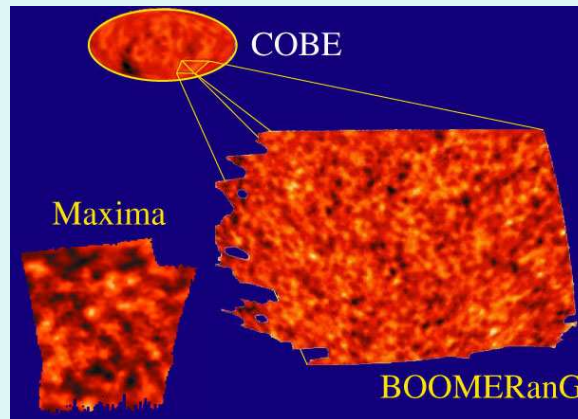


# Evolution technologique rapide

<1998 : nombreux ballons et observations sol.

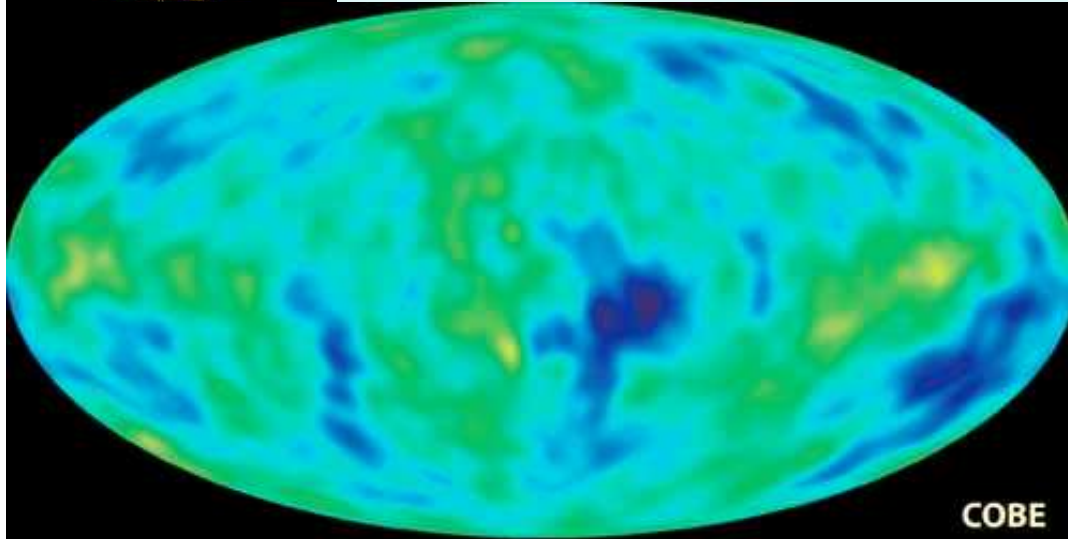
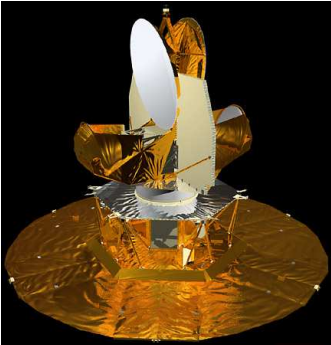
1998: Boomerang  
Maxima

