

Penser l'univers

Le Big Bang face aux observations

Jean-Philippe Uzan

Institut d'Astrophysique de Paris

Laboratoire de Physique Théorique, Orsay

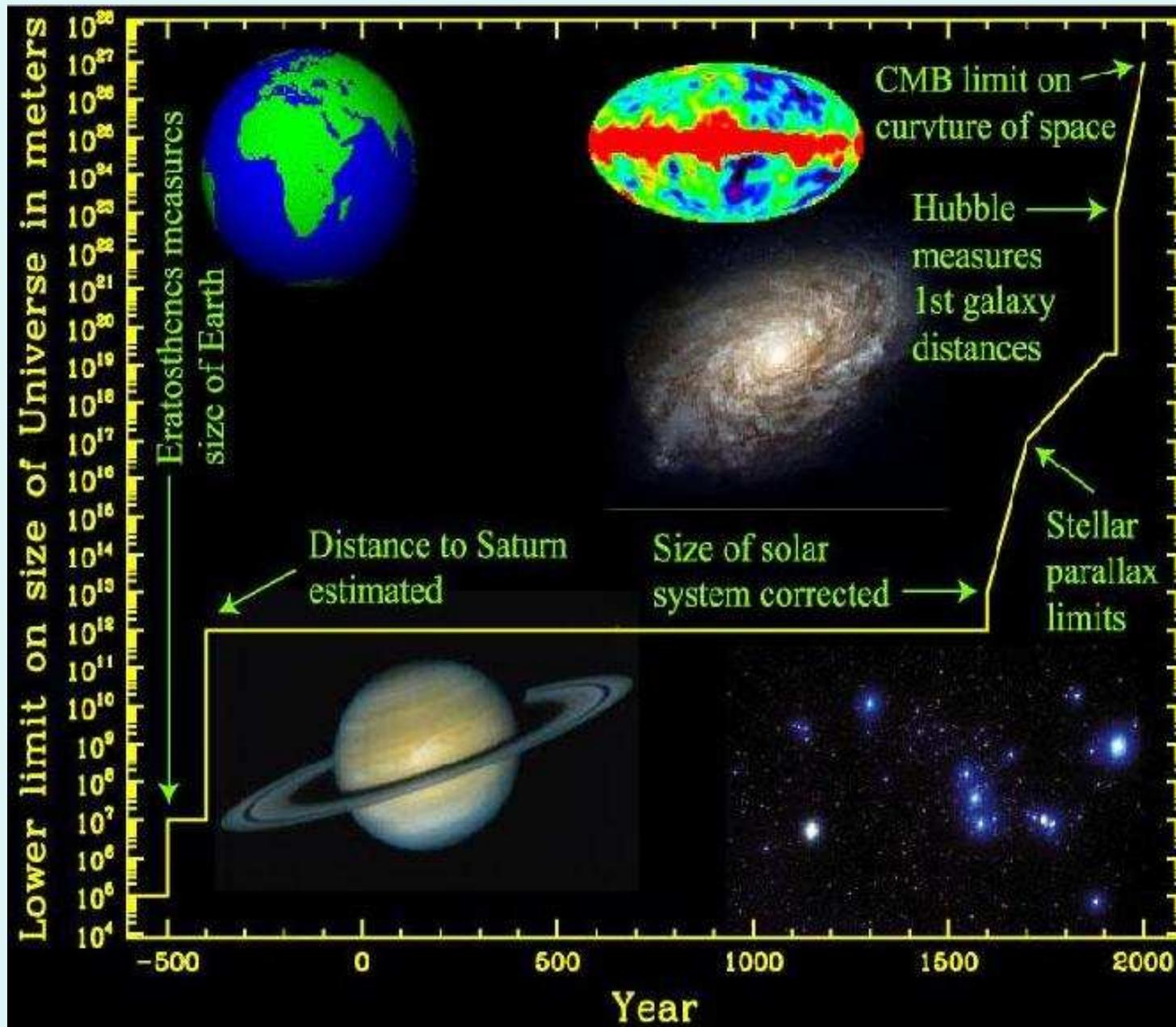
Plan

- 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 ?

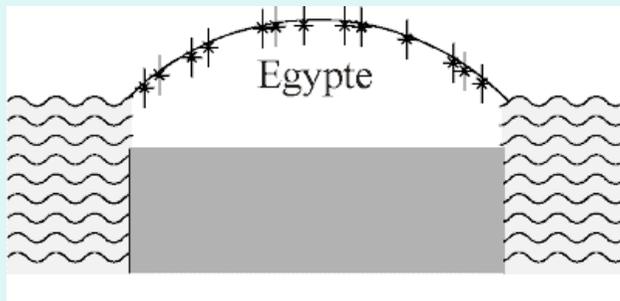
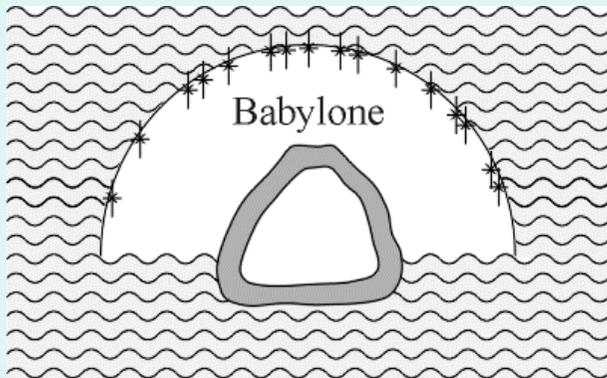
Penser l'univers

*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**:

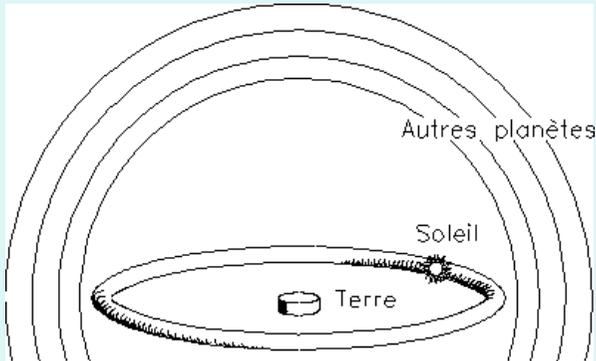
- ⌘ mouvement des corps célestes
- ⌘ durée de l'année à un millièmè près (-1700, Babylone).

Instruments :

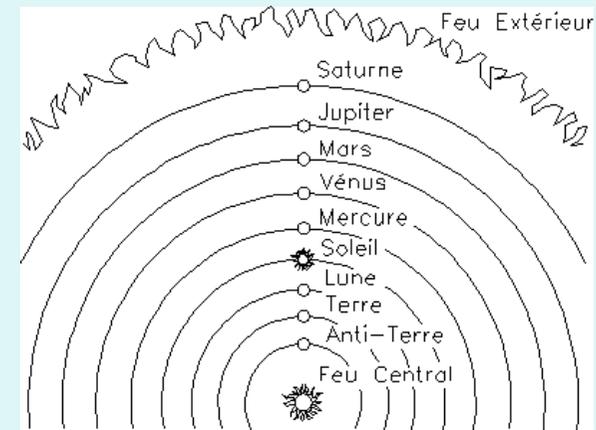
- ⌘ gnomon (cadran solaire)
- ⌘ clepsydre

-VI à -III : que d'idées...!

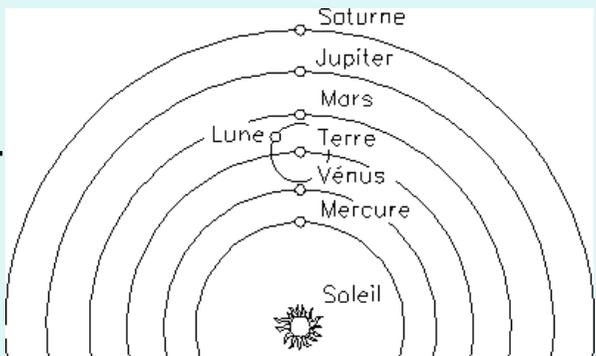
Anaximandre



Philolaos



Aristarque



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

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

Instruments :

- α bâton de Jacob
- α sphère armillaire

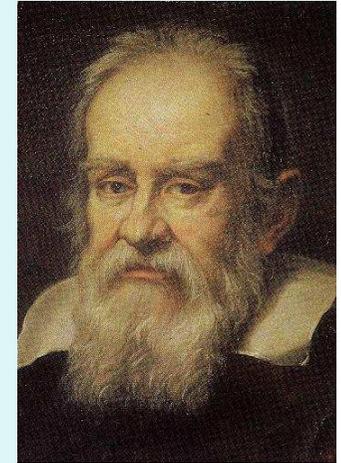
Du monde clos à l'univers infini



Une physique : Galilée

Une géométrie : Descartes

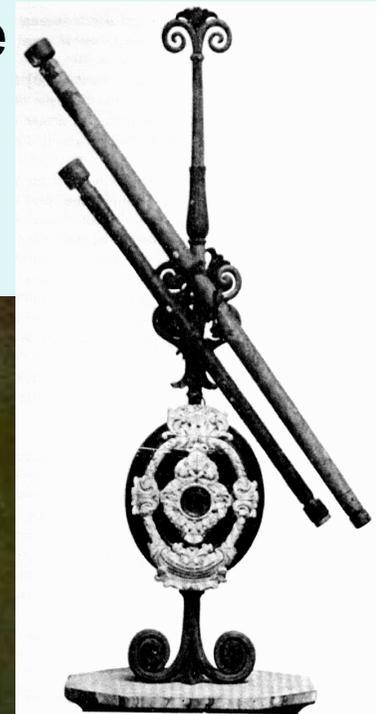
Le Soleil revient au centre du monde
(Copernic)



Observations fines de Tycho Brahé
invention de la lunette



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



La cosmologie newtonienne



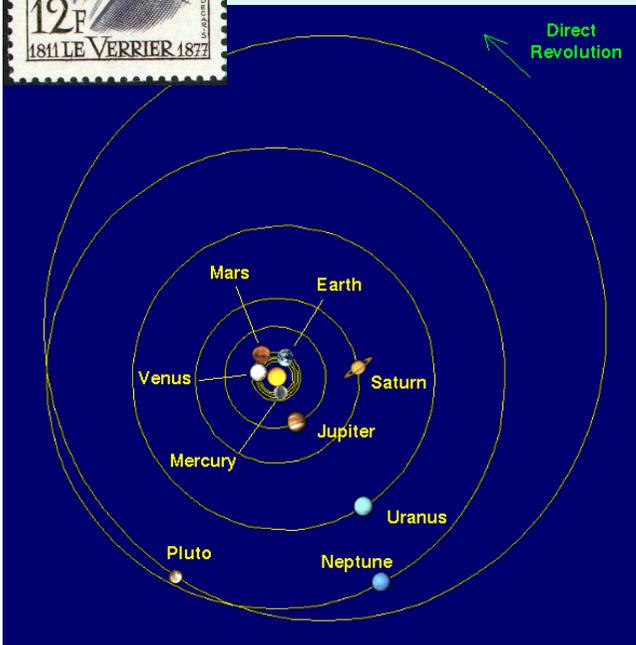
Les lois de la gravitation universelle (**Newton**)

Les succès de la mécanique céleste :

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



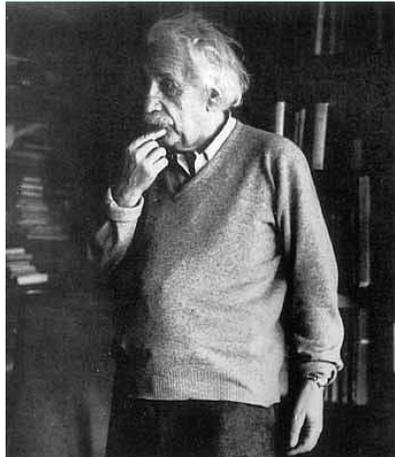
Observations : télescope à miroir
montres de précision



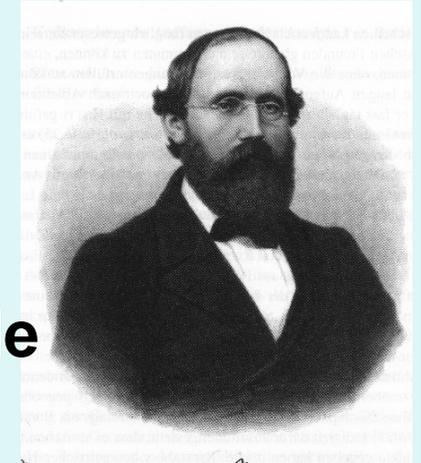
Naissance de la cosmologie newtonienne (**Kant,...**)

MAIS, Mercure...!

