A visualization of the cosmic web, showing a complex network of red and orange filaments and nodes against a dark background. The nodes are bright yellow and orange, representing galaxy clusters, while the filaments are thinner and more diffuse. The overall structure is a dense, interconnected web of matter.

LA COSMOLOGIE SCIENTIFIQUE MODERNE

Jean-Marc Virey

Centre de Physique Théorique & Université d'Aix Marseille

LA COSMOLOGIE SCIENTIFIQUE MODERNE

- Les cosmologies scientifiques antiques
- Le Modèle du Big Bang
- Problèmes
- Spéculation : le Multivers

Cosmologie :

Etude de l'origine, de la structure et de l'évolution de l'univers

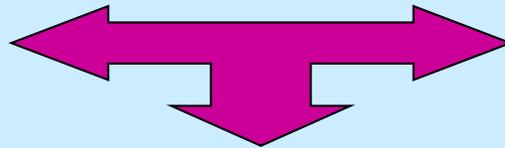
À ne pas confondre avec

Cosmogonie :

- Partie des mythologies qui racontent la naissance du monde et des hommes.
- Science de la formation des objets célestes (planètes, étoiles, galaxies, etc.).

Démarche scientifique :

EXPERIENCES



THEORIES

MODELISATION

Les cosmologies antiques

La démystification du monde (< -1500 ans)

Le disque de Nebra (-1600)

Le plus ancien document sur les observations du ciel

Mélange

- d'observations astronomiques
- d'éléments artistiques
- d'éléments mythiques

Ère mystique : chaos et anarchie des Dieux, les humains sont spectateurs soumis à leurs volontés



Les Mésopotamiens (II^{ème} millénaire avant JC)

Babylone (-1200 ↔ -600)

Début de l'observation du ciel précise et systématique

Découverte des premières « régularités »

Accumulation du savoir (par des écrits)

mais la Terre est toujours plate ... **règne de l'astrologie**

Les Grecs et les premières cosmologies scientifiques

Forte influence de Thalès (-625 ↔ -546) et d'Anaximandre (-610 ↔ -546)

Début du concept de « cosmos » = le « bon ordre »

Les choses sont compréhensibles par la pensée

L'étude méticuleuse des phénomènes permet d'en trouver les règles

Même le Soleil est soumis à des règles !

La modélisation du monde et le rôle de la géométrie

La cosmologie de Platon (-428 ↔ -347)

Solides de Platon = images de la perfection

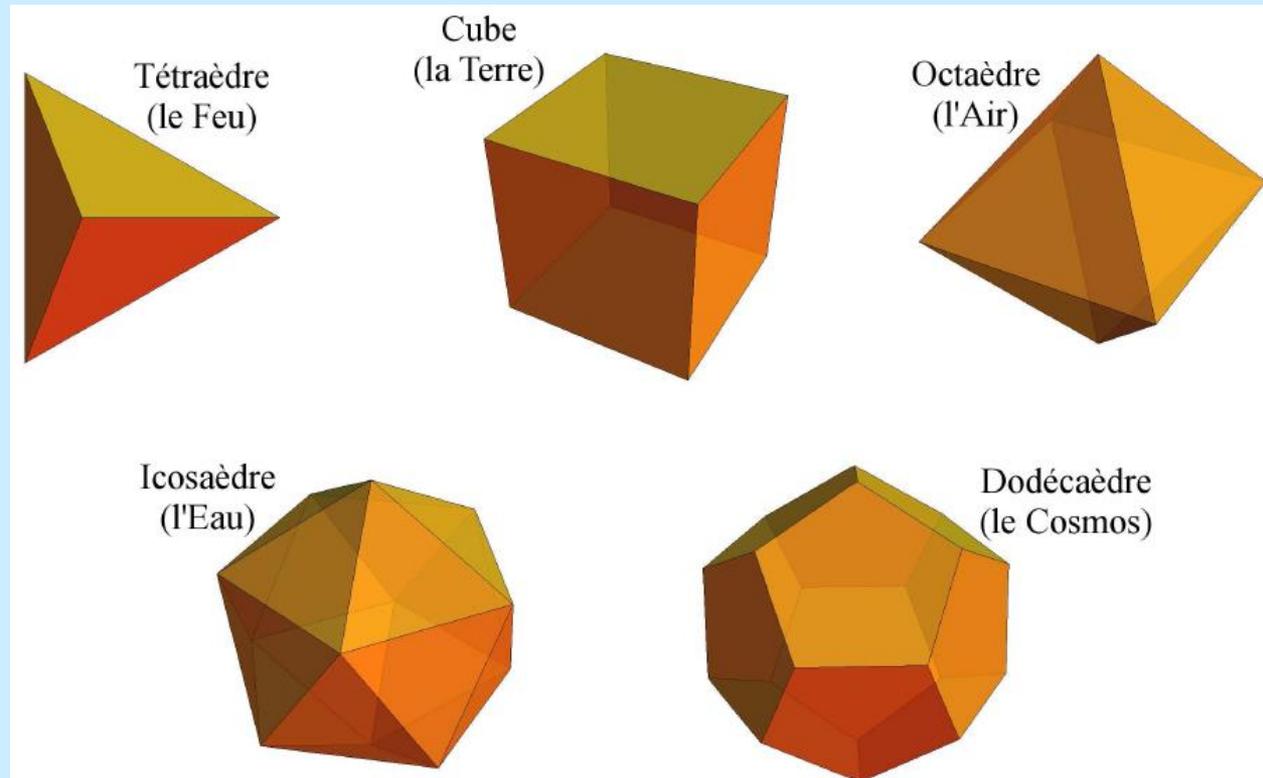
Les éléments sont interchangeables

Univers =

sphère centrée autour de
la Terre (sphérique)

où sont fixées les étoiles

et où se déplace les
planètes, la lune et le
soleil



La cosmologie d'Aristote (-384 ↔ -322)

Influence la pensée occidentale pour 2000 ans

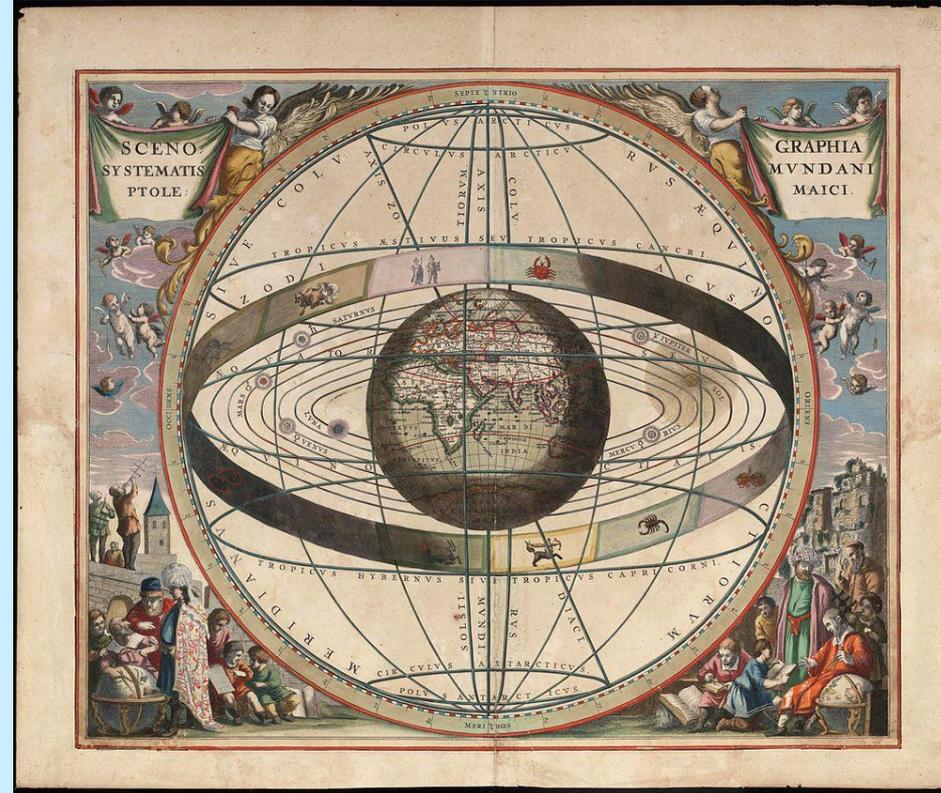
Il décompose la sphère céleste en 2 régions :
inférieure et supérieure

Dogme sur la région supérieure :
« Le corps céleste est inaugmentable,
inaltérable, impassible, éternel »

En conflit avec sa philosophie naturelle : les mouvements sont temporaires et les choses sont altérables

⇒ Le ciel est constitué d'autre chose que les 4 éléments terrestres :

Il est fait d'une 5^{ème} essence : l' **éther**



Aristarque de Samos (-310 ↔ -230)

L'**héliocentrisme** : le Soleil est au centre, la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil !

