

# Relativité et Cosmologie *d'Einstein à aujourd'hui*

Jean-Philippe UZAN



- *Observer localement, penser globalement*

cosmologie

Cosmologie

# Contraintes de construction

Deux contraintes:

Prendre en compte les lois de la Nature  
connues

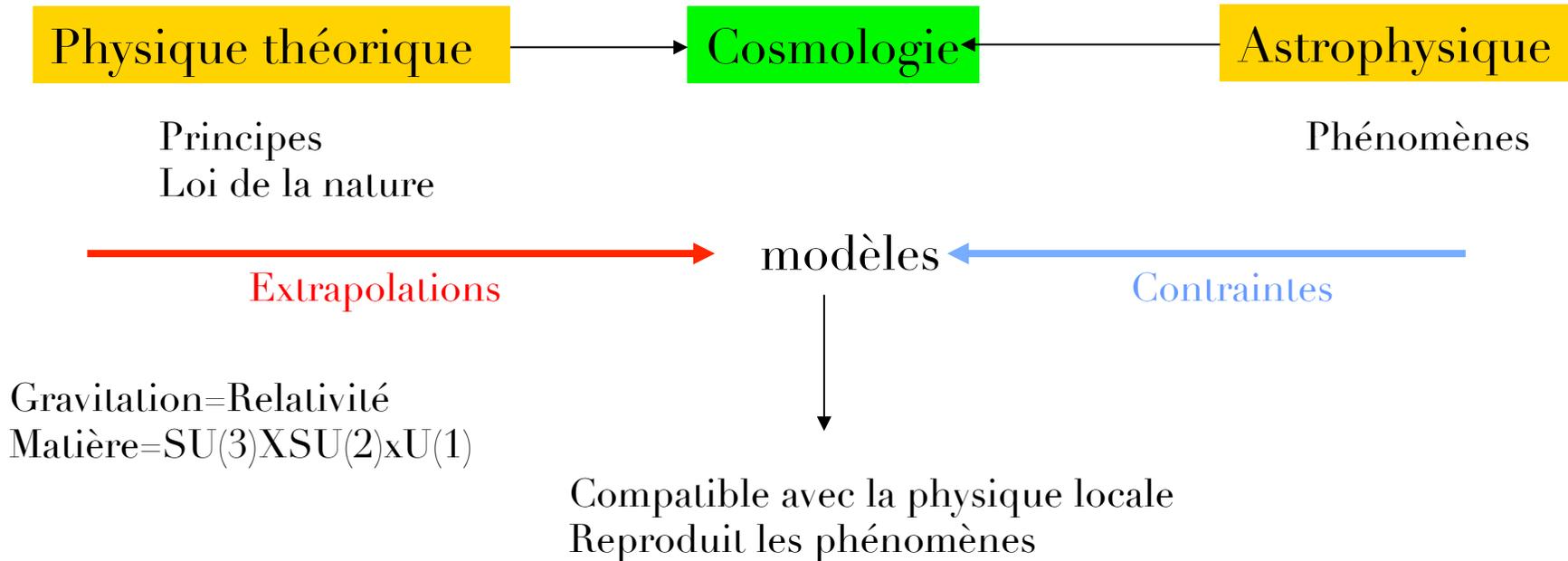
Reproduire toutes les phénomènes  
astronomiques connus

*Il faut à la fois construire un modèle d'univers et étudier ce qu'un observateur de cette univers hypothétique observerait.*

# Particularités

- Un seul univers observable  
*reproductibilité de l'expérience*
- Dimension historique  
*déduction – induction - abduction*
- Histoire la plus probable  
*quantifier la crédibilité de cette construction*
- Cohérence de l'explication de plusieurs faits  
*à contraster avec une explication isolée*
- Importance de l'extrapolation et de l'exploration des modèles d'univers possibles

# Hypothèses du modèle standard



Sa construction repose sur 4 hypothèses

1. Théorie de la gravitation [Relativité générale]
2. Matière [Modèle standard + CDM +  $\Lambda$ ]
3. Hypothèse de symétrie [Principe copernicien]
4. Structure globale [Topologie spatiale est triviale]

Implication: l'univers est en expansion.

# Modèle en couche

Le modèle du big bang est constitué de 4 couches, développées historiquement les unes après les autres.

Chacune repose sur une meilleure compréhension de la physique et est associée à des observations permettant de valider ses hypothèses.

*Modèle cosmologique  
standard  
contemporain*

# Relativité et cosmologie

*We take the origin of modern cosmology to be Einstein's general theory of relativity*  
Ralph Alpher & Robert Herman

# Oui, mais.....

*We take the origin of modern cosmology to be Einstein's general theory of relativity*  
Ralph Alpher @ Robert Herman

*But it really was a terrifically simple idea*  
Ralph Alpher

La cosmologie demande de décrire la matière  
*C'est la chose difficile*  
*La plupart des tests de la RG sont dans le vide*

*Nombre de familles de neutrinos*  
*neutrinos massif*  
*Matière noire*

Nature inclusive de la cosmologie  
*prendre en compte tous les progrès théoriques*

Période 1:

la cosmologie relativiste

# Naissance de la cosmologie

Février 1917: Einstein publie «*Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*» (Pruss. Akad. Weiss. Sitz.)

On peut considérer ce texte comme l'acte de naissance de la cosmologie moderne.

Avec sa théorie de la relativité générale, l'espace-temps lui-même devient un phénomène physique et on peut enfin essayer de déterminer la structure de l'espace-temps décrivant l'univers.

$$G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}] = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Toute solution des équations de la RG est un espace-temps, un univers.

# Naissance de la cosmologie

Résoudre cette équation est extrêmement difficile.

## **Limitation mathématique:**

- *10 Equations dérivées partielles non-linéaires couplés*
- *il faudrait connaître la distribution de matière dans tout l'univers,*
- *il faudrait connaître les conditions aux limites*

## **Limitation astrophysique:**

- *il faut connaître le contenu matériel de l'univers et sa distribution*
- *nous n'observons l'univers que depuis un point de l'espace-temps.*

Il faut donc trouver un guide pour faire des hypothèses simplificatrices.

Au lieu de déterminer la géométrie de l'univers on cherche une géométrie qui en est une « bonne » approximation.

# Les hypothèses d' Einstein 1917

Einstein va supposer:

1- l' espace est spatialement **fini**.

*Pour cela il est guidé par le principe de Mach.*

2- l' univers est **statique**.

*Cette hypothèse n' est pas justifiée. Mais on peut penser que c' est un héritage de la physique newtonienne.*

*Il n' y a aucune raison observationnelle pour remettre en cause cette propriété.*

3- la distribution de matière est **homogène**.

*C' est une hypothèse simplificatrice qui, avec la finitude, permet de régler le problème des conditions à l' infini.*

*La cosmographie ne permet pas de justifier cette hypothèse.*

Ces conditions sont trop contraignantes et Einstein prouve qu' il n' y a alors pas de solution des équations de la relativité générale SAUF si on les modifie pour inclure un terme (théoriquement possible): la constante cosmologique.

$$G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}] = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

# La fin de la staticité

En 1922, Alexandre Friedmann prouve qu'il existe des solutions dynamiques aux équations de la relativité sous les hypothèses:

- homogénéité de la distribution de matière de pression nulle
- il suppose une courbure spatiale nulle et positive (1922) puis négative (1924).

La réaction d'Einstein à ce travail se trouve dans:

- *Remarque sur le travail de A. Friedmann « Sur la courbure de l'espace »*  
[*Zeitschrift für Physik*, vol. XI, 1922, p. 326]

- *Remarque sur le travail de A. Friedmann « Sur la courbure de l'espace »*  
[*Zeitschrift für Physik*, vol. XVI, 1922, p. 228]

Dans une note antérieure<sup>a</sup> j'ai critiqué le travail susmentionné<sup>b</sup>. Mais -comme je m'en suis convaincu à l'instigation de Monsieur Krutkoff<sup>c</sup> et grâce à une lettre de Monsieur Friedmann - mon objection était fondée sur une erreur de calcul. Je tiens les résultats de Monsieur Friedmann pour justes et éclairants. Ils montrent que les équations du champ admettent pour la structure de l'espace à symétrie centrale, en plus des solutions statiques, des solutions dynamiques (c'est-à-dire variant avec la coordonnée de temps). ¶

**1924:** il souligne que « les équations d'univers à elles seules ne suffisent pas pour décider si l'univers est fini ou non. »

# Georges Lemaître

En 1927, Georges Lemaître va dériver de façon indépendante ces solutions dynamiques mais ne suppose plus que la pression est nulle.

Sa contribution (majeure) va largement au-delà:

1- **1927**: il donne une prédiction de l'expansion de l'univers: le décalage vers le rouge des galaxies lointaines, ce qui sera publié en 1929 sous le nom de « loi de Hubble »

Modèle sans singularité initiale: « Univers d'Eddington-Lemaître »

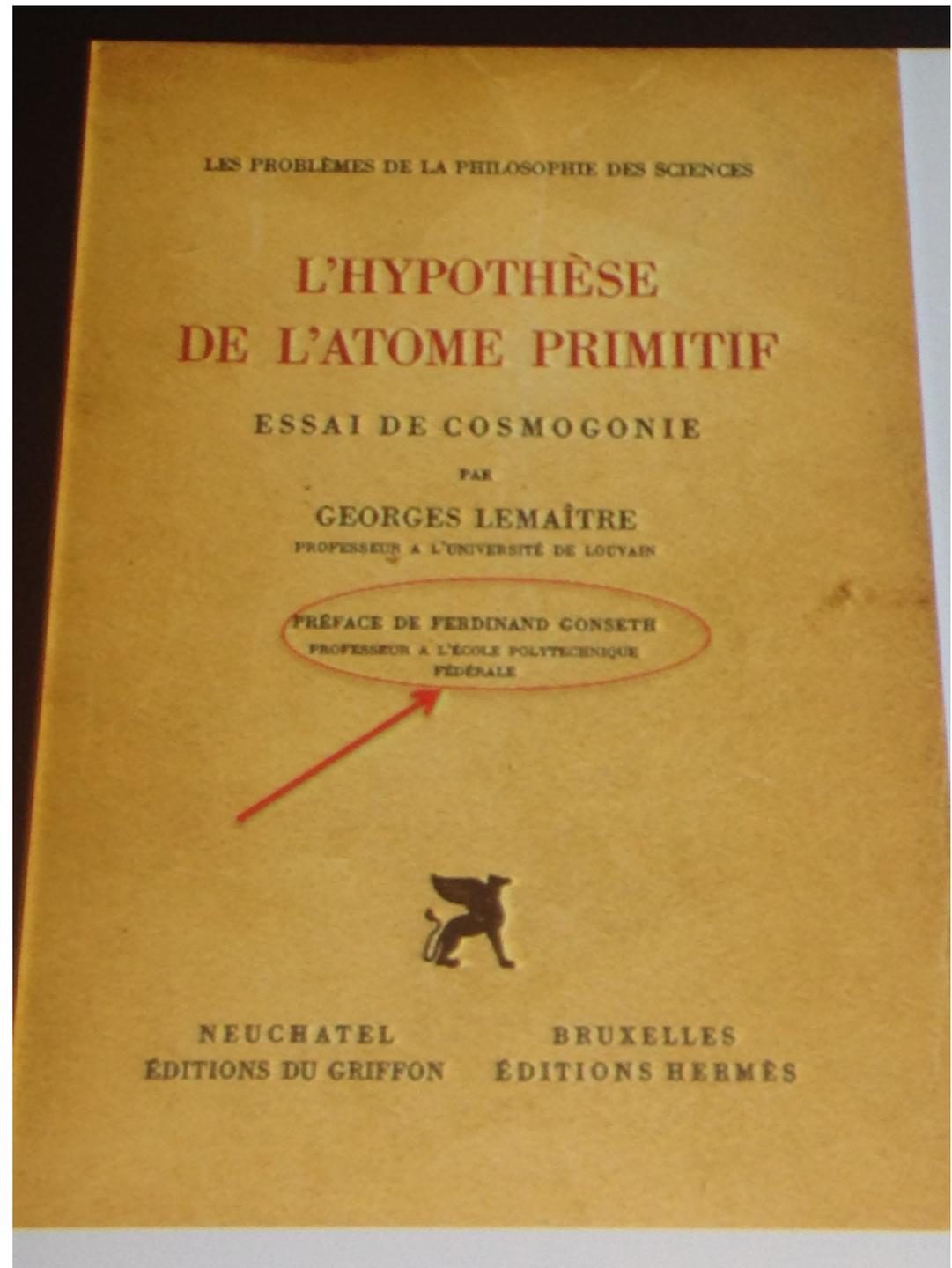
2- **1931**: hypothèse de l'« atome primitif ».

2- **1931**: hypothèse de l'« *atome primitif* », en réponse à une déclaration de son ancien professeur de Cambridge A. Eddington selon qui l'idée d'un commencement de l'univers était « philosophiquement répugnant ».

Proche de la singularité, on ne peut plus négliger la mécanique quantique.

Ne sera jamais décrit à l'aide d'un formalisme mathématique par Lemaître.

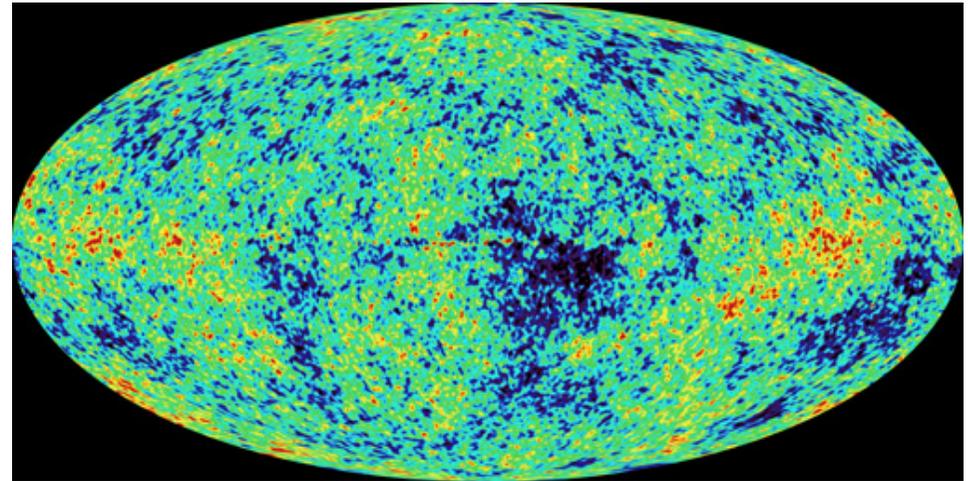
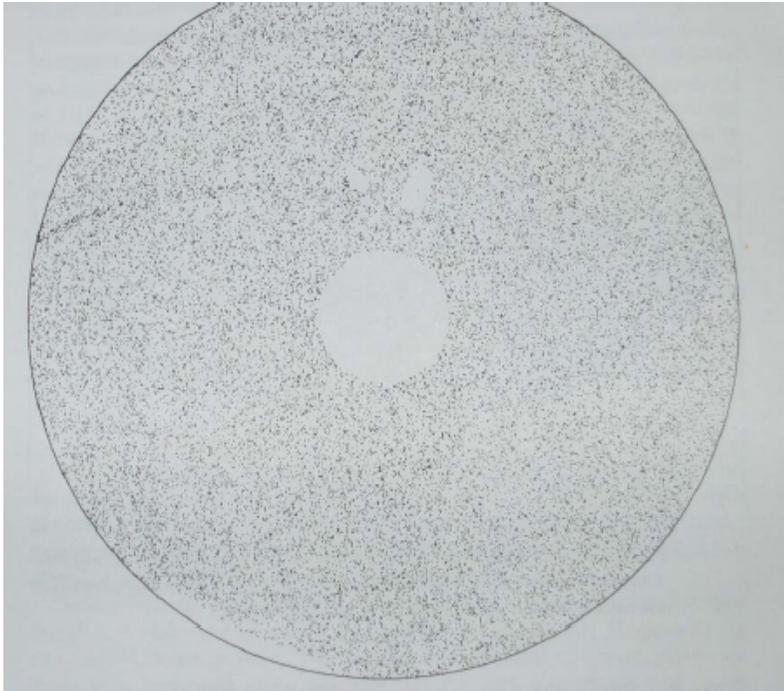
3- Il dérive des solutions cosmologiques qui ne sont pas homogènes spatialement.



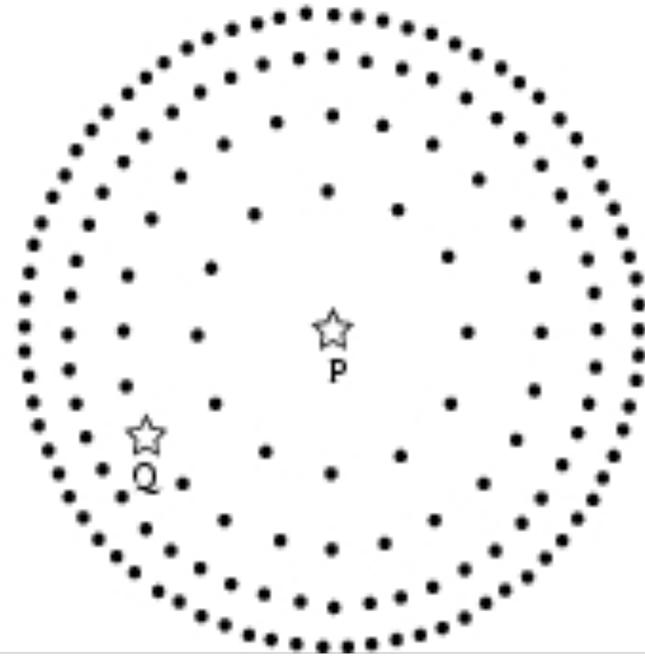
*Contruisons l'univers*

# Il faut regarder...

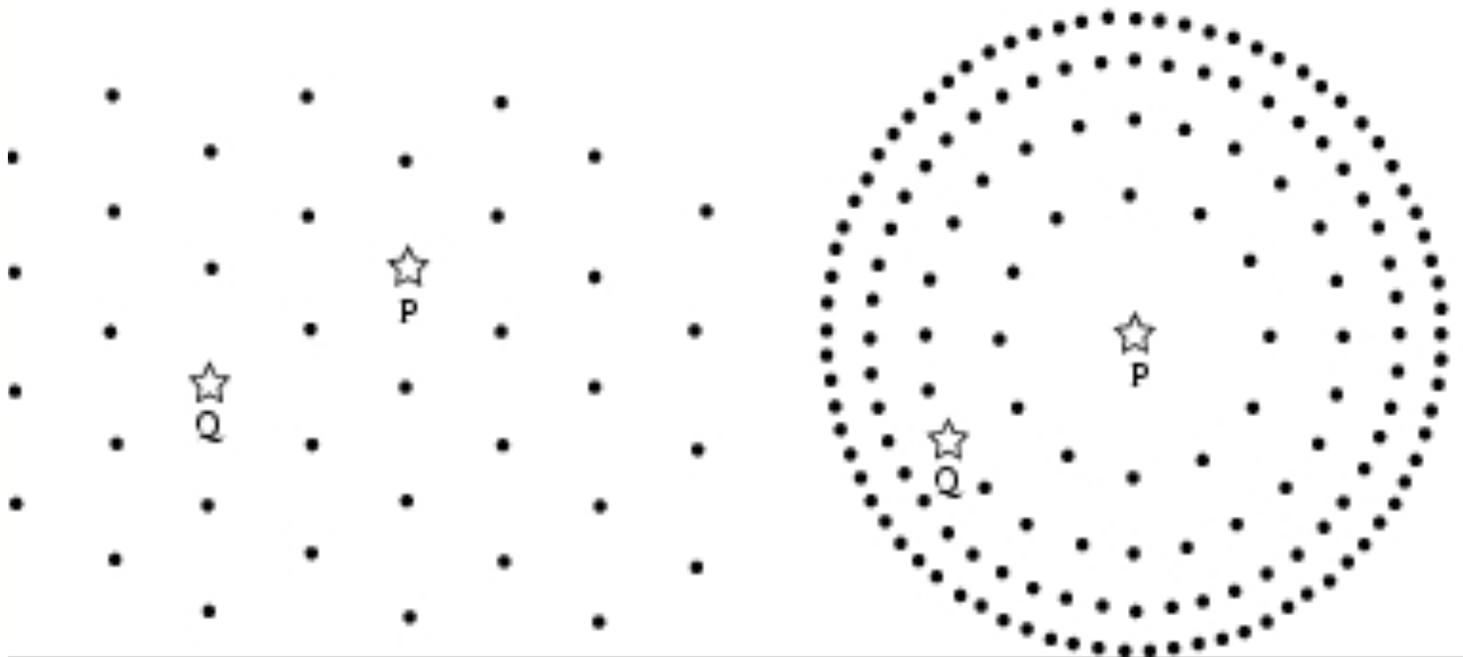
Observationnellement: l'Univers semble isotrope autour de nous



# Principes d'uniformité



# Principes d'uniformité



# Le principe copernicien

« *Nous n'occupons pas une place privilégiée dans l'univers* »

Modèles homogènes et isotropes

L'univers est en expansion (**dilatation**)  
*[Loi de Hubble]*

Loi d'expansion donne accès au contenu en matière.