La cosmologie relativiste



Une physique : Einstein
Une géométrie : Riemann

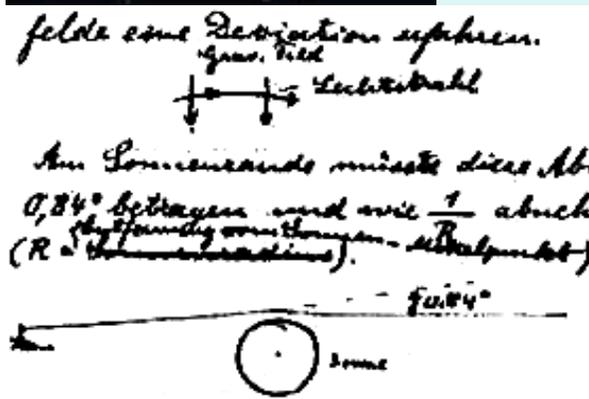


Formulation de la **relativité générale**
nombreux succès...



Premiers modèles cosmologiques:
statique ou en évolution ?

Modèle du big bang chaud



La cosmologie actuelle

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

EXPÉRIMENTALEMENT ET THÉORIQUEMENT

α Boom des observations, de la modélisation et des simulations

α 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

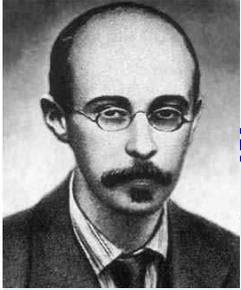
Une adéquation entre toutes les observations connues et le modèle cosmologique

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)

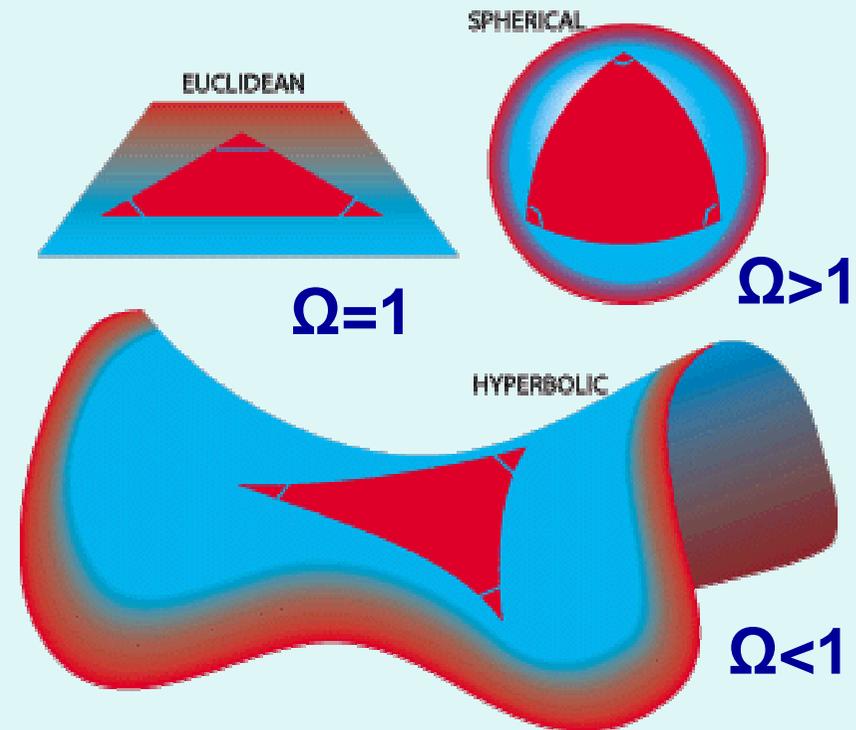
Les modèles de F.-L.

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

Géométrie de l'espace : trois possibilités, dépend du contenu total de matière dans l'univers (ρ).

ρ_{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 :

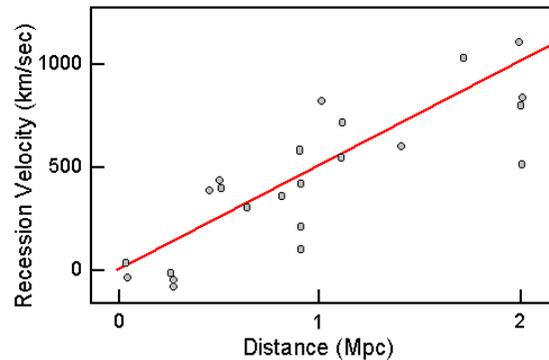
L'expansion de l'univers,

La nucléosynthèse primordiale,

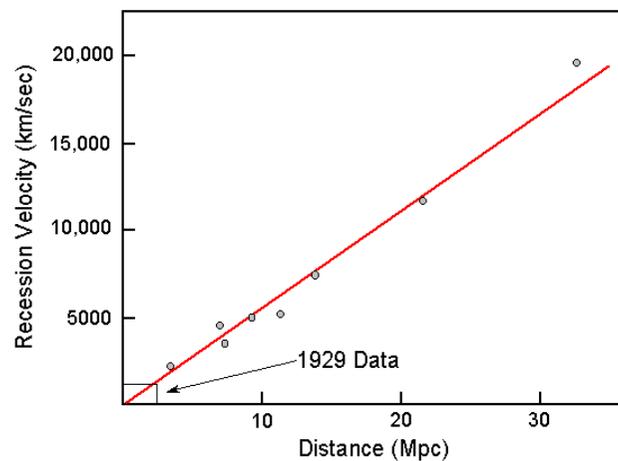
L'existence d'un fond diffus électromagnétique

L'expansion de l'univers

Hubble's Data (1929)

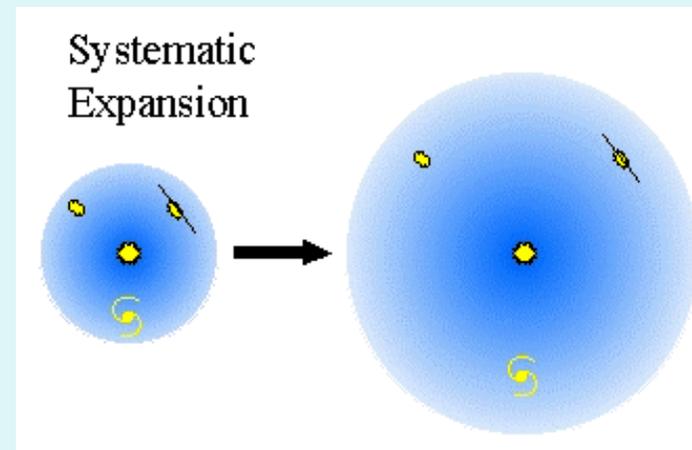


Hubble & Humason (1931)