Ses détracteurs, dont Archimède, ont permis que ses travaux tombent dans l'oubli pendant près de 2000 ans ...

Copernic déterrera cette idée en 1543

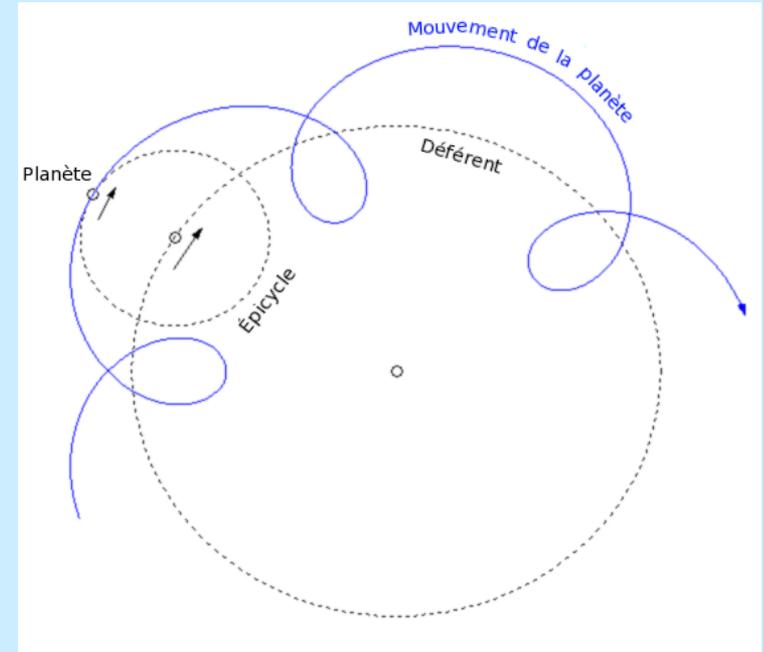
Hipparque (-190 ↔ -120)

Haut niveau mathématique

+ précision des observations

Exigence d'un **accord numérique entre modèle géométrique et observations** =>

le résultat dépend du modèle / plusieurs modèles sont en accord avec les observations (cercles vs ellipses). Introduit les **épicycles**.



Ptolémée (+90 ↔ +168)

Condense les travaux d'Hipparque et 7 siècles d'observations dans son fameux ouvrage **l'Almageste** très utilisé au moyen âge.

L'obscurantisme religieux

Anéantissement de la pensée innovante
mais l'idée d'un cosmos organisé survit

Dieu a besoin d'un compas pour
construire le monde ...

Les mathématiciens de l'islam

Al-Khwârizmî (780-850) : Algèbre

Umar Al-Hayyam (1048-1131) :

« géométries non-euclidiennes »



Bible moralisée (1220)

La renaissance

Nicolas Copernic (1473-1543) : **héliocentrisme** (via les grecs)

Principe de Copernic : la Terre (et l'Homme) n'occupent pas une position privilégiée

Galilée (1564 – 1642) : **naissance de la science moderne**

Conception d'expériences au service de la théorie (« mécanique terrestre »)

Invention de la lunette astronomique. Découvertes des satellites de Jupiter (1610) et des phases de Vénus (1613) (et des taches solaires)

Giordano Bruno (1548-1600) : prône l'héliocentrisme, **l'univers est infini**, les étoiles sont des soleils avec des planètes peuplées partout, **l'univers n'a pas de centre** ! Idée de la relativité (et des monades)

=> bûcher

Tycho Brahé (1546-1601) : (géocentriste) Développe la précision dans les instruments de mesure et la position des astres.

Priorité à l'observation :

1572 – découverte d'une supernova : la sphère céleste n'est pas statique,
1577 – étude d'une comète (mesure de distance) : les choses bougent au-delà de la lune ... *Aristote est malmené !*

Johannes Kepler (1571-1630) : mesures très précises du mouvement des planètes => **les 3 lois de Kepler** (orbites, aires, périodes)

Observation d'une supernova (1606). *Aristote commence à s'effondrer.*

Mais seul le système solaire est étudié...

Il faudra attendre **Charles Messier** (1730-1817) et **William Herschel** (1738-1822) pour que les premières « nébuleuses » soient étudiées et répertoriées ...

et **Edwin Hubble** (1889-1953) dans les années 1920 comprend qu'elles sont lointaines et pleines d'étoiles : **les galaxies arrivent dans le décor !**

La cosmologie « classique » de Newton

Newton (1630-1700) : unifie les mécaniques terrestres et célestes
Théories du mouvement et de la gravitation (1686)

L'univers est statique

Le temps et l'espace sont absolus :

Le temps s'écoule uniformément, l'espace est rigide et immuable

Aristote s'accroche !!!

Mais les masses s'attirent => l'univers doit s'effondrer !!

=> l'univers est infini ... mais ...

Le paradoxe d'Olbers (1823) :

*Si l'univers est infini et a toujours existé, il est donc peuplé d'infiniment d'étoiles, mais alors **pourquoi la nuit est-elle noire ?***

=> l'univers n'est pas statique, il est dynamique et peut-être a-t-il un début ? (Si on le veut statique il faut introduire une constante cosmologique ...)

La cosmologie

scientifique moderne

∞ Grand

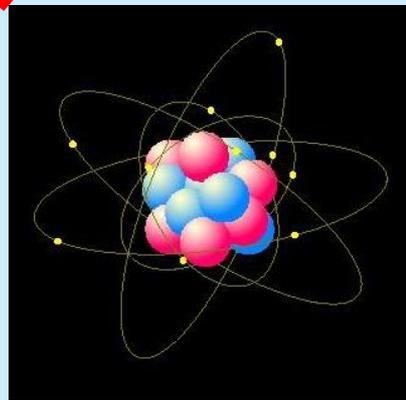
∞ Complexe

Relativité Générale
(Einstein, Hilbert 1915)

Et toutes les autres sciences ...

Gravitation

Electromagnétisme
+ autres interactions



Relativité restreinte (1905)
(Einstein, Poincaré, Lorentz)
+
Mécanique Quantique
(Heisenberg, Pauli, Dirac,
Schrödinger ~ 1930)

Gravité Quantique ?

Cosmologie

Interaction Nucléaires
(Fortes et faibles)
+
Electromagnétisme

4 Forces Fondamentales

Particules de base :

