

The background of the slide is a reproduction of the painting 'The Starry Night' by the Dutch Impressionist painter J.M.W. Turner. The painting depicts a night scene with a turbulent, swirling sky filled with stars and a crescent moon. In the foreground, a dark, jagged cypress tree stands on the left, and a small village with a prominent church spire is visible in the distance. The overall color palette is dominated by deep blues, purples, and yellows.

# Lumières sur l'Univers

A.Ealet

12/04/2014

# Reconstruire l'histoire de l'Univers

- Premiers pas dans l'Univers
  - De la Terre aux galaxies
  - Des galaxies aux grandes structures de l'Univers
- Comprendre les structures
- L'histoire de l'Univers
- Où cosmologie et physique des particules se rejoignent

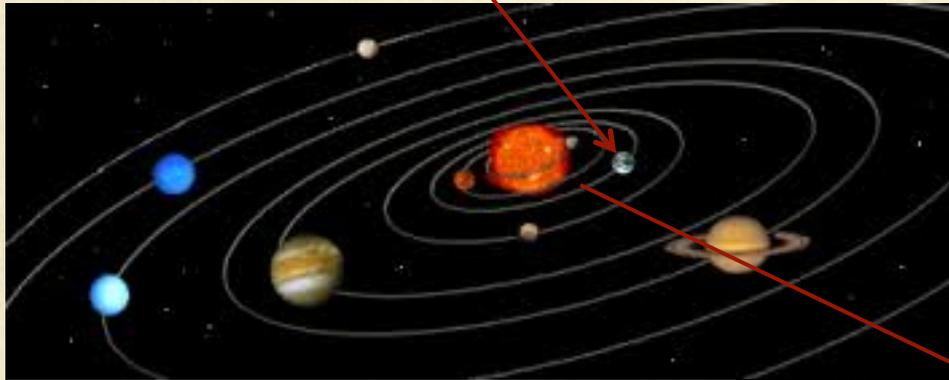


# Quelques distances



La Terre  
 $D \sim 13\,000\text{ km}$   
Soit  $1,3 \cdot 10^7\text{ m}$   
Terre-Lune  $1,2\text{ s}$

1 année lumière =  $10^{16}\text{ m}$   
(10 000 milliards de km)  
1 parsec  $\sim 3 \cdot 10^{16}\text{ m}$



Le système solaire  $\sim 10^{13}\text{ m}$   
Taille  $\sim 5\text{ h } 30\text{ s}$   
Terre-soleil  $8\text{ mn } 20\text{ s}$

Les plus proches étoiles  $4 \cdot 10^{16}\text{ m}$   
 $\sim 4\text{ années lumière}$

La voie lactée  
 $\sim 10\text{ kpc}$   
 $\sim 100\,000\text{ années lumière}$





Groupe de galaxies local de la voie lactée

M 110

NGC 147

NGC 185

La plus proche galaxie  
Andromède  $\sim 1$  Mpc  
2,5 millions d'années lumière

Andromeda

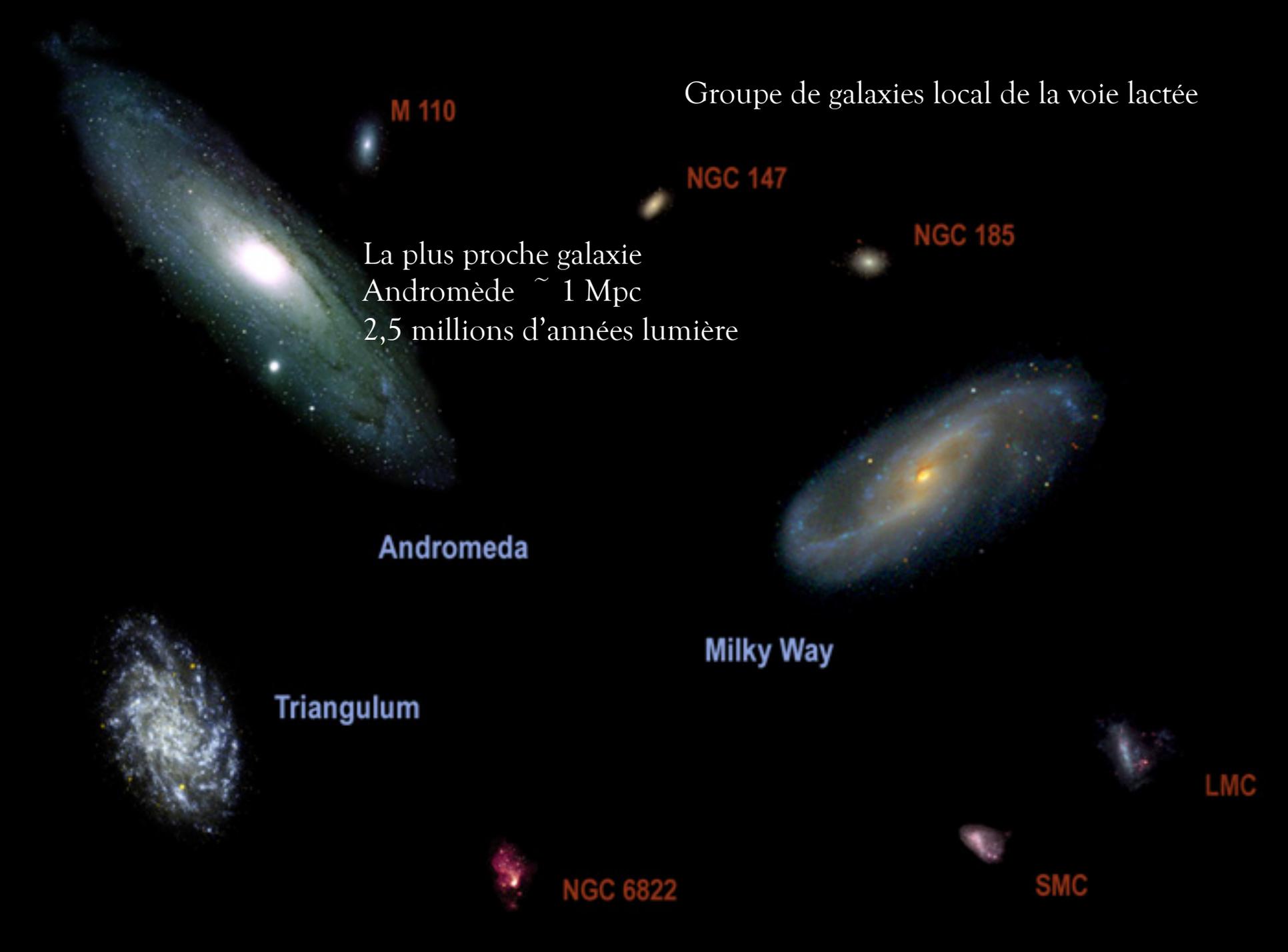
Milky Way

Triangulum

LMC

NGC 6822

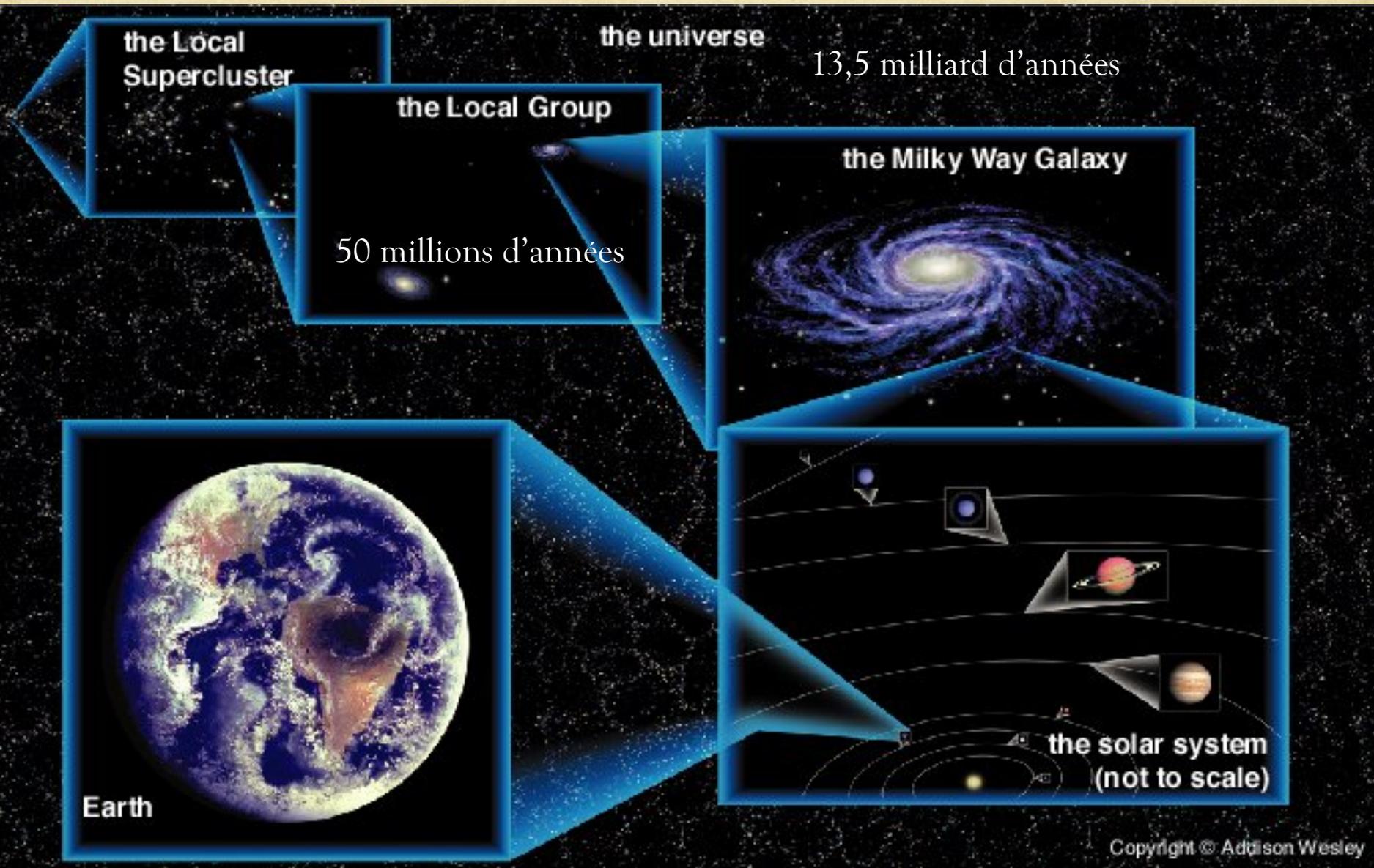
SMC





Le groupe local est dans un grand amas

L'amas de la vierge



Chaque petit point est une galaxie... taille totale 13,5 milliard d'années

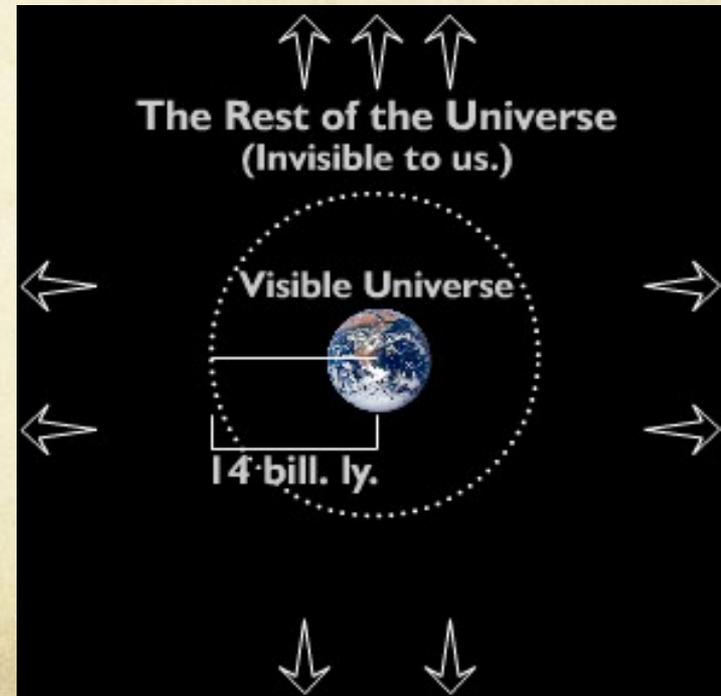
*Finally we are just a speck in the middle of billions of galaxies !!!*

○ L'univers observable ...c'est très vaste ...

Nb: observable= distance maximale que peut parcourir un photon (la lumière) créé au début de l'Univers . On l'appelle l'horizon

- Comment on l'observe ?
- Que voit on ?
- Comment on s'en sert pour reconstruire l'histoire de l'Univers

○ Et l'inobservable?

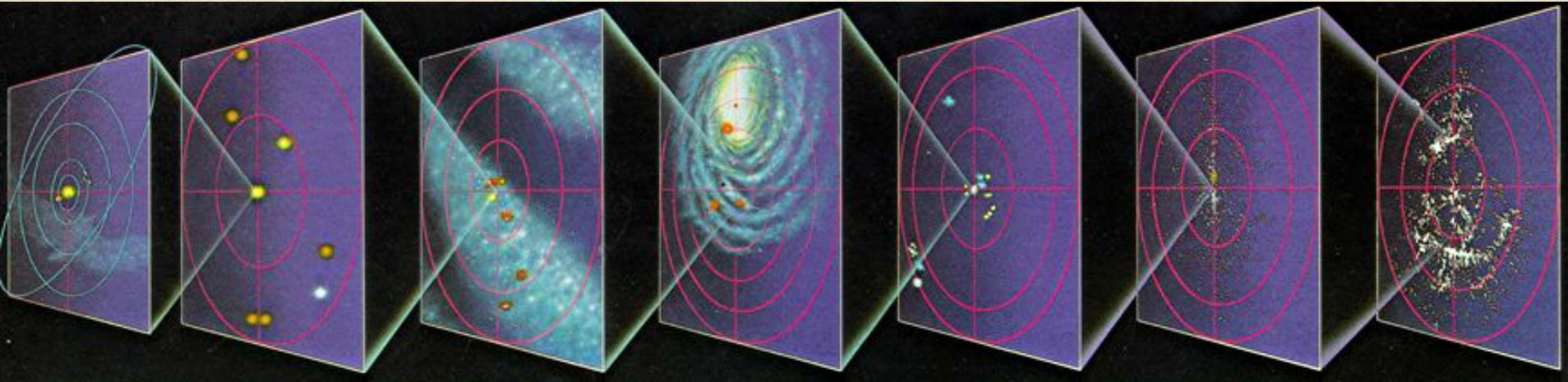


# Où en sommes nous?

*La cosmologie progresse*



# Vers les grandes structures...



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

En cosmologie on fait une carte de toutes les galaxies pour comprendre l'histoire de l'Univers.