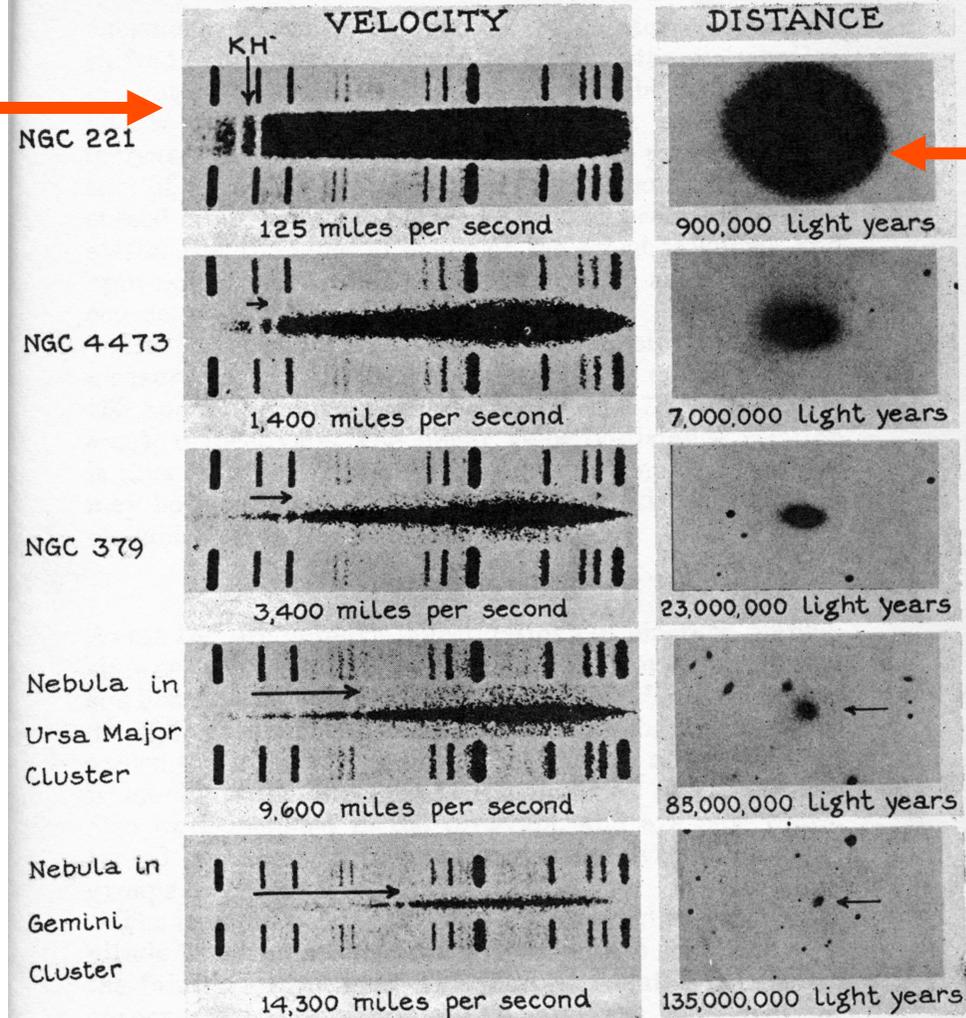
# Expansion / décalage spectral



THE VELOCITY-DISTANCE RELATION  
FOR EXTRA-GALACTIC NEBULAE

Le décalage spectral donne la vitesse

La taille apparente donne la taille



The arrows above the nebular spectra point to the H and K lines of calcium and show the amounts these lines are displaced toward the red end of the spectra. The comparison spectra are of helium.

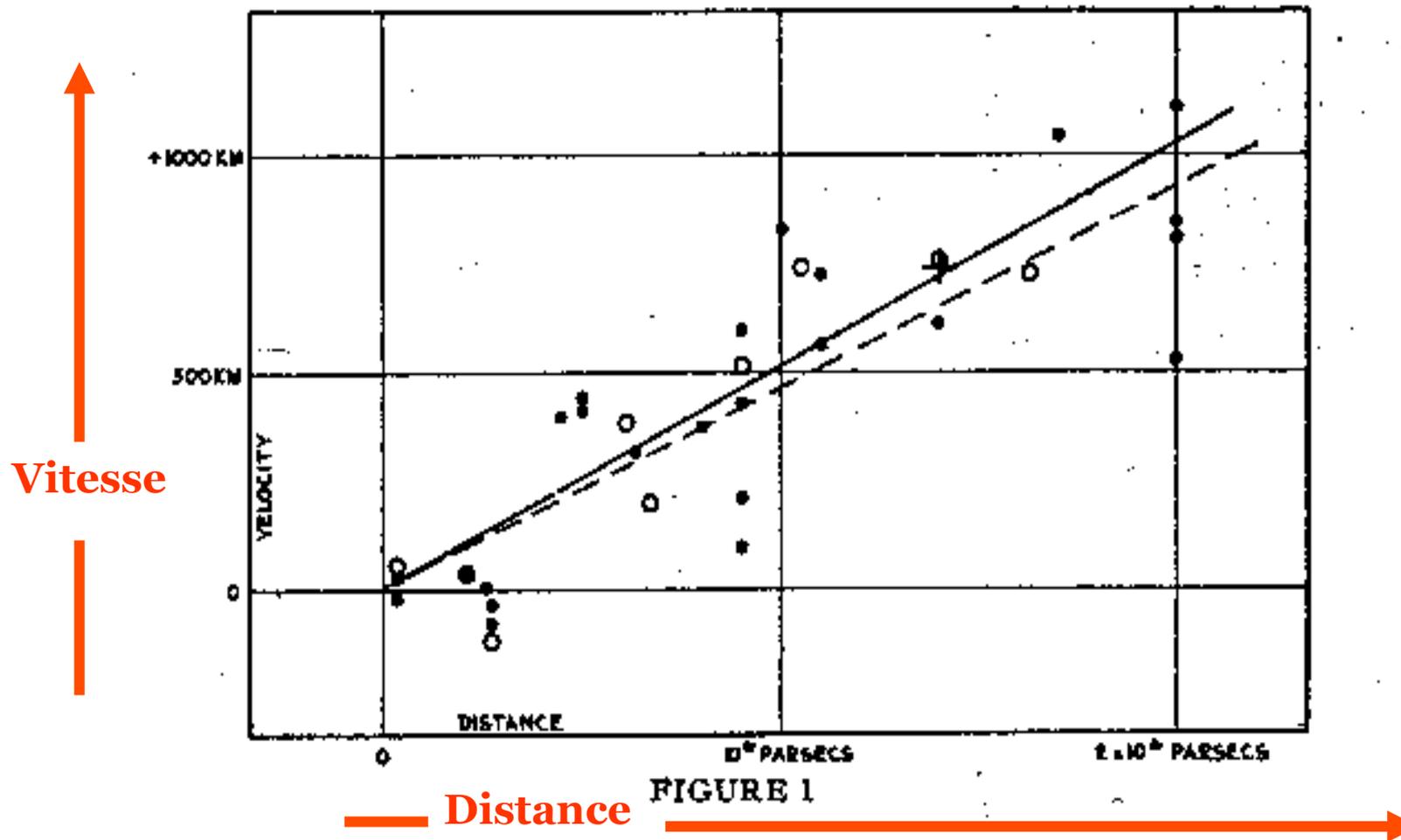
The direct photographs (on the same scale and with approximately the same exposure times) illustrate the decrease in size and brightness with increasing velocity or red-shift.

NGC 4473 is a member of the Virgo cluster and NGC 379 is a member of a group of nebulae in Pisces.

Edwin Hubble,  
1929

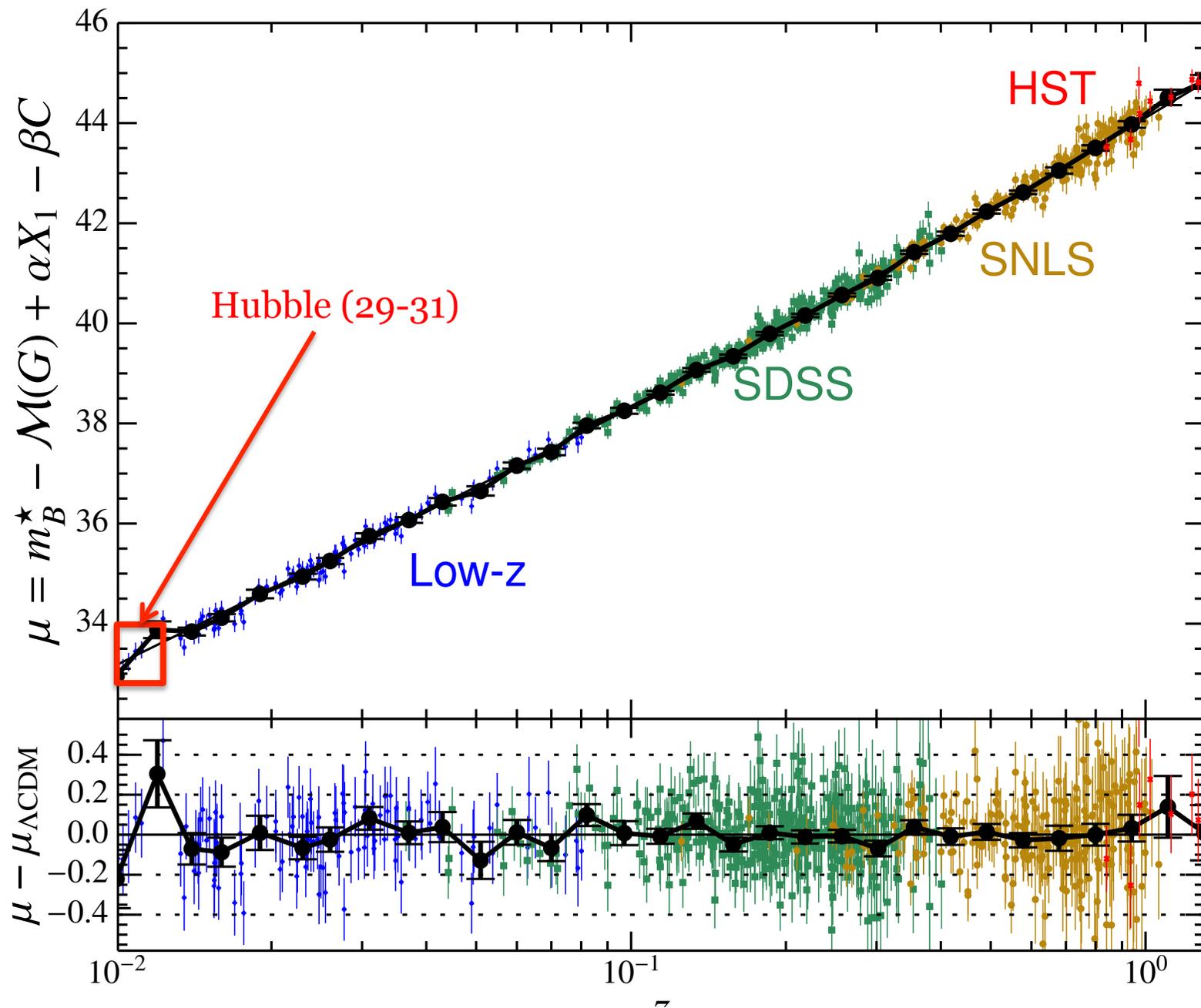
# Les conclusions de Hubble

E. Hubble, « A relation between distance and radial velocity among extra-galactic Nebulae », Proc. Natl. Acad. Sci. USA **15**, 168, 1929.



La vitesse est proportionnelle à la distance

# Aujourd'hui



# Les débats

- Dans cette période, la cosmologie est avant tout un débat de géomètres
  - *Peu de réflexion sur la matière*
  - *Origine de la courbure*
  - *Statique ou dynamique*
- Espace de liberté pour penser la relativité générale (J. Eisenstaedt)

# Les débats

On a, en germe les principaux débats qui vont animer la cosmologie:

1- La constante cosmologique et l'âge de l'univers

$$T = \frac{2}{3} H_0^{-1} \sim 6h^{-1} \times 10^9 \text{ ans}$$

2- La validité du principe copernicien:

- solutions spatialement anisotropes et homogènes de Bianchi
- solutions spatialement inhomogènes de Lemaître-Tolman
- Est-ce testable observationnellement?

3- Le débat Steady state vs Big Bang

4- La valeur des paramètres cosmologiques:

la courbure spatiale, la constante de Hubble

Le programme de cosmologie observationnelle se réduisait ainsi à une mesure de la densité moyenne de l'univers.

5- Lemaître (1931): « *une cosmogonie vraiment complète devrait expliquer les atomes comme les soleils* »...

Période 2:

le big bang chaud

# Cosmologie et thermodynamique

La nature de la cosmologie va évoluer vers 1940, principalement sous l'influence de George Gamow, mais aussi sous l'influence des travaux de Richard Tolman sur la thermodynamique dans les espaces en expansion.

On s'intéresse au membre de droite des équations d'Einstein.

L'hypothèse d'un gaz de pression nulle ne peut pas être toujours valable.

# Histoire thermique

Dans les phases primordiales de l'univers,  $P=0$  n'est pas une bonne hypothèse et la courbure de l'espace n'affecte pas la dynamique.

L'univers est de plus en plus chaud quand on se rapproche dans le passé.

L'univers se refroidit au cours de son expansion, ce qui implique **une histoire thermique**:

- des symétries peuvent être spontanément brisées;
- gel des interactions
- existence de particules reliques

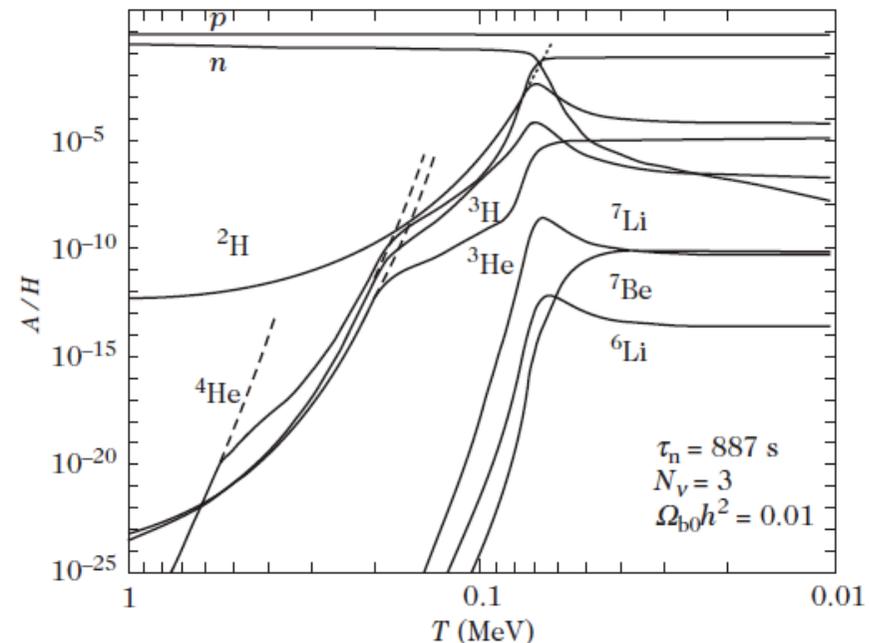
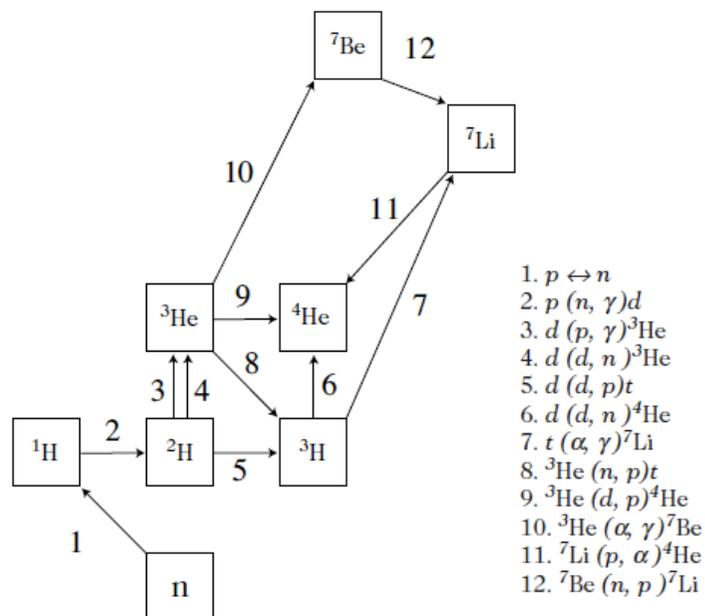
C'est ce que vont comprendre Gamow, Bethe, Alpher & Hermann sur le cas des interactions nucléaires et électromagnétiques, offrant ainsi les bases à 2 des piliers observationnels du modèle du big bang.