- électrons
- protons
- neutrons

∞ Petit

Notre galaxie

La Voie Lactée



U
N
E

V
U
E

P
R
O
F
O
N
D
E

Étoile

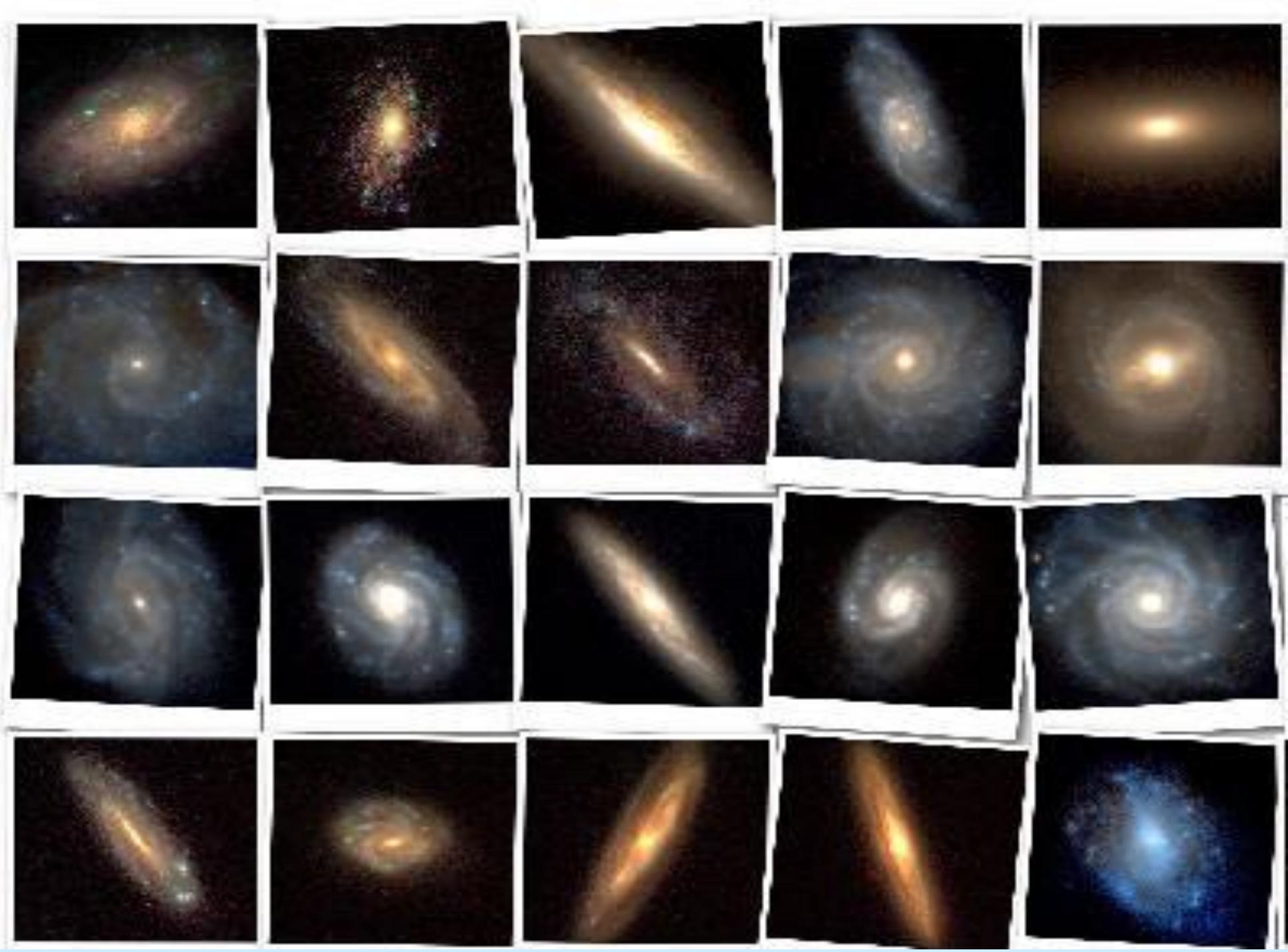
Spirales barrées

Elliptique

Vue de côté

Vue de face





Le sextette de Seyfert :
Groupe compact de 4
galaxies en interaction
(la 5^e en projection)
(la 6^e est la queue de la 1^{re})



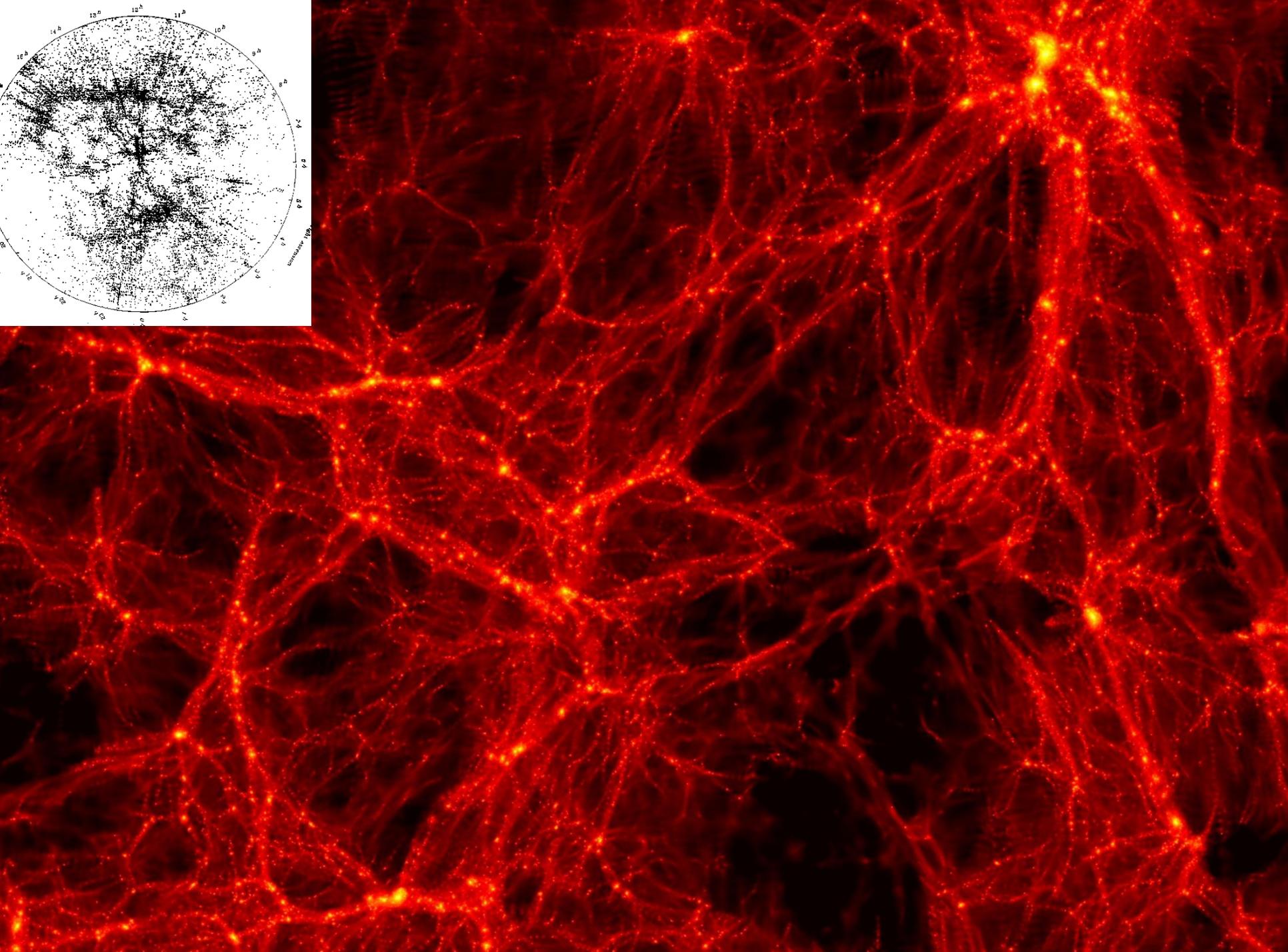
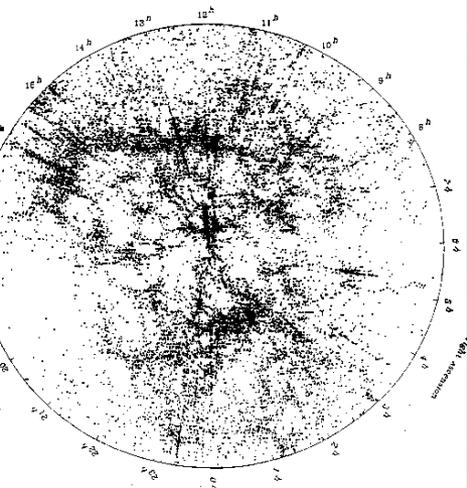