# Les premiers catalogues



## Messier:

- ★ Chercheur de comètes
- ★ 1781: publie un catalogue de 110 objets nébuleux:
  - objets non stellaires (flous dans un télescope) inexpliqués à l'époque
  - On sait aujourd'hui que ce sont des galaxies, des amas ou des nuages de gaz



## Herschel: entre 1782 et 1802:

- ★ Recherche systématique
- ★ Plus de 2500 nébuleuses publiées dans 3 catalogues
- ★ Ce catalogue sera plus tard étendu et formera le NGC (new General Catalog)

# Un peu d'histoire



1924 : Hubble démontre que les « nébuleuses » sont le plus souvent des objets très étendus rassemblant des milliards d'étoiles, les Galaxies

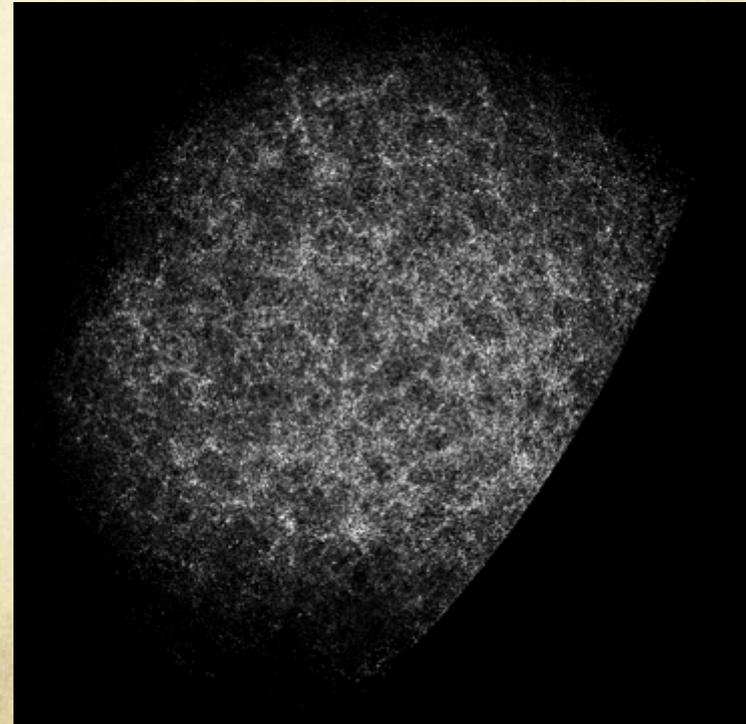
- Années 30 : Controverses âpres pour savoir si les galaxies sont ou non rassemblées en amas → premiers catalogues (Shapley, Zwicky...)
- Difficultés pour savoir si une galaxie donnée appartient ou non à un amas donné (effets de projection, pas de bord net...). Toutes les galaxies n'appartiennent pas à un amas (la moitié ?)
- Difficultés pour avoir une image en 3 dimensions de la répartition (il faut de la spectroscopie et il faut bien plus de temps pour avoir un spectre qu'une image)
- Difficultés pour enregistrer des milliers d'objets (il faut les progrès de la photographie, de la sensibilité des détecteurs, la taille des télescopes, etc..)

Les 3 derniers points ne commenceront à être résolus que dans les années 80 jusqu'à maintenant!

# 1970-1980: Mesures 2 D ..

En 1967, Shane & Wirtanen publient le catalogue dans lequel ils indiquent la position d'un million de galaxies repérées (à l'oeil) sur les plaques photographiques de l'observatoire Lick

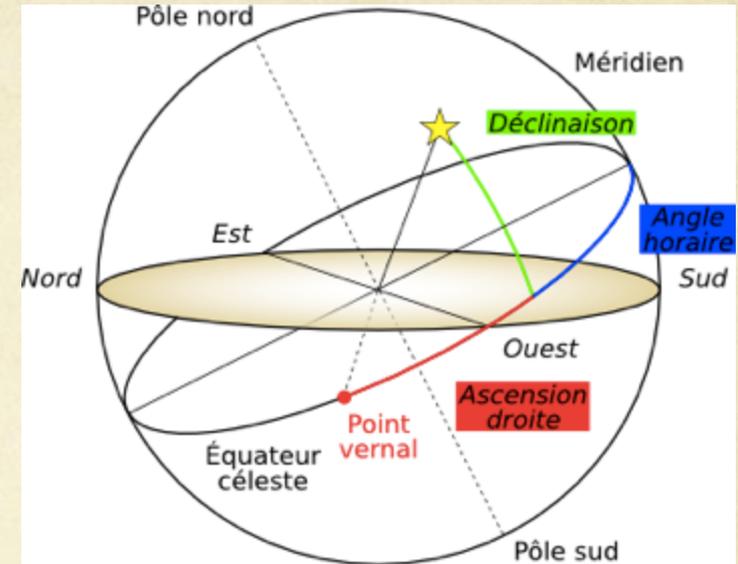
- Ce sera la base des premières études statistiques (Peebles, etc.)
- Par la suite, automatisation de l'identification des galaxies sur des plaques de Schmidt



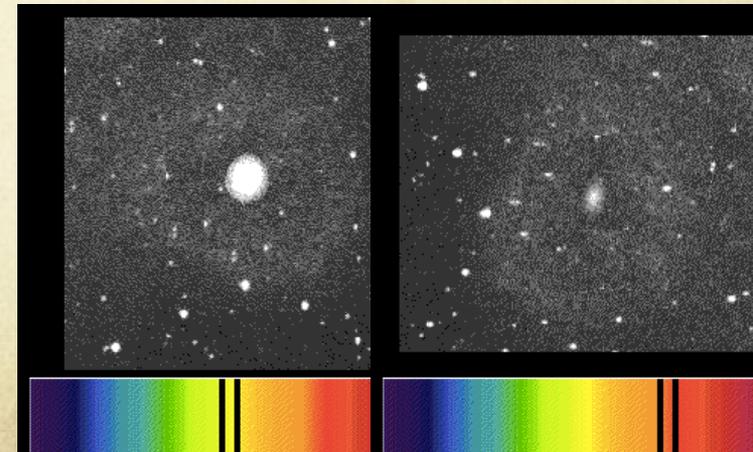
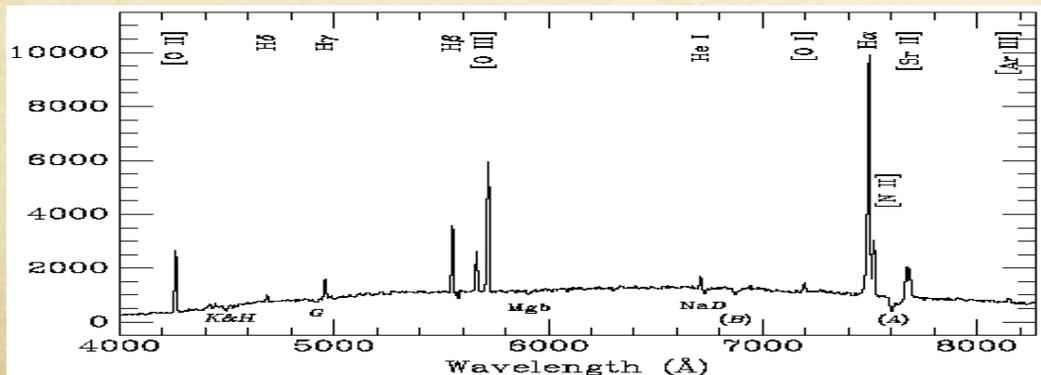
# Mesures 3 D

On se repère sur une sphère par la direction ( $\alpha$ ,  $\delta$ ) et distance

- $\alpha$  = ascension droite
- $\delta$  = déclinaison
- $z$  = le décalage vers le rouge (pas exactement une distance)

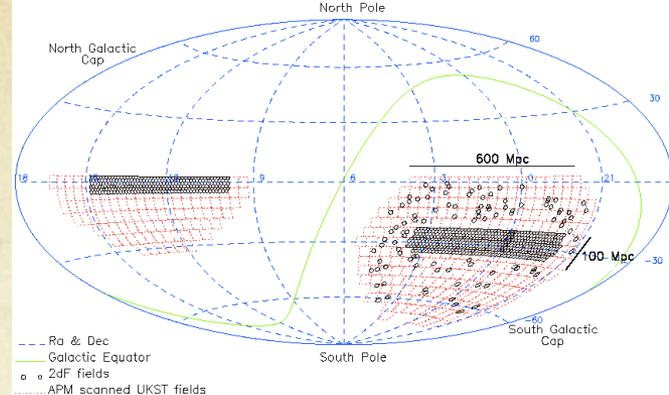


Le décalage vers le rouge: décalage des raies chimiques d'un spectre de galaxie  
= spectroscopie

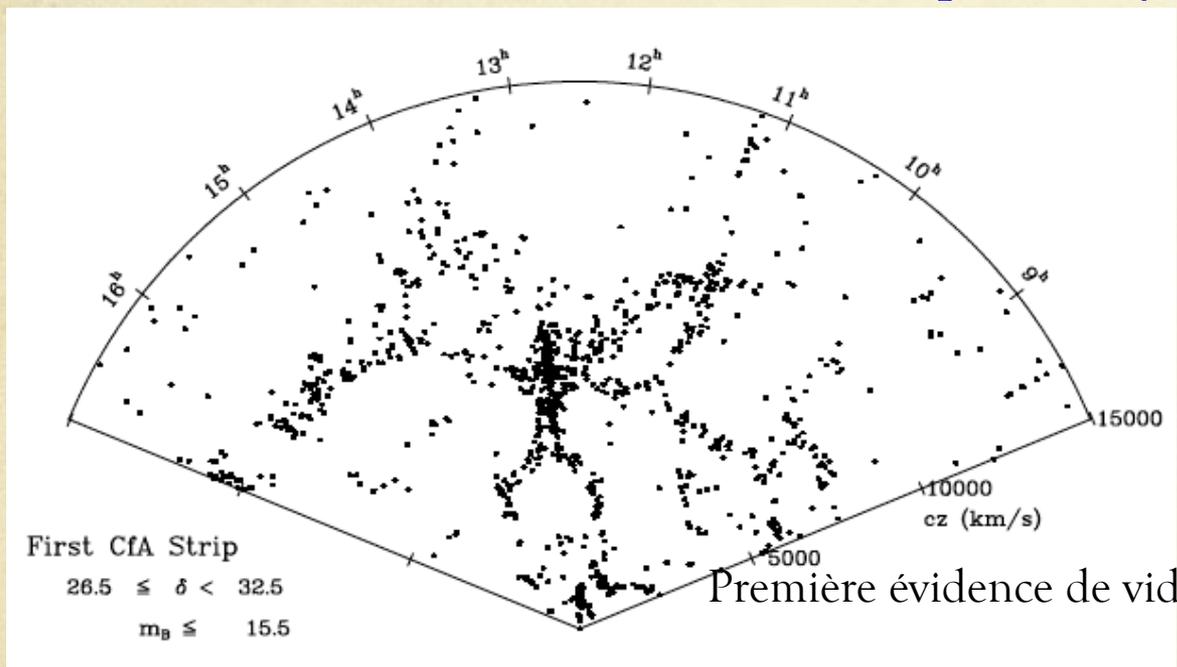


# 1977-1995 : CfA

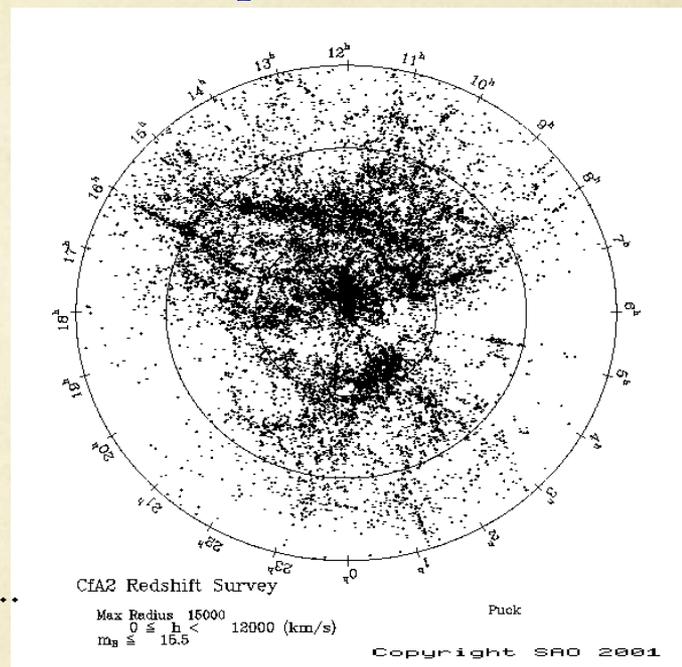
Z-machine (Huchra, Davis, Latham & Tonry)



○ Tranche d'univers de 200 Mpc de rayon et 10 Mpc



Première évidence de vide..