2002: Archeops

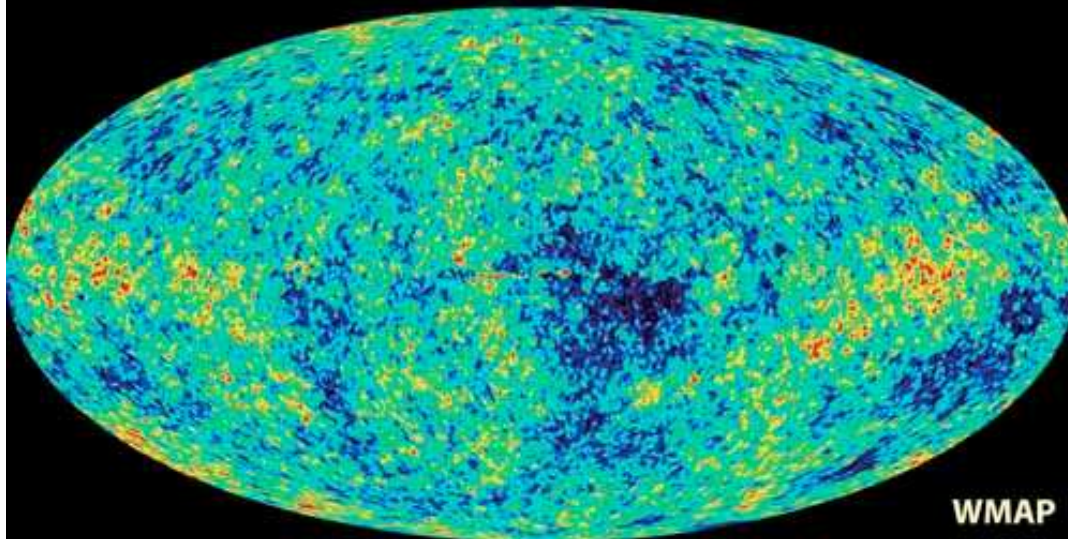




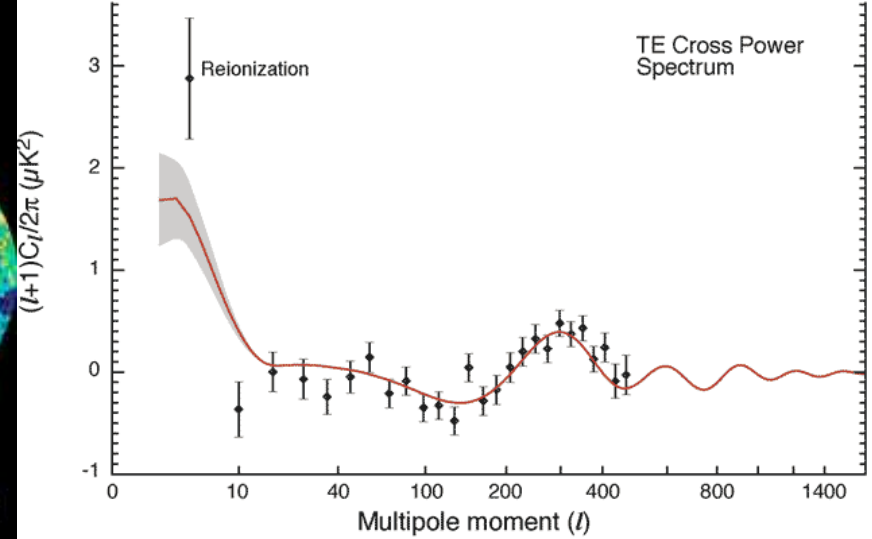
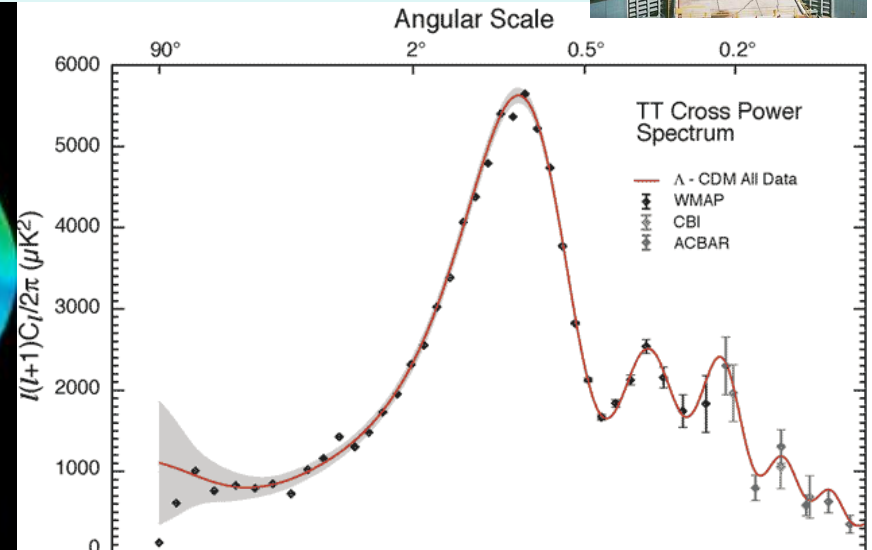
# 2003 : WMAP



COBE



WMAP



# Conclusions du FDC

---

---

Physique linéaire - Matière noire nécessaire !!!