La galaxie du Tourbillon
M51

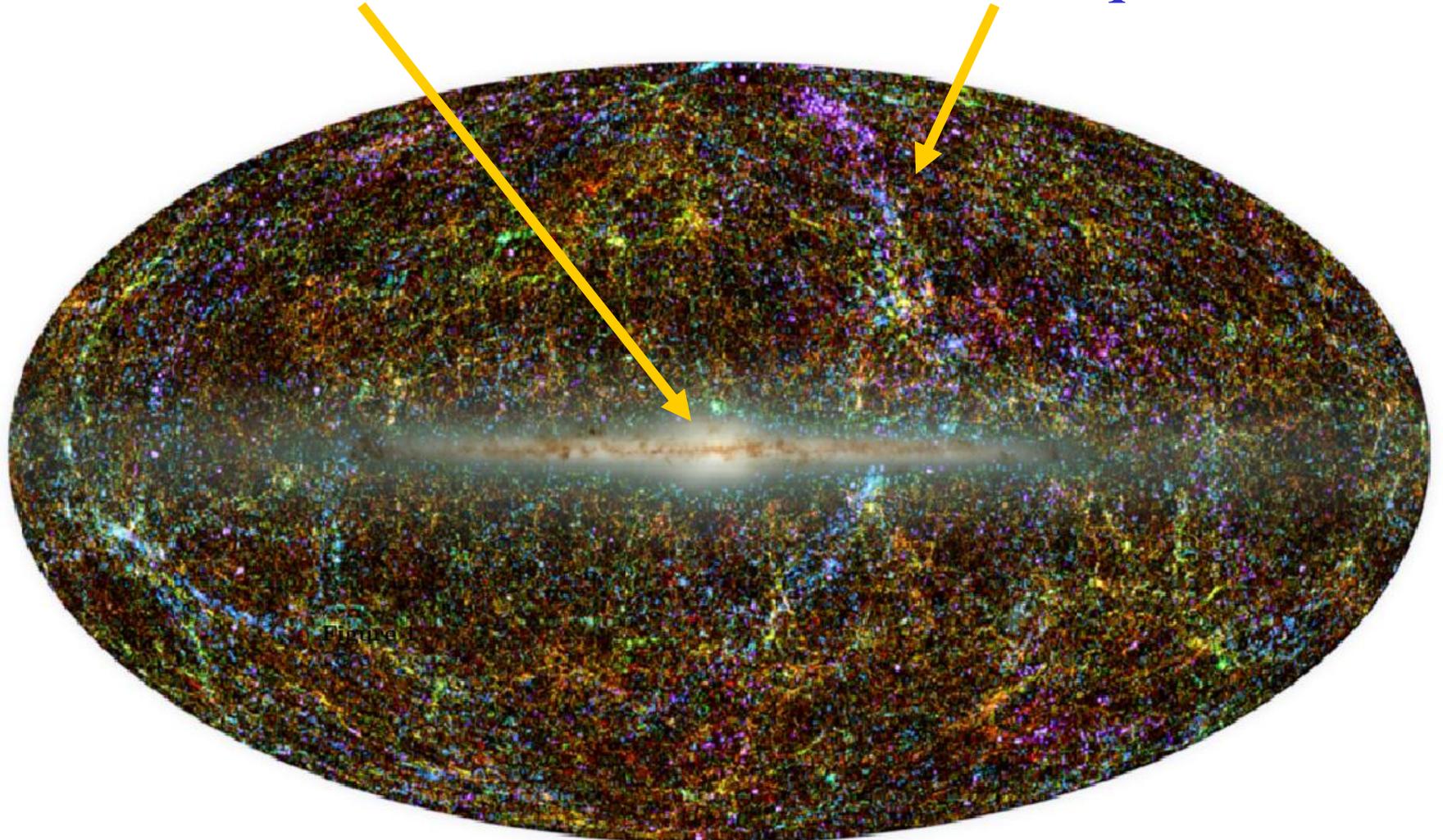


La galaxie du
Sombrero
M104





Distribution des galaxies et structuration de l'Univers: Notre Galaxie et la Toile Cosmique



Relevé dans l'infra-rouge 2MASS

Le modèle cosmologique du BIG BANG

COSMOLOGIE (global)  ***PHYSIQUE*** (local)

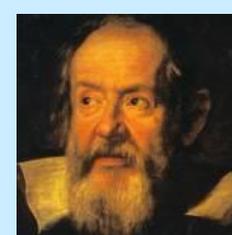
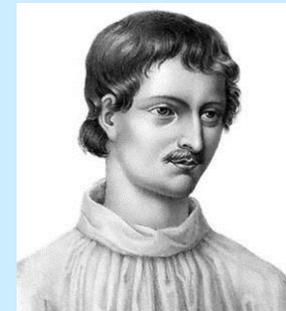
La Relativité Générale permet de décrire l'Univers dans sa globalité

Einstein 1917 : premier modèle cosmologique moderne mais statique
Aristote s'accroche toujours !!

Selon les échelles de temps/distances/énergies on mélange plus ou moins la physique microscopique avec la théorie de la gravitation pour rendre compte des observations.

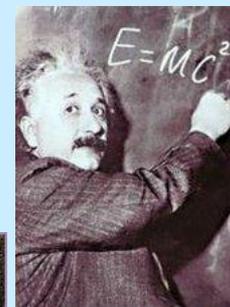
S'appuie sur :

- Le Principe Cosmologique : pas de centre absolu
- Le Principe de Relativité : invariance des lois
- Le Principe d'Universalité de c : vitesse finie
- Une Théorie de la Gravitation : la Relativité Générale
- La Physique (microscopique et macroscopique)

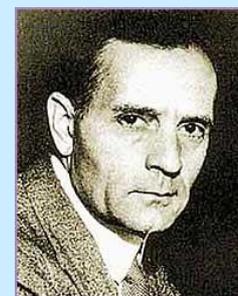


GALILEE
1564-1642

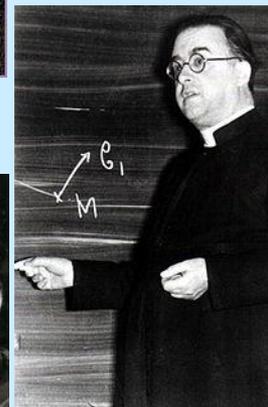
BRUNO
1548-1600



EINSTEIN
1879-1955



HUBBLE
1889-1953



LEMAITRE
1894-1966



GAMOW
1904-1968

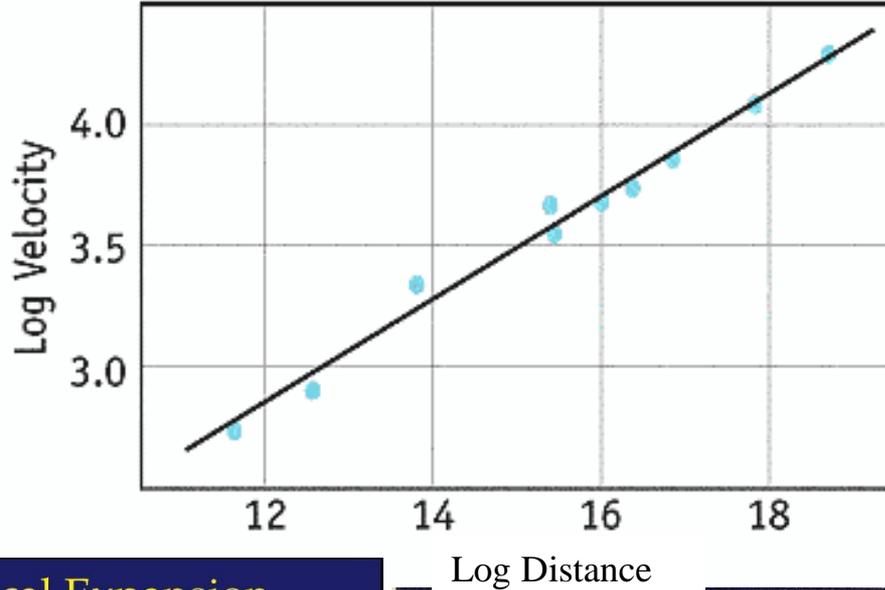
Repose sur 4 piliers observationnels :

- L'expansion (**Hubble** 1929 – **Lemaitre** 1927 – **Friedman** 1923)
- La nucléosynthèse primordiale (**Gamow, Alpher** 1948)
- Le rayonnement cosmologique fossile
(**Penzias, Wilson** 1964 – **Lemaitre** 1934 – **Gamow** 1948)
- Les oscillations acoustiques des baryons (**Sunyaev-Zeldovich+Peebles-Yu** 1970, anisotropies CMB **WMAP**-1999, distribution statistique des galaxies **Eisenstein** 2005)

OBSERVATION DE LA FUITE DES GALAXIES : LA LOI DE HUBBLE (1929)

EXPANSION DE L'UNIVERS !