Les hypothèses de Friedmann et Lemaître impliquent que

l'univers est en expansion

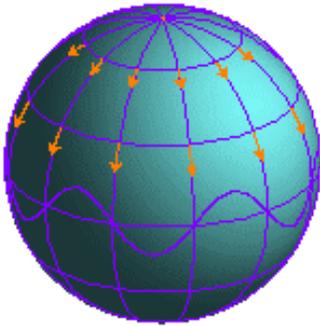


Cela sera vérifié en 1929 par Edwin Hubble



Le décalage vers le rouge

Facteur d'échelle : $a(t)$



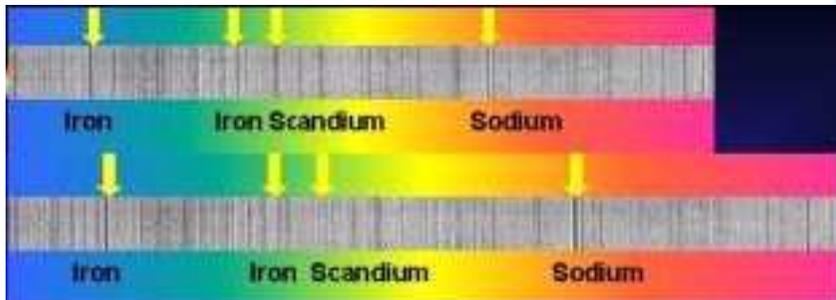
Les distances croissent comme a

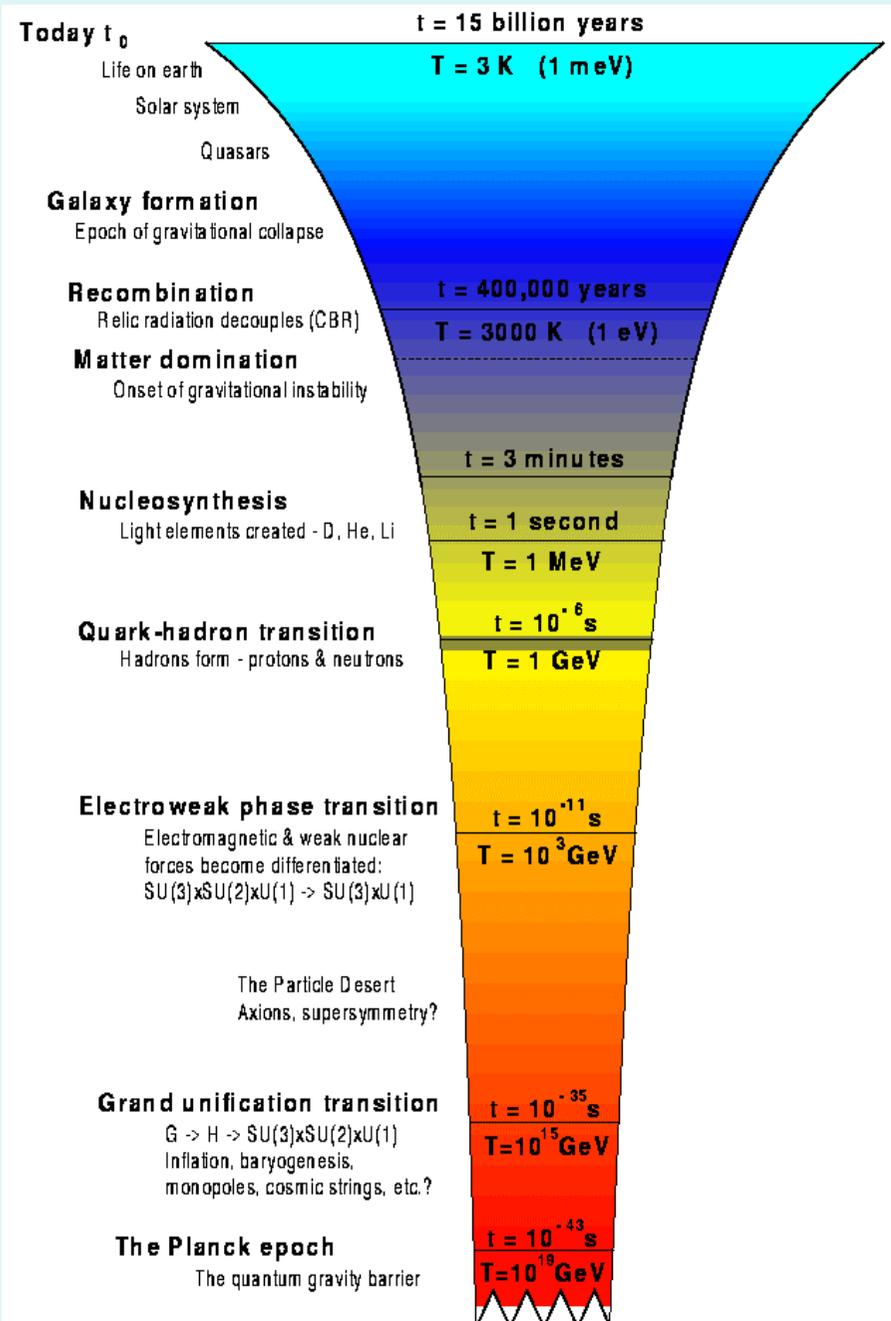
Les fréquences diminuent comme $1/a$

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

« $a=0$ »

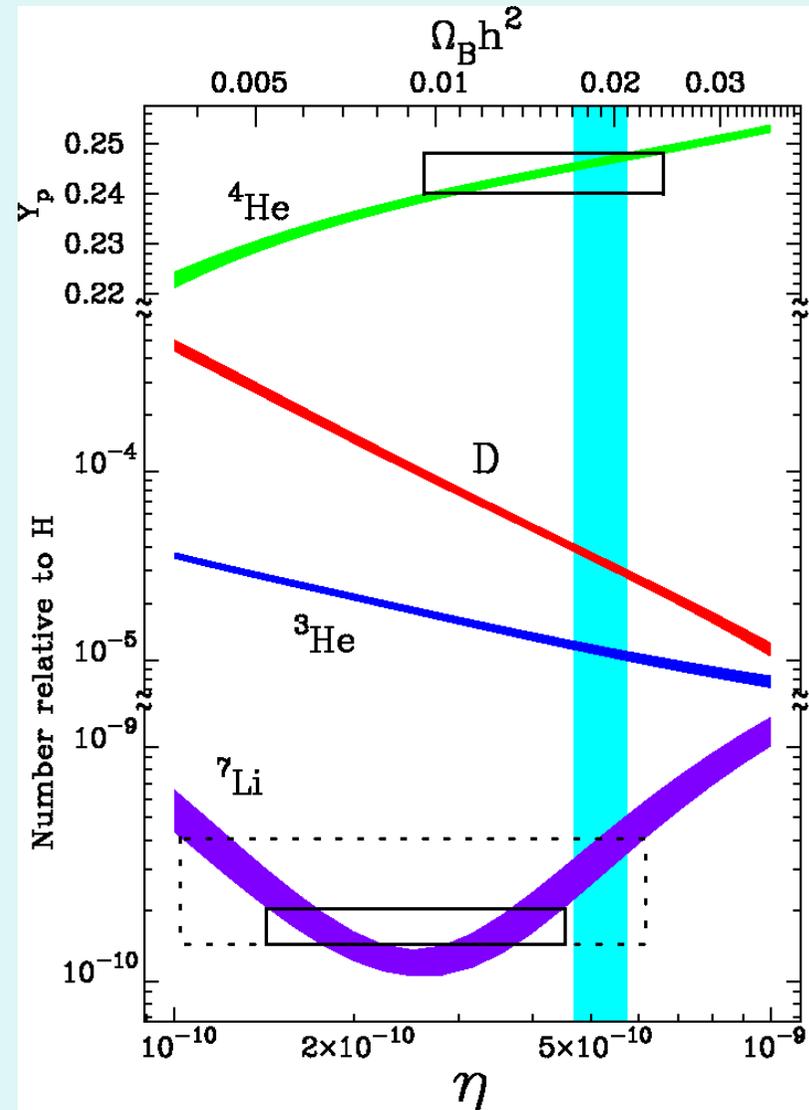
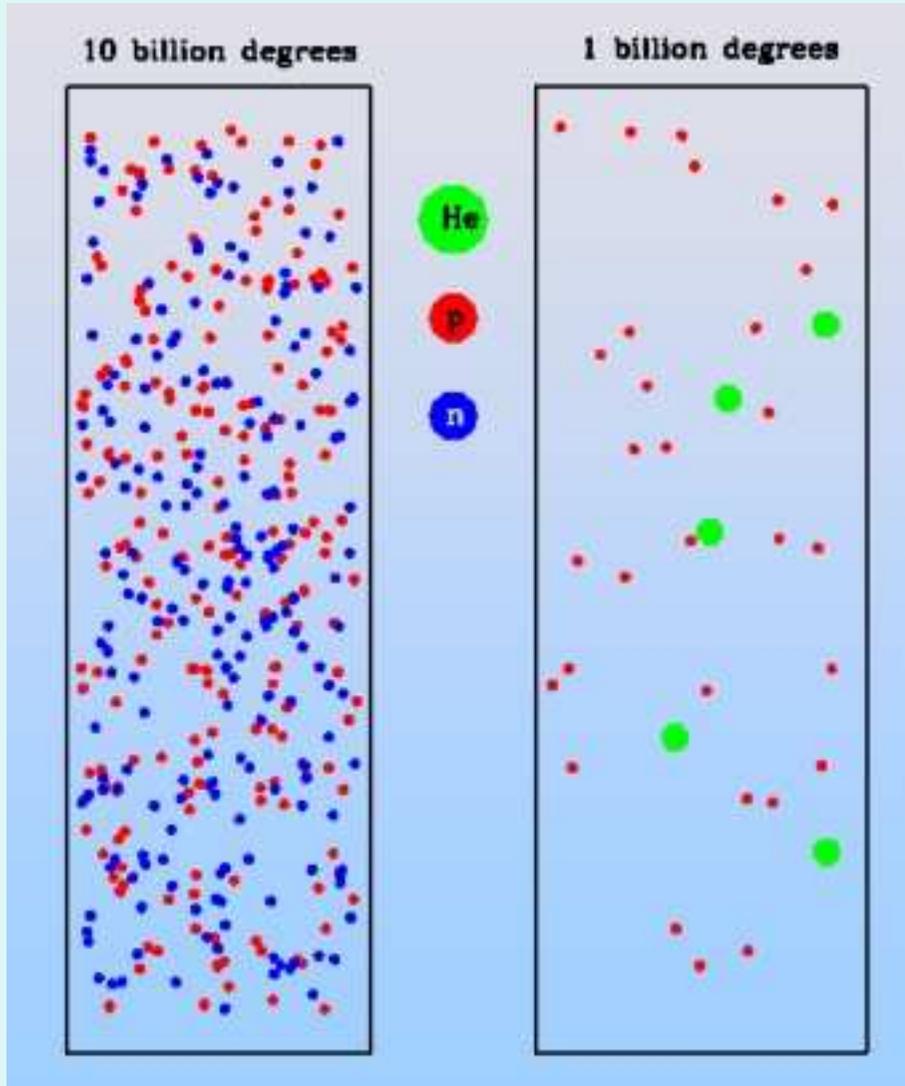
L'univers a une *histoire thermique* (Gamow, Herman, Alpher) :

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

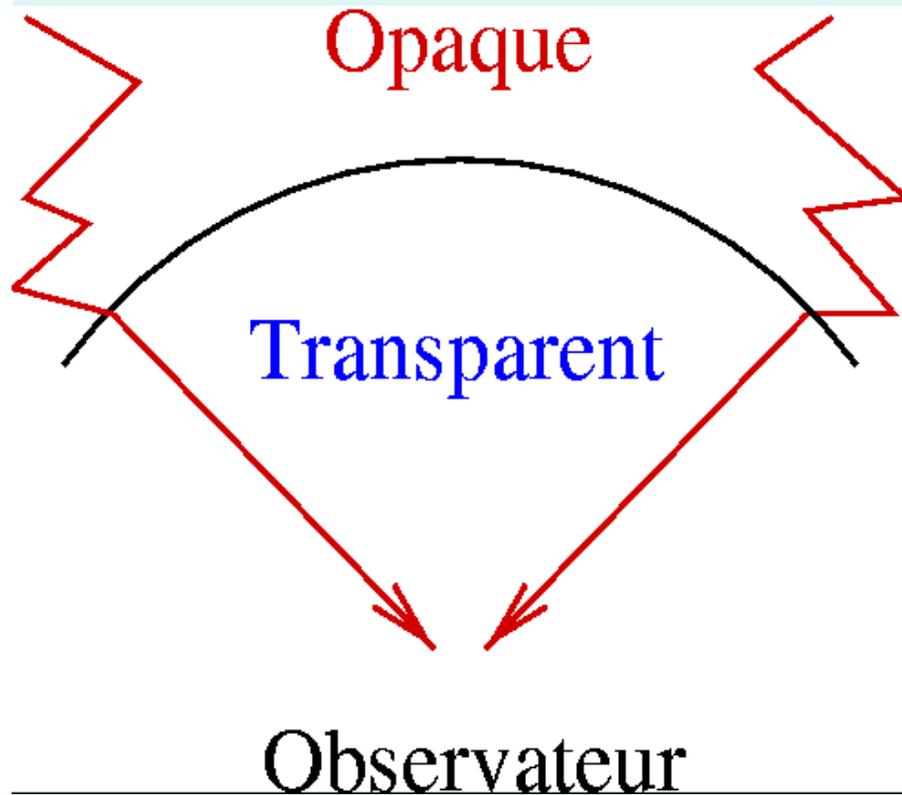
Conclusions ne dépendant que de

- * l'expansion
- * physique nucléaire et atomique

La nucléosynthèse primordiale



Le fond diffus cosmologique



411 photons/cm³,
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

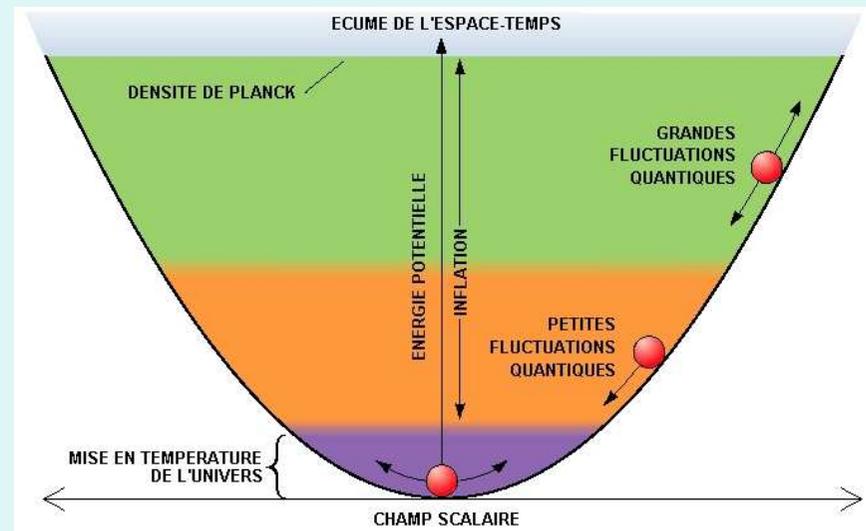
Où on se rend compte que tous les problèmes peuvent se résoudre d'un seul coup !