Univers très plat :  $\Omega = 1.02 \pm 0.02$

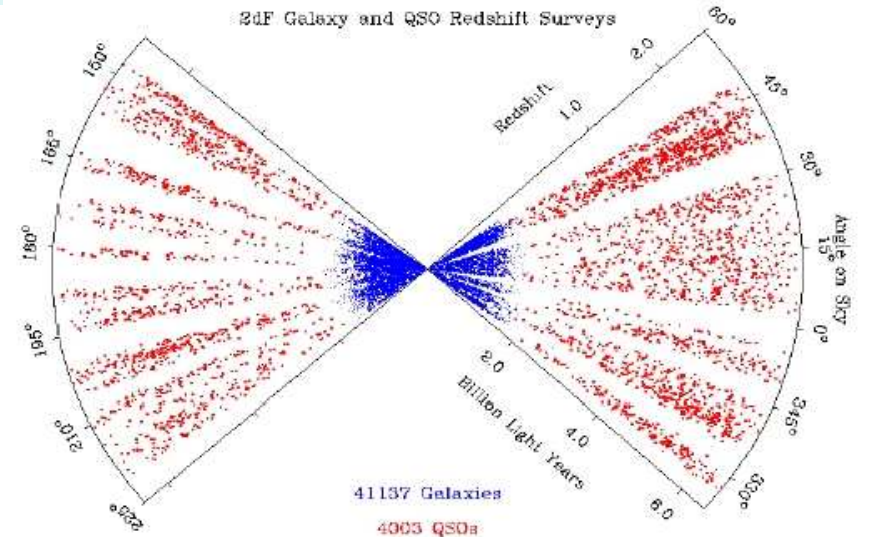
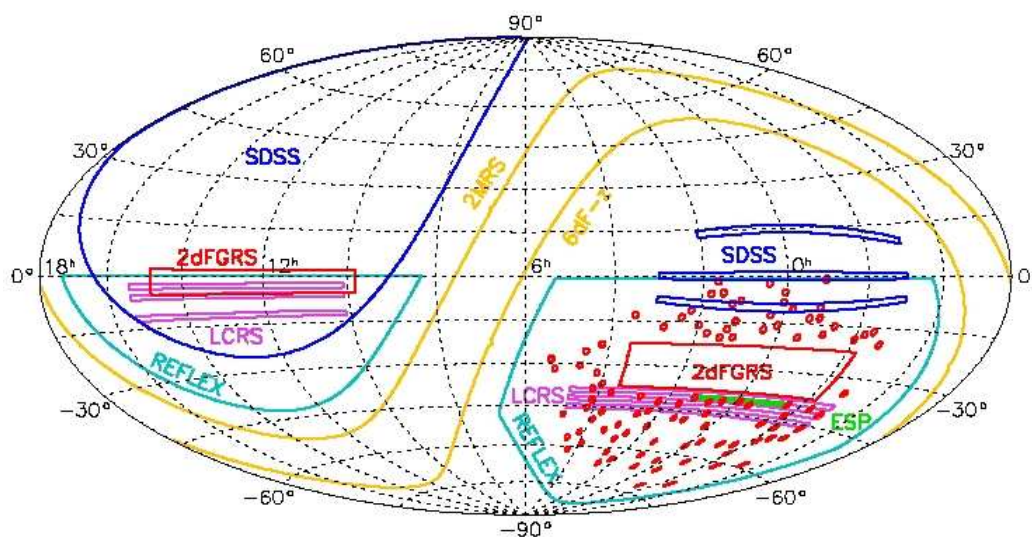