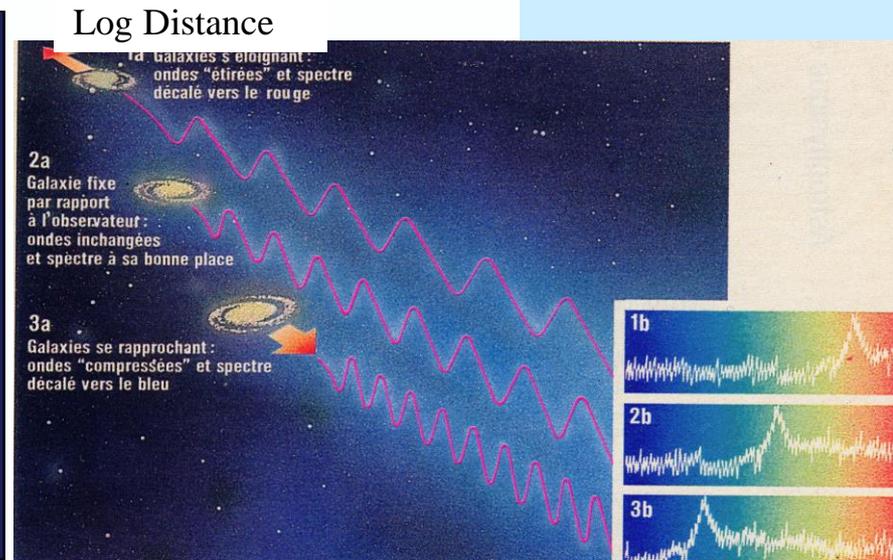
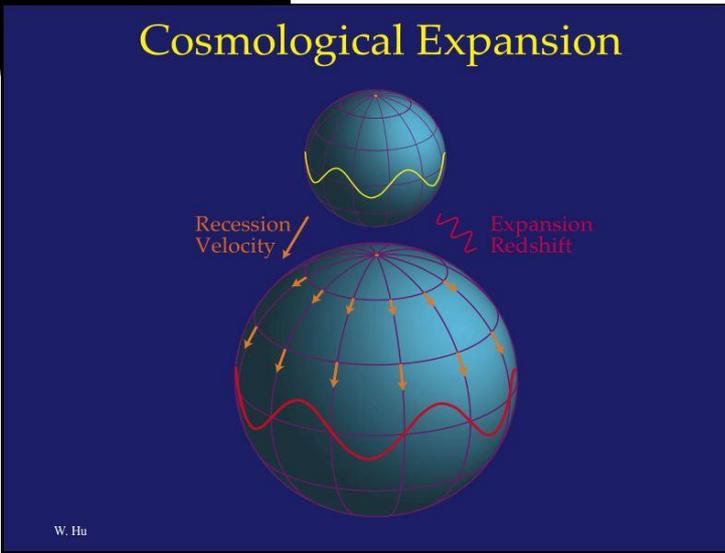
Les galaxies
s'éloignent de
nous d'autant
plus vite
qu'elles sont
loin !



$$V \cong H_0 r$$

(Lemaître 1927)

$t_U = 1,36 \cdot 10^9$ ans



Nucléosynthèse Primordiale

Cadre : expansion + physique nucléaire

Prédictions :

→ Abondance élts légers :

H(80%), ^4He (20%), D(10^{-4}), ^3He (10^{-5}), ^7Li (10^{-9})

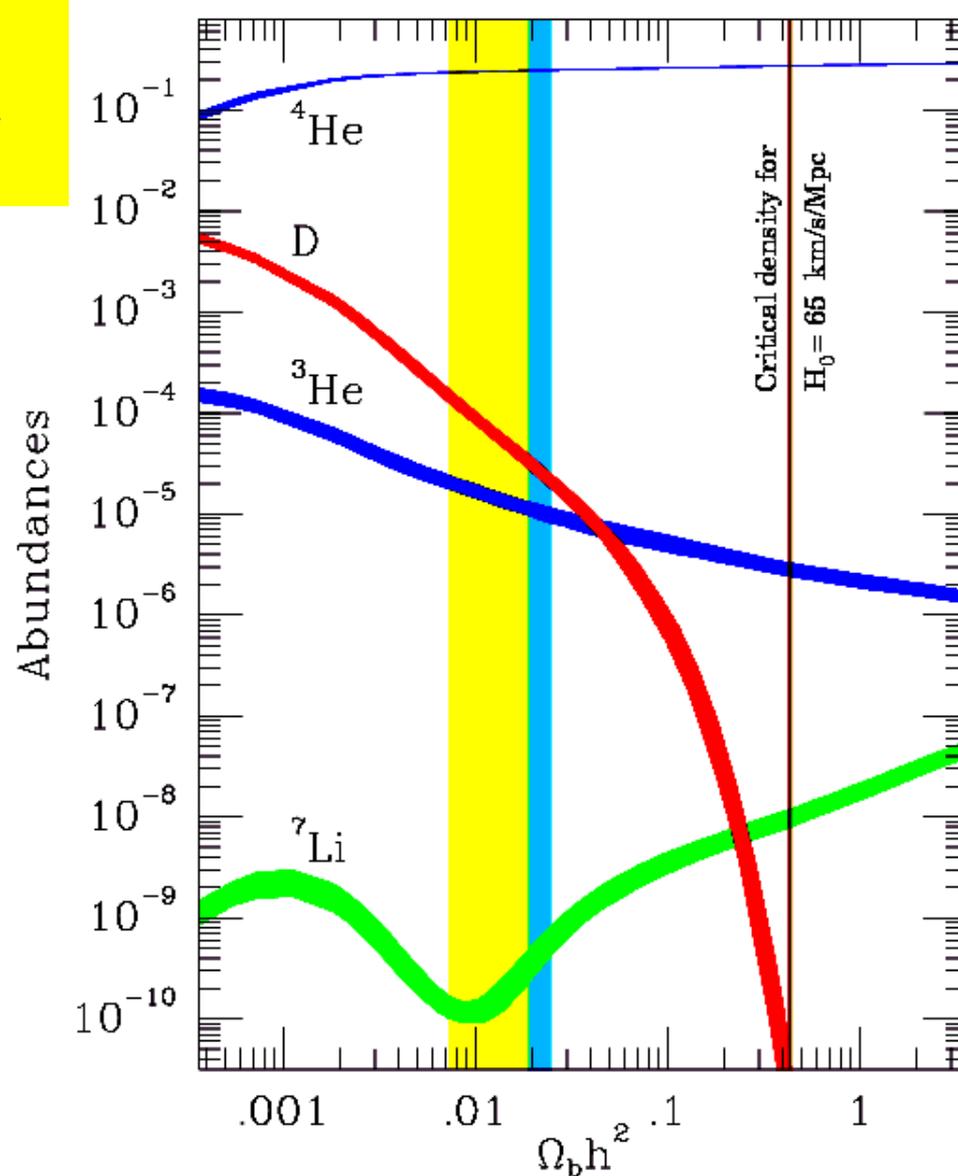
→ rapport photon/baryon :

$$\Omega_\gamma / \Omega_b \approx 10^{10}$$

→ peu de baryons :

$$\Omega_b / \Omega_T \ll 1$$

$$\Omega_b \cong 4-5 \%$$



$t_U = 3 \text{ minutes}$

PERIODIC TABLE Atomic Properties of the Elements

NIST Big Bang
National Institute of Standards and Technology
Technology Administration, U.S. Department of Commerce

Frequently used fundamental physical constants
For the most accurate values of these and other constants, visit physics.nist.gov/constants
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of ¹³³Cs

speed of light in vacuum	<i>c</i>	299 792 458 m s ⁻¹	(exact)
Planck constant	<i>h</i>	6.6261 × 10 ⁻³⁴ J s	(<i>h</i> = <i>h</i> /2π)
elementary charge	<i>e</i>	1.6022 × 10 ⁻¹⁹ C	
electron mass	<i>m_e</i>	9.1094 × 10 ⁻³¹ kg	
proton mass	<i>m_p</i>	1.6726 × 10 ⁻²⁷ kg	
neutron mass	<i>m_n</i>	1.6749 × 10 ⁻²⁷ kg	
Rydberg constant	<i>R_∞</i>	10 973 732 m ⁻¹	
<i>R_{∞c}</i>		3.289 842 × 10 ¹⁵ Hz	
<i>R_{∞hc}</i>		13.6057 eV	
Boltzmann constant	<i>k</i>	1.3807 × 10 ⁻²³ J K ⁻¹	

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

13 IIIA		14 IVA		15 VA		16 VIA		17 VIIA		18 VIIIA	
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne						
Boron	Carbon	Nitrogen	Oxygen	Fluorine	Neon						
10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.179						
1s ² 2s ² 2p ¹	1s ² 2s ² 2p ²	1s ² 2s ² 2p ³	1s ² 2s ² 2p ⁴	1s ² 2s ² 2p ⁵	1s ² 2s ² 2p ⁶						
9.208	11.260	14.534	13.811	17.422	21.564						
13 IIIA		14 IVA		15 VA		16 VIA		17 VIIA		18 VIIIA	
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar						
Aluminum	Silicon	Phosphorus	Sulfur	Chlorine	Argon						
26.981	28.085	30.973	32.065	35.453	39.948						
[Ne]3s ² 3p ¹	[Ne]3s ² 3p ²	[Ne]3s ² 3p ³	[Ne]3s ² 3p ⁴	[Ne]3s ² 3p ⁵	[Ne]3s ² 3p ⁶						
5.985	8.157	10.487	10.360	12.967	15.750						

ETIOPIES

1 IA		2 IIA		3 IIIB		4 IVB		5 VB		6 VIB		7 VIIB		8 VIII		9 VIII		10 VIII		11 IB		12 IIB																																																																																
1 H	2 He	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Atomic Number: 58
Ground-state Level: 1G₄
Symbol: Ce
Name: Cerium
Atomic Weight: 140.116
Ground-state Configuration: [Xe]4f¹5d⁰6s²
Ionization Energy (eV): 5.5387

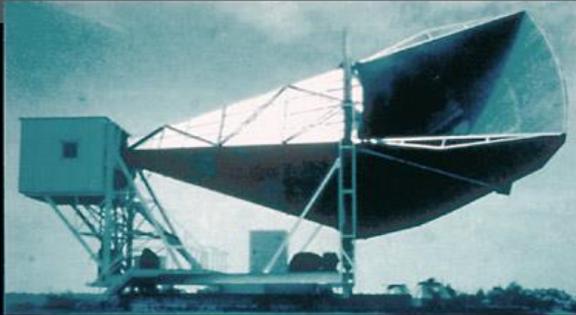
[†]Based upon ¹²C. () indicates the mass number of the most stable isotope.