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

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

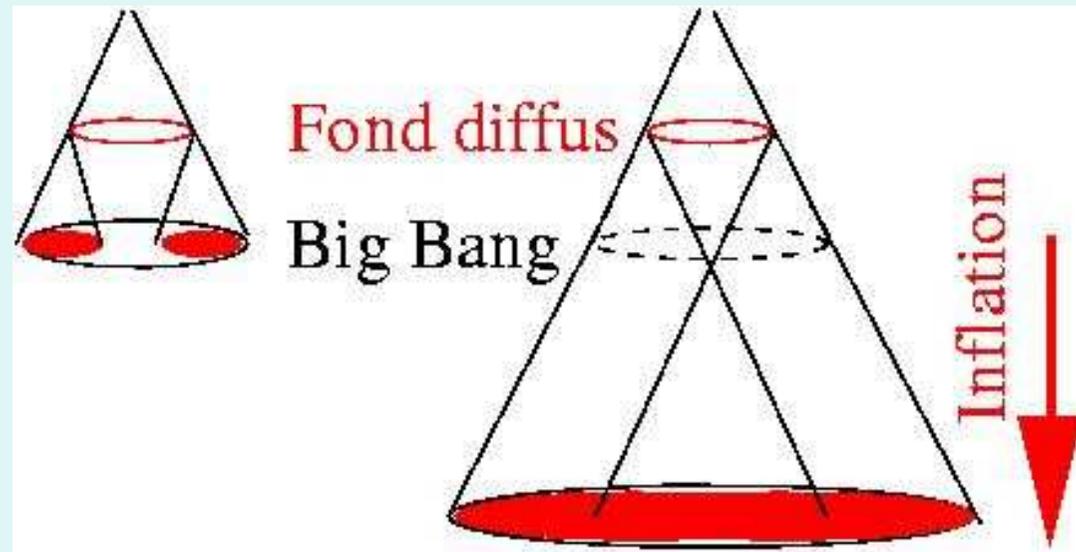
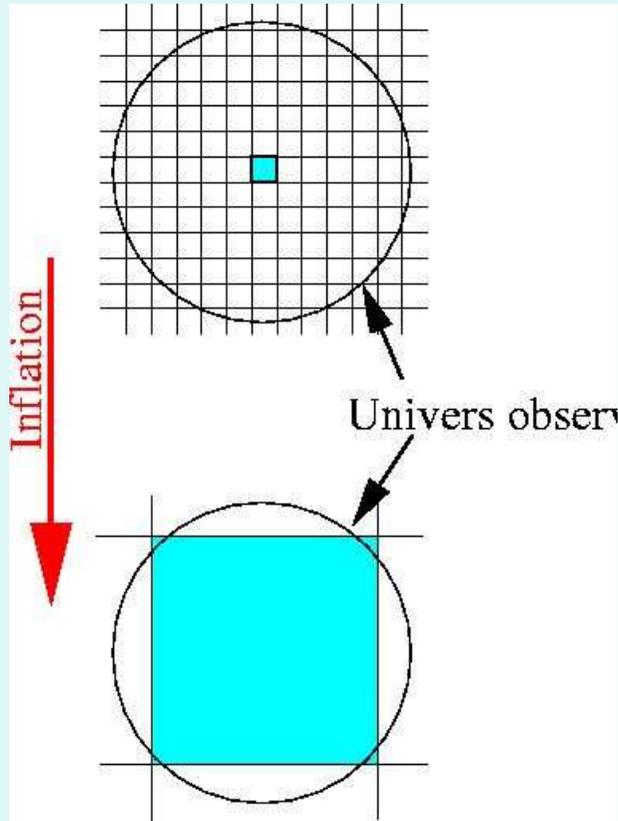


L'expansion de l'univers est **exponentielle**,

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

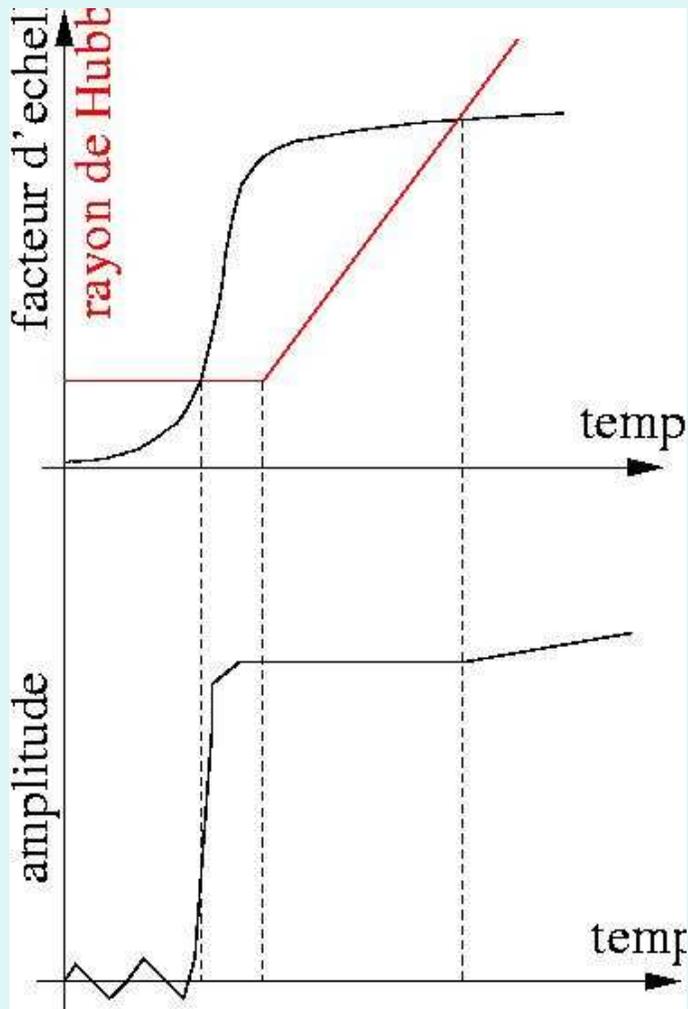
Résolution des problèmes

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

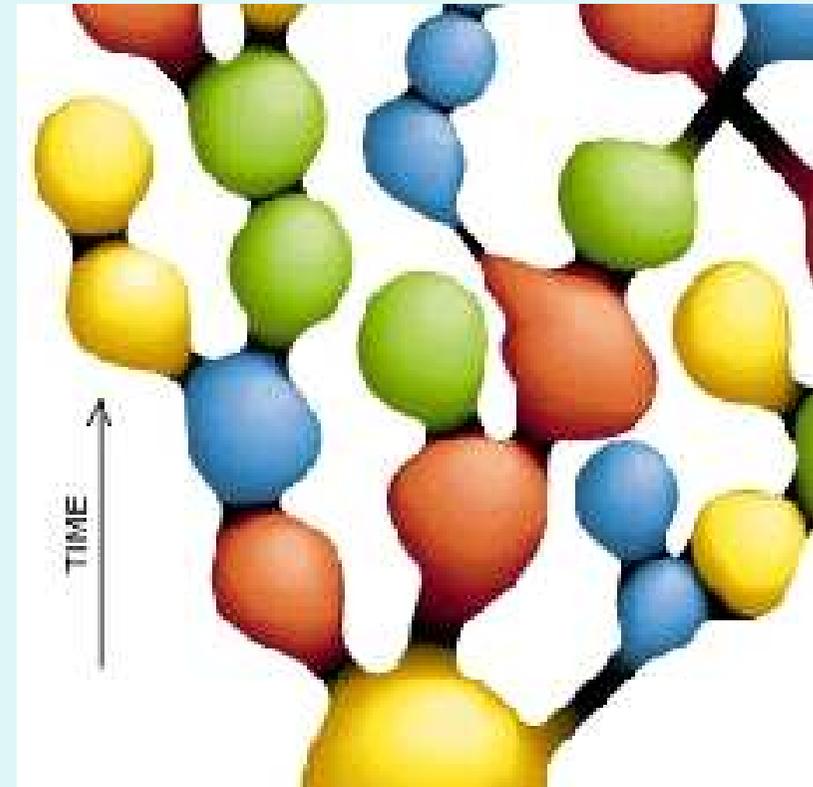
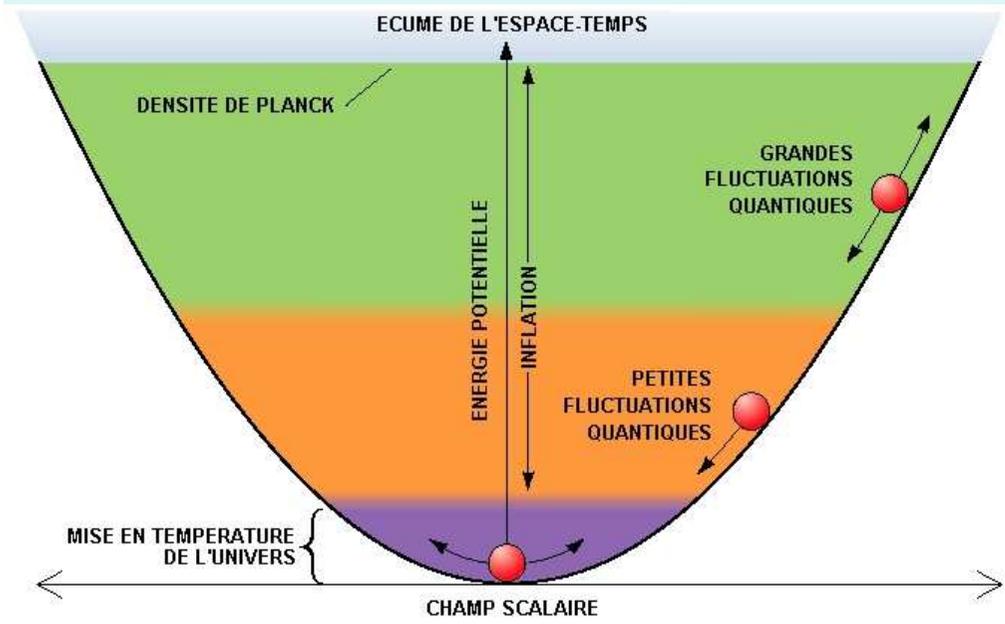


L'inflaton a des fluctuations quantiques
∝ amplifiées et étirées à des échelles cosmologiques
∝ spectre et amplitude dépendent du modèle

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.