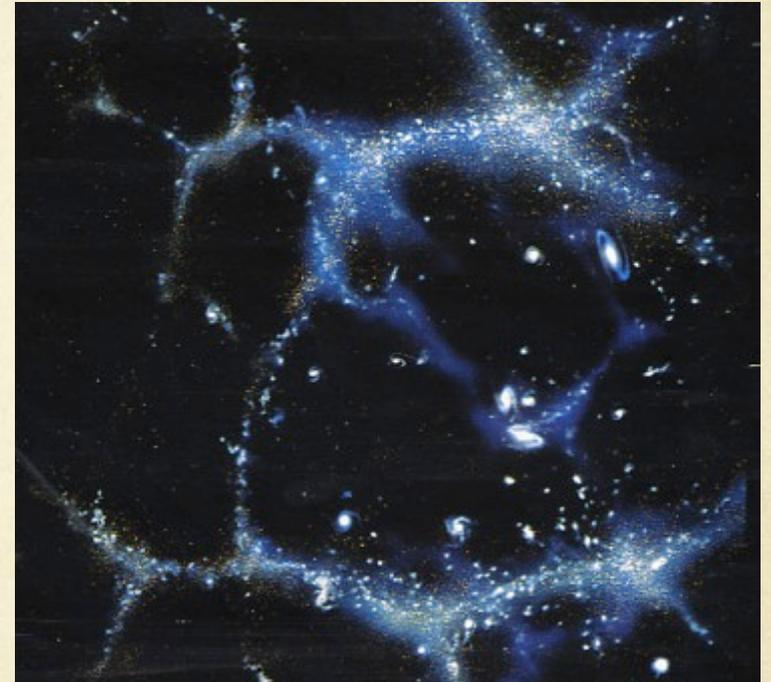
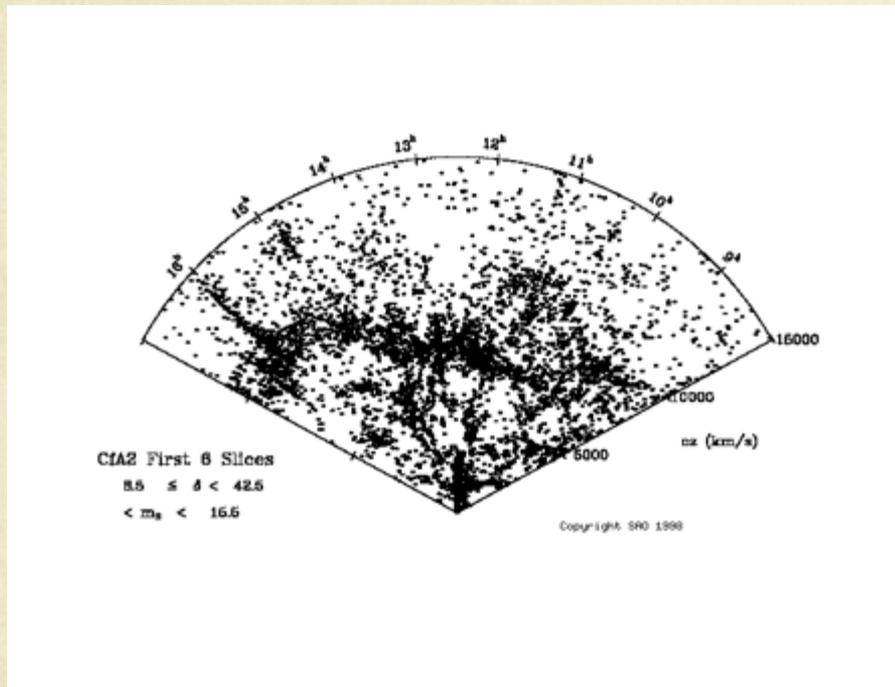


2500 galaxies (CfA1)



12000 galaxies (CfA2)

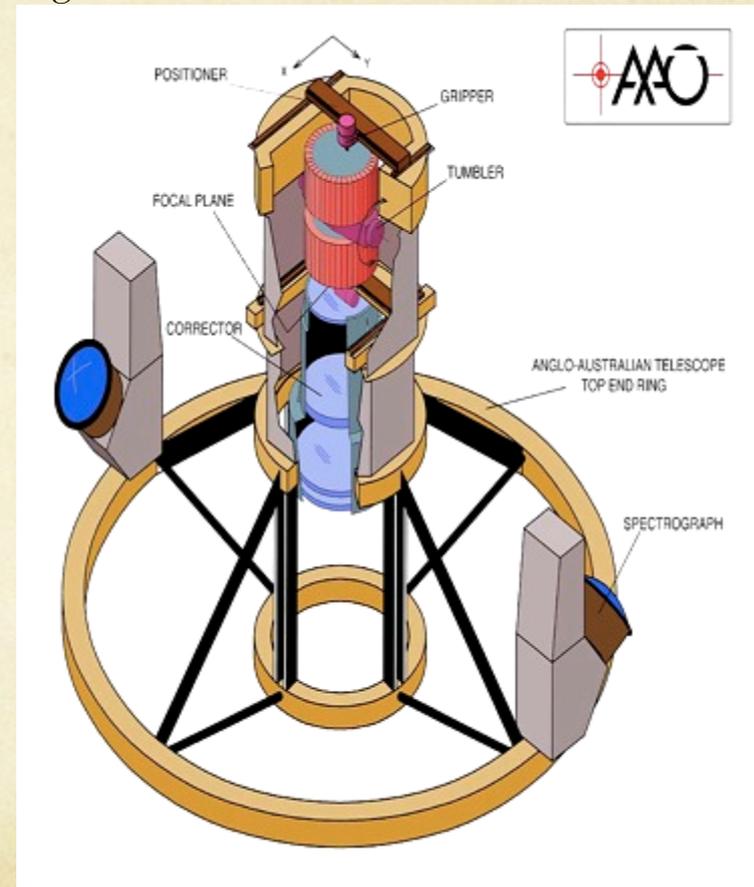
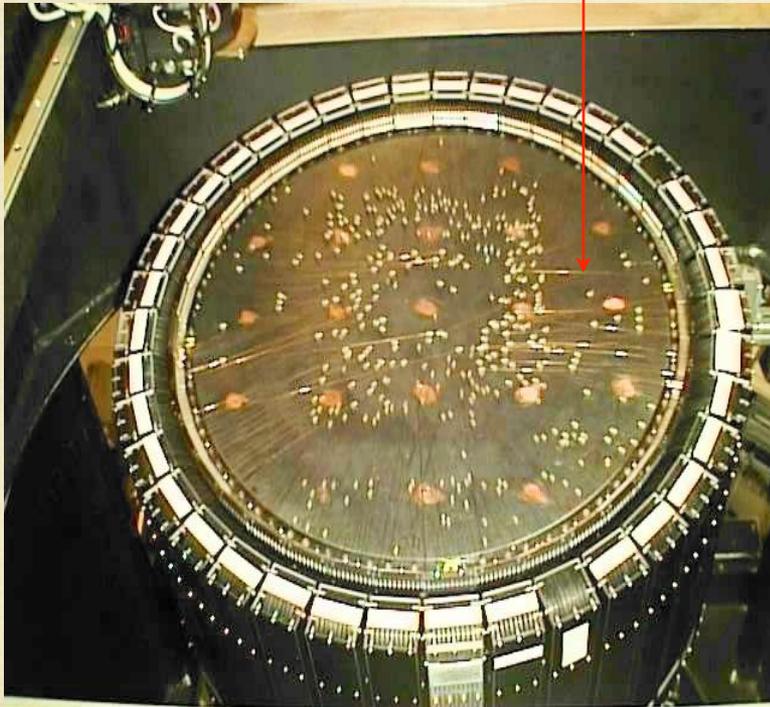
# Le grand mur (1989)



Longue de 500 millions d'années lumière ! Large de 200 millions ! Epaisse de 15 millions !  
On appelle cela maintenant des filaments..

# Plusieurs spectres / champ

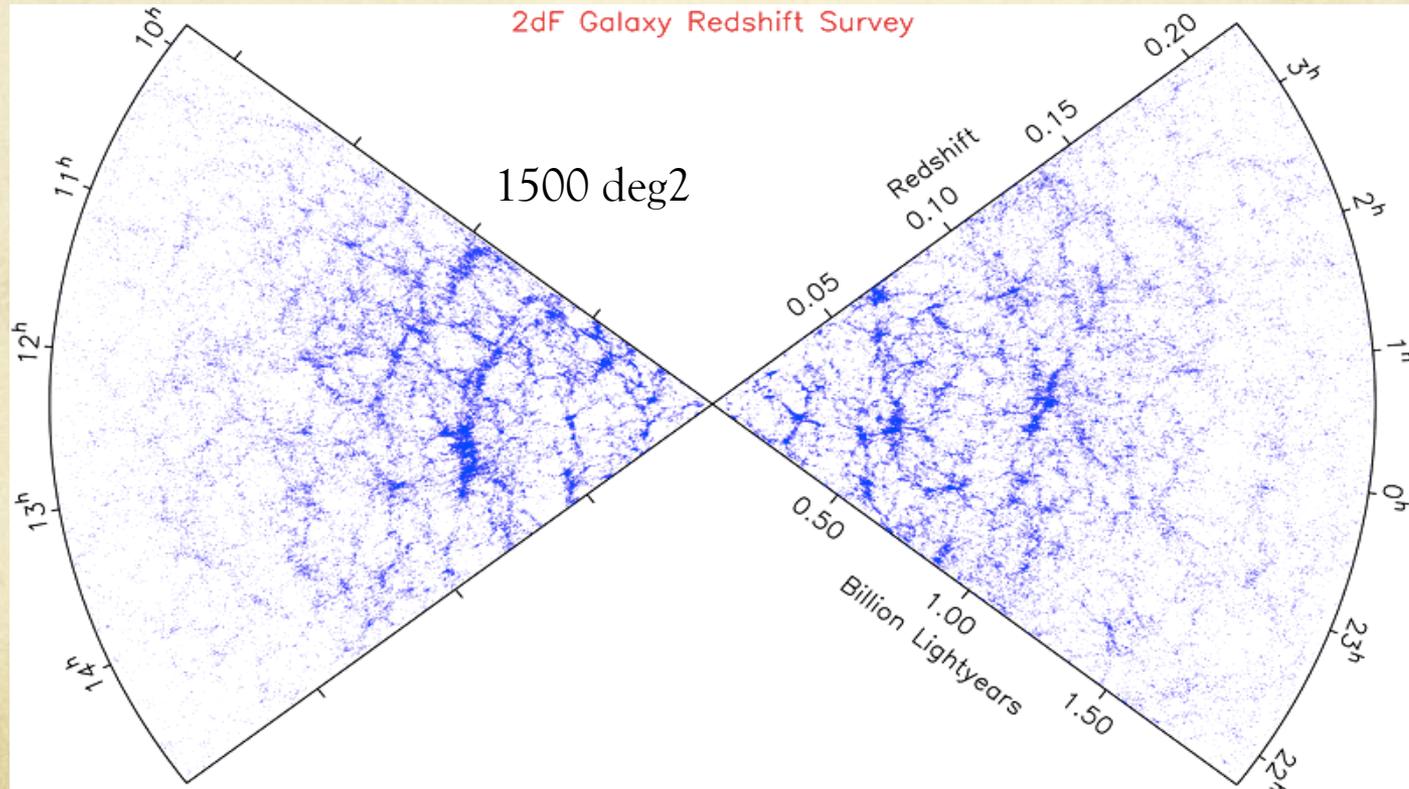
2dF : 400 fibres = 400 spectres par champ de 2 degrés



# 1997-2002 : 2dF

## (Two degree field galaxy survey)

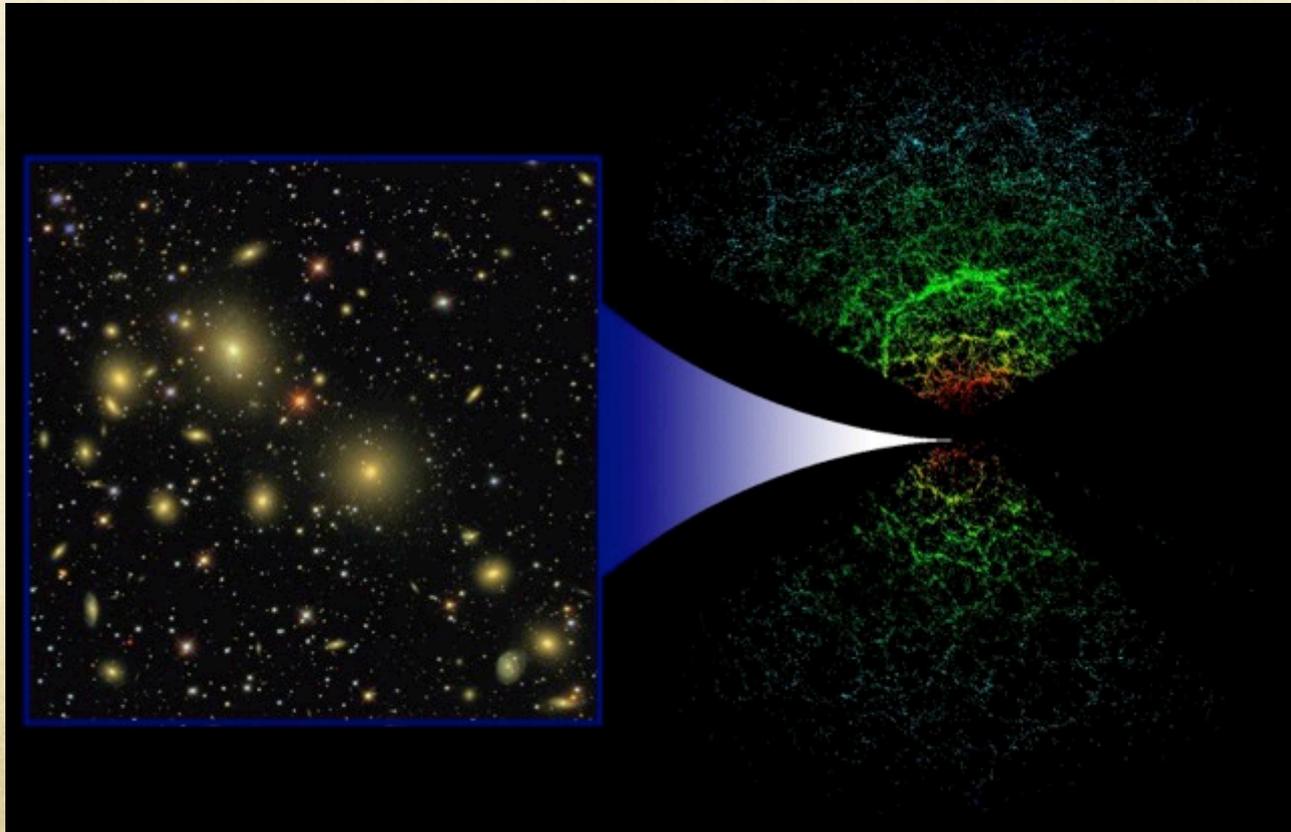
- 230 000 galaxies (sélectionnées sur le catalogue APM de  $\sim 400000$  objets,  $\langle z \rangle = 0.1$ )



# 2000-2014 : Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

250 millions de galaxies détectées , 1 million de spectres, 10 000 deg<sup>2</sup>  
en 10 ans à  $z = 0.1, 0.4, 0.7$  !