For a description of the data, visit physics.nist.gov/data

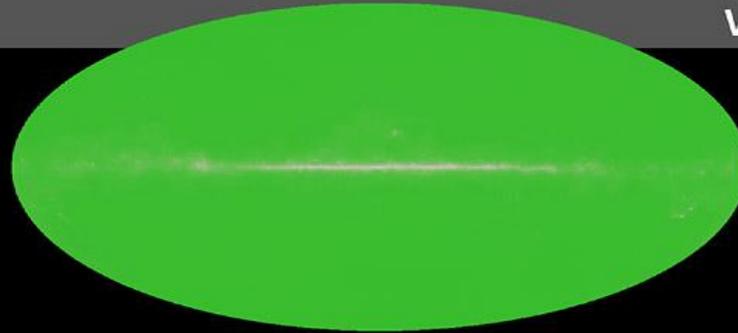
Supernovae

Le rayonnement cosmologique fossile

1965



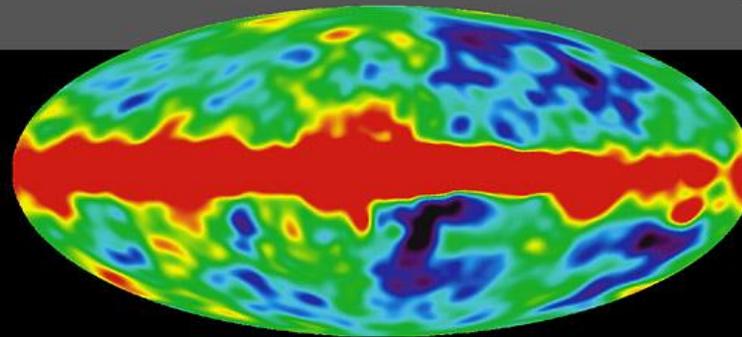
Penzias and
Wilson



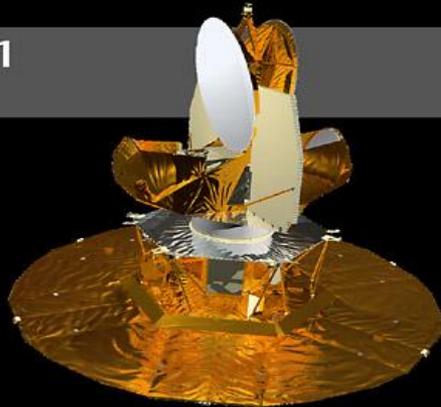
1992



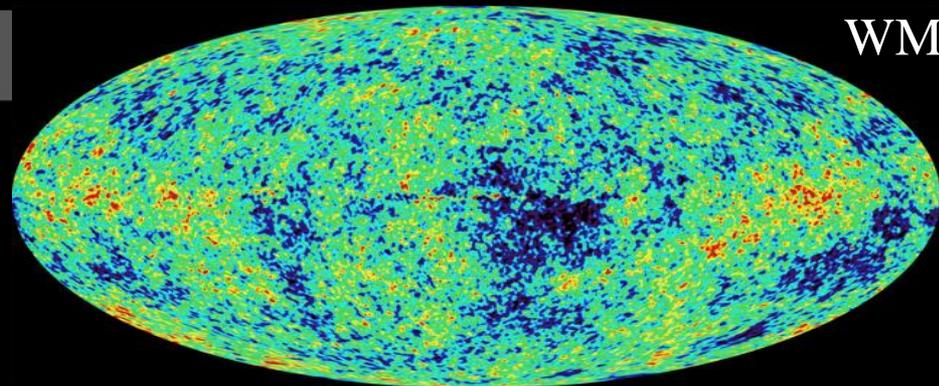
COBE



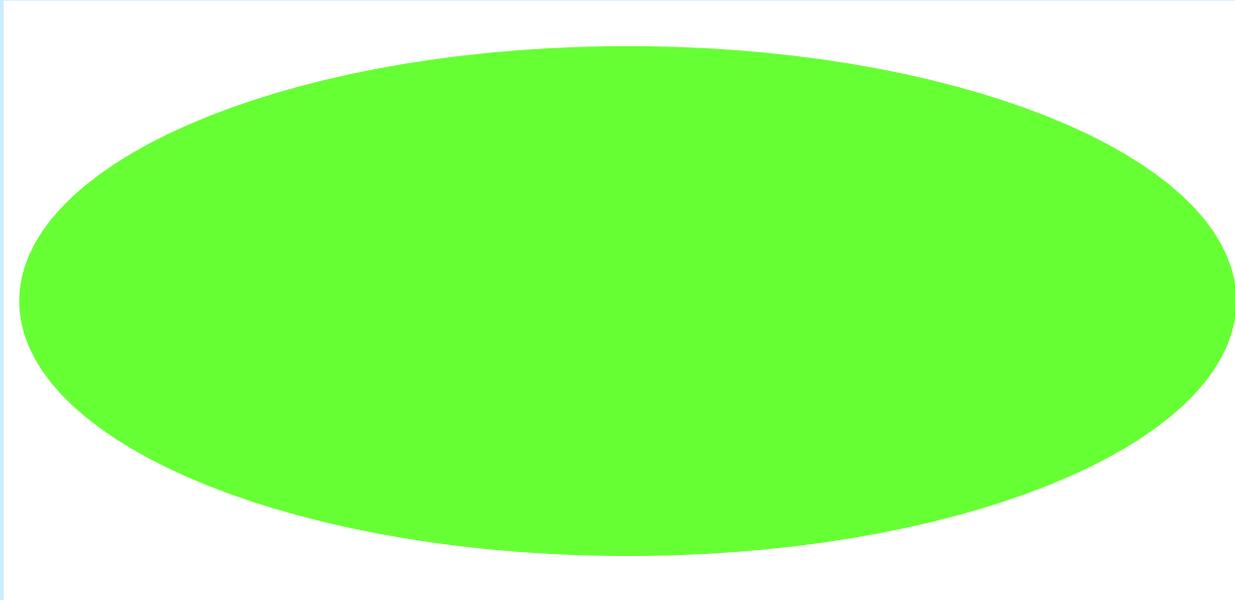
2001



WMAP



L'univers primordial est homogène

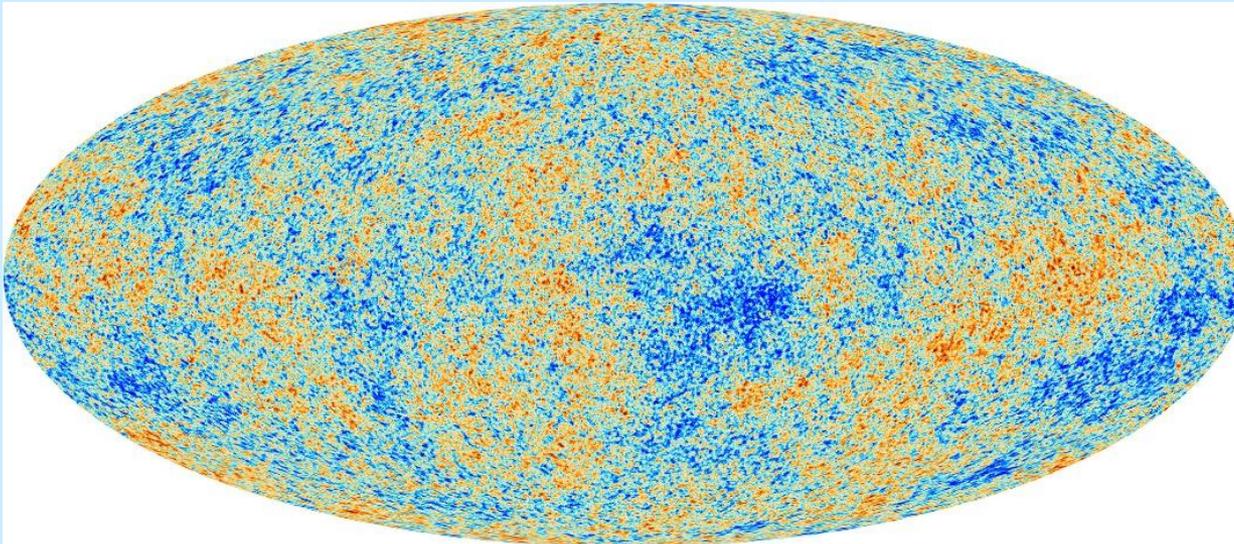


T=2.7K