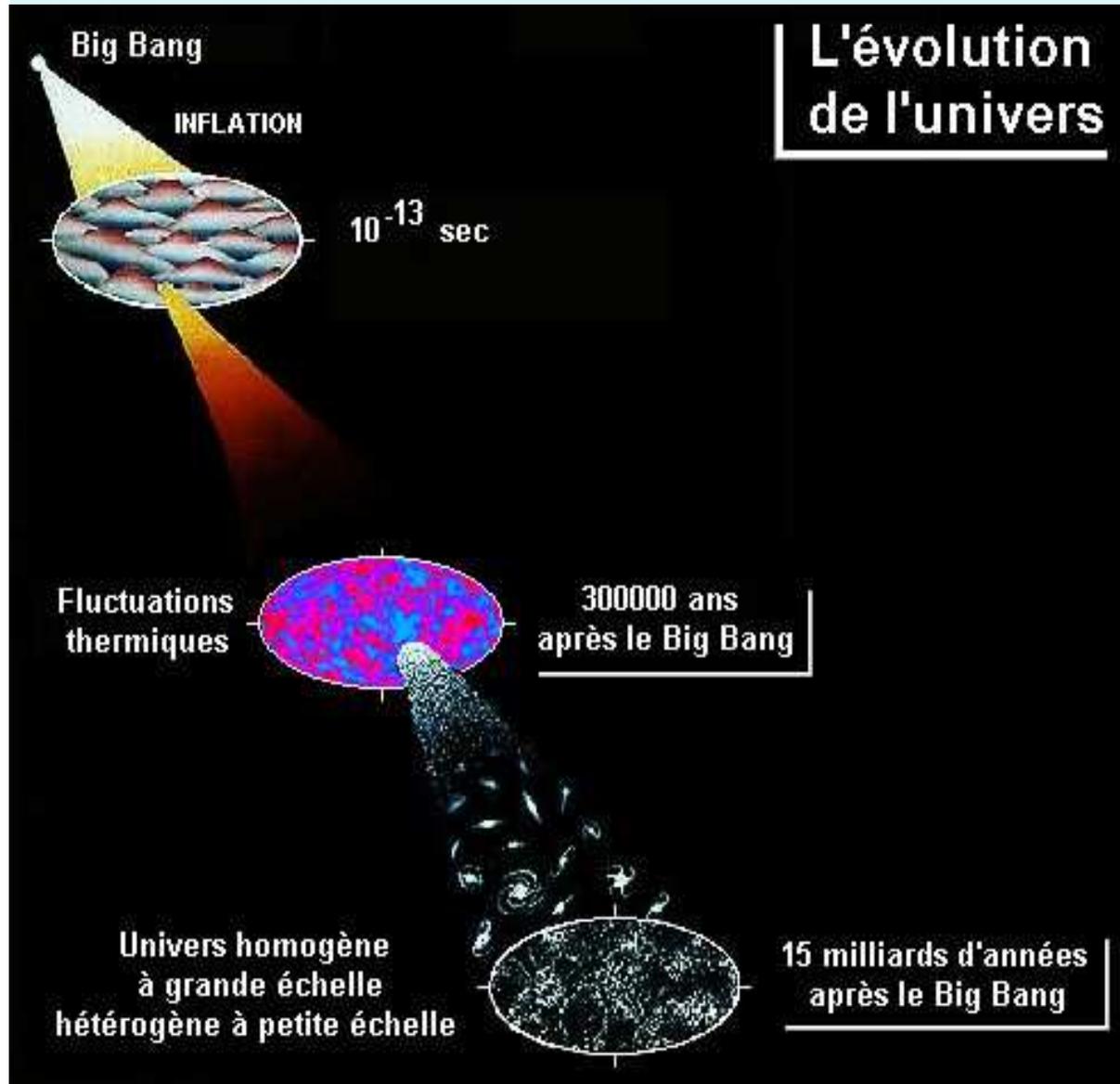
Grandes structures ont une origine quantique

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?

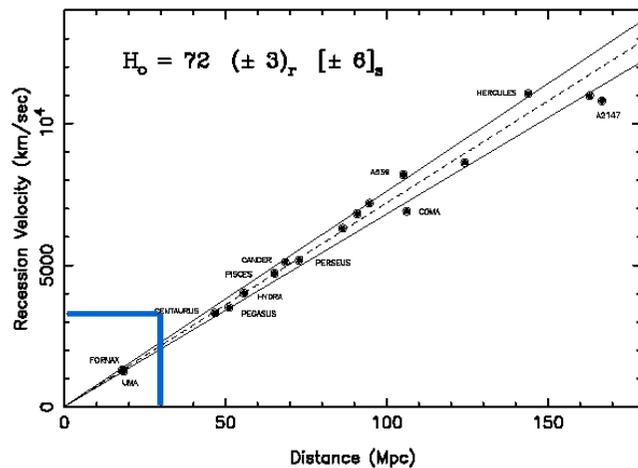
Nécessité de **combiner** diverses observables

Le Big Bang face aux observations

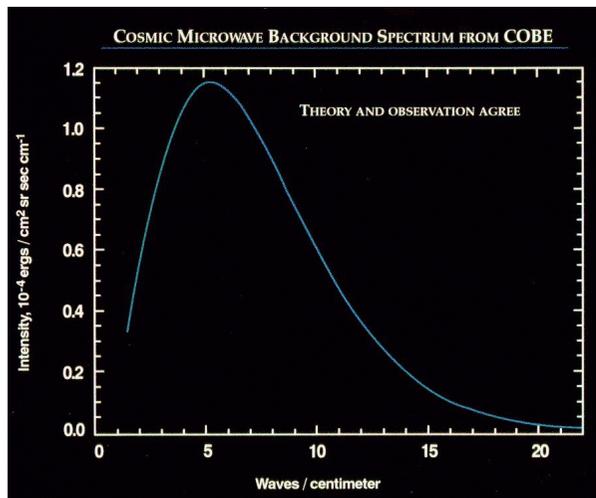
Comment teste t'on le modèle du big-bang et le scénario de l'inflation ?

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 :

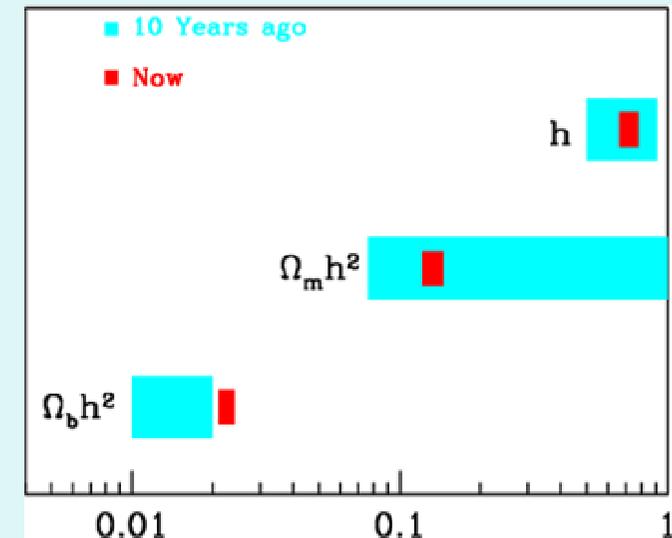
photons $\Omega \sim 5 \cdot 10^{-5}$

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**)

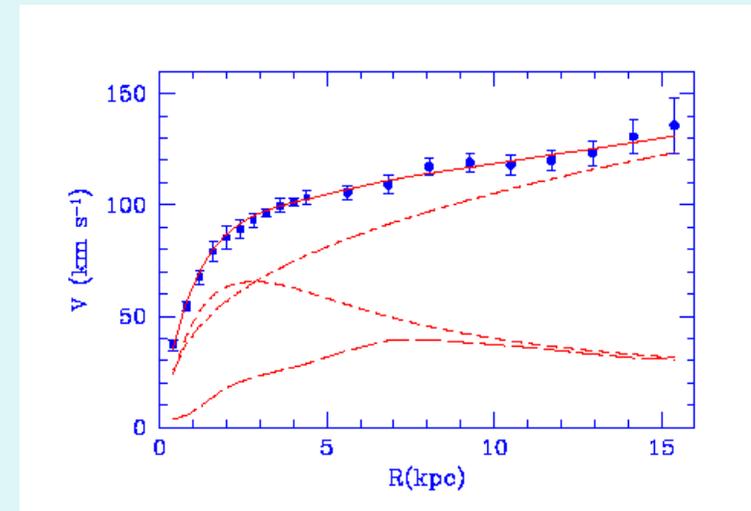
Nucléosynthèse : sensible au rapport entre la densité de radiation et de baryon : mesure de la densité baryonique.

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 ?

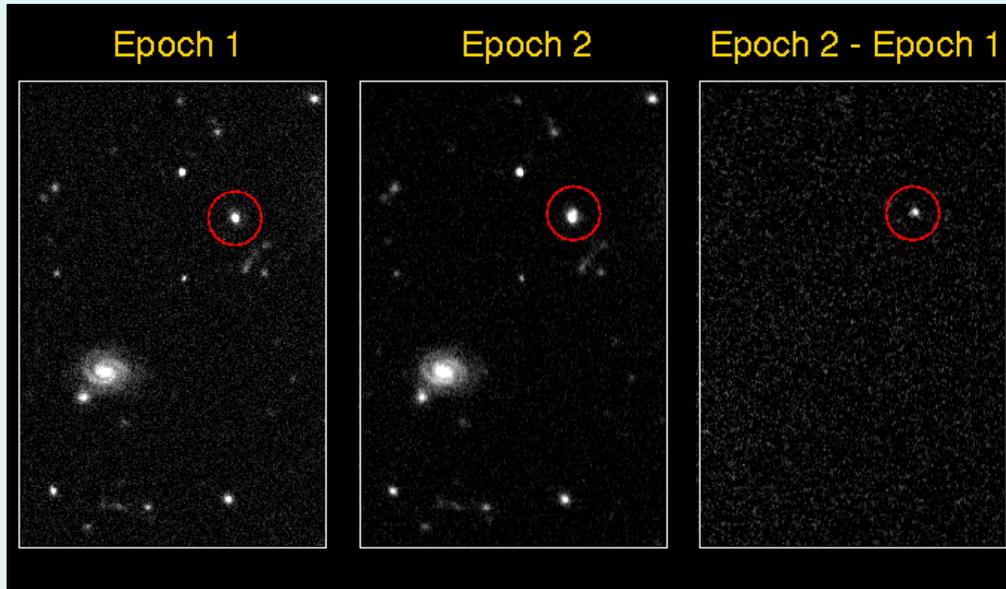
La physique des particules propose de **nombreux candidats** :
particules supersymétrique (neutralino...)
axions
neutrinos massifs...