Une cartographie complète pour voir apparaître les filaments, les vides, des structures primordiales...



20

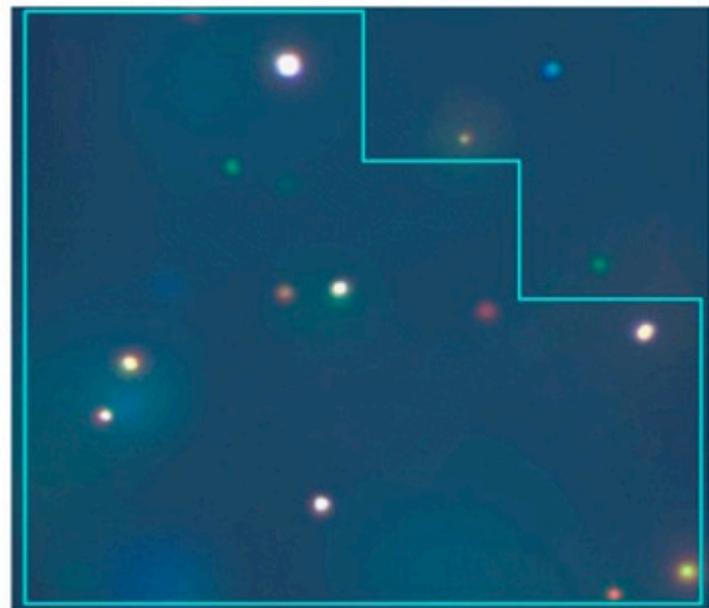
/4

0



# Les sondages dans l'espace

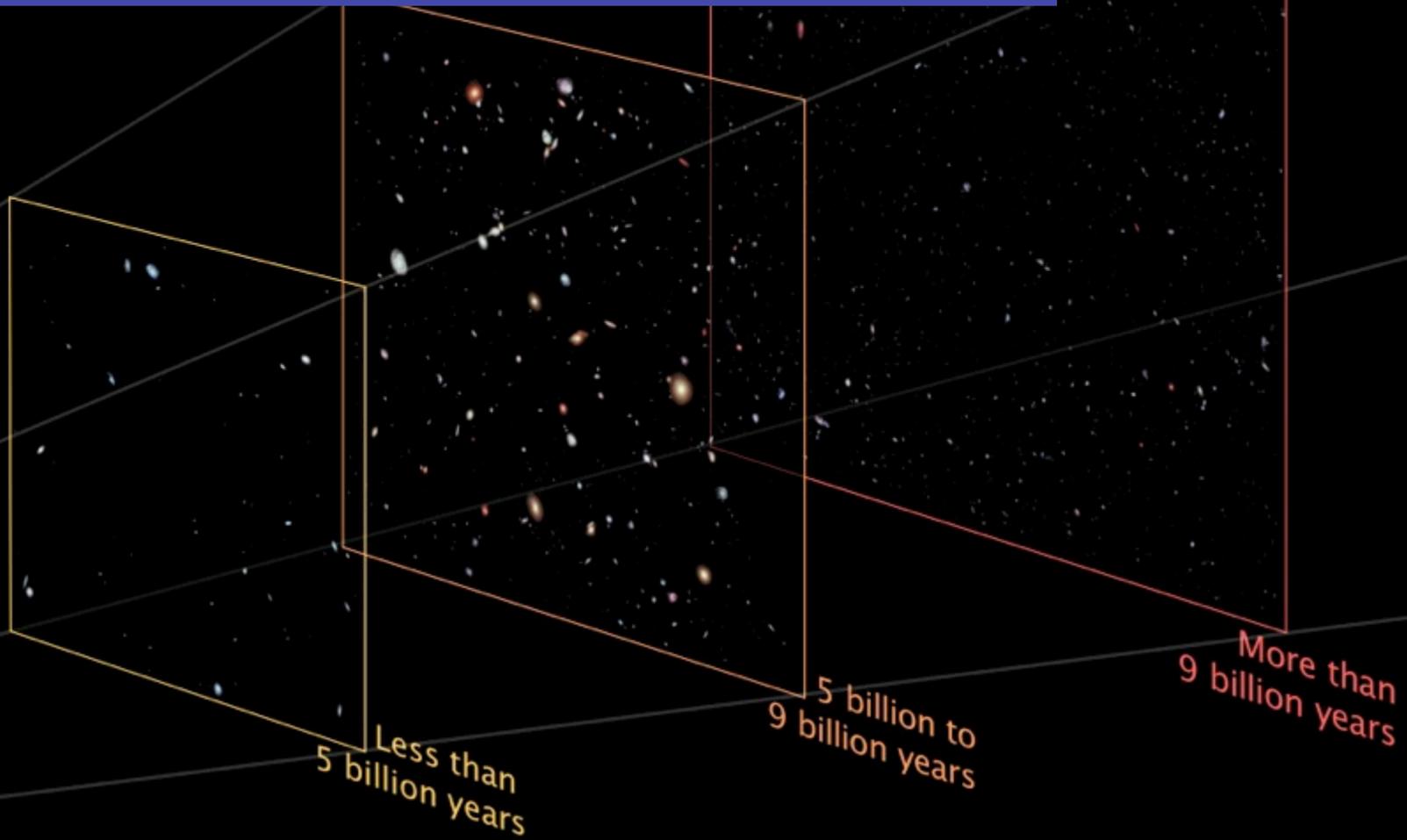
- Il est aussi possible de n'observer qu'une surface réduite du ciel, mais d'aller très profondément (*pencil beam survey*) → **évolution**
- *Le telescope de Hubble HST ... 3000 galaxies (champ très petit)*
  - Hubble Deep Field et Hubble Ultra Deep Field ( $0.5 < z < 5.3$ )
  - Chandra Deep Field (en rayons X)



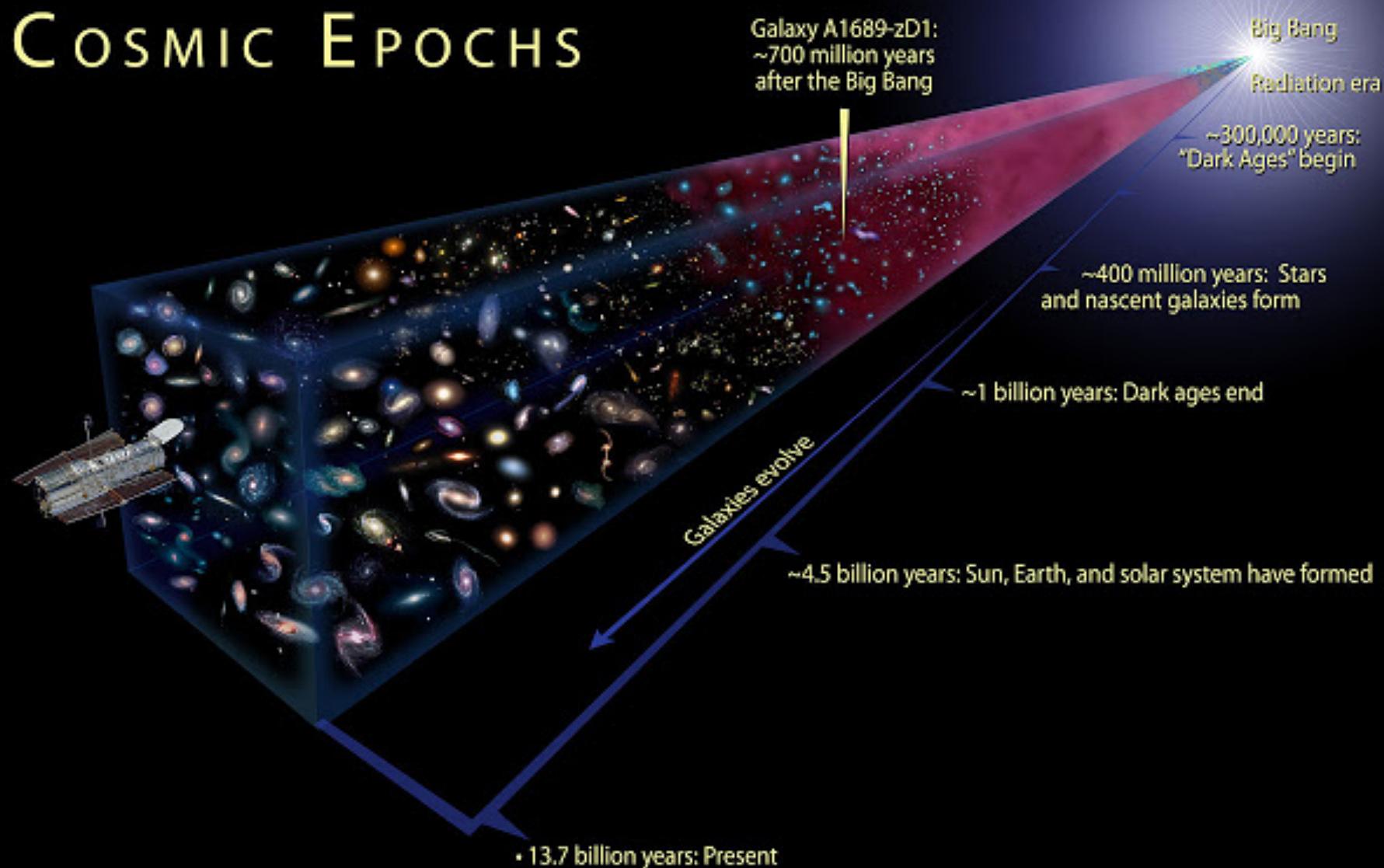
22  
/4

Hubble eXtreme Deep Field  
HST ACS/WFC WFC3/IR  
Lookback Time

Regarder loin , c'est regarder dans le passé.....jusqu'au début de l'Univers



# COSMIC EPOCHS



# La prochaine génération

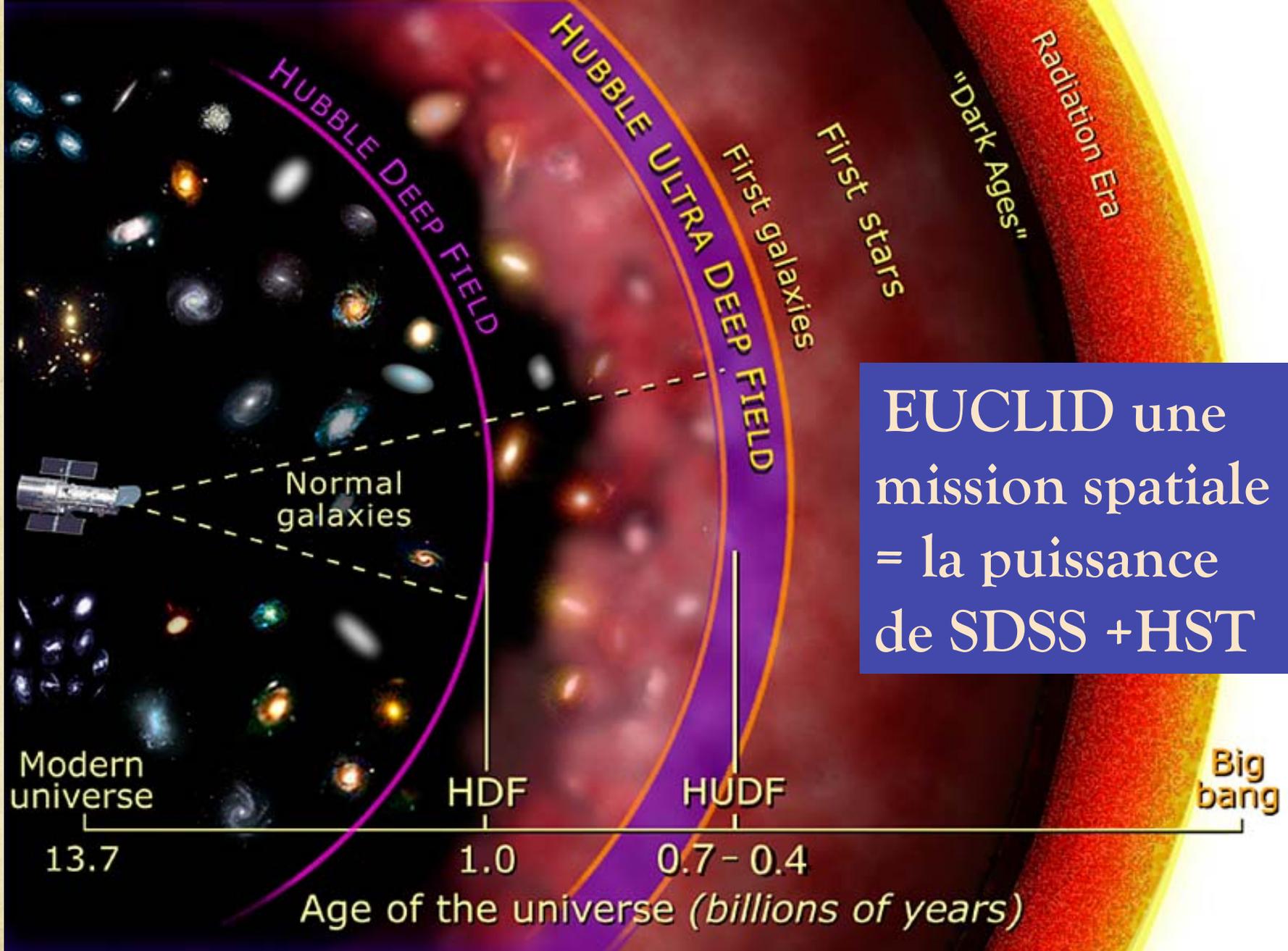
Combiner les grands relevés de galaxies et la profondeur dans l'espace :

## EUCLID

Le prochain télescope grand champ de l'ESA : un projet majeur !