Le principe cosmologique: l'univers est homogène et isotrope

est vérifié

$t_U = 380\,000$ ans



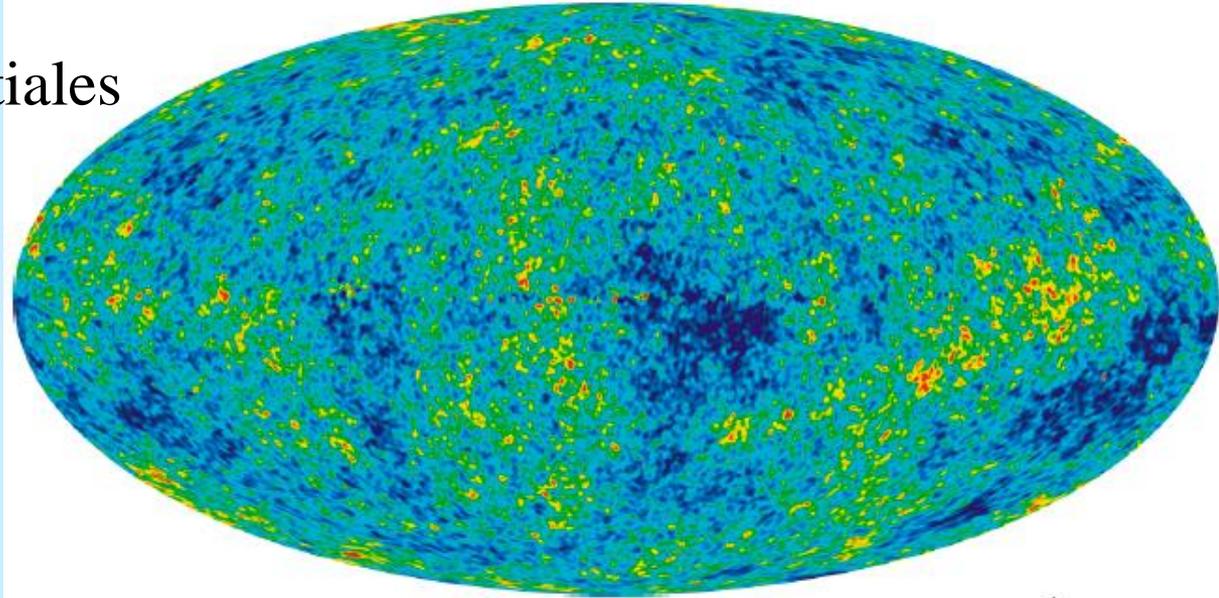
$\Delta T = 20\mu\text{K}$

Inhomogénéités, graines des structures visibles à partir d'une résolution de 1/100 000

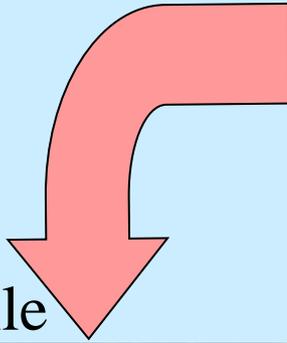
**PLANCK
2012**

La formation des structures : Observations

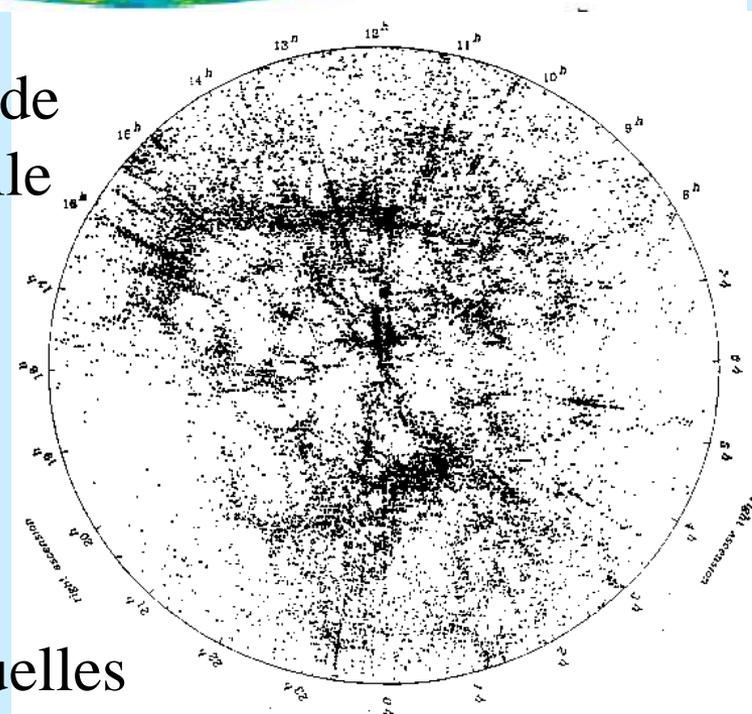
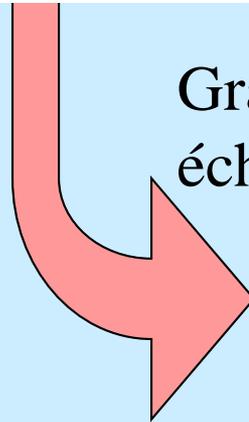
Conditions initiales