# 1948- Origine des éléments légers

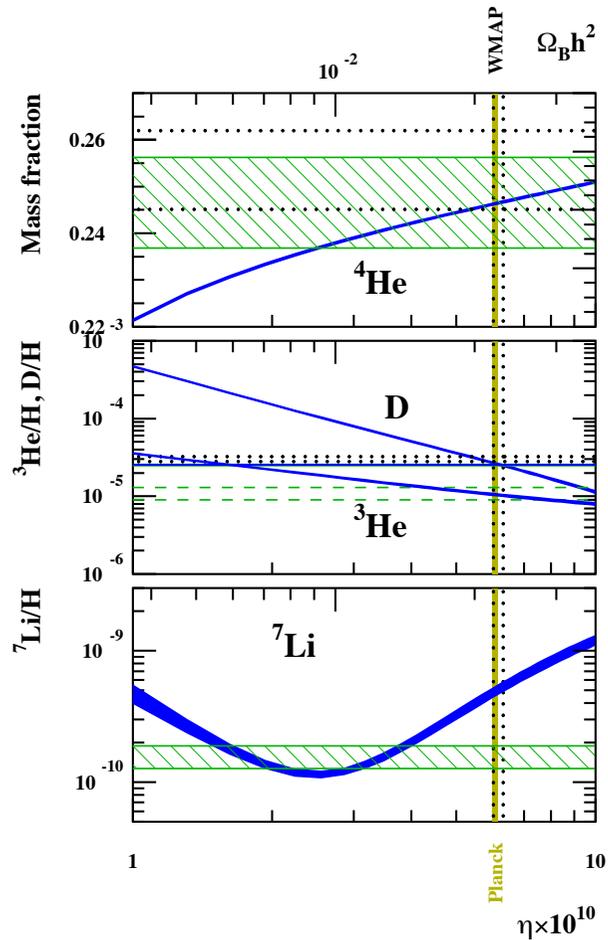
R.H. Alpher, H. Bethe, and G. Gamow, « The origin of chemical elements », Phys. Rev. Lett. **73**, 803, 1948.

Dans l'univers primordial, la température du bain de photons qui baigne l'univers est telle que les noyaux ne peuvent pas rester liés, typiquement dès que  $T > B_A$ .

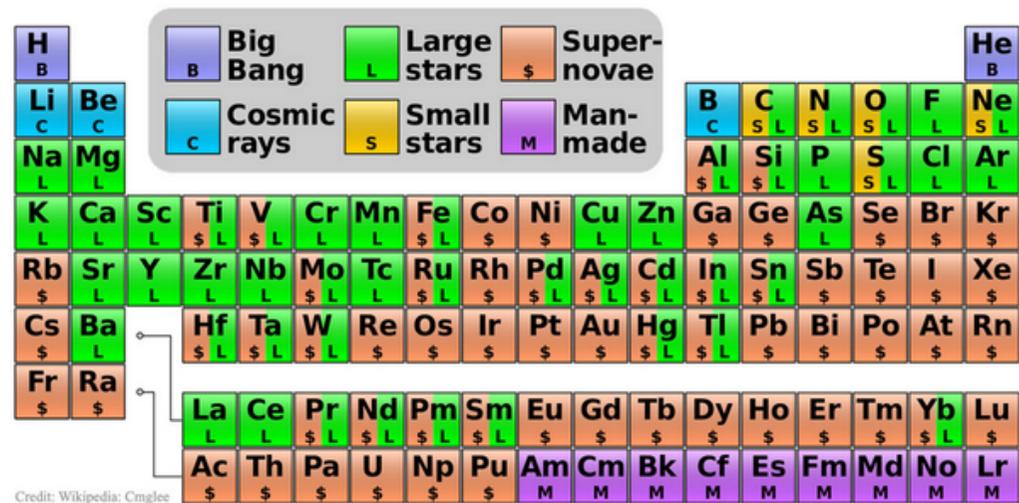
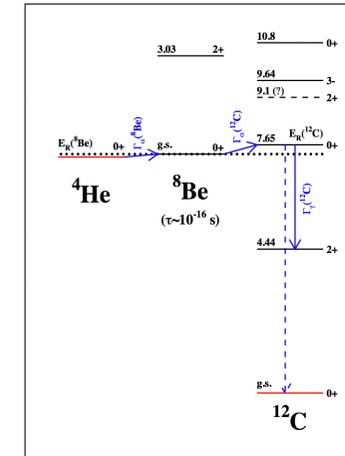
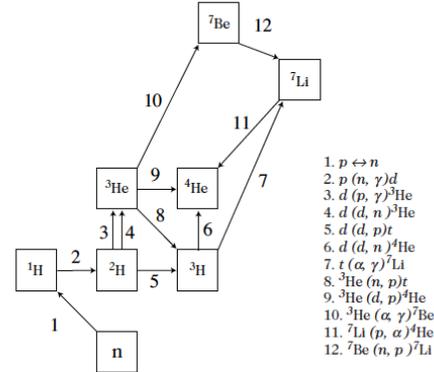
Ainsi pour  $T > 100$  MeV, l'univers ne contient que des protons, neutrons, photons, neutrinos, électrons et positrons



# 1948- Origine des éléments légers



Coc, Vangioni, JPU (2005-2015)



On comprend l'origine de tous les éléments!

# 1948- Fond de rayonnement fossile

**1948:** argument théorique par Gamow

[G. Gamow, 'The evolution of the Universe', Nature **162**, 680, 1948.]

**1948:** Prédiction de la température par Alpher et Herman

[R.A. Alpher and R. Herman, 'Evolution of the Universe', Nature **162**, 774, 1948.]

A haute température, l'hydrogène est ionisé et l'univers opaque.  
Le bain de photons est « libéré » à la recombinaison

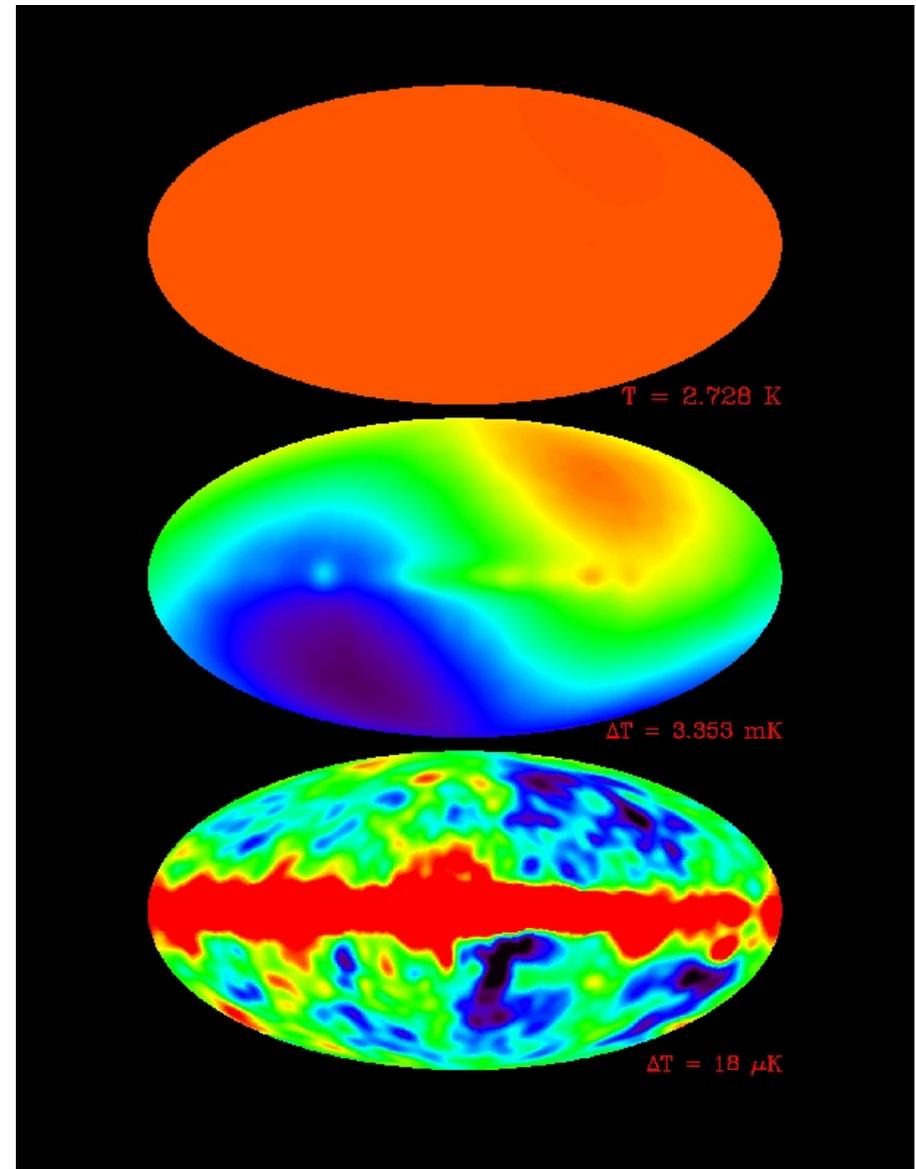
# Fond diffus cosmologique

La prédiction donne un ordre de grandeur car la densité baryonique était mal connue à l'époque.

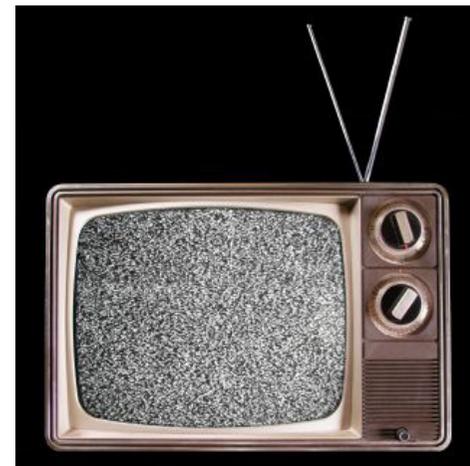
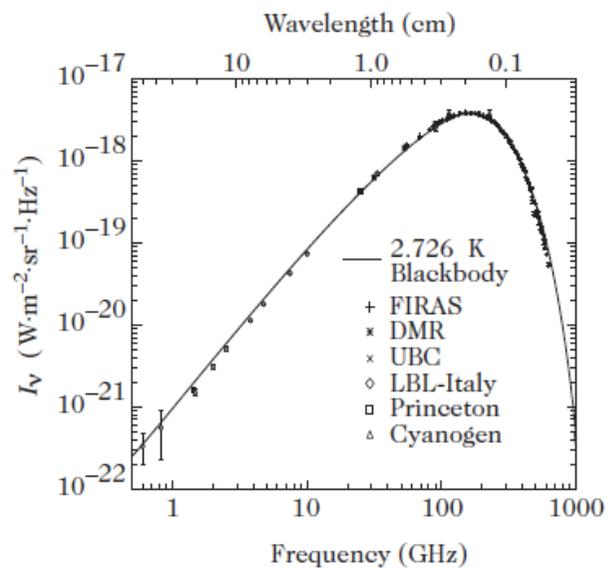
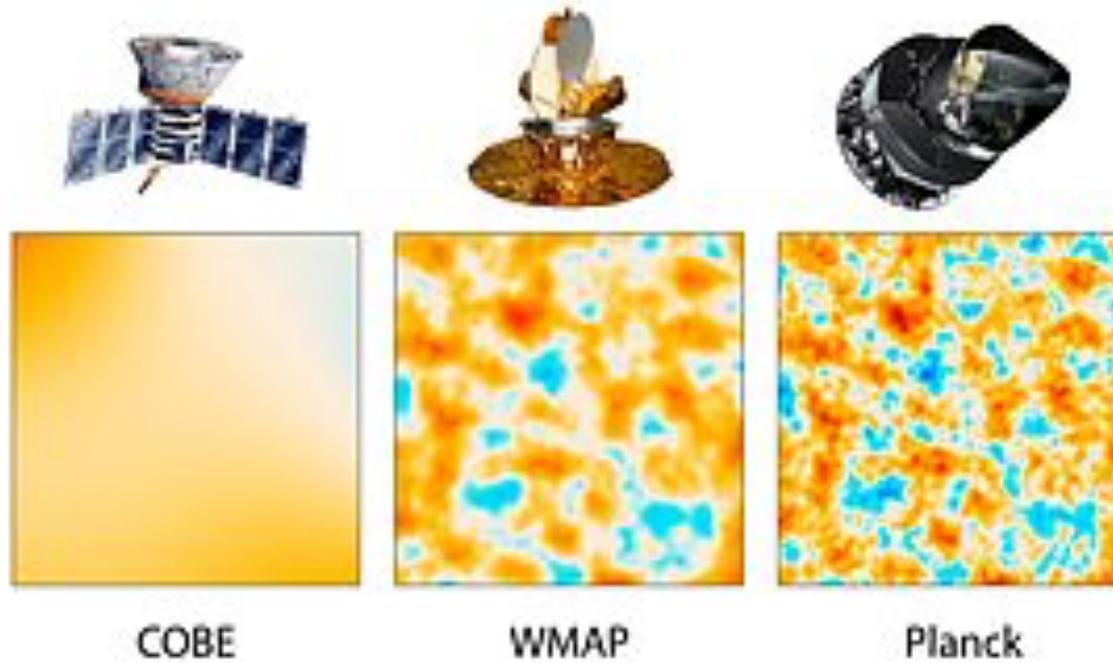
Cela correspond à un bain de radiation microonde.

Il sera découvert en 1964 par Penzias et Wilson à  $3.5 \pm 1$  K.

Notion d'univers observable.



# Fond diffus cosmologique

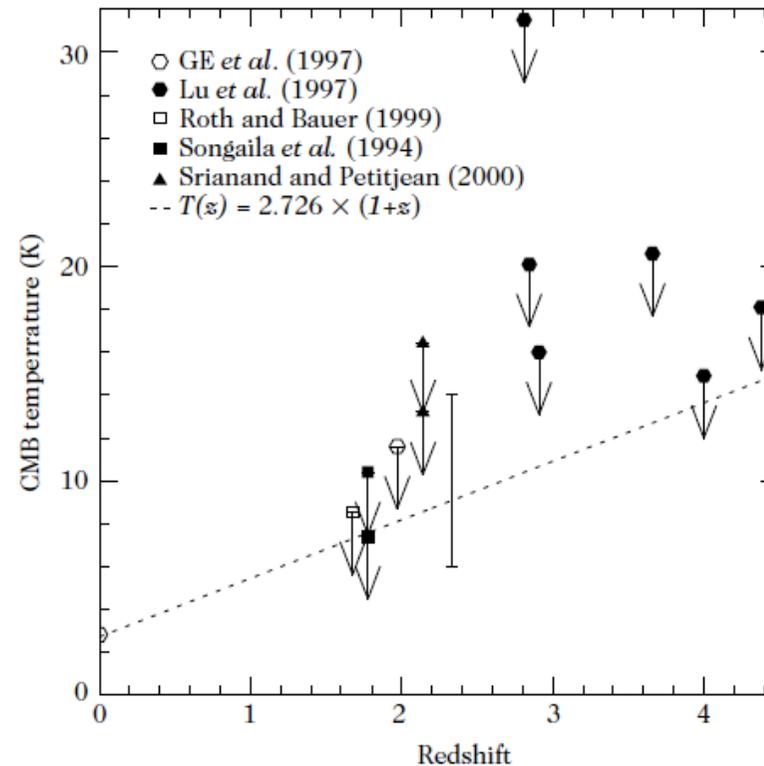


# 1948 – Le *Steady state*

Il y a des réticences, entre autre philosophiques, envers les modèles dynamiques (cf. Eddington).

**1948:** Fred Hoyle, Hermann Bondi, Thomas Gold propose un modèle stationnaire. *cela nécessite une création continue de matière permettant à l'univers d'avoir une densité constante tout en étant en expansion.*

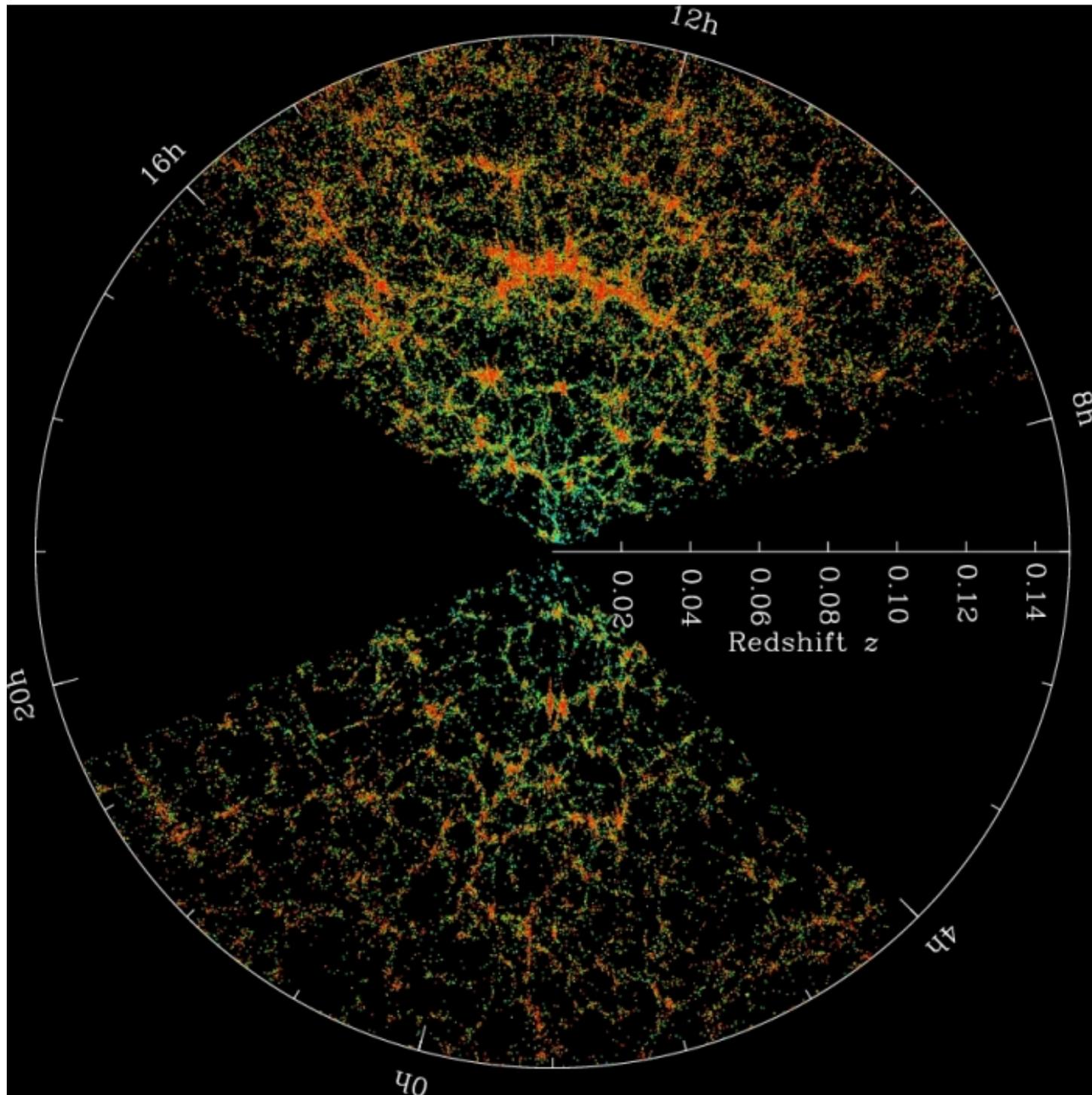
**28 mars 1949,** BBC: Fred Hoyle utilise le terme de « big bang »