- 15 000 deg<sup>2</sup> du ciel
- En photométrie et spectroscopie
- Des milliards de galaxies détectées
- 50 millions de redshift mesurés

Le spectrographe à Marseille!  
Lancement en 2020



EUCLID une mission spatiale = la puissance de SDSS + HST

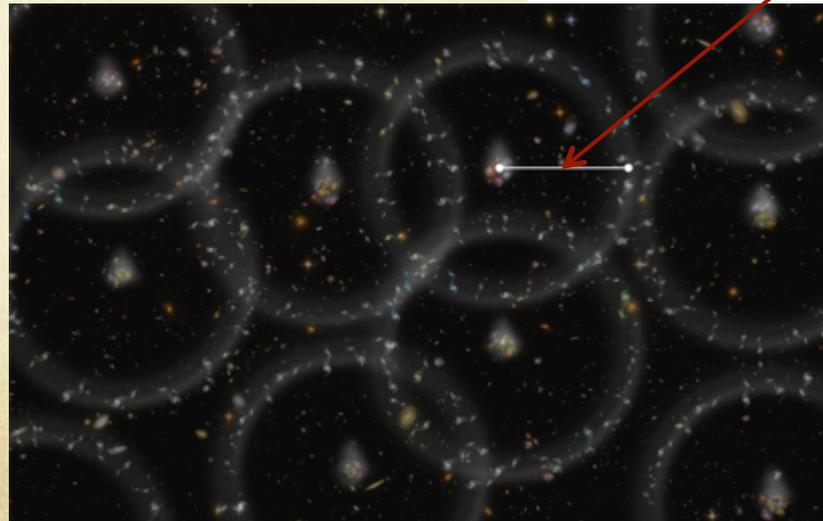
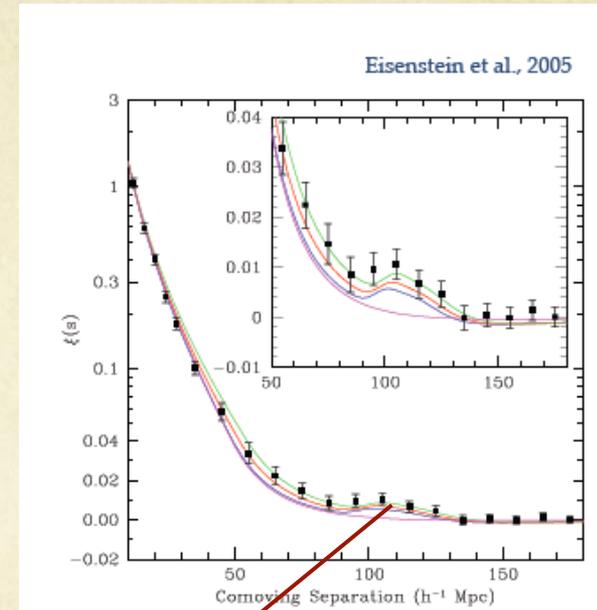
# Résultats des sondages

- Les galaxies ne sont pas distribuées uniformément
  - Structures de plusieurs dizaines de Mpc (murs, filaments...)
  - Structure hiérarchique (amas – super amas)
  - Vides de 50 Mpc à 70 Mpc de diamètre
  - *Mais contrastes de densité faibles (un amas n'est que 100 fois plus dense que la moyenne)*
- Reste à quantifier par une description mathématique
  - Structure-> corrélation des galaxies
  - Fluctuations -> Spectre de puissance
- Et à expliquer l'origine de ces structures...> reproduire les structures avec une théorie et un modèle cosmologique.

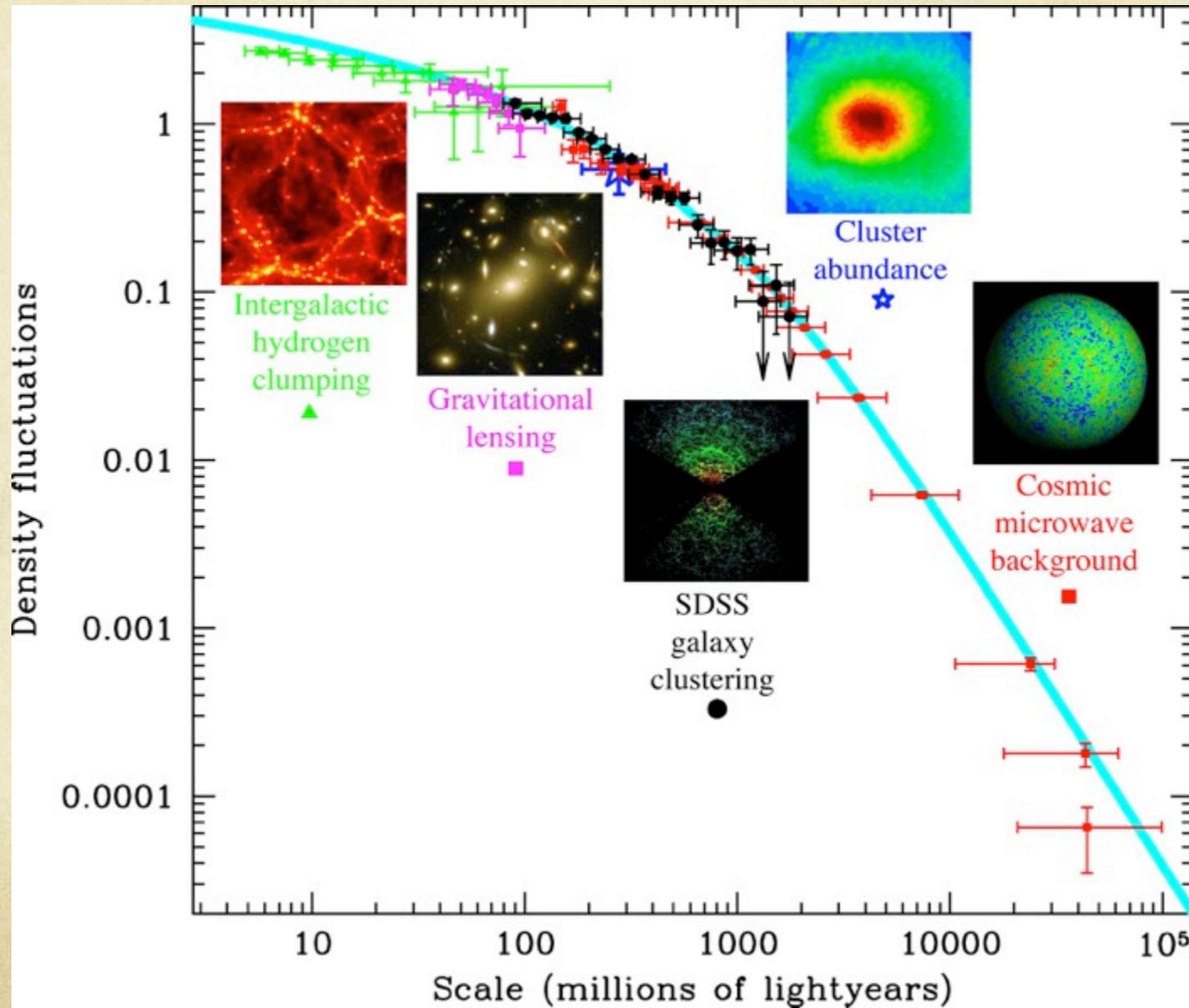
# Des échelles privilégiées!

On observe des signes de corrélation dans une échelle caractéristique de 100 Mpc

signe attendu par la théorie du Big Bang, basé sur l'évolution d'une seule fluctuation primordiale originelle unique !



# Spectre de puissance





La naissance de l'Univers  
un modèle cohérent

# Notre Univers

Il y a 100 ans, notre description de l'Univers était simple : il était éternel, statique et formé d'une seule galaxie contenant quelques millions d'étoiles.

Le modèle contemporain est beaucoup plus riche et complet.

- Le cosmos a débuté il y a environ 13.7 milliards d'années.
- Aujourd'hui, l'Univers observable renferme plus de 100 milliards de galaxies, elles-mêmes contenant plus de 100 milliards d'étoiles et probablement autant de planètes.

Comment notre Univers a évolué durant ces 13,7 milliards d'années?

Le modèle communément admis est le BIG BANG qui décrit l'Univers par une dilatation thermique appelée (à tort) explosion



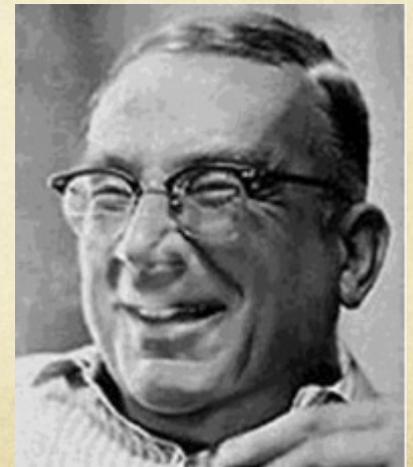
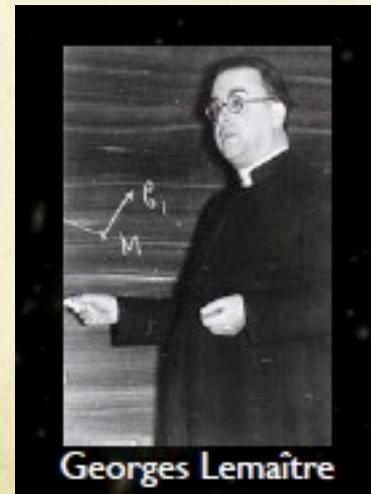
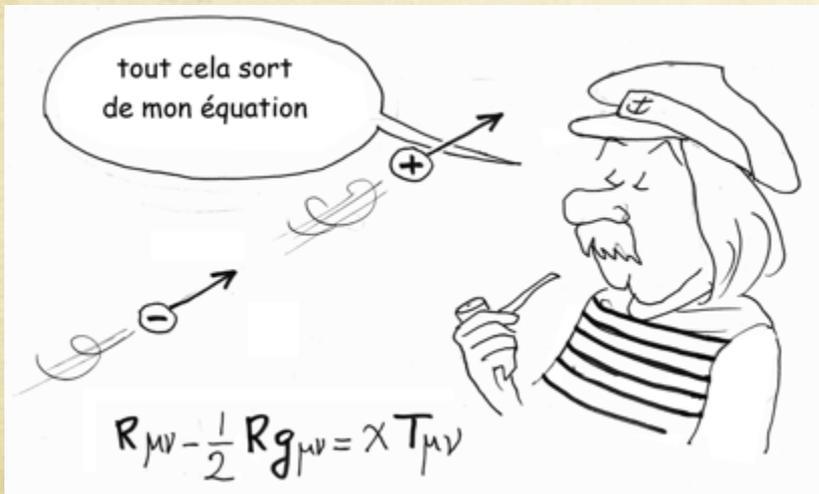
# Les piliers théoriques du Big Bang

-Modèle proposé dès 1927 par Lemaître

-Basé sur un Univers homogène et isotrope - > principe cosmologique

Fluide en expansion évoluant avec la relativité générale (théorie géométrique de l'espace-temps).

-La théorie moderne du Big Bang a été introduite par Gamow, en collaboration avec Ralph Alpher et Hans Bethe en 1948. Gamow avait compris que la dilatation de l'Univers entraînait son refroidissement, et que par conséquent autrefois l'Univers devait avoir été très chaud et dense.



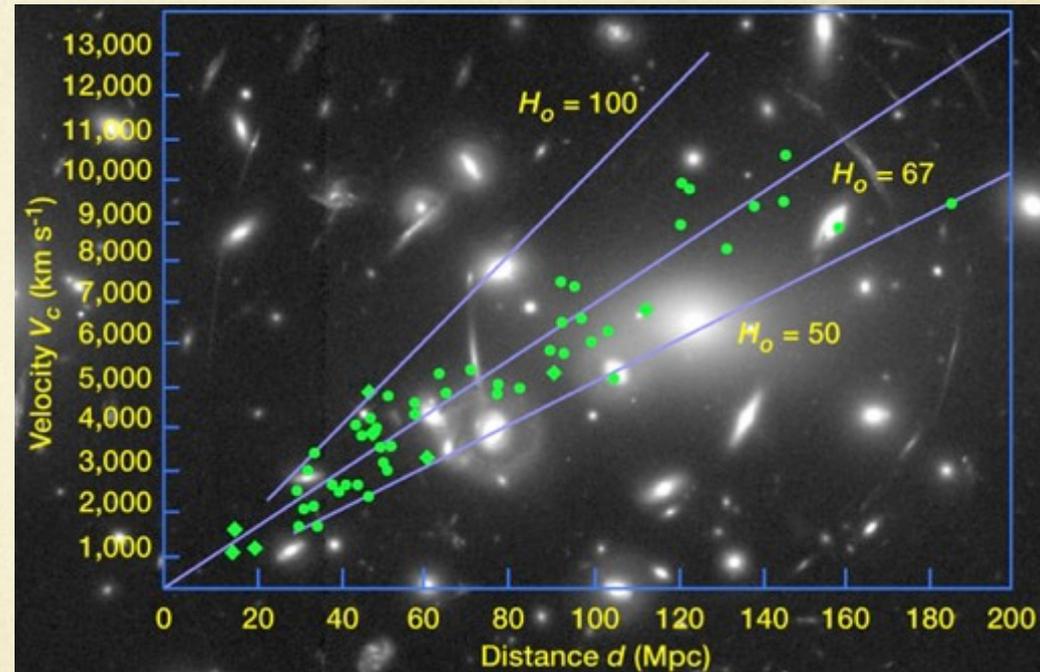
# Les preuves observées du Big Bang

1. l'Univers est en expansion
2. Il est homogène et isotrope aux grandes échelles
3. Il est plat
4. Il y a des structures à petites échelles
5. La nucléosynthèse
6. Mais ....en expansion accélérée!!!