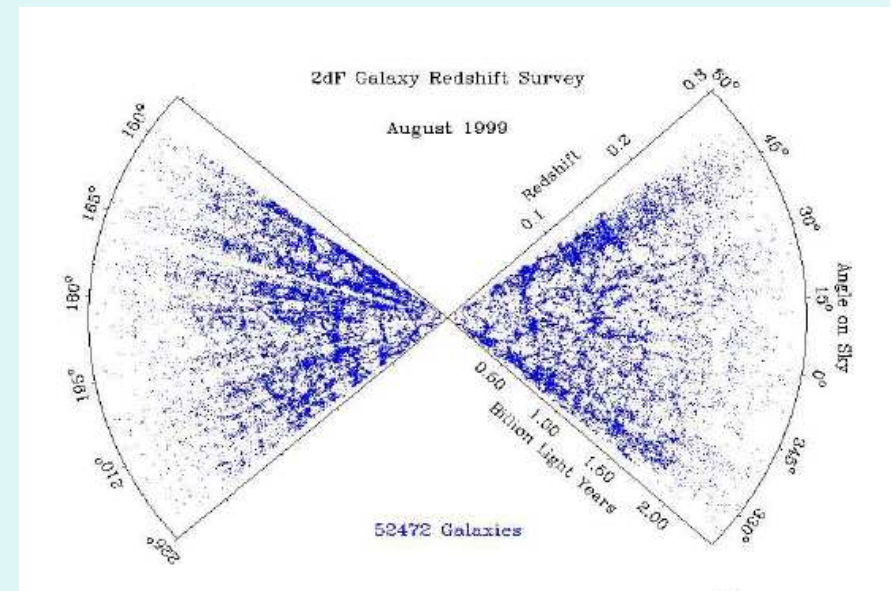
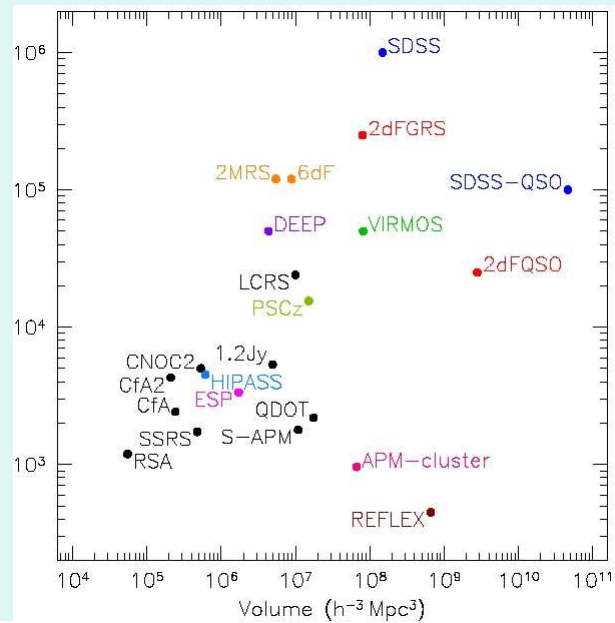
**Inflation** : fluctuations de densité seules  
bon accord (spectre...)