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

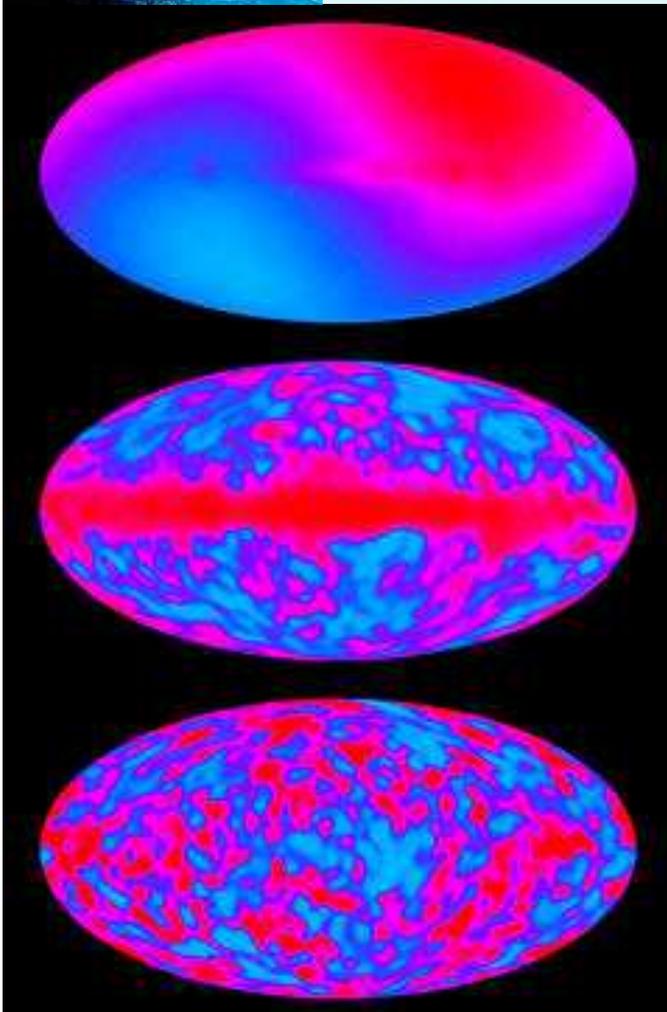
Résolution ~ 7 deg.

Confirme les mesures terrestres,
Mesure du spectre,

Met en évidence l'existence de
fluctuations de température

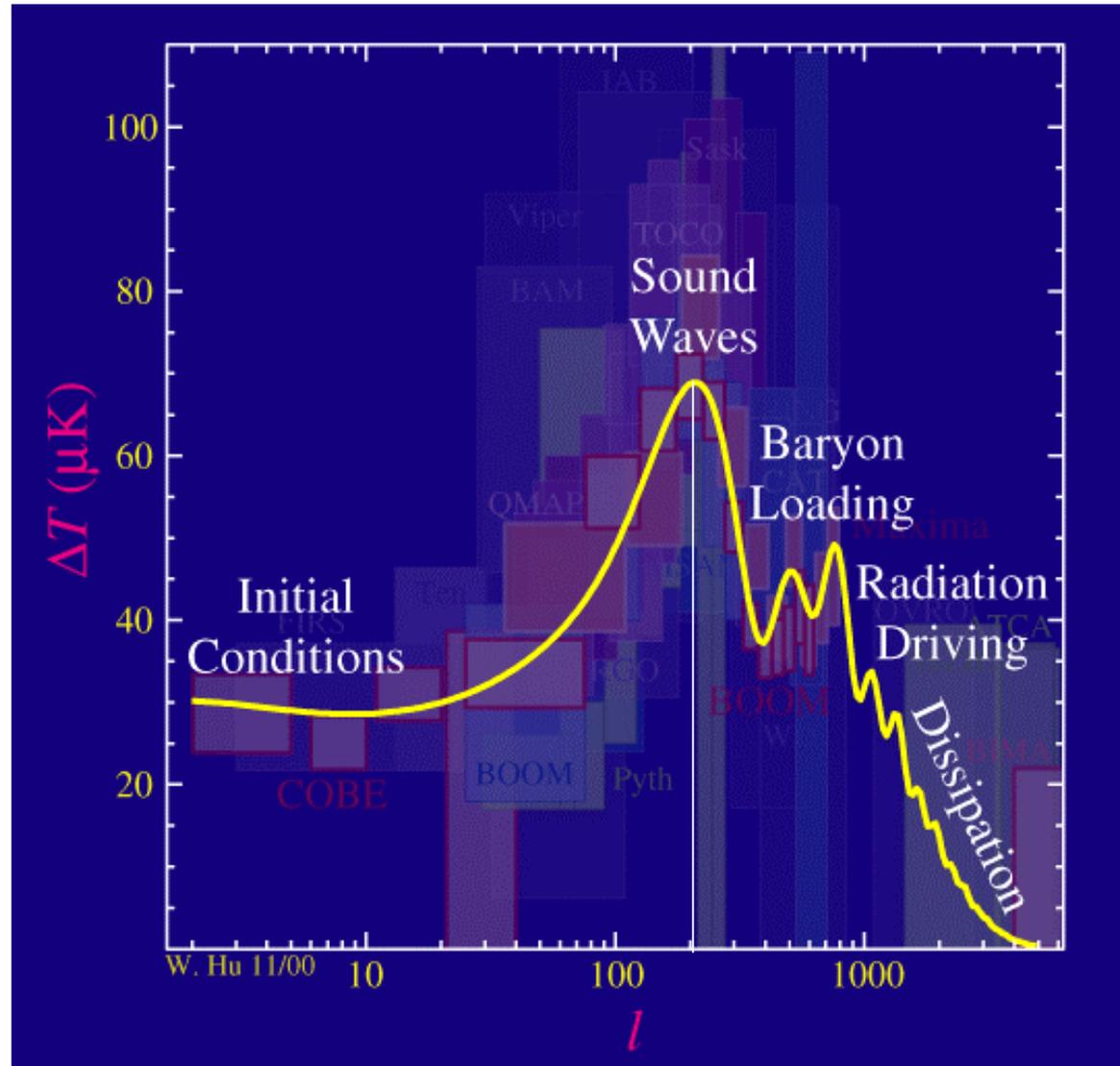
Preuve de l'existence de fluctuations
primordiales

Spectre en accord avec l'inflation....



Prédiction de l'inflation

Amplitude des fluctuations de température



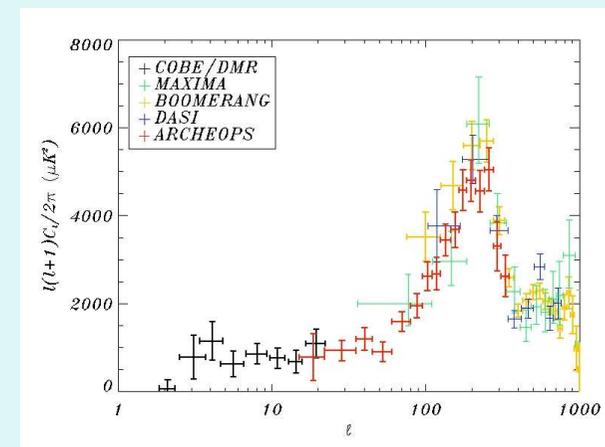
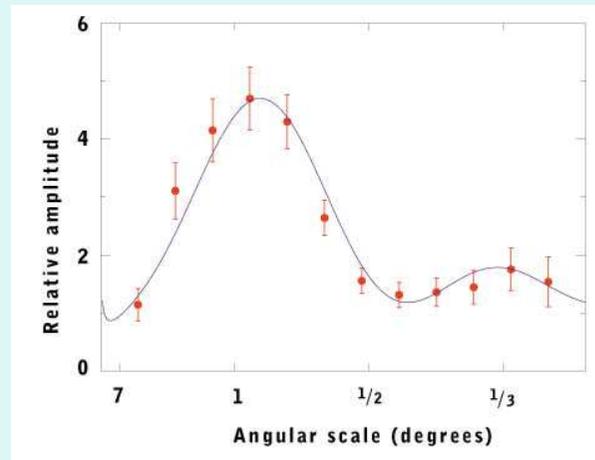
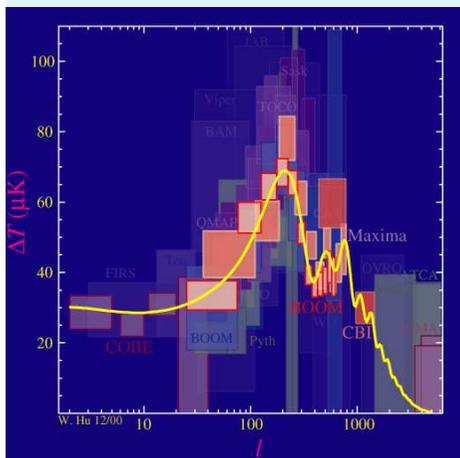
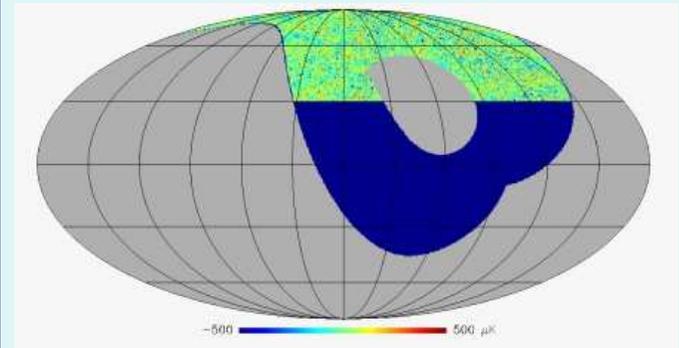
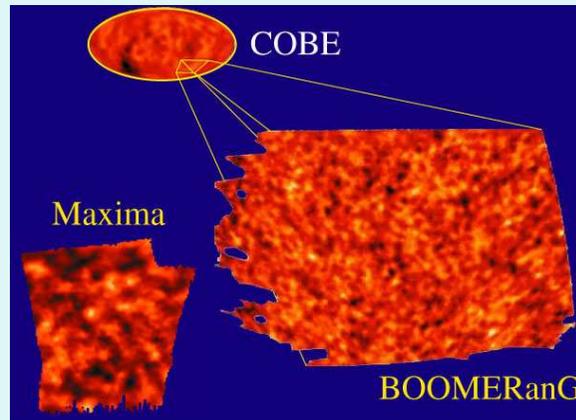
Échelle angulaire