«Petite» échelle

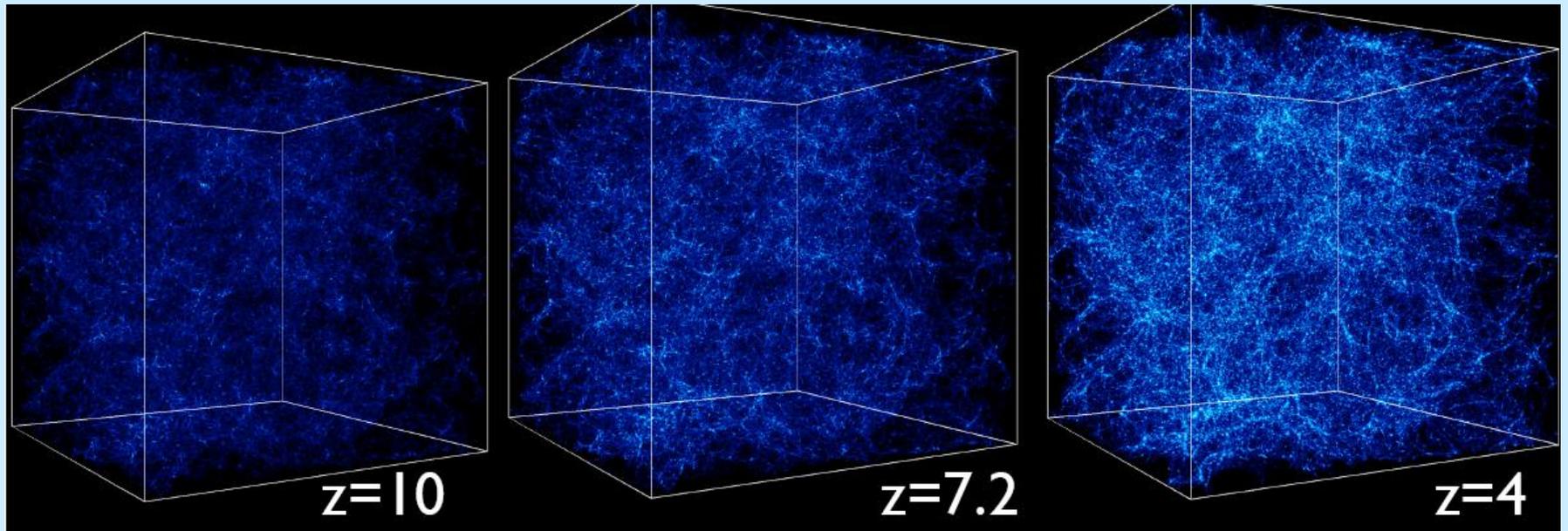


Grande
échelle

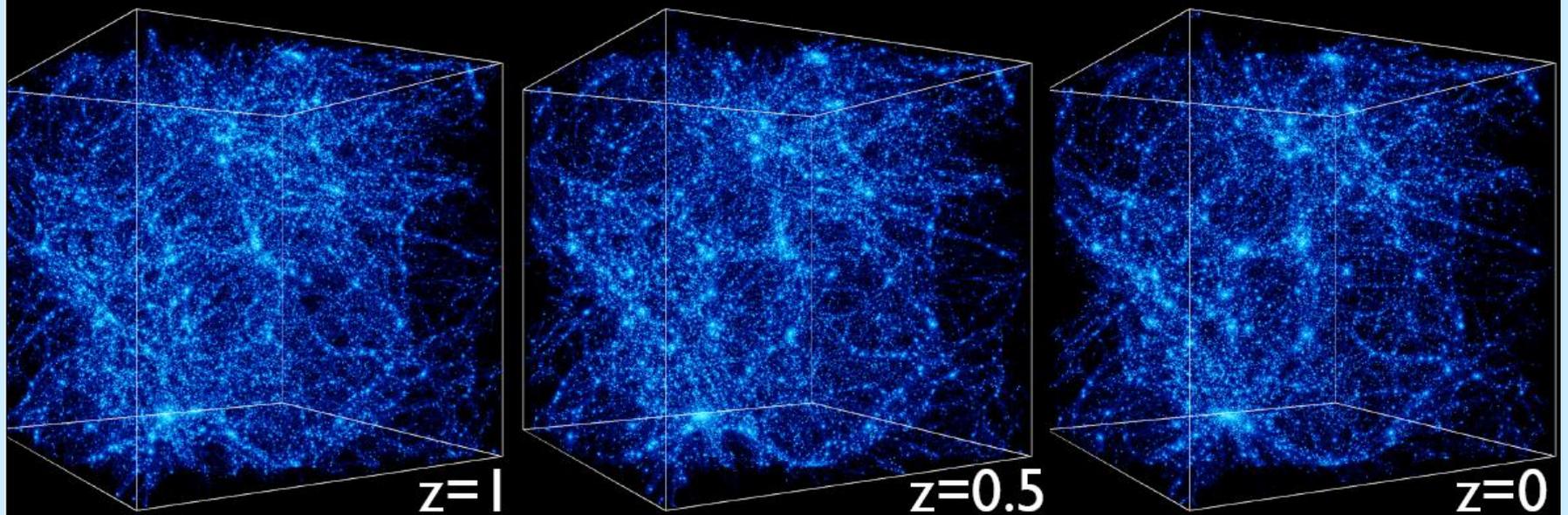


Situations actuelles

Evolution temporelle : très sensible à l'expansion + RG

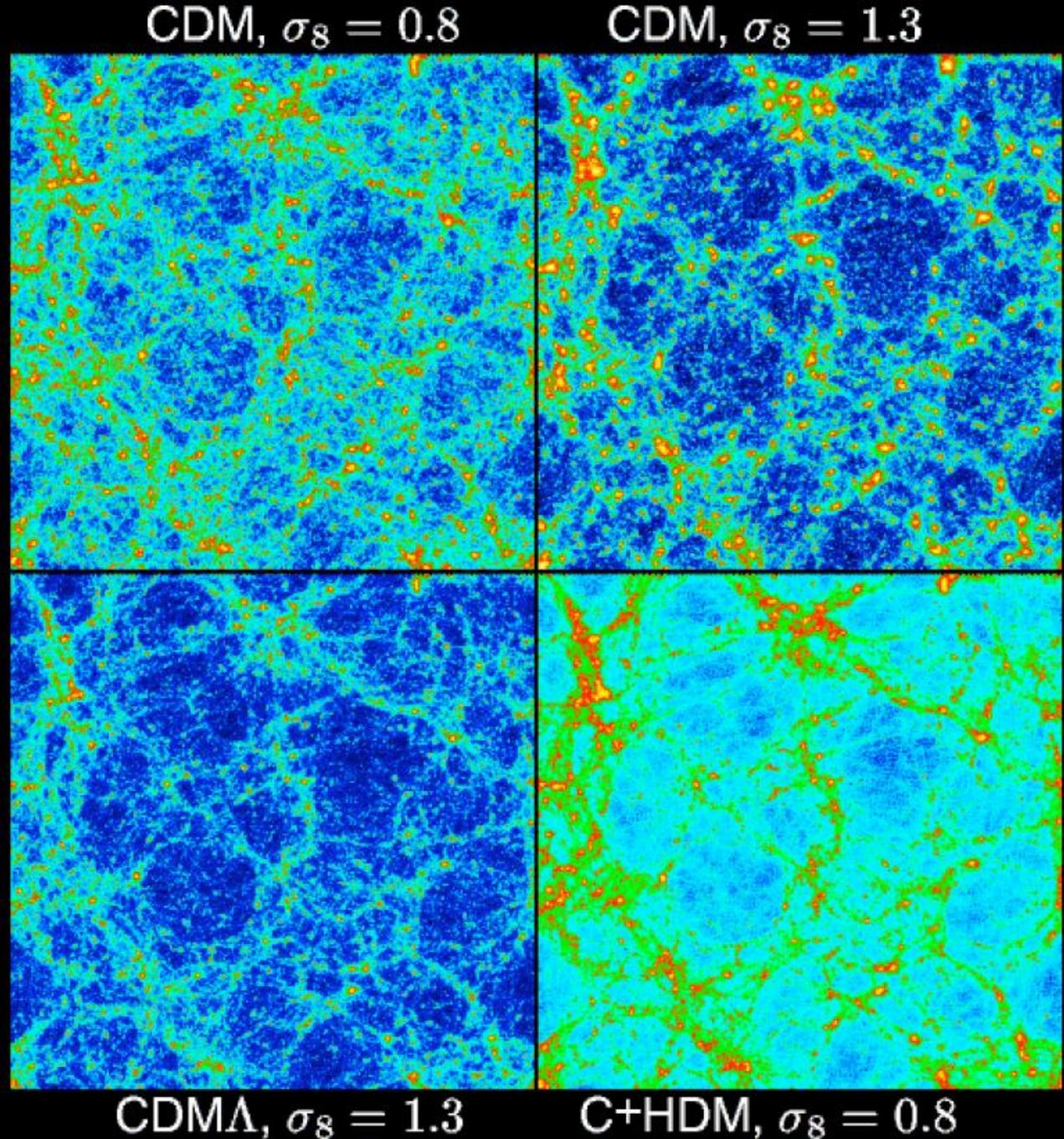


$$a = 1/(1+z)$$



Et sensible a de
très nombreux
paramètres
cosmologiques

Ex : abondance et
type de Matière
Noire et/ou
d'Energie Noire

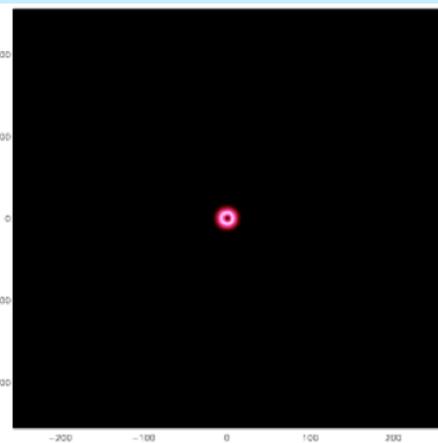


Warren *et al.*, Los Alamos

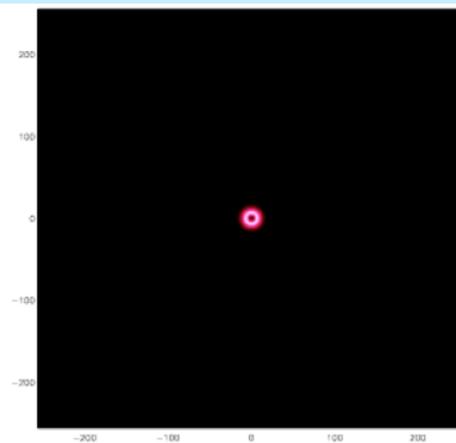
Les ondes acoustiques (baryoniques) primordiales

$t_U = 3$ minutes - $1,36 \cdot 10^9$ ans