# 1 - l'Univers est en expansion !



Edwin Hubble  
1889 - 1953



Au début du 20e siècle, V. Slipher et E. Hubble découvrent que les galaxies s'éloignent les unes des autres.

## 2- L'univers est homogène et isotrope

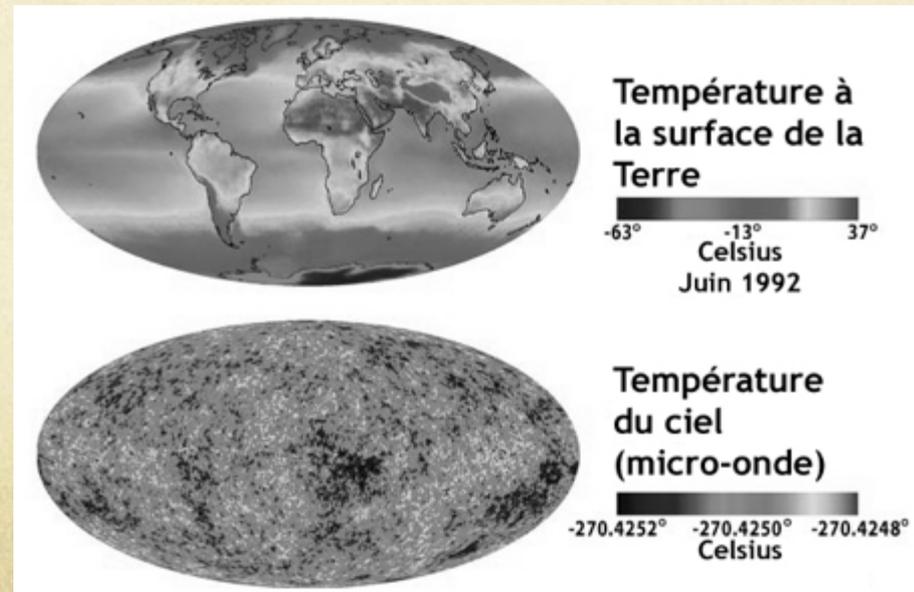
- En 1965, A. Penzias et R. Wilson confirment que l'Univers a connu une phase initiale chaude, et qu'il se refroidit depuis. Aujourd'hui, la température moyenne de l'Univers est 2.735 K
- Lorsque ce rayonnement est émis, l'Univers est beaucoup plus homogène et isotrope qu'il ne l'est aujourd'hui.
- Il aurait été émis 380 000 années après le Big Bang (soit il y a plus de 13 milliards d'années!!) ..c'est la première image de l'Univers

Mesuré par

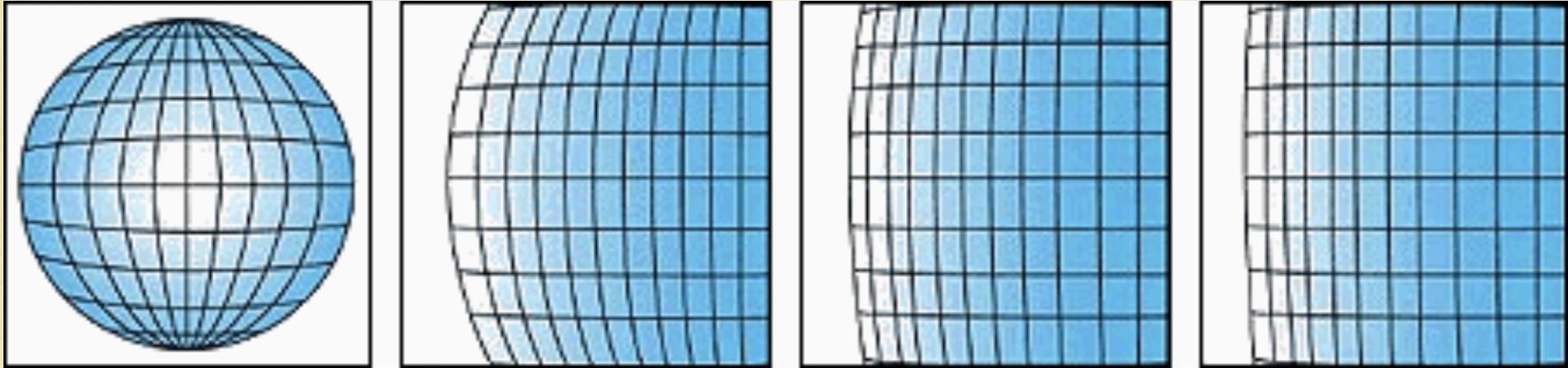
COBE (1989)

WMAP (2001)

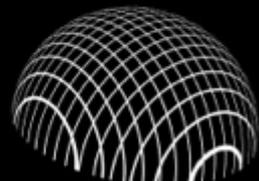
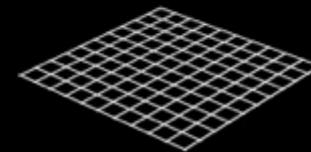
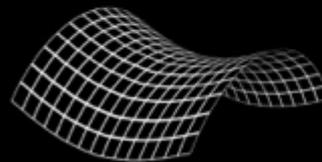
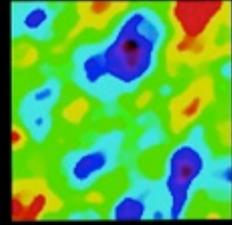
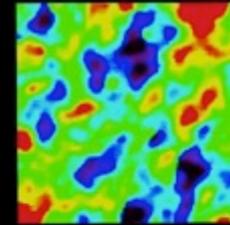
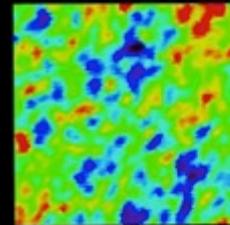
PLANCK (2009)



# 3- L'Univers est plat



Vu dans le CMB  
très précisément !  
C'est à dire 380 000 ans  
Après le Big Bang



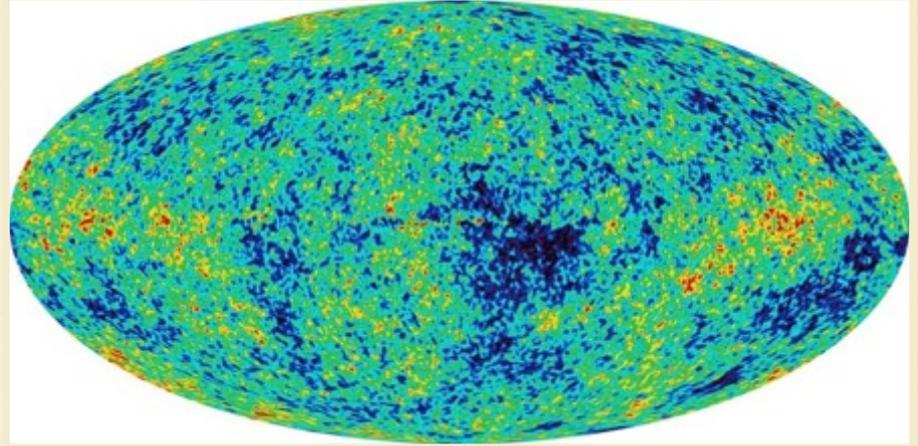
**OPEN**

**FLAT**

**CLOSED**

# 4: Il y a des structures à petites échelles

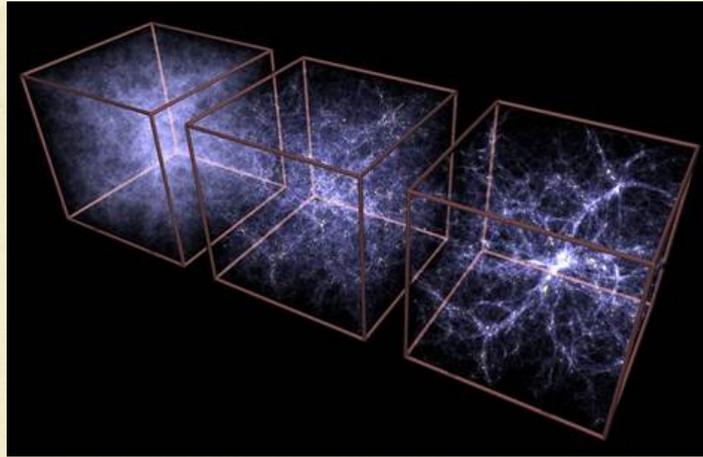
- Il y a des fluctuations de température du rayonnement de fond  
 $\delta T/T \sim 10^{-5}$



- Ces fluctuations peuvent grandir sous l'effet de la gravité et forment des puits de potentiel gravitationnel ou la matière va être piégée
- C'est la base de la formation des structures, des filaments et des amas... Vérifié par simulation numérique

C'est la reconciliation CMB- grandes structures  
..... Mais il faut mettre de la matière noire..

# La naissance des structures



-> Grandes simulation de l'évolution des structures dans l'Univers en mettant de la matière visible et de la matière noire qui évolue par gravité..

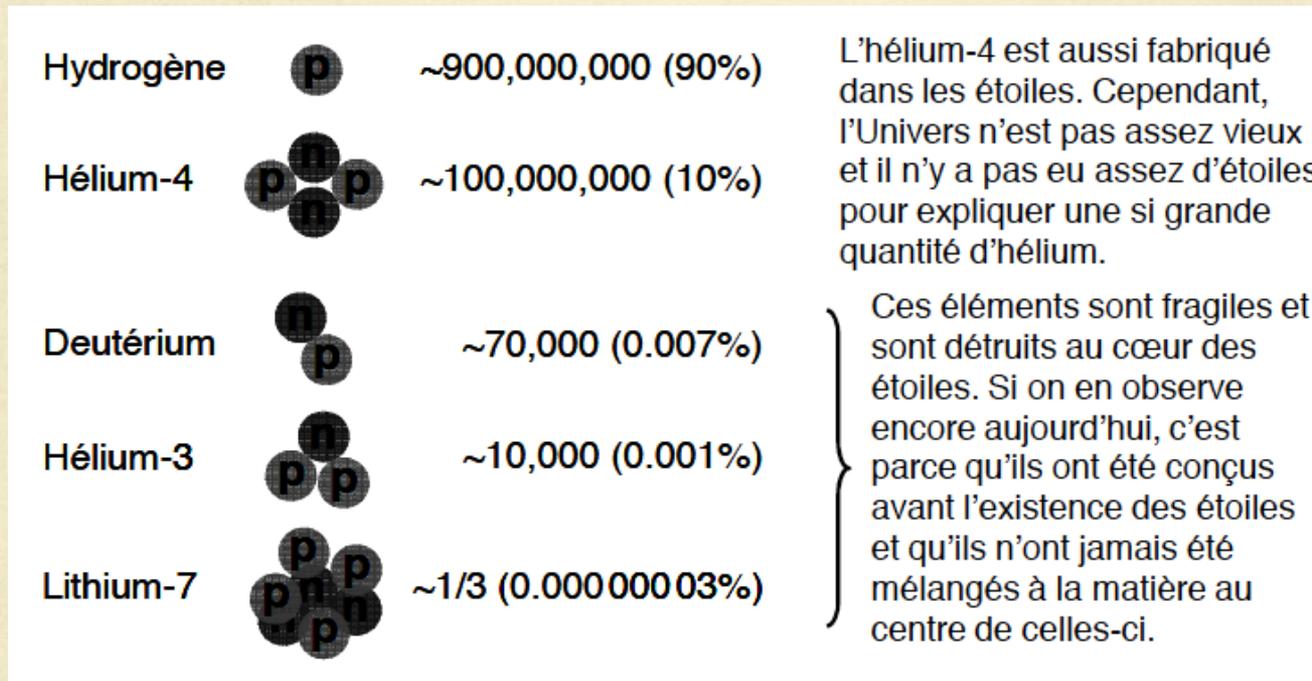
Elles auraient commence a grandir  
400 millions d'années après le Big Bang