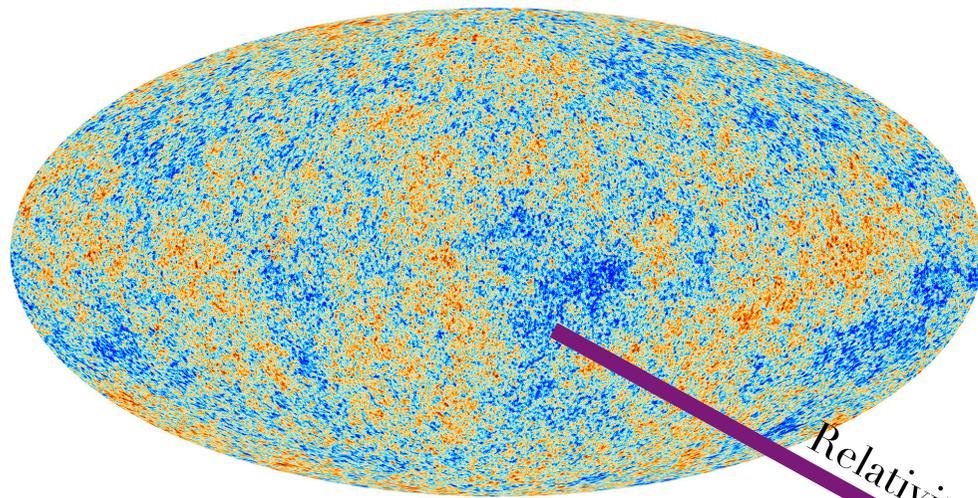
Période 3:

Les grandes structures

SDSS

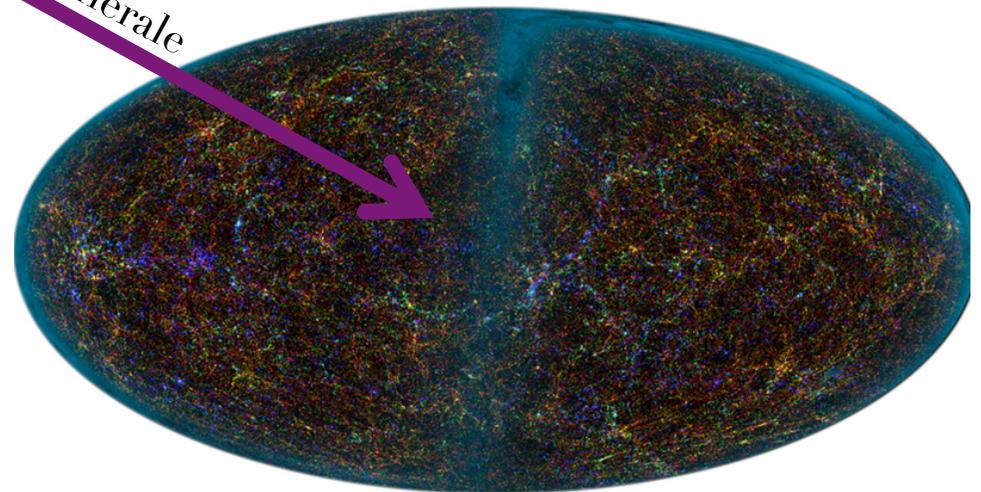


# Une explication cohérente



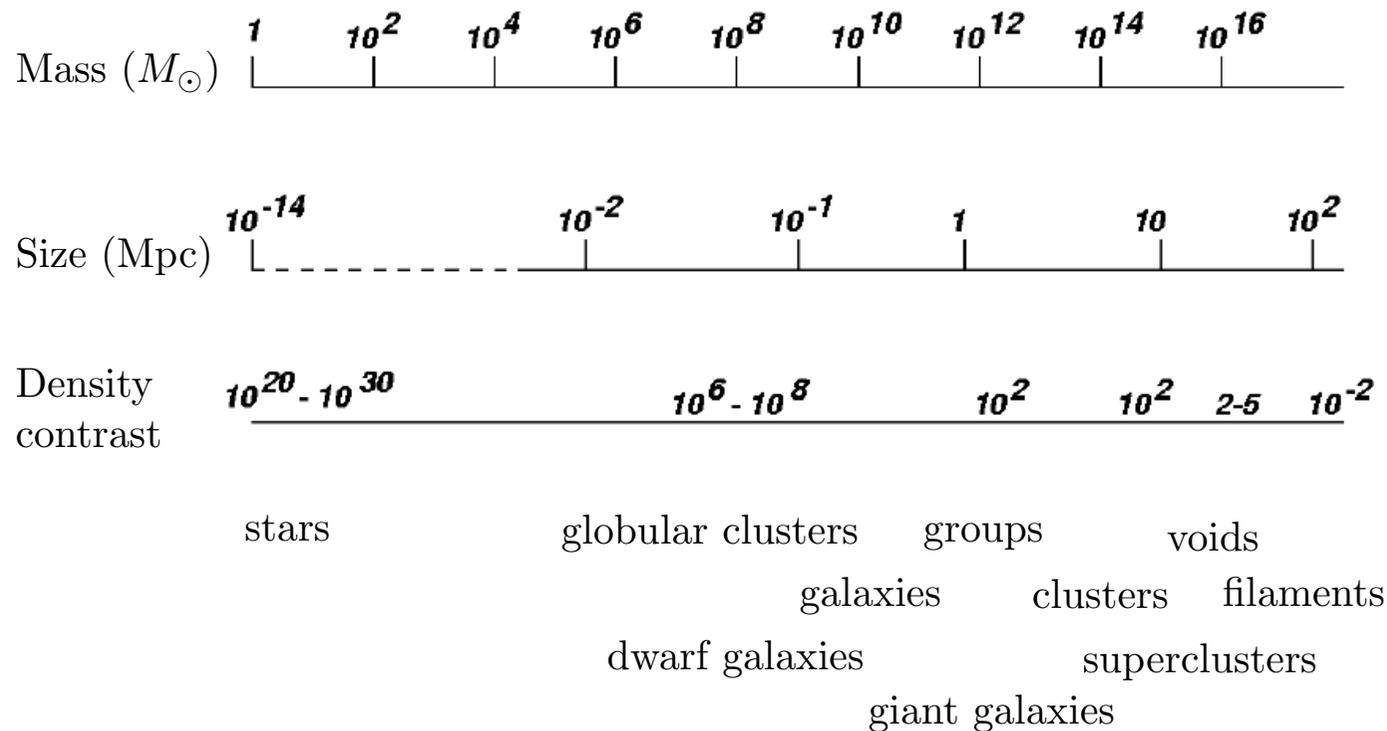
Planck

*Relativité Générale*



2Mass

# Une explication cohérente

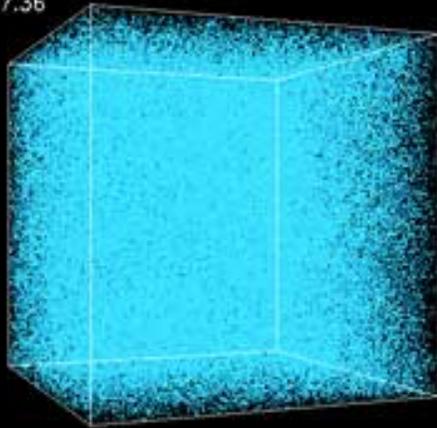


Approche analytique + simulation numérique

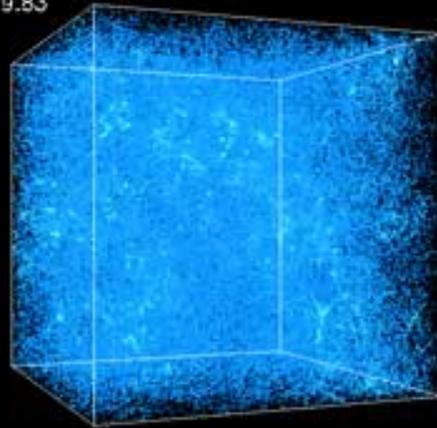
La structuration de l'univers dépend:

- des conditions initiales,
- du contenu en matière de l'univers

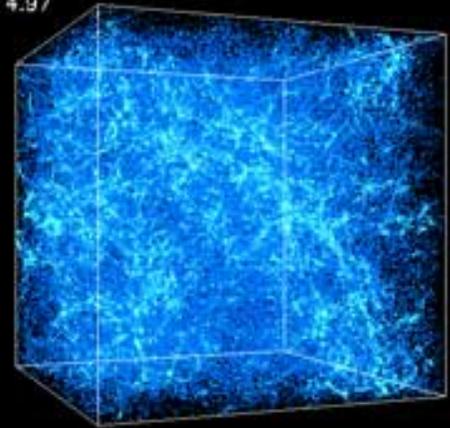
Z=27.36



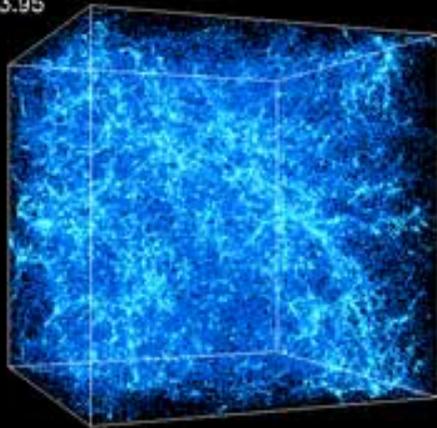
Z= 9.83



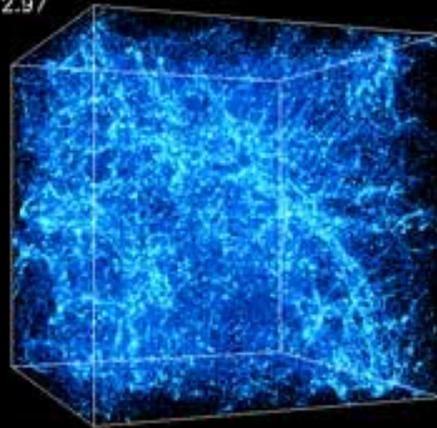
Z= 4.97



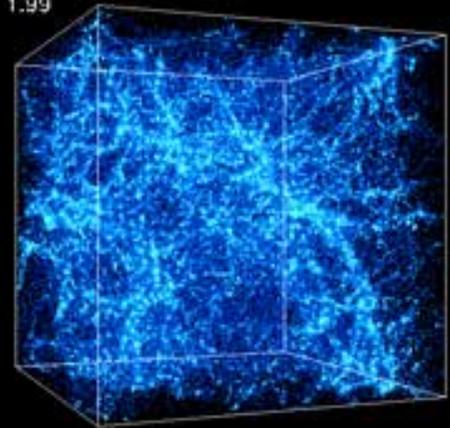
Z= 3.95



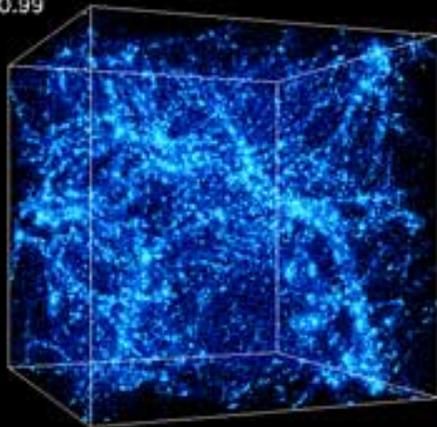
Z= 2.97



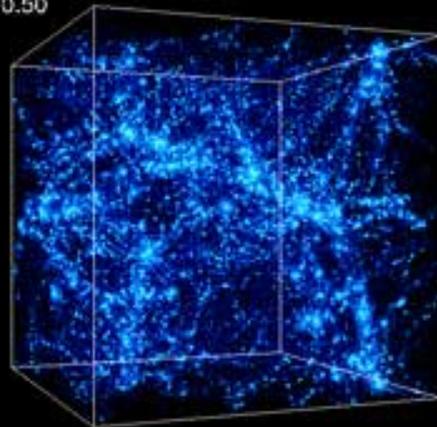
Z= 1.99



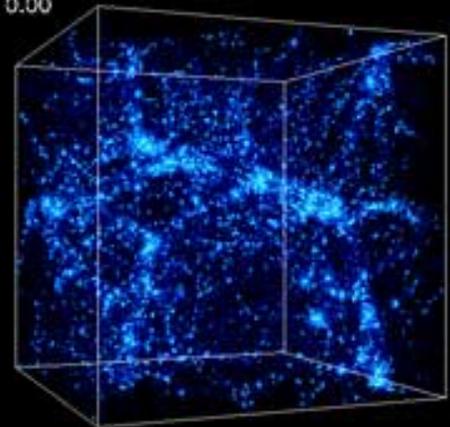
Z= 0.99

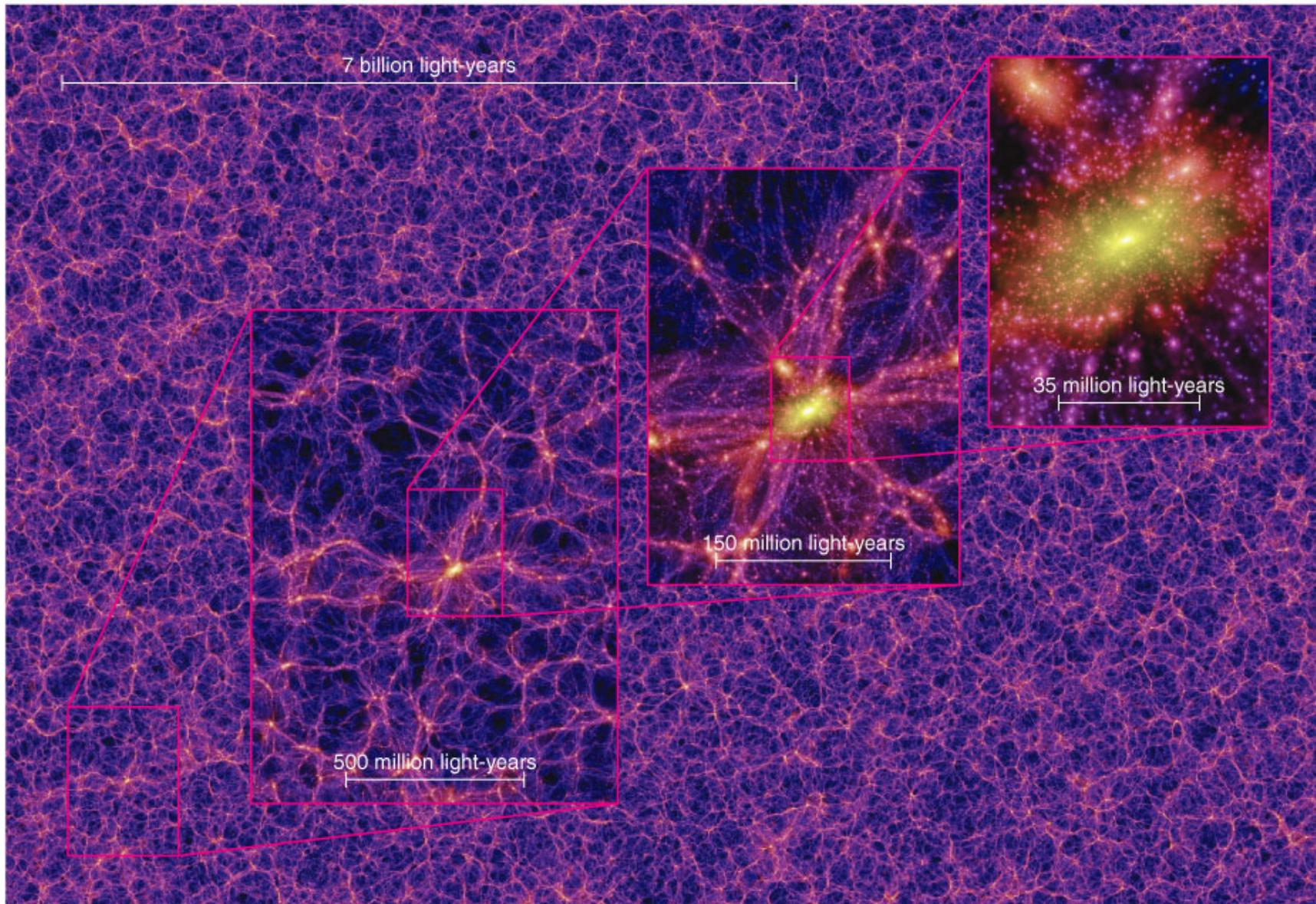


Z= 0.50



Z= 0.00





**A partir des années 1970:** origine des grandes structures et des galaxies.  
quand, comment?

Le mécanisme d'effondrement gravitationnel ne semble pas permettre de comprendre la croissance des grandes structures.

*inhomogénéités ne croissent significativement qu'après l'égalité.*

*Il faut des perturbations de densité initiales, avec un spectre invariant d'échelle sur des échelles super-Hubble: cela semble être acausal.*

**1980:** Echec des modèles de formation des structures avec matière baryonique seule.

On doit introduire le concept de matière noire, pour toute une série de raisons (on va y revenir.... Patience).

# Bilan

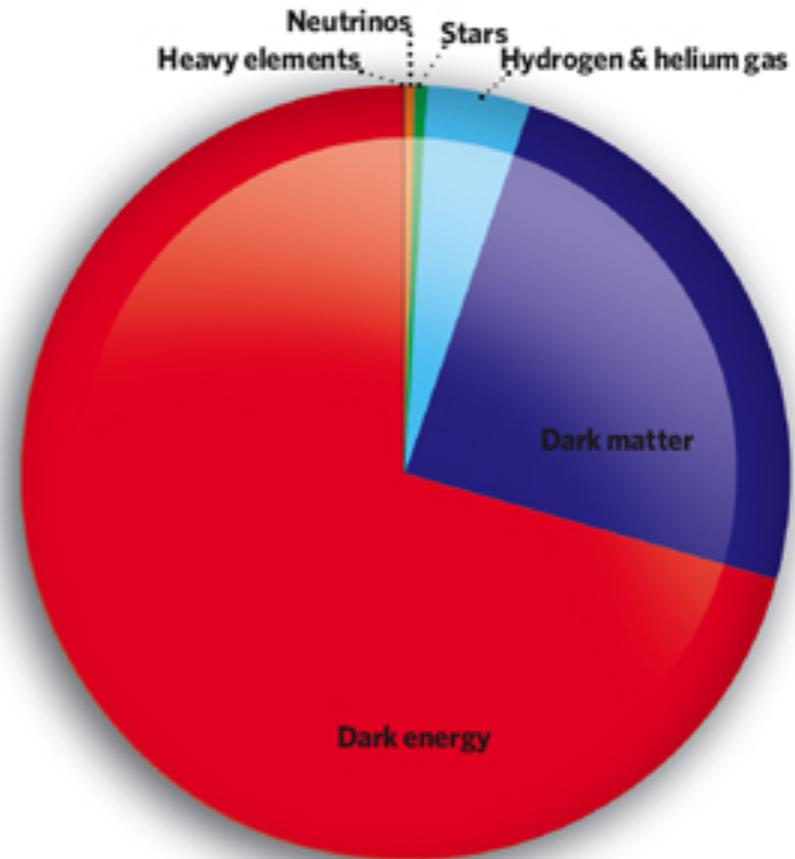
L'analyse de toutes les données cosmologiques pointent vers deux conclusions:

- Il faut invoquer d'un nouveau type de matière, la *matière noire*, afin de comprendre les grandes structures

- On doit invoquer l'existence d'une « *énergie sombre* » pour rendre compte de la dynamique récente de l'expansion cosmique

La forme la plus simple d'énergie sombre est une nouvelle constante dans les lois de la nature:

*la constante cosmologique*



# Est-ce un bon modèle?

On a construit un modèle fondé sur 3 hypothèses

- la relativité générale offre une bonne description de la gravitation
- la matière est celle connue en laboratoire/accélérateur
- un principe de symétrie

On a ensuite construit un modèle cosmologique en extrapolant ces hypothèses à l'univers dans son ensemble.