Evolution technologique rapide

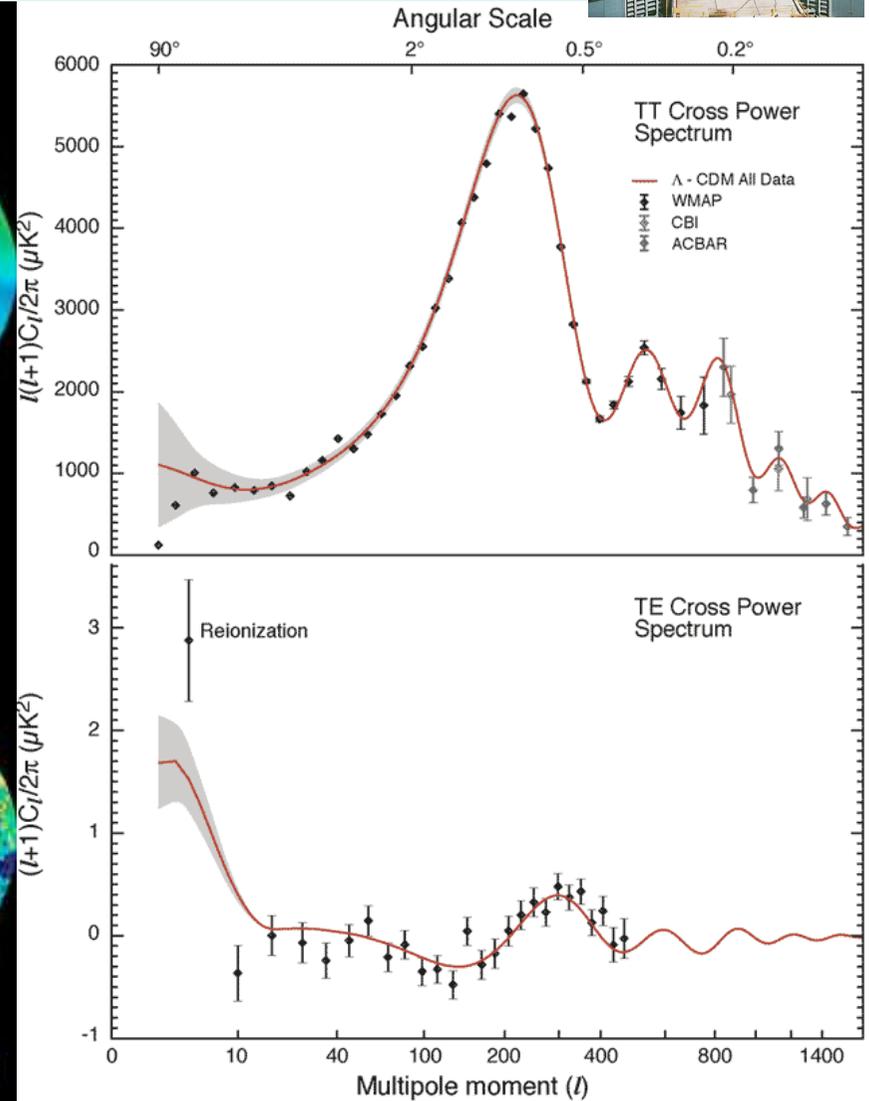
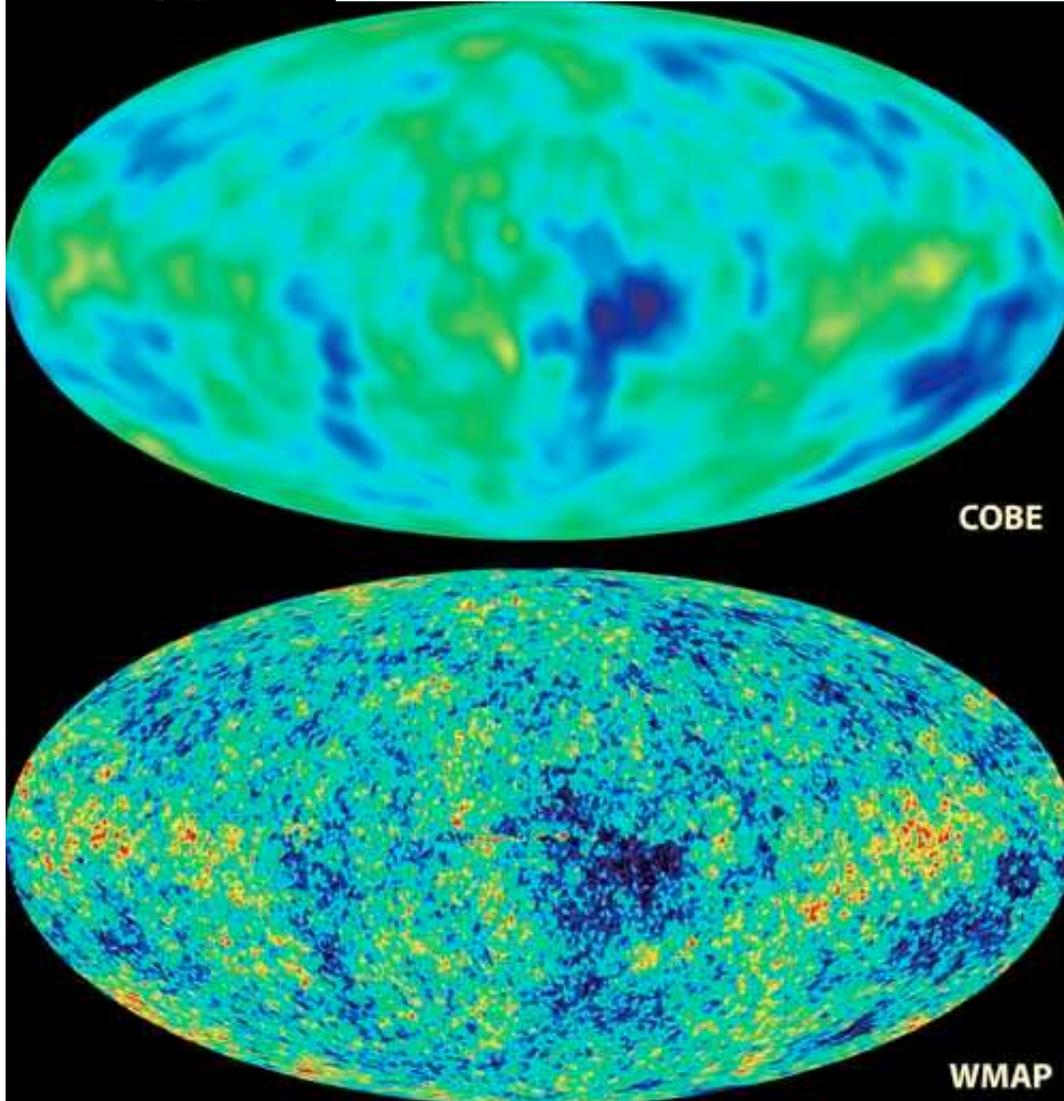
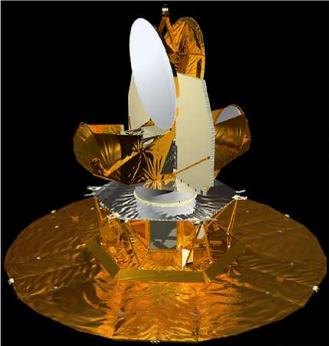
<1998 : nombreux ballons et observations sol.

1998: Boomerang
Maxima

2002: Archeops



2003 : WMAP



Conclusions du FDC

Physique linéaire - Matière noire nécessaire !!!

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

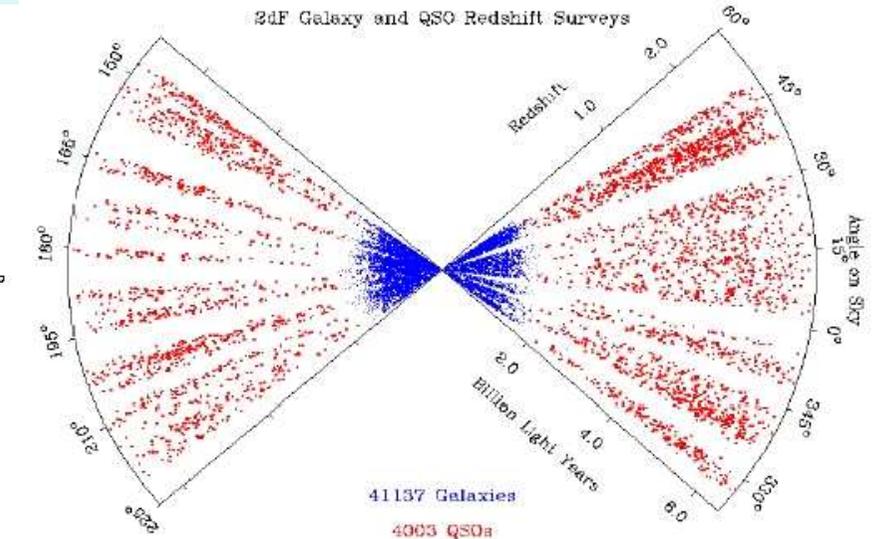
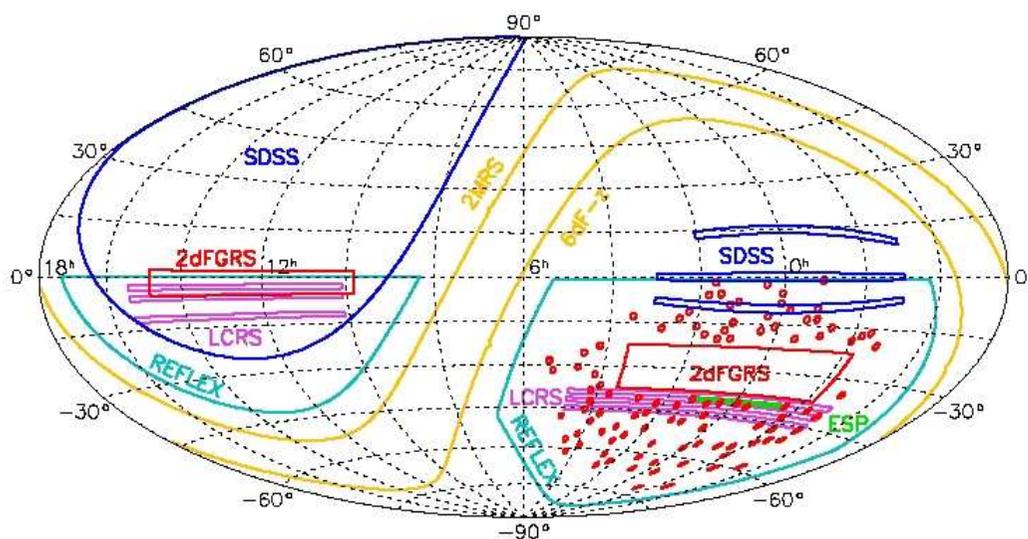
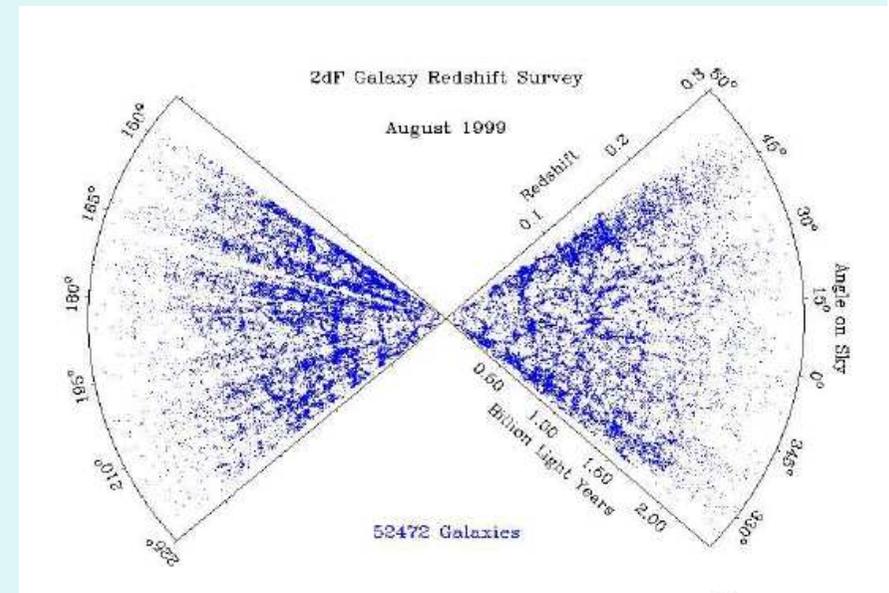
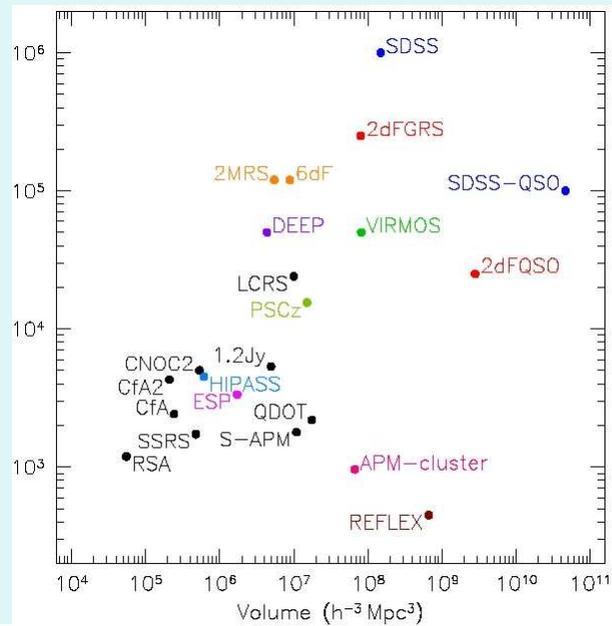
Inflation : fluctuations de densité seules
bon accord (spectre...)