Détection de la **polarisation** : période de reionisation

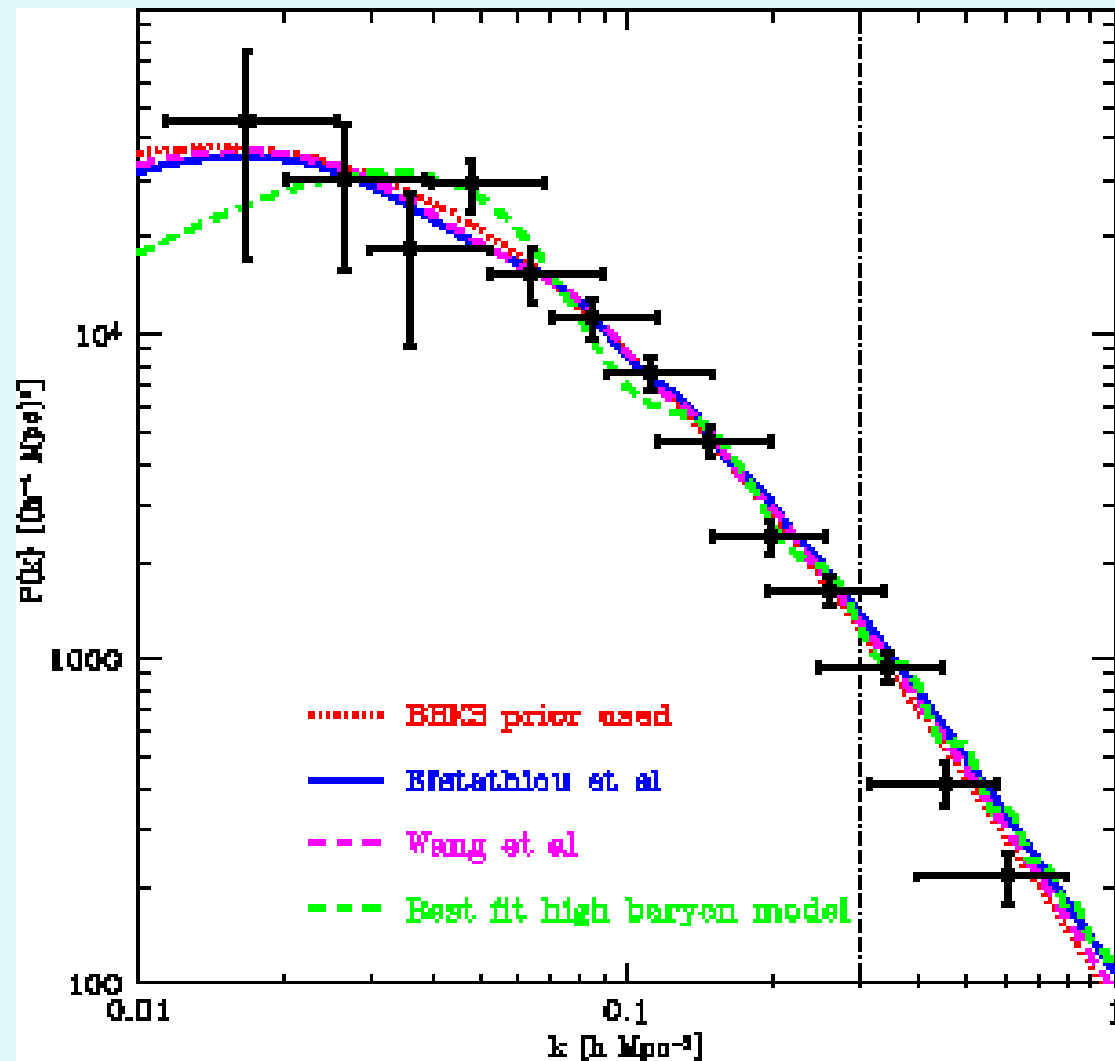
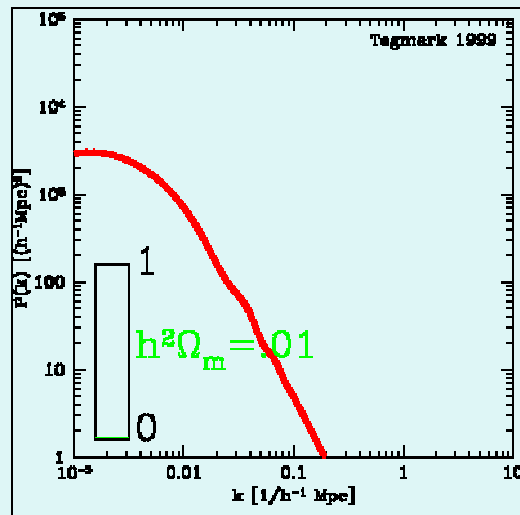
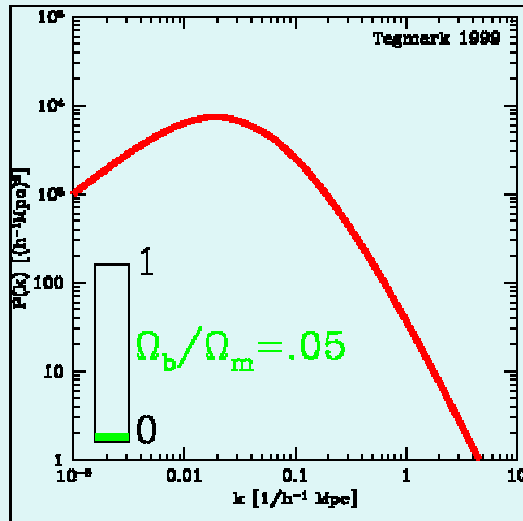
Quadrupole : nouvelle physique à grande échelle ?