Mais

- La relativité générale est essentiellement testée dans le système solaire
- On observe l'univers depuis un seul point, ce qui ne permet pas de vérifier l'homogénéité de l'espace.

Peut-on tester ces deux hypothèses?

Période 4:

La cosmologie primordiale

# Incomplétude du modèle du big bang

## **Problèmes du modèles du big bang:**

- problème de la platitude
- problème de l' horizon
- problème des reliques
- problème de l' origine des structures.

# Incomplétude du modèle du big bang

## Problèmes du modèles du big bang:

- problème de la platitude
- problème de l' horizon
- problème des reliques
- problème de l' origine des structures.

Ces problèmes peuvent être résolus si on suppose l' existence d' une phase primordiale d' expansion accélérée:

- idée est proposée par Guth en 1981

[ 'Inflationary Universe: a possible solution to the horizon and flatness problems' , Phys. Rev. D 23, 347, 1981.]

- précurseurs à cette idée

[R. Brout, F. Englert and E. Gunzig, 'The creation of the Universe as a Quantum phenomenon' , Ann. Phys. 115, 78, 1978. A. Starobinsky, 'Spectrum of relic gravitational radiation and the early state of the Universe' , JETP Lett. 30, 682, 1979.]

# Modèles d'inflation

Le modèle d'inflation va avoir de nombreux développements et succès:

- implémentation en terme de champ scalaire

[A. D. Linde, 'A new inflationary scenario: a possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems', Phys. Lett. B 108, 389, 1982]

Différents modèles (transition de phase du premier ou second ordre)

- Origine quantique des inhomogénéités de courbure

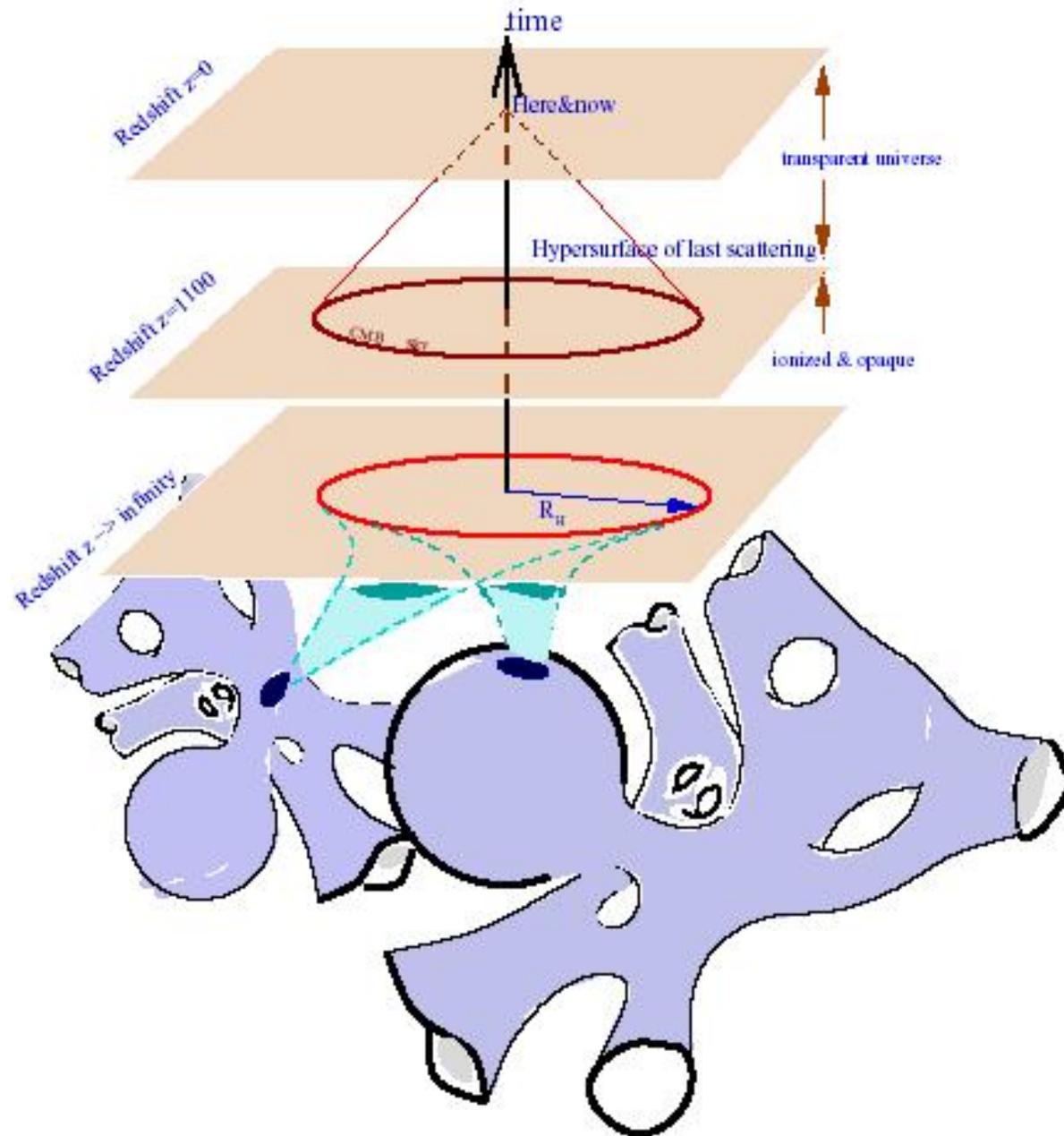
[V. Mukhanov and G. Chibisov, 'Quantum fluctuations in a nonsingular Universe', JETP Lett. 33, 532, 1981]

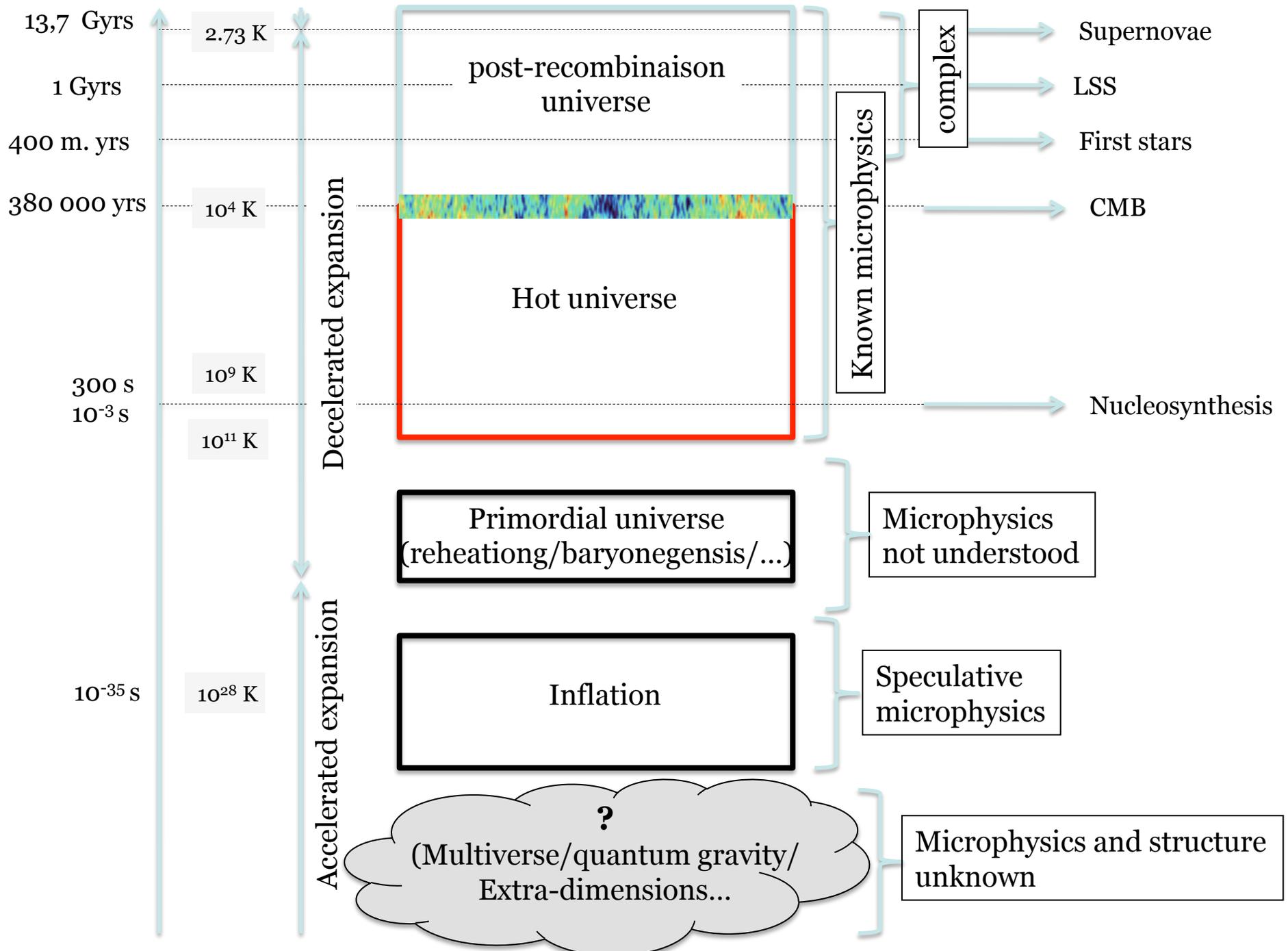
- Conditions initiales chaotiques

[A. Linde, 'Chaotic inflation', Phys. Lett. B 129, 177, 1983]

- Modèles d'inflation éternelle

# Implications pour la représentation de l'univers





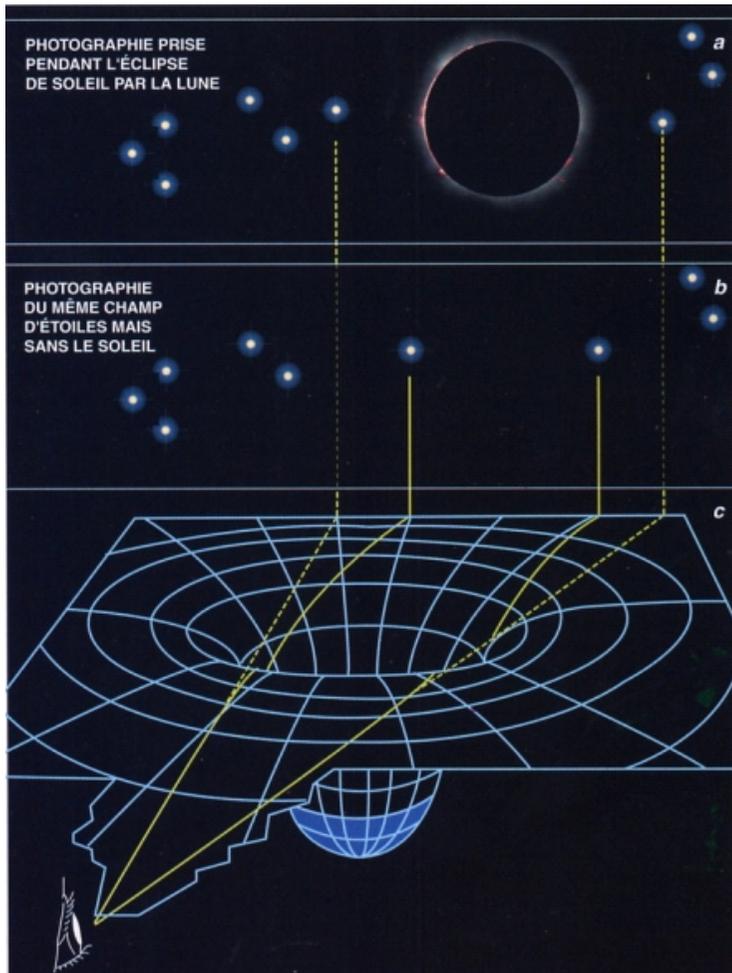
*Aujourd'hui, et demain*

GR aujourd'hui 1:

Lentilles gravitationnelles

# Lentilles gravitationnelles

La géométrie est universelle.



## LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less  
Agog Over Results of Eclipse  
Observations.

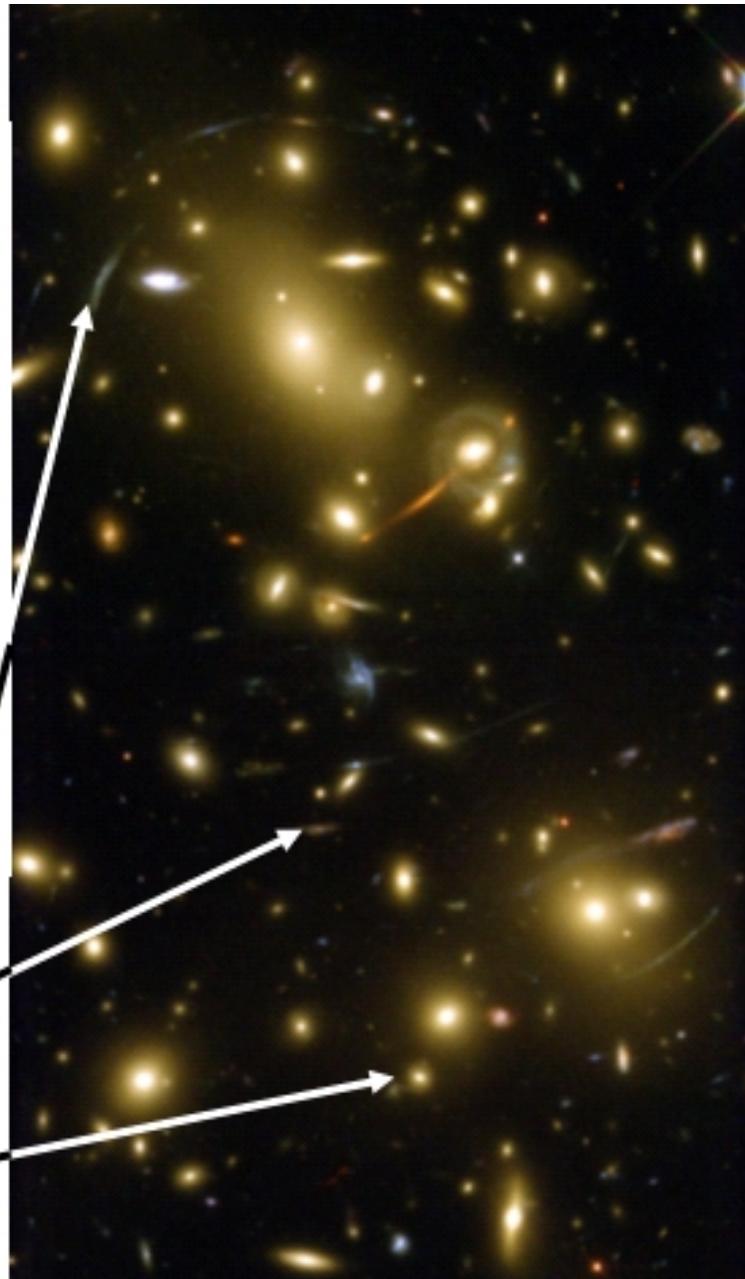
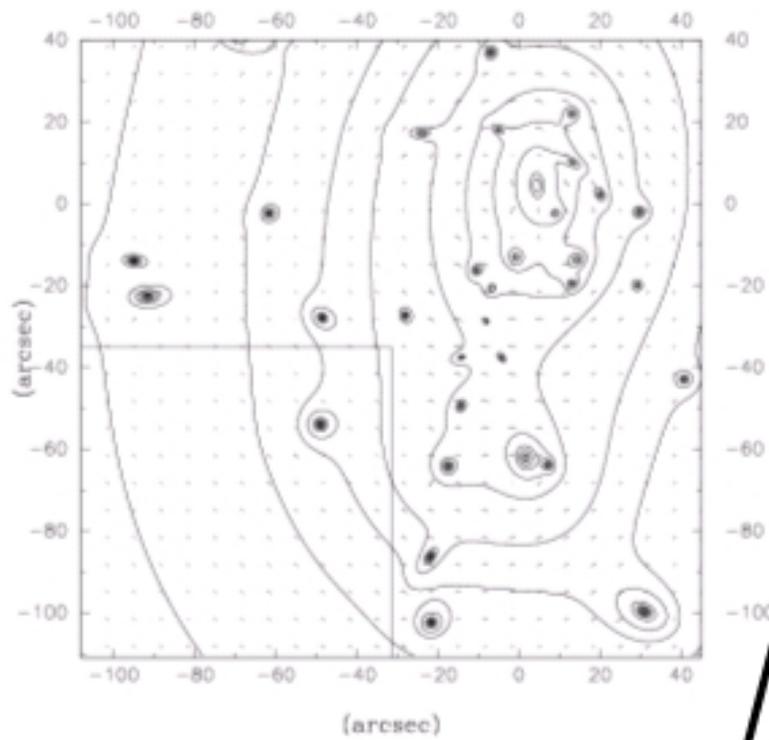
### EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed  
or Were Calculated to be,  
but Nobody Need Worry.

### A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could  
Comprehend It, Said Einstein When  
His Daring Publishers Accepted It.