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

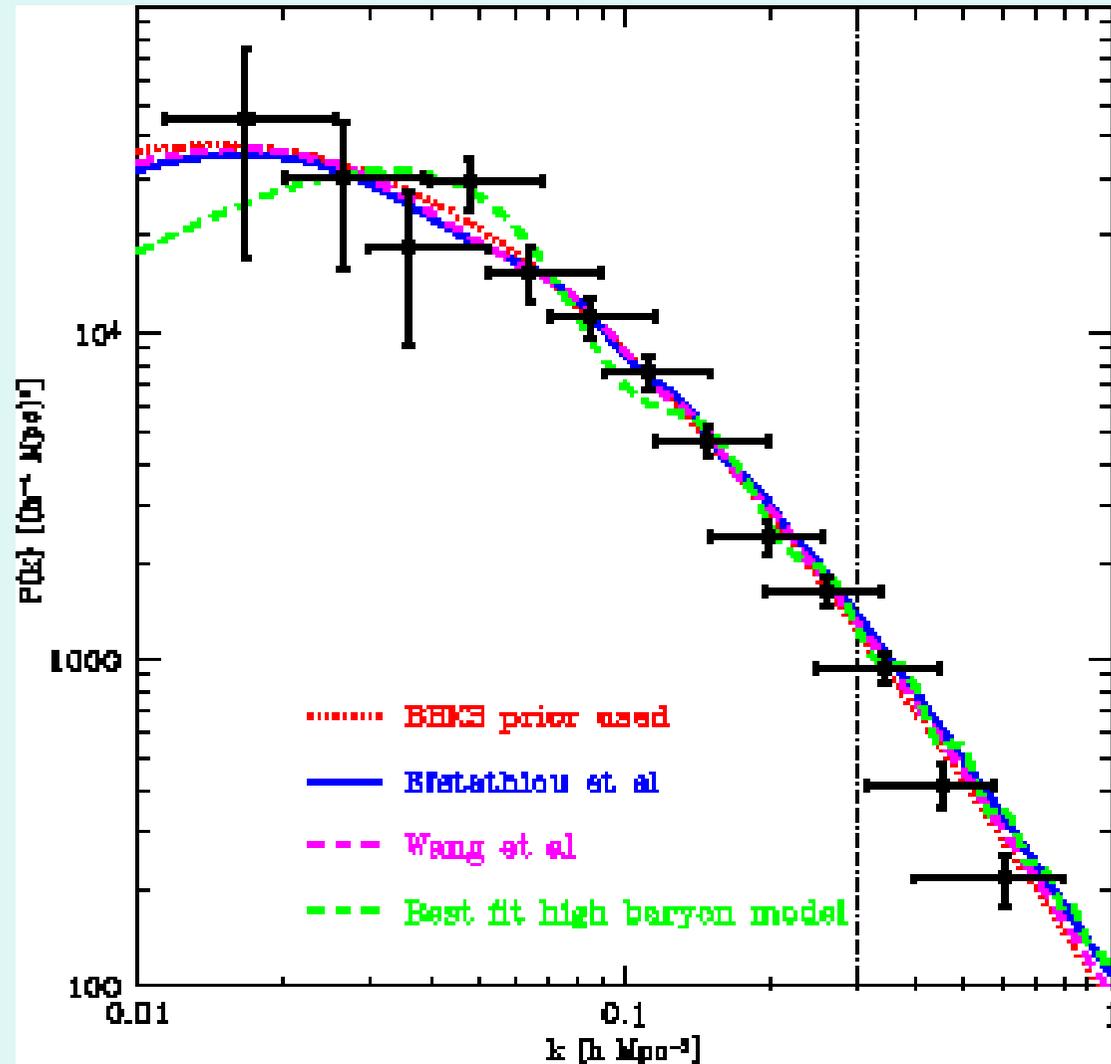
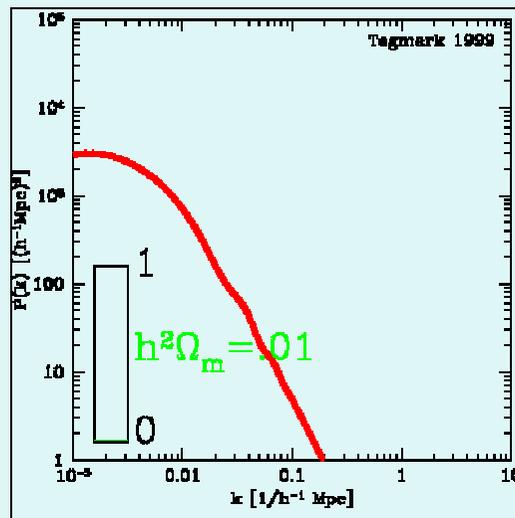
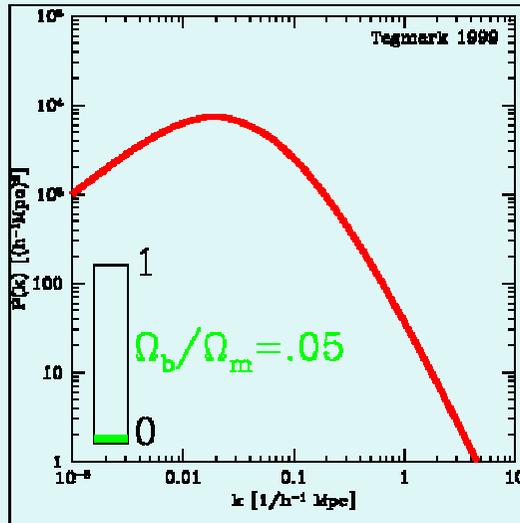
Quadrupole : nouvelle physique à grande échelle ?

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

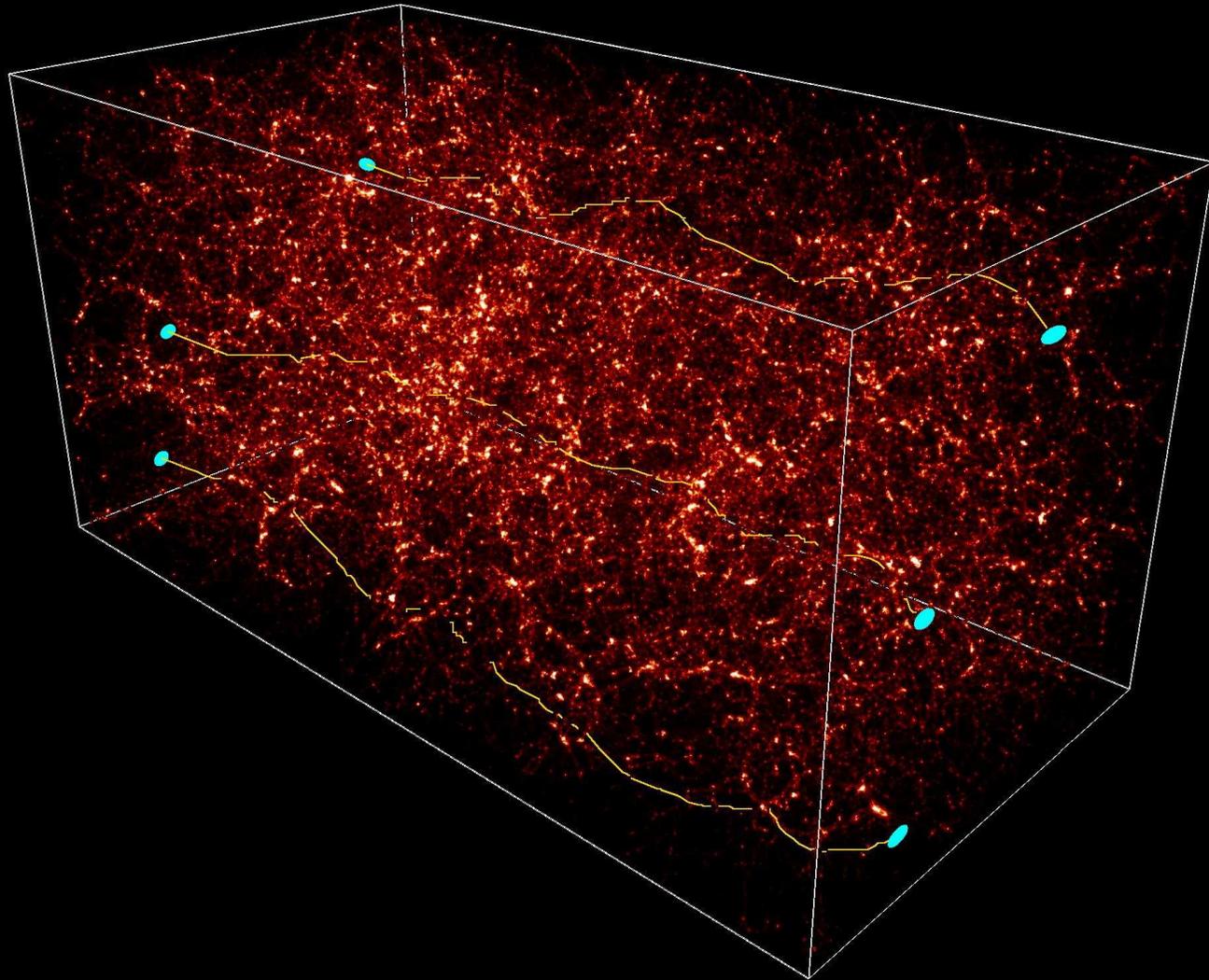
Evidence pour la matière noire

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