GRANDE SIMULATION COSMOLOGIQUE



# 5: La nucléosynthèse primordiale

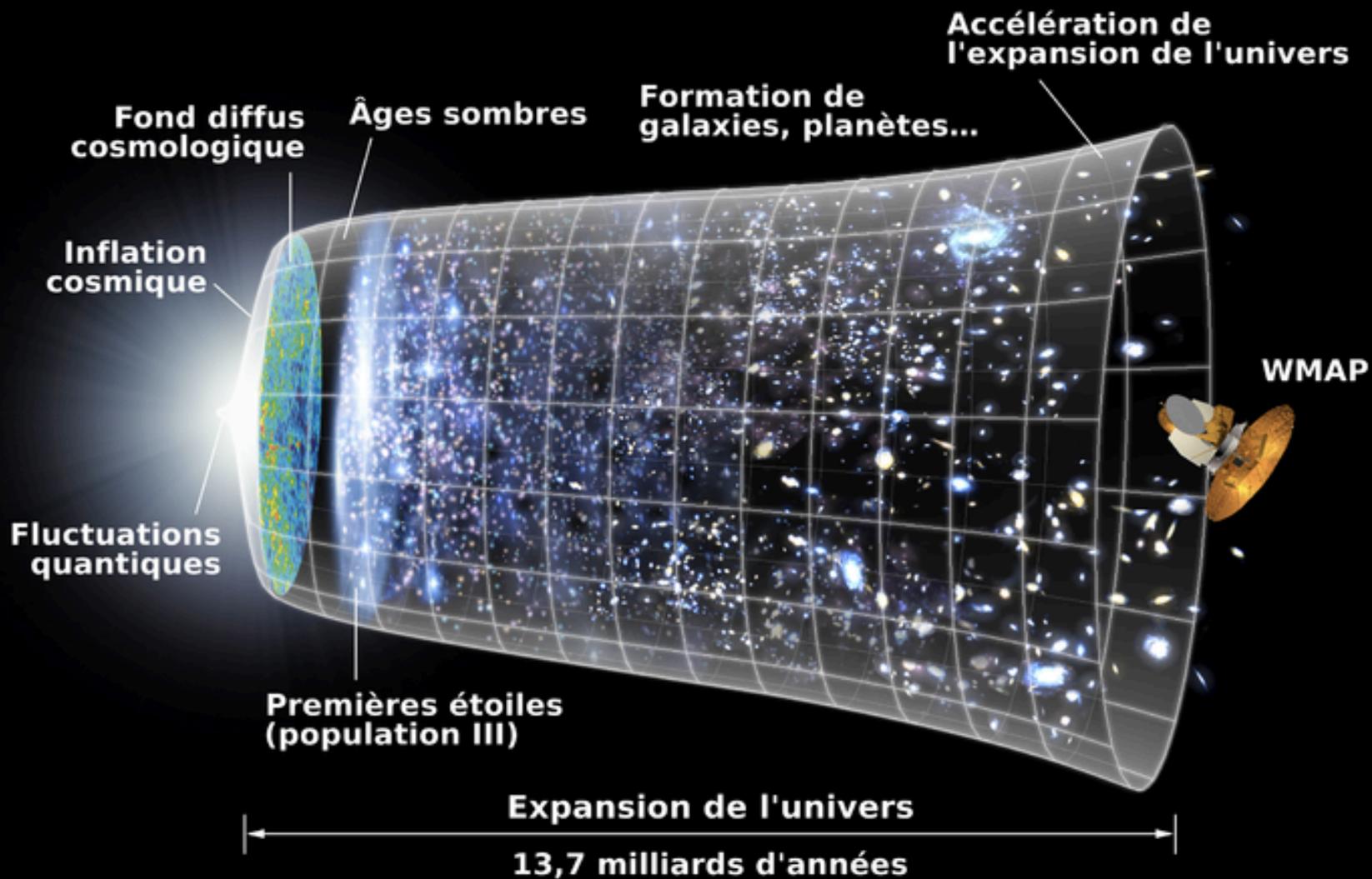
La proportion des espèces chimiques simples (hydrogène, deutérium, hélium, et lithium) dans les quasars lointains indique que l'Univers a connu une phase de nucléosynthèse primordiale « globale » de courte durée



Conditions réunies 3 mn après le Big Bang et valable 17 mn!

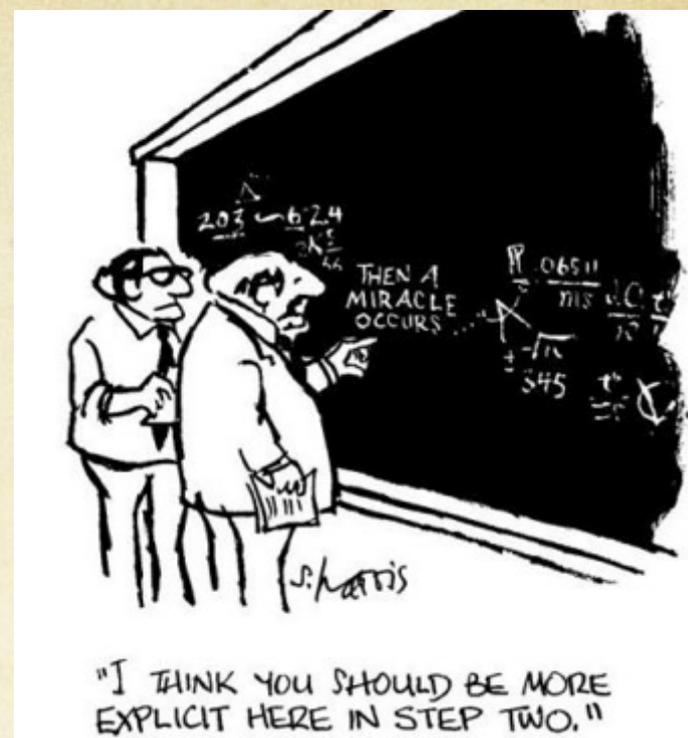
# Le modèle du Big Bang

- Après le Big Bang , l'Univers est très chaud et dense
- Il s'étend rapidement
- Il est opaque pendant 380 000 ans (inobservable) mais rempli d'une 'soupe' de particules.
- 380 000 ans après le Big Bang, l'Univers arrête de s'étendre rapidement : Il est plat et devient transparent
- Avec le refroidissement, des structures plus complexes apparaissent : les noyaux atomiques, les atomes
- 400 millions d'années plus tard, les premiers nuages de gaz se forment et vont évoluer dans les puits gravitationnels pendant 500 millions d'années pour donner les premières étoiles puis les galaxies , les amas ..
- Les éléments lourds sont créés plus tard dans les étoiles qui sont dans les galaxies



# Y a un problème !

On mesure le CMB 380 000 ans après le Big Bang, avec des fluctuations de  $10^{-5}$ , qui seraient les germes des structures dans un Univers est plat !



- Mais les fluctuations auraient du être produites tout début du big bang ?
- Comment ca se fait que tout est homogène à  $10^{-5}$  pendant tout ce temps là ?
- Et pourquoi l'Univers est plat?

Il faut que l'espace se dilate de  $10^{30}$  à  $10^{100}$  fois en  $10^{-32}$  s !

C'est l'inflation !!

# L'inflation : la solution à tous vos problèmes !!! 😊

- Comment expliquer que les conditions initiales sélectionnent, parmi une infinité de modèles à courbure quelconque, justement celui à courbure nulle ?

1981 : pour s'affranchir des conditions initiales, Alan Guth propose la théorie de l'**inflation primordiale**

- D'après les théoriciens, aux températures très élevées ( $>10^{28}$  K), les forces s'unifieraient + un **vide unifié** de densité d'énergie  $\gg \gg$  vide actuel  
C'est ce vide unifié qui serait responsable de la phase d'inflation (ie champ scalaire)

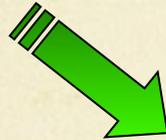


*Alan Guth*

Reconciliation mécanique quantique-cosmologie..

# L' Inflation cosmique .

Bébé univers



Taille observable



**Apparait plat!**

Fluctuations  
quantiques

Cela explique la platitude

**$\times 10^{30}$  or more**

**Naissance de  
l'univers**

**Les fluctuations** du vide quantique subissent l'inflation et sont à la base de la formation des structures !!!!

# Et l'accélération ???



# Accelerated Expansion of the Universe

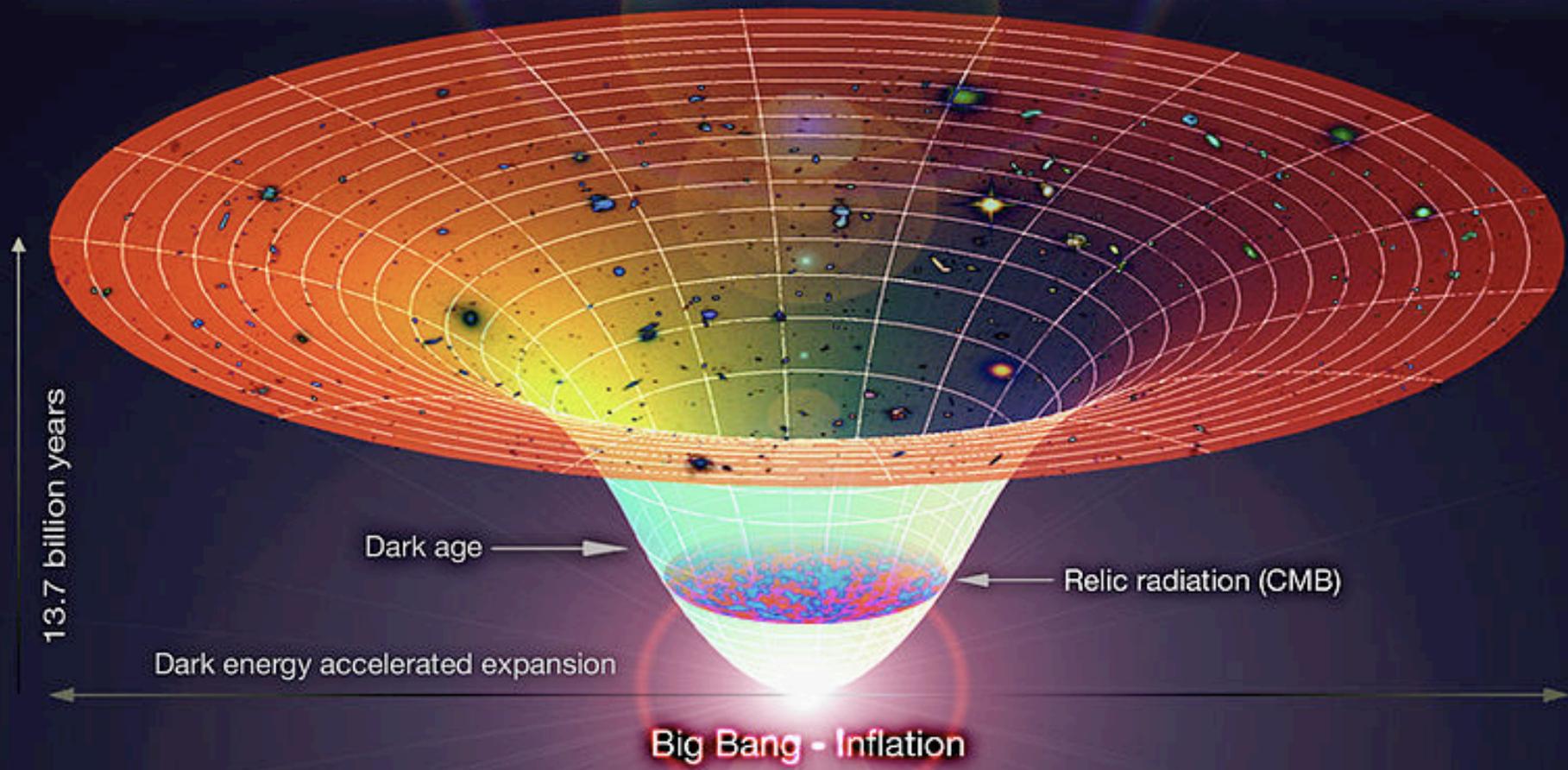


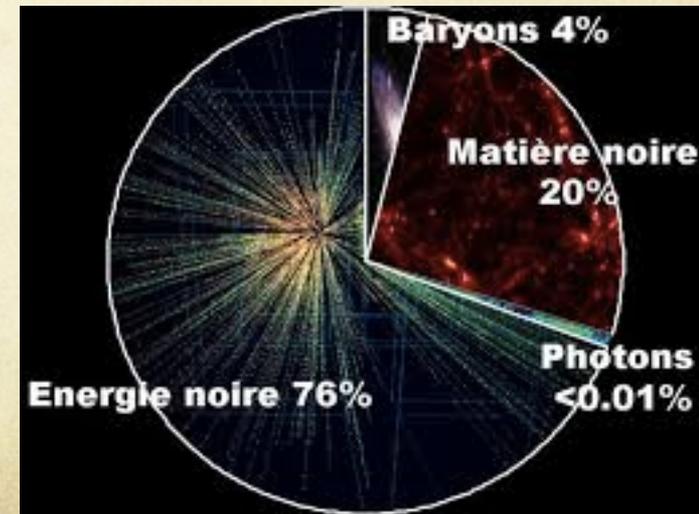
Image: Coldcreation

# Accélération et énergie noire..

À la fin des années 1990, les observations de supernovae lointaines semblent indiquer une accélération de l'expansion récente associée à une forme inconnue d'énergie, baptisée **énergie noire**