Special Cable to THE NEW YORK TIMES.  
November 10, 1919



Arcs géants

Arclets

Distortion faible

# Matière noire (1)

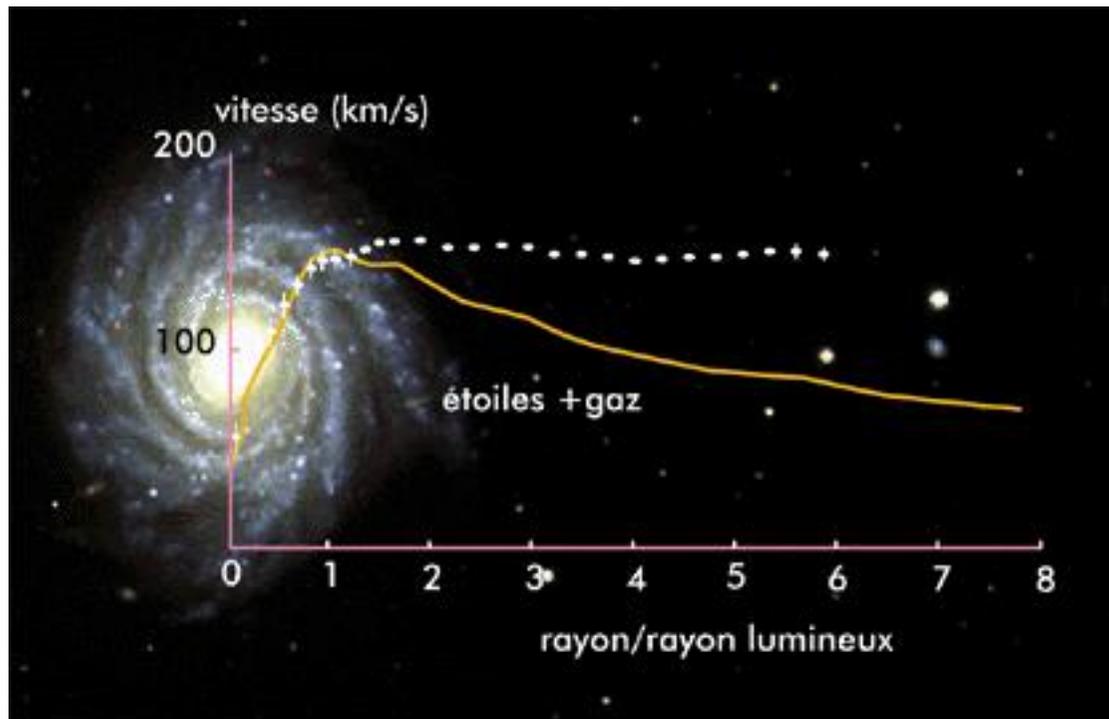
La gravitation est universelle.



Pour la dynamique des galaxies...



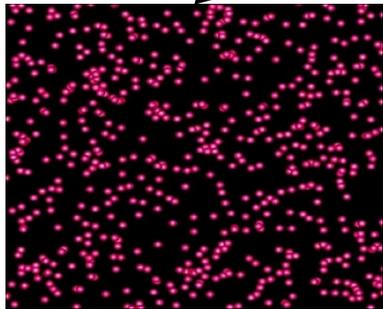
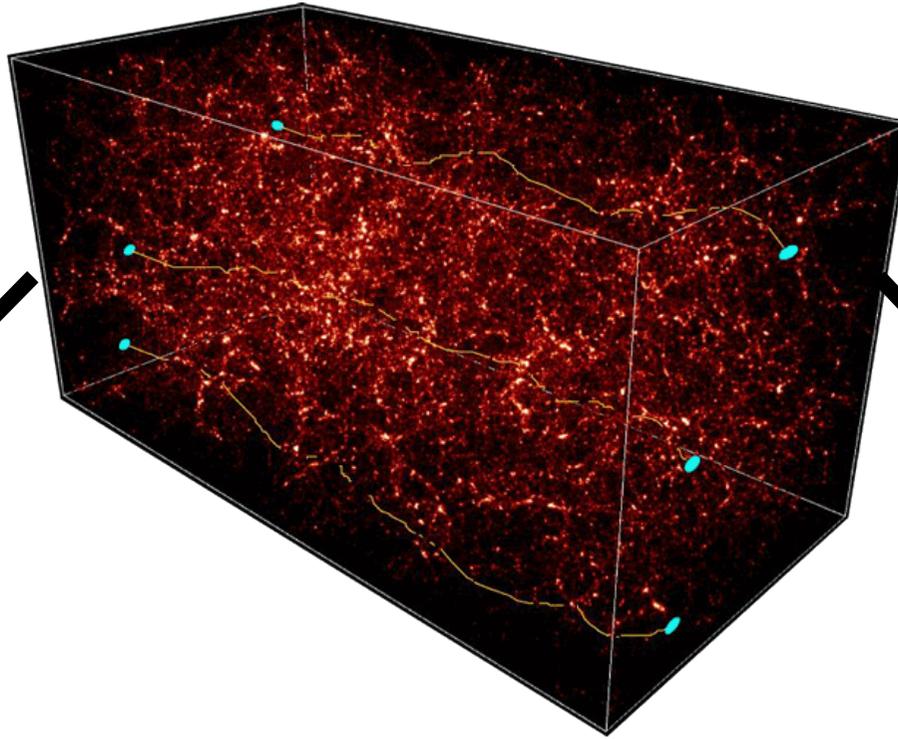
... et des amas



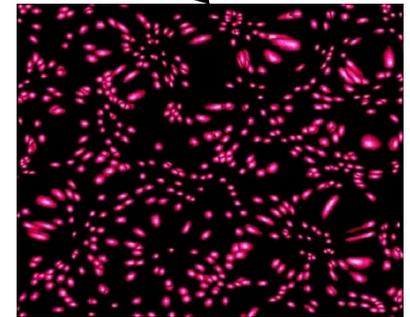


# Lensing

Large scale structure

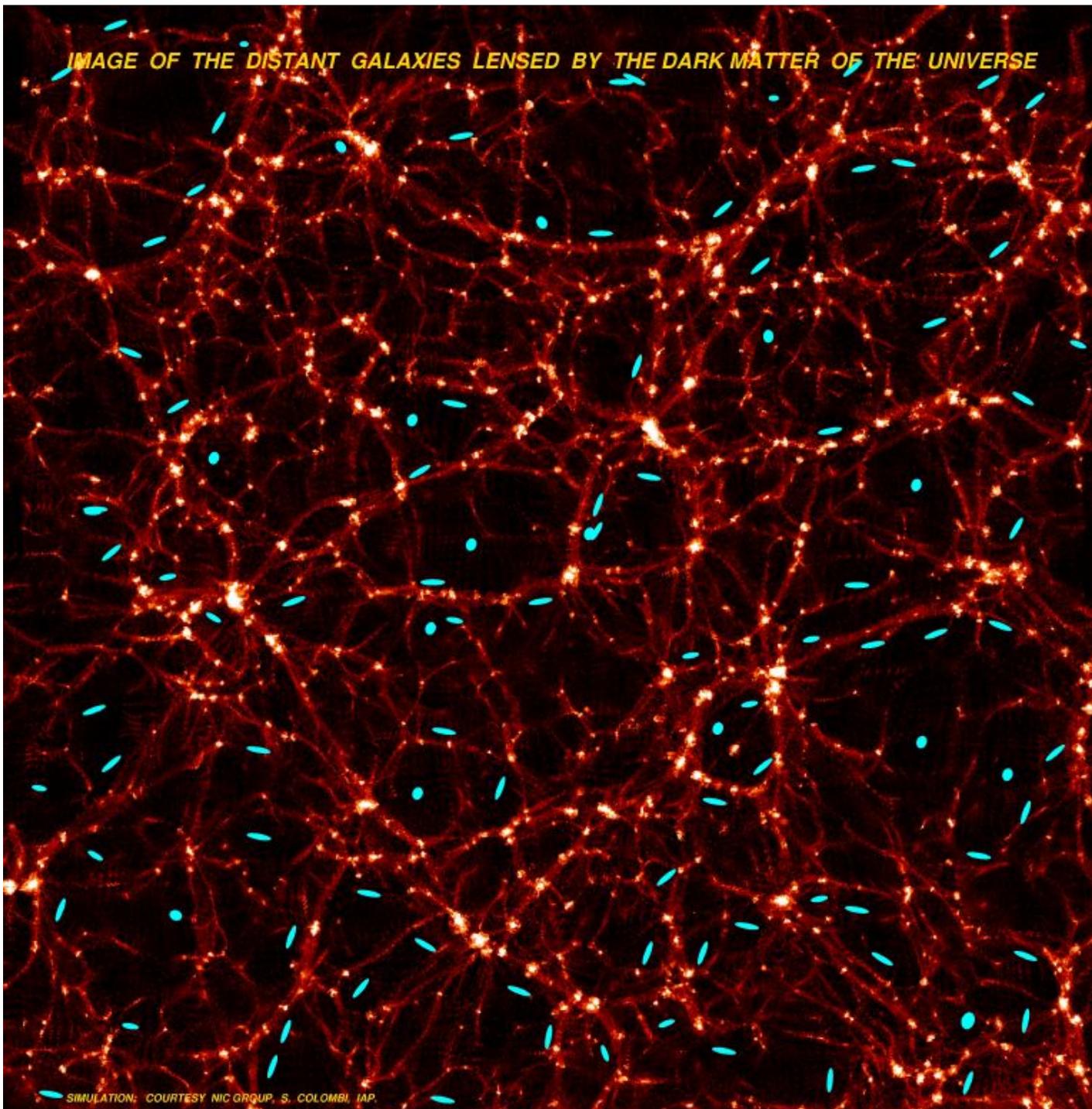


Distribution of matter

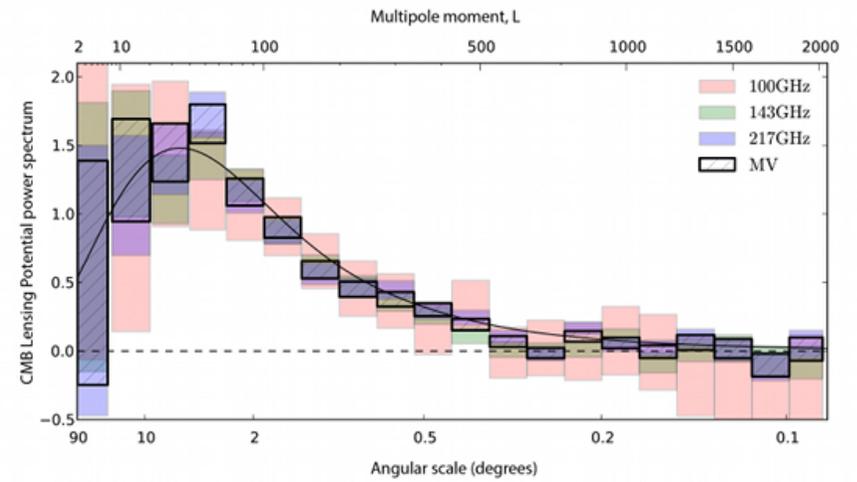
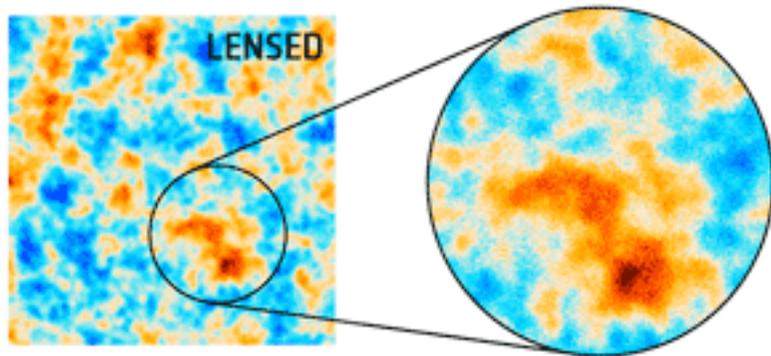
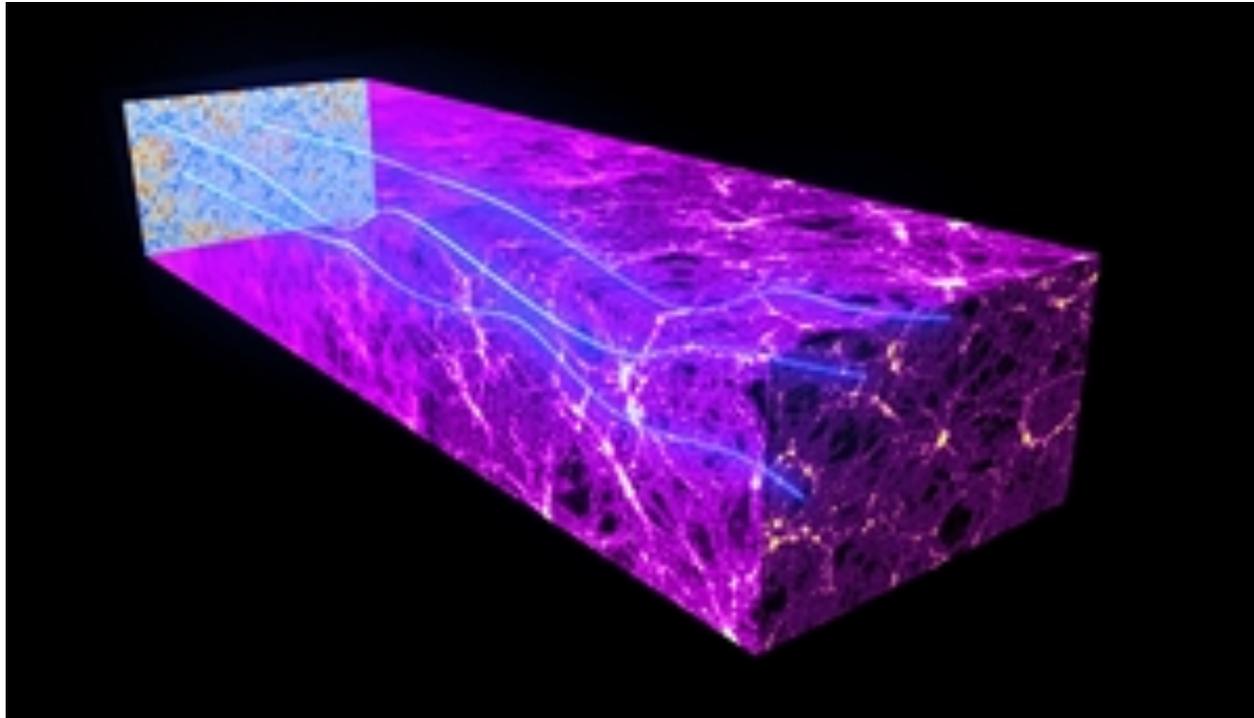


Gravitational lensing

IMAGE OF THE DISTANT GALAXIES LENSED BY THE DARK MATTER OF THE UNIVERSE

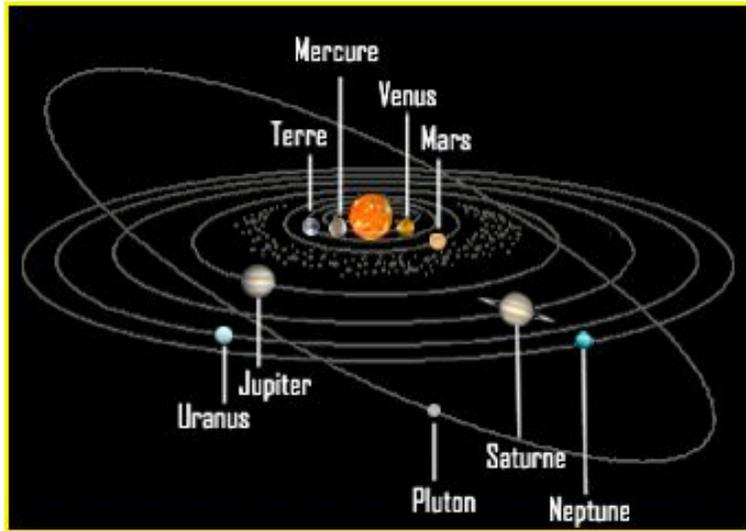


SIMULATION: COURTESY NIC GROUP, S. COLOMBI, IAP.

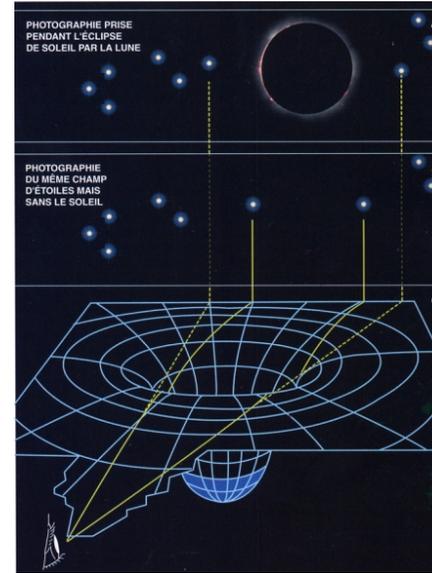
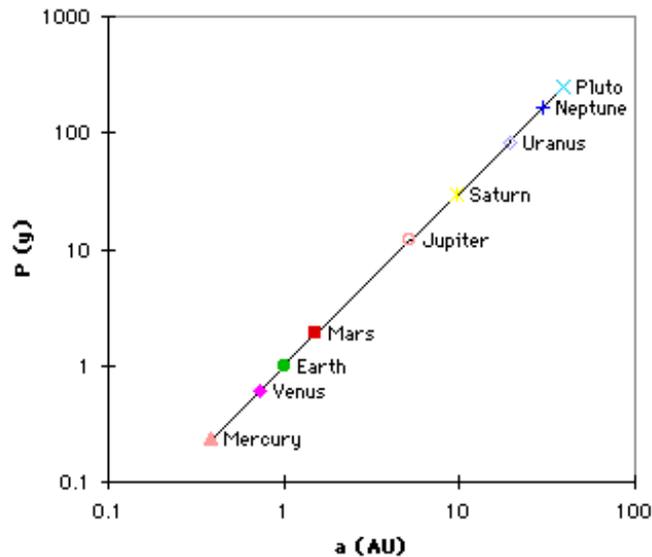


GR aujourd'hui 2:  
Tester la RG

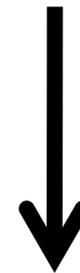
# Tester la relativité générale



Orbite des planètes (loi de Kepler)

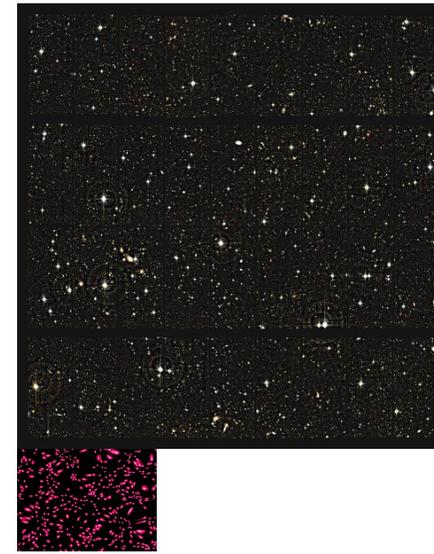
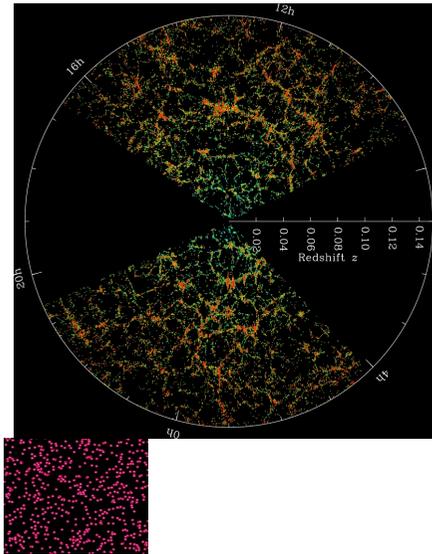
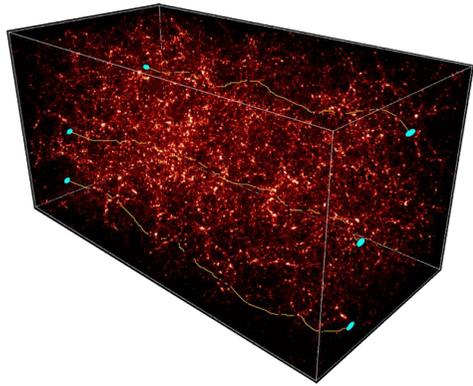


Déflexion de la lumière



Accord nécessaire.