**Futur** : Planck (2007), interférométrie sol (CBI)  
polarisation  
détection des ondes gravitationnelles primordiales

# Catalogues de galaxies



# Prédiction et accords



# Conclusions des grandes structures

Schema d'effondrement gravitationnel est **OK**

Compatible avec inflation

Evidence pour la matière noire

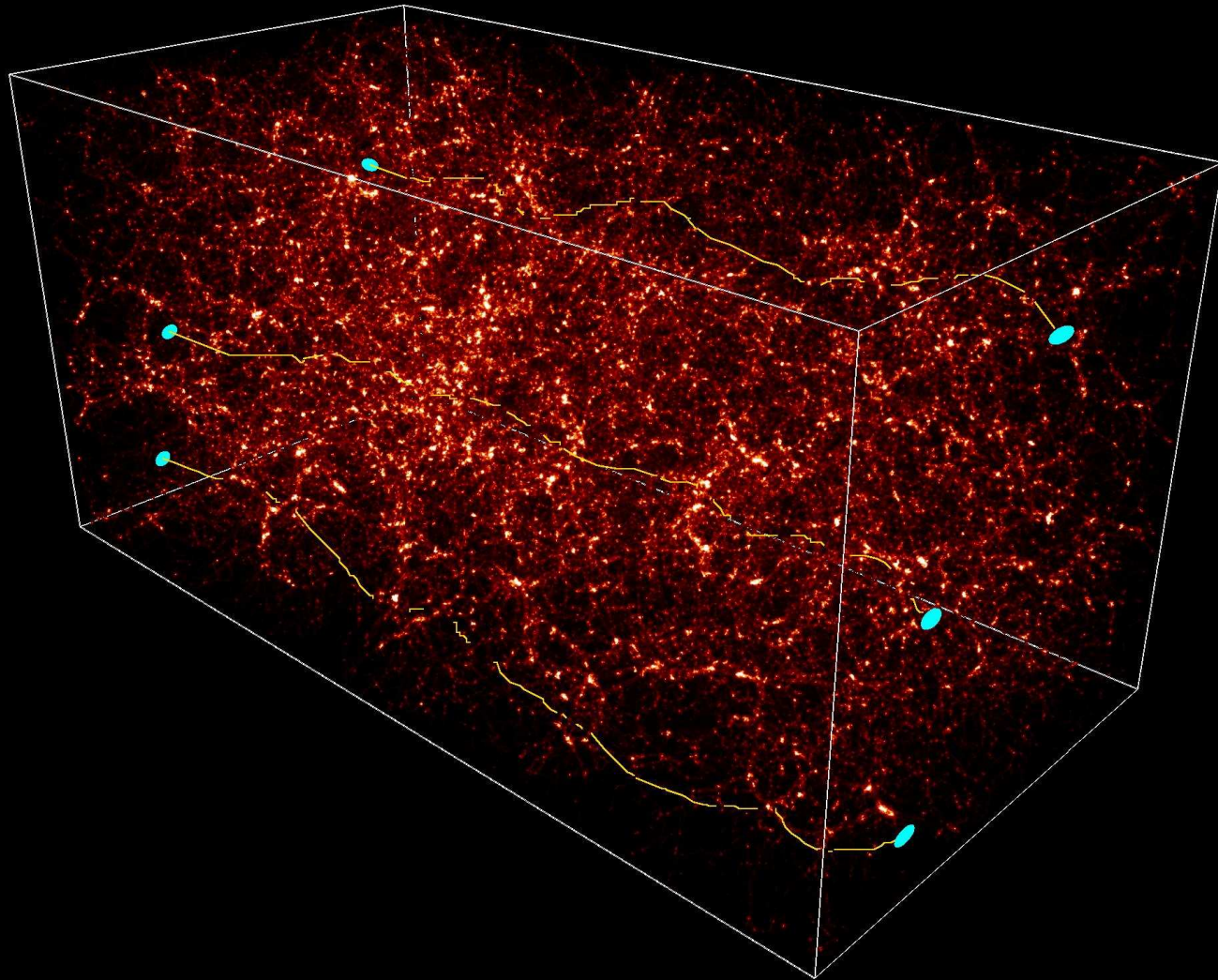
**Problème** : comment la matière noire suit-elle la matière visible ?

non linéarités...



# Lentilles gravitationnelles

*DEFLEXION DES RAYONS LUMINEUX TRAVERSANT L'UNIVERS, EMIS PAR DES GALAXIES LOINTAINES.*



*SIMULATION: GROUPE INC, S. COLOMBI, IAP.*

# Lentilles gravitationnelles

---

---

Première détection en **2002**,

Teste la répartition de matière totale :  
**sensible à la matière noire !**

Très prometteur pour tester la physique de l'univers  **$z < 1$** .

Croissance des structures dans les régimes linéaires et non-linéaires sensible à **l'équation d'état de l'énergie sombre**



# Conclusions

- ⌘ **un modèle complet** depuis 20 ans,  
conditions initiales + évolution  
inflation offre une nouvelle image de l'univers  
qui est l'inflaton ?
  
- ⌘ en accord avec toutes les données actuelles,  
image globale très **cohérente**,  
**mais** quelques points d'ombre.
  
- ⌘ **boom** des observations
  
- ⌘ **vérifiabilité** : 1 seul univers
  
- ⌘ **identité de la matière noire et de l'énergie sombre**
  - \* matière ou modification de la gravité
  - \* l'univers comme laboratoire
  - \* cosmologie primordiale

# Cosmologie primordiale