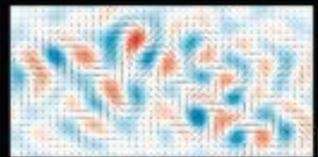
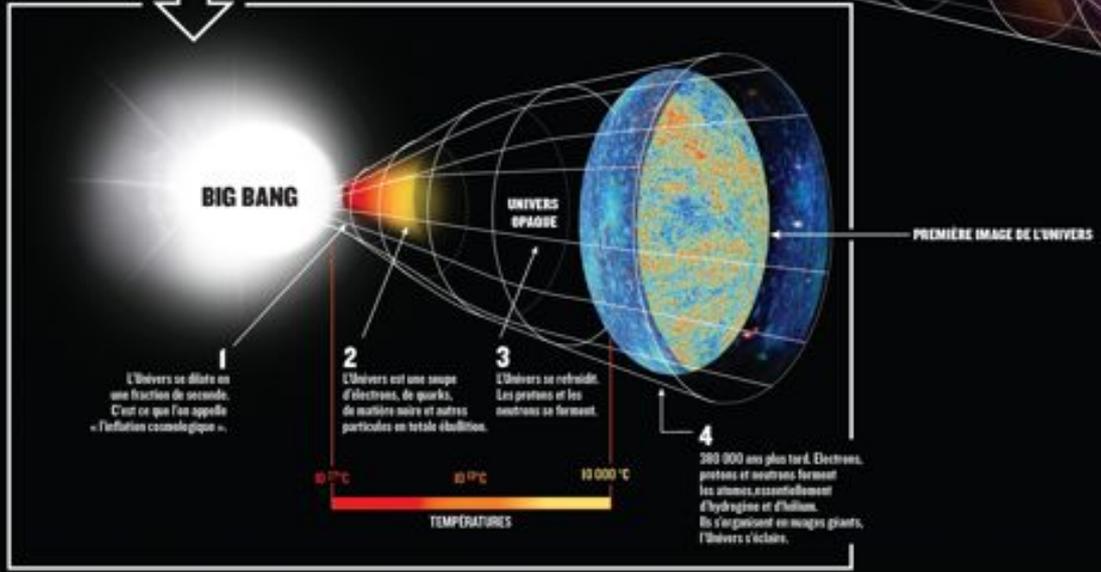
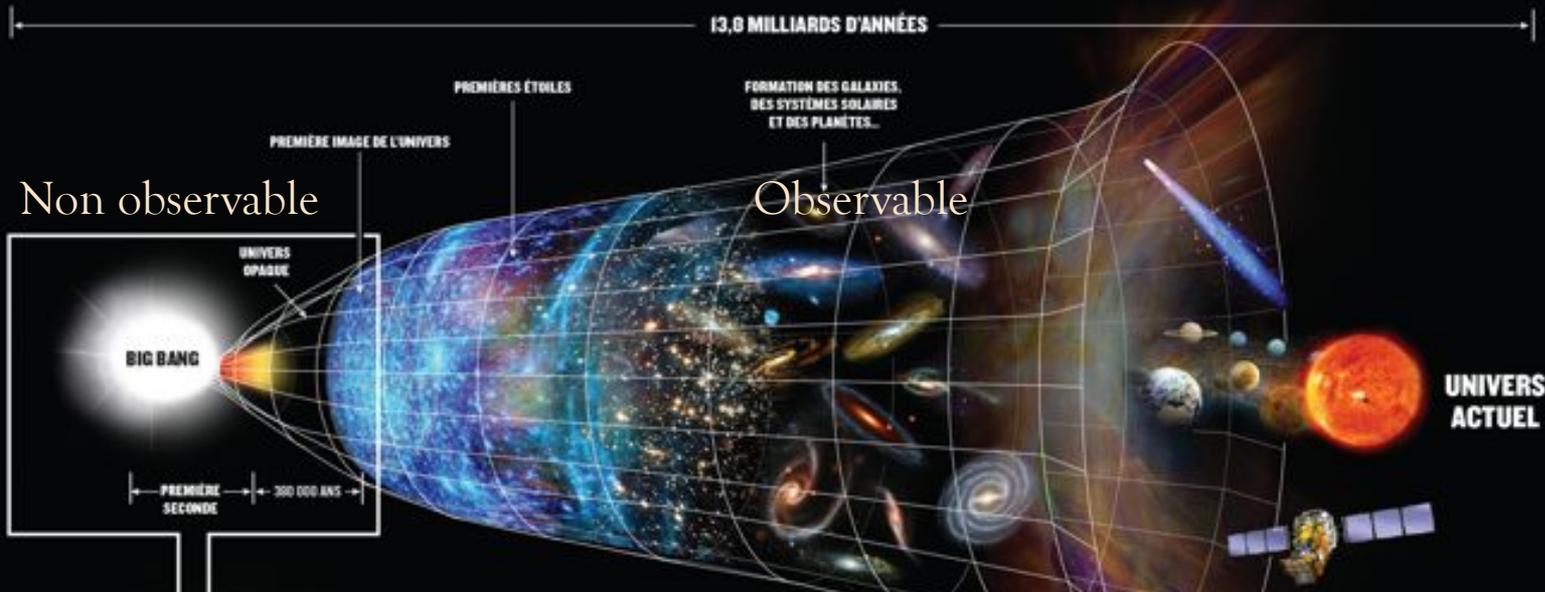
Résultat très étonnant car on s'attend à ce que la matière ralentisse l'expansion!

Souvent interprété comme l'énergie du vide (encore !) ..car répulsive...  
Mais pas du tout compatible avec la densité d'énergie du vide attendue





Où  
Cosmologie et physique des  
particules se rejoignent....



Cette image provient de la nuit des temps et même d'au-delà. Il s'agit des traces laissées dans la structure même de l'univers par l'inflation primordiale survenue une fraction de seconde après le big bang. Pour la première fois, une équipe de Harvard a pu capter des informations provenant de derrière l'univers opaque, cette période où la densité des particules empêchait la lumière de filtrer. À l'aide du télescope américain *Boomerang*, les chercheurs ont détecté ces traces dans le fond diffus cosmologique, la première image de l'univers, 380 000 ans après sa création.

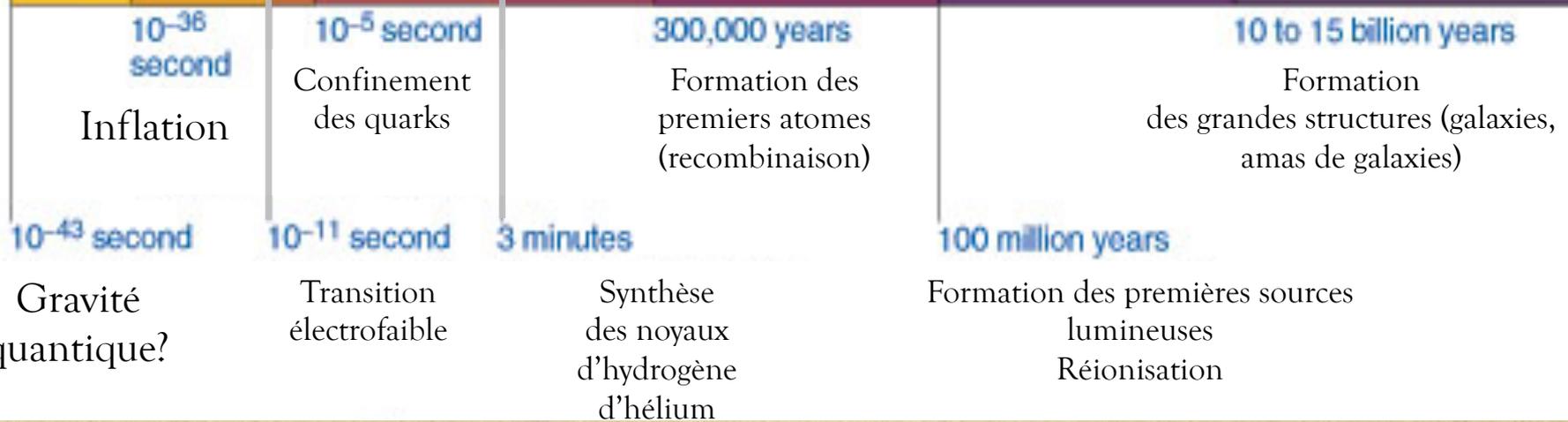
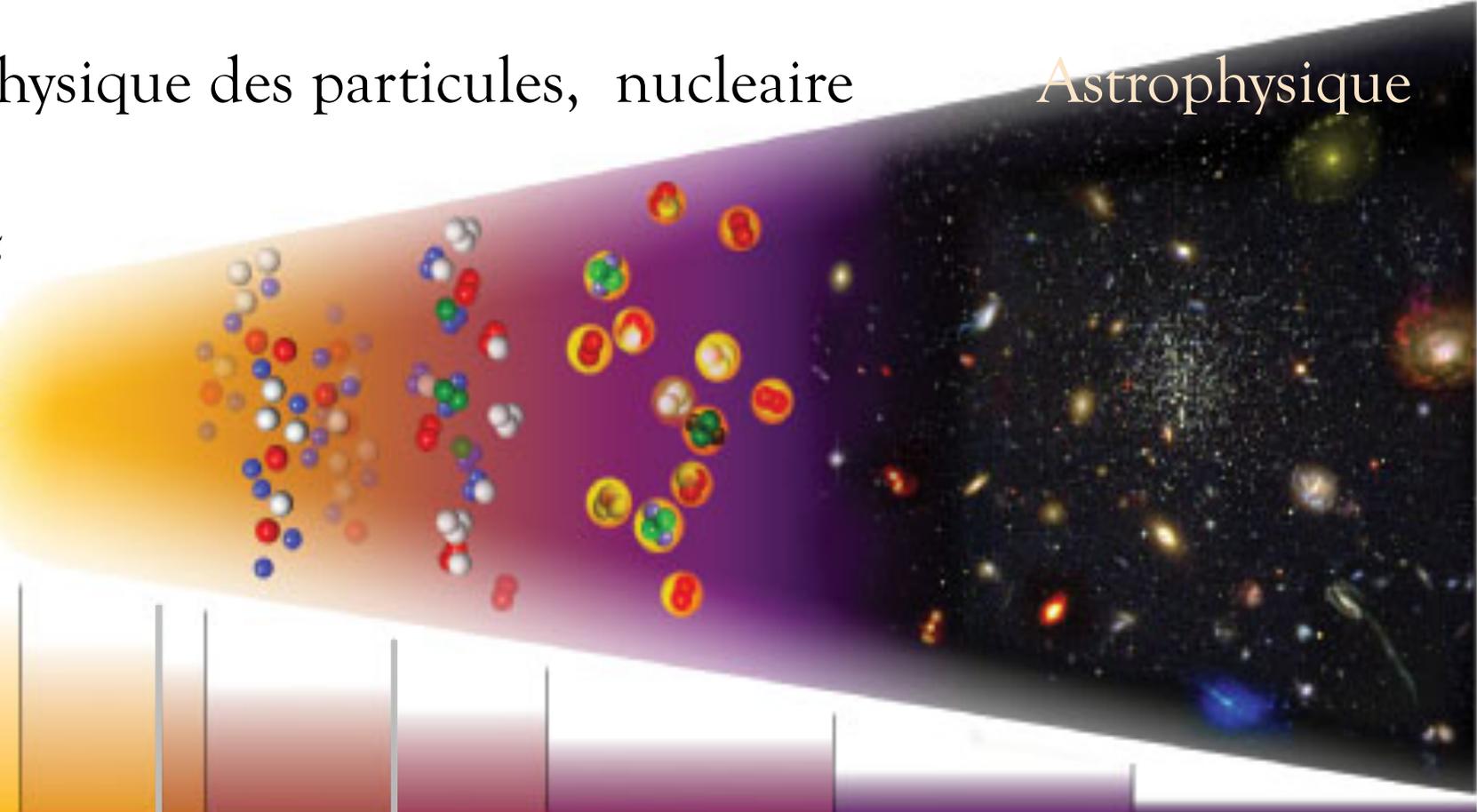
# Un univers 'non observable'

- Avant 380 000 ans .. L'astrophysique ne nous dit rien: l'Univers n'est pas 'observable'
- Entre 380 000 ans et 3 mn c'est le temps de la nucléosynthèse et de la formation des atomes...
- Avant 3mn, c'est le règne de la physique des particules : l'Univers est une soupe chaude et uniforme de particules élémentaires, les quarks et les leptons.
- Entre  $10^{-36}$  et  $10^{-43}$  s , c'est l'inflation
- Avant  $10^{-43}$  s, on sait pas grand chose (temps de Planck) ..la théorie ne marche pas...gravité quantique?
- Mais il y a surtout de la matière noire et de l'énergie noire qui est nécessaire du côté 'observable' , qui doit être là mais dont la nature est inexplicable..
- cela pourrait bien être lié au côté ' physique des particules' ..

# Physique des particules, nucléaire

# Astrophysique

Big Bang



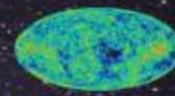
Interactions fondamentales

Interaction forte

Interaction faible

Electromagnétisme

Gravitation



Temps (s)

$10^{-50}$   $10^{-40}$   $10^{-30}$   $10^{-20}$   $10^{-10}$   $10^0$   $10^{10}$   $10^{20}$

Ere quantique  
( $T > 10^{32} \text{K}$ )

Ere de Grande Unification  
( $T > 10^{28} \text{K}$ )

Ere Hadronique  
( $T > 10^{12} \text{K}$ )

Ere Leptonique  
( $T > 10^{10} \text{K}$ )

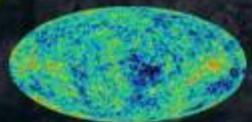
Ere radiative  
( $T > 10^4 \text{K}$ )

Ere Stellaire  
( $T > 3 \text{K}$ )

$10^{13}$   $10^{14}$   $10^{15}$   $10^{16}$   $10^{17}$   $10^{18}$

Temps (s)

Emission du rayonnement fossile



Formation des quasars



Formation des Premières étoiles



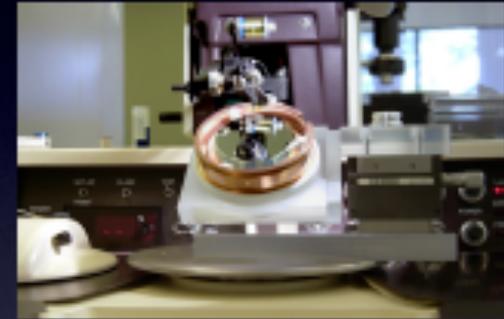
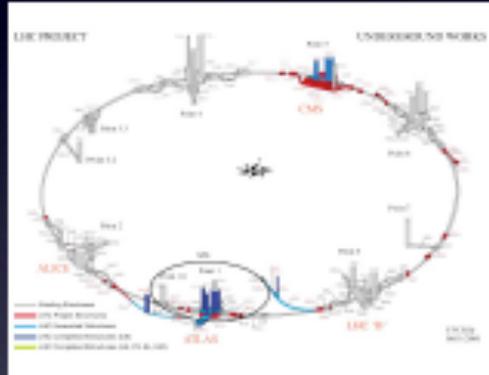
Formation du Système solaire



Aujourd'hui

l'Observatoire de Paris

# Une entreprise où se rejoignent astrophysique et physique fondamentale



En l'honneur de A.Mazure, spécialiste des amas,  
pionnier de la cosmologie à Marseille