# Tester le relativité à grande échelle



Mesure de la **distribution de matière**  
(source du potentiel gravitationnel selon RG)

Mesure du **potentiel gravitationnel**  
(source de la déflexion selon RG)

En accord?

Test la relativité générale au delà de ce qui est fait dans le système solaire.

Objectif de la mission ESA: Euclid (+ champ de vitesses)

# Principe d'équivalence

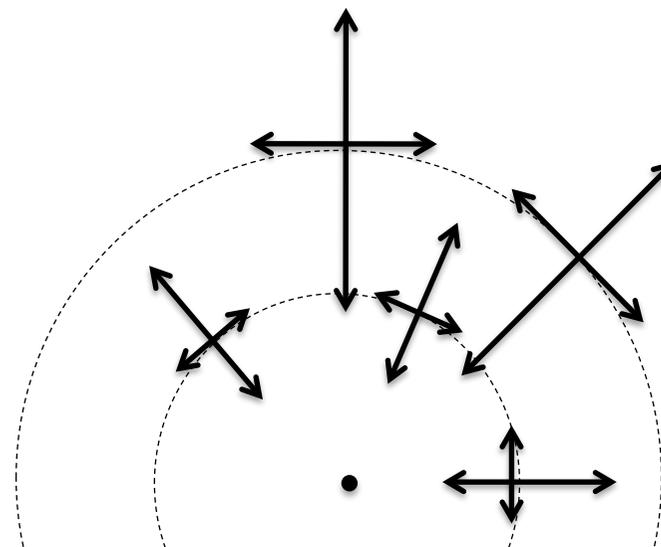
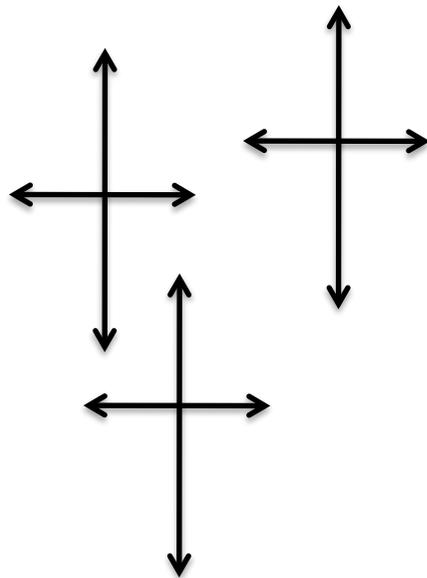
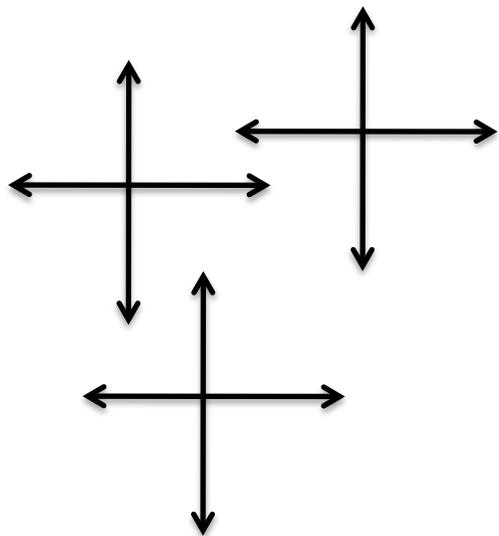
## Constantes fondamentales:

- Dirac (1934)
- Robert Dicke
- Lien principe d'équivalence
  
- violé dans la plupart des extensions de la RG
  
- Webb 1999
- nombreux tests  
*[BBN, CMB, QSO, Pop III, horloges...]*
  
- *lien au multivers (sic!)*

GR aujourd'hui 3:

Principe copernicien

# Isotropie ?



Friedmann-Lemaître  
homogène-isotrope

$$r = 6$$

$$s = 3 \quad q = 3$$

Bianchi I  
homogène-anisotrope

$$r = 3$$

$$s = 3 \quad q = 0$$

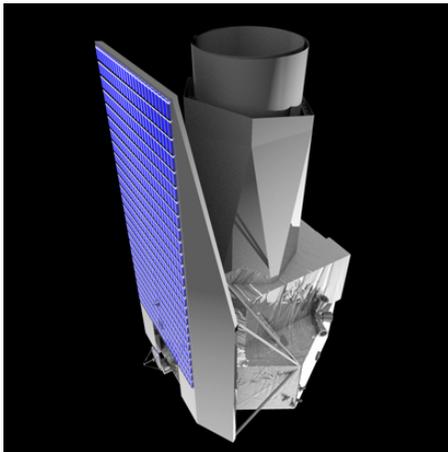
Lemaître-Tolman-Bondi  
inhomogène-loc. isotrope

$$r = 3$$

$$s = 2 \quad q = 1$$

$$(\text{centre}) \quad s = 0 \quad q = 3$$

# What to expect with Euclid



(i) Visible imaging (ii) NIR photometry (iii) NIR spectroscopy.  
15,000 square degrees  
100 million redshifts, 2 billion images  
Median  $z \sim 1$

I will provide:

- $P(k,z)$  on 15,000 square degrees, 70,000,000 galaxy redshift with  $0.5 < z < 2$ .
- weak lensing on 15,000 square degrees, 40 galaxy images per square arcmin with  $0.5 < z < 3$ .

The error bars on the B-modes should be divided by (10-40) compared to CFHTLS.

Linear regime typically for scales larger than 1 deg. And Euclid will probe scales up to  $\sim 40$  deg.

It will probe large scales for which astrophysical effects leading to B-modes are important.

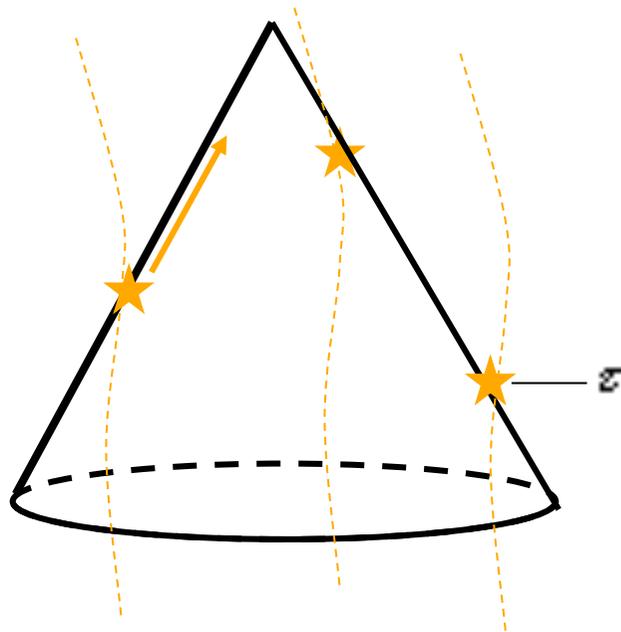
Isotropie testable à 1% ([Cyril Pitrou / Thiago Pereira / JPU 2010-2014](#))

# Peut-on tester principe copernicien ?

Pendant longtemps on pensait que non.

*il faudrait de l'information depuis un autre point de l'espace-temps*

Janvier 2008

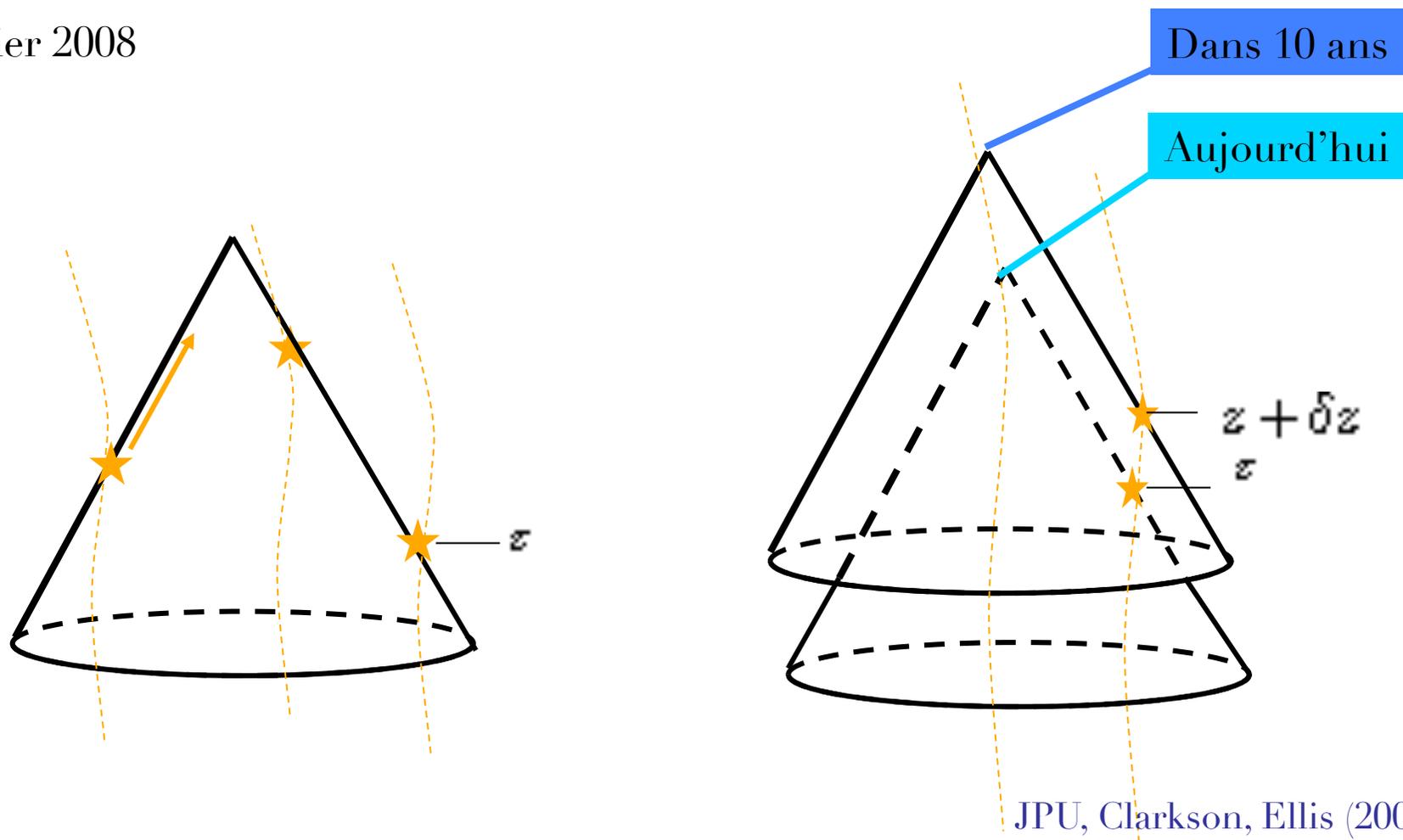


# Peut-on tester principe copernicien ?

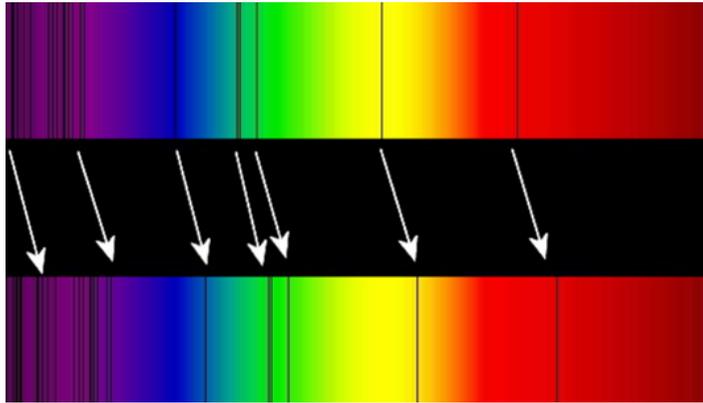
Pendant longtemps on pensait que non.

*il faudrait de l'information depuis un autre point de l'espace-temps*

Janvier 2008



# Comment?



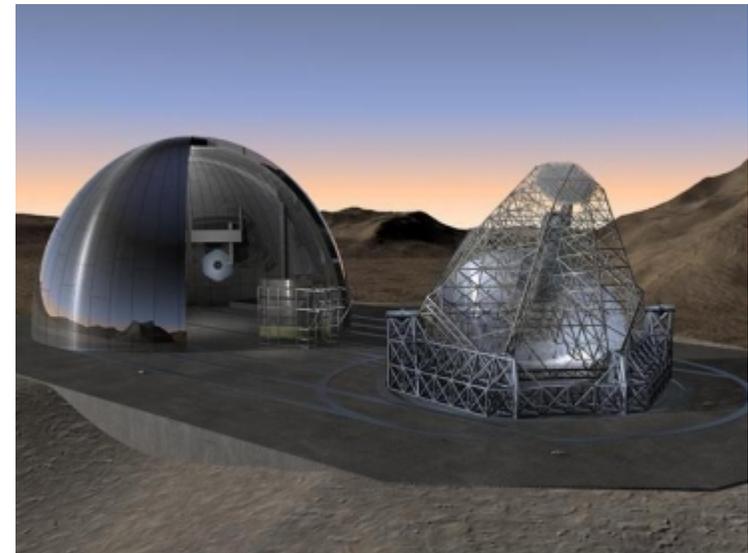
Pour un objet à  $z=4$ , on s'attend à

$$\delta z \sim -5 \times 10^{-10} \quad \text{sur} \quad \delta t \sim 10 \text{ ans}$$

Au delà de ce que l'on est capable de mesurer aujourd'hui.

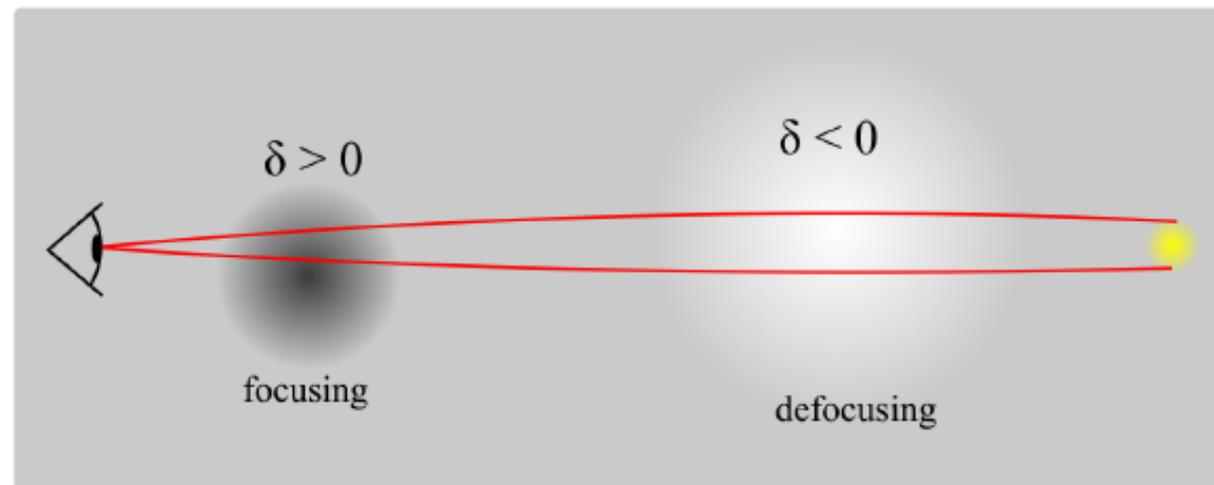
## Projet E-ELT/CODEX

- 40 mètres de diamètre
- spectrographe haute-résolution
- 25 ans ?
- 10 ans d'observation !



## Mesure de distance / Supernovae / Fluide

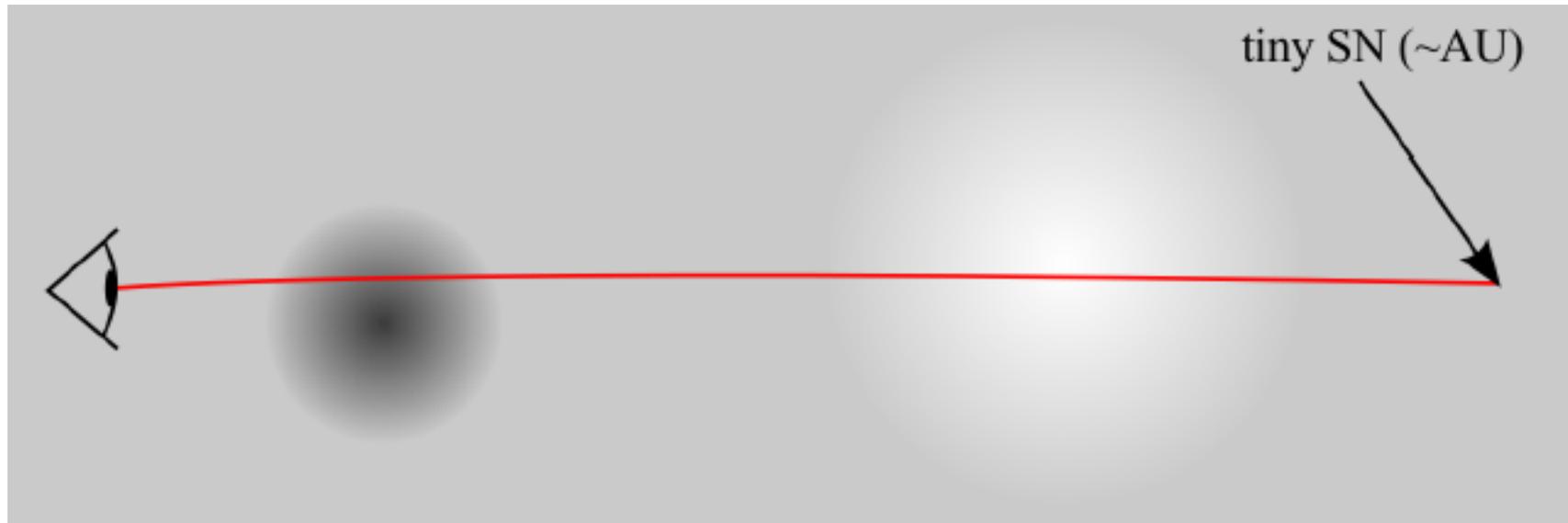
- Lensing enters in the distance determination
- It can influence in particular the Hubble diagram obtained from supernovae



- In the standard lore, one takes this effect perturbatively into account.

## Is this the correct method?

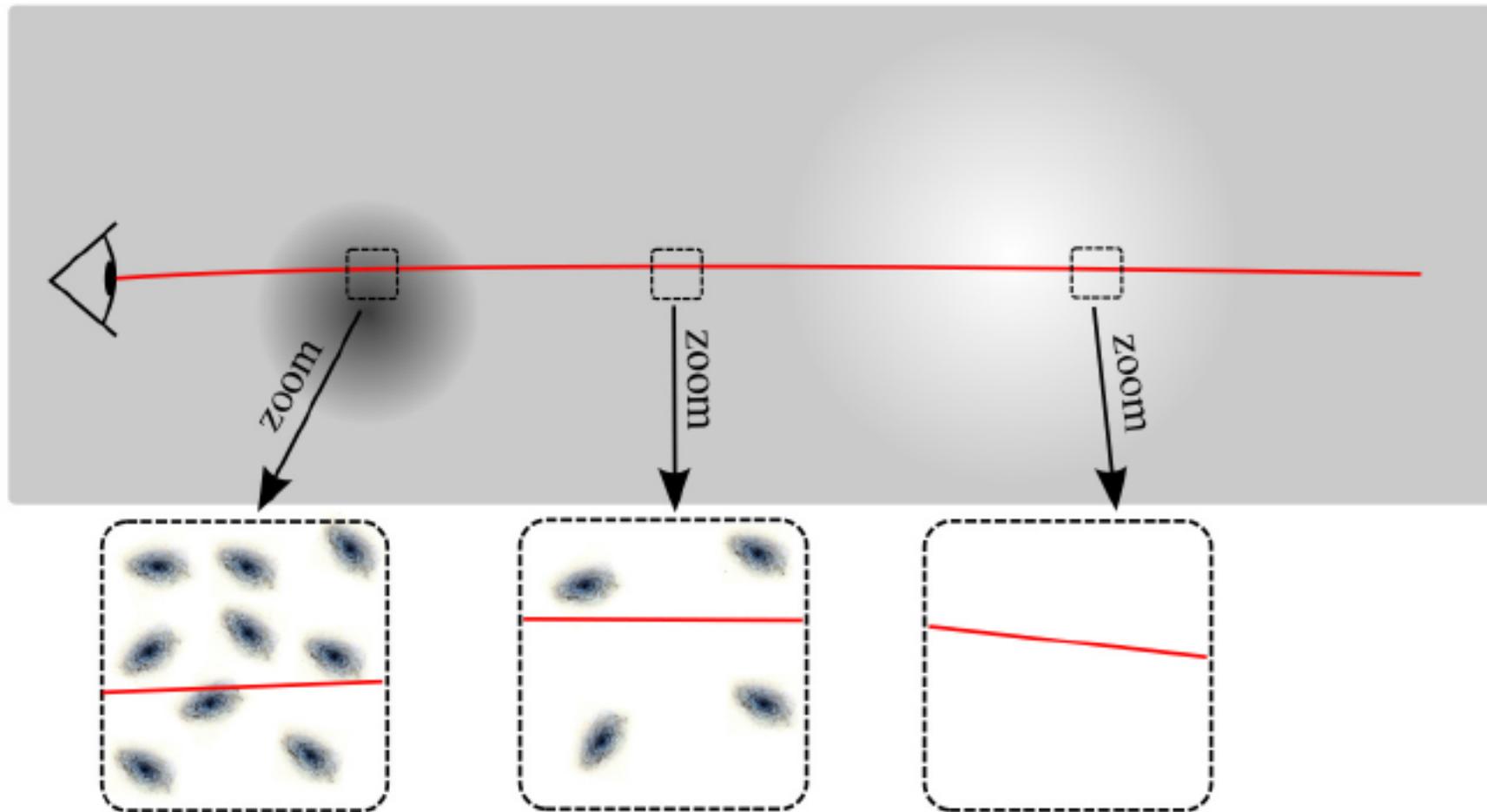
Supernovae subtend a very thin beam (typical  $1\mu\text{as}$ ).



# Is this the correct method?

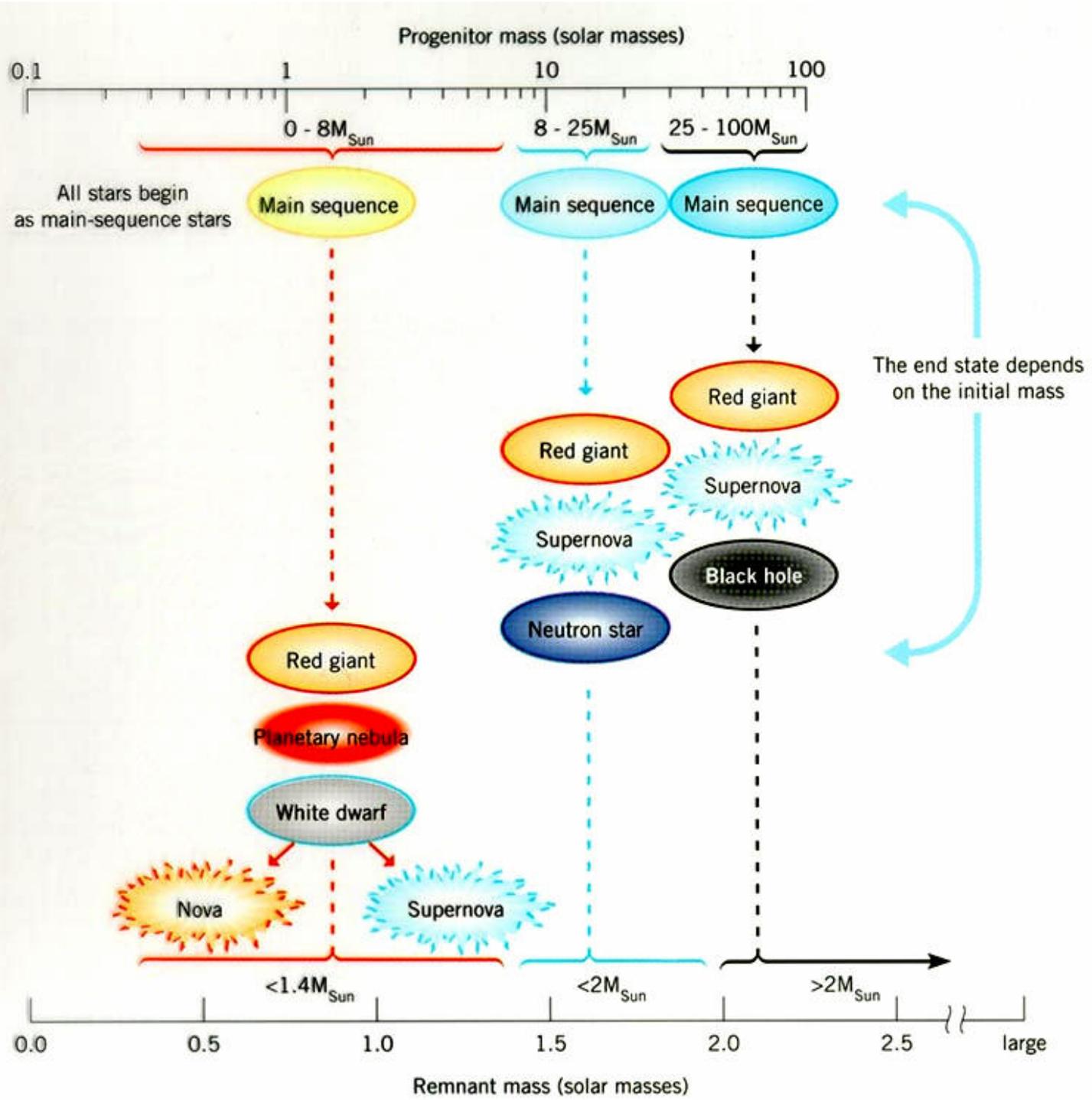
Supernovae subtend a very thin beam (typical  $1\mu\text{as}$ ).

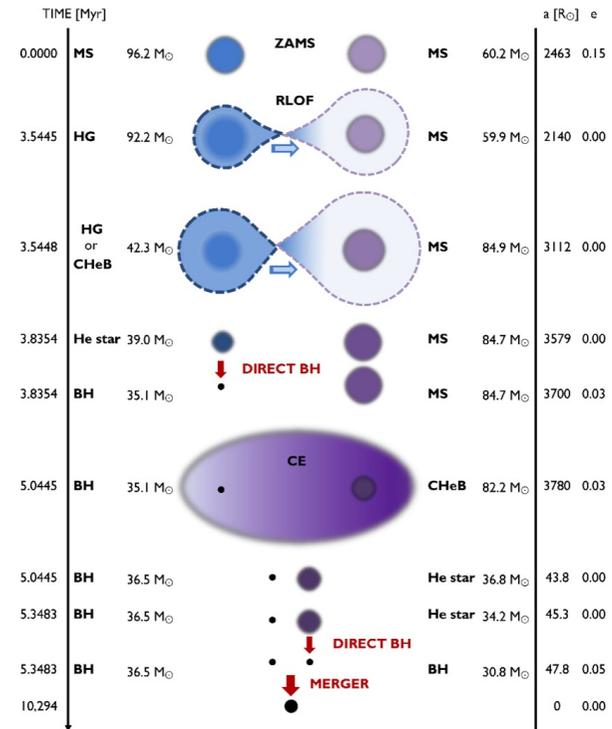
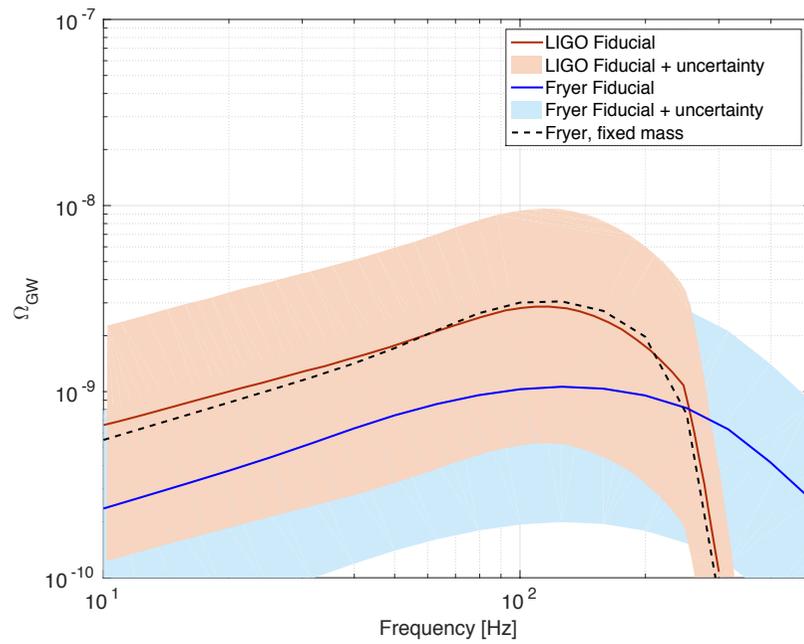
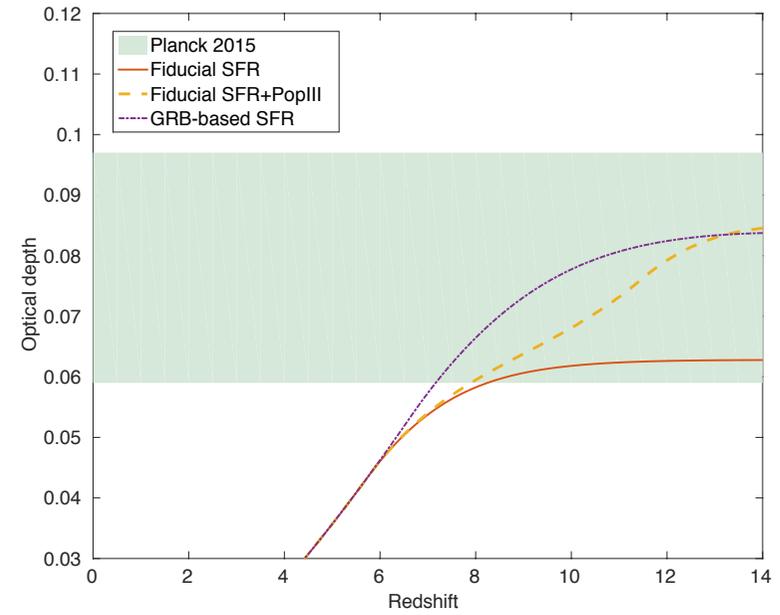
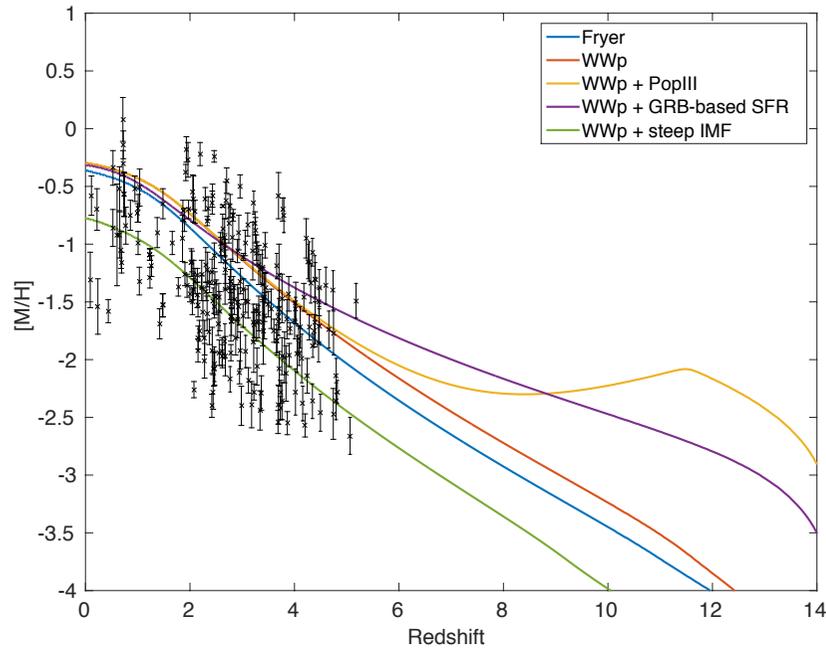
[Clarkson, Ellis, Maartens, Umeh, JPU, arXiv:1109.2484]



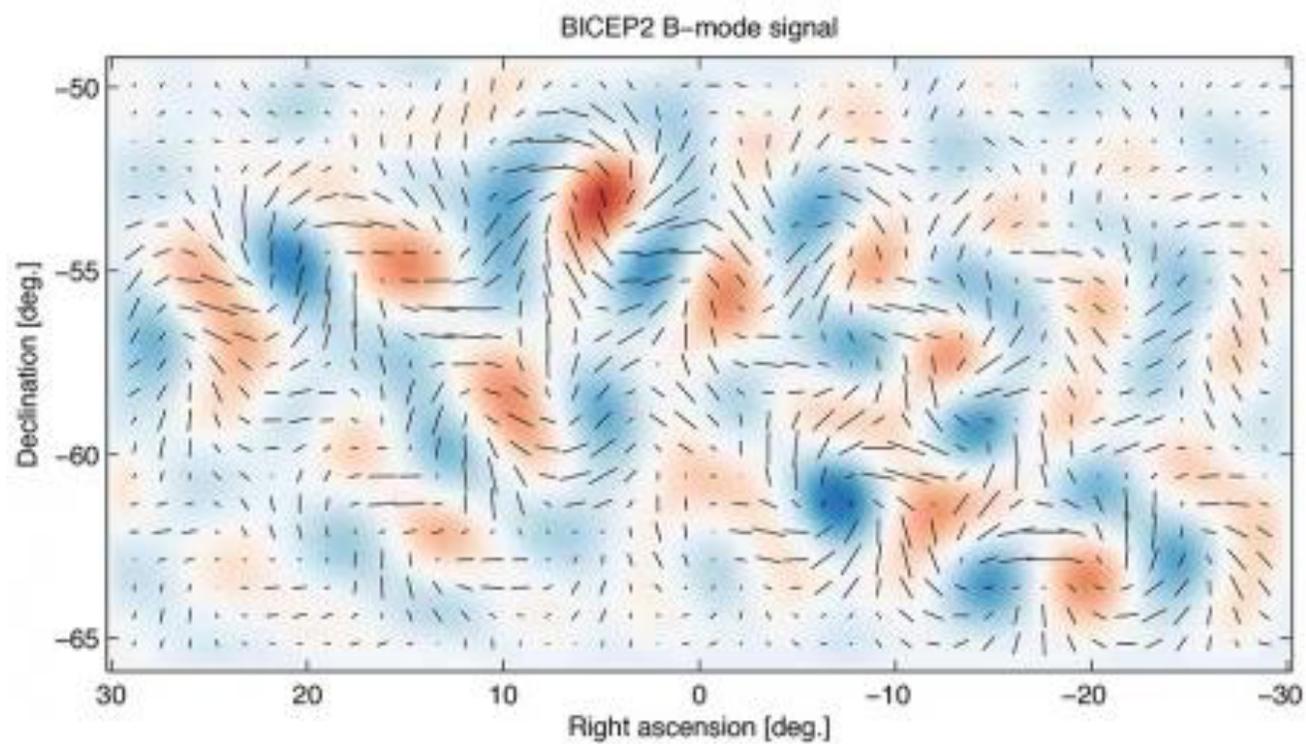
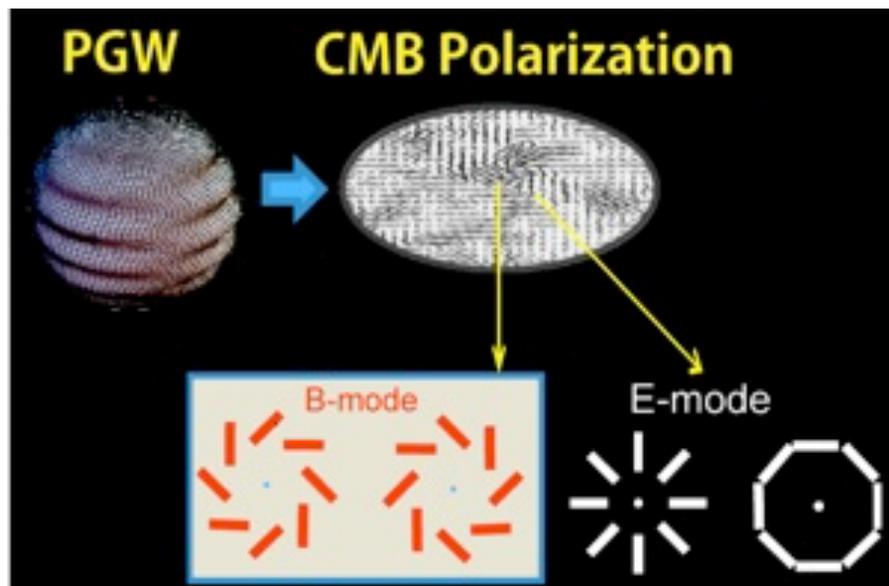
Pierre Fleury, H el ene Dupuy, Julien Larena, JPU (2011-1015)

GR aujourd'hui 4:  
Free OG





Irina Dvorkin, Elisabeth Vangioni, Joe Silk, JPU (2016)



*Conclusion*

RG= base de cosmo  
.... Mais loin d'être suffisant

BB: modèle cohérent – mesure des paramètres à 1-5%

Est-ce le bon modèle?  
Robuste de 0.1 sec à today

RG:  
lensing: fenêtre sur univers sombre  
GW: nouvelle fenêtre

Lambda:  
pb au niveau quantique

Question gênantes:  
big/old univers  
big object

Path to Qgrav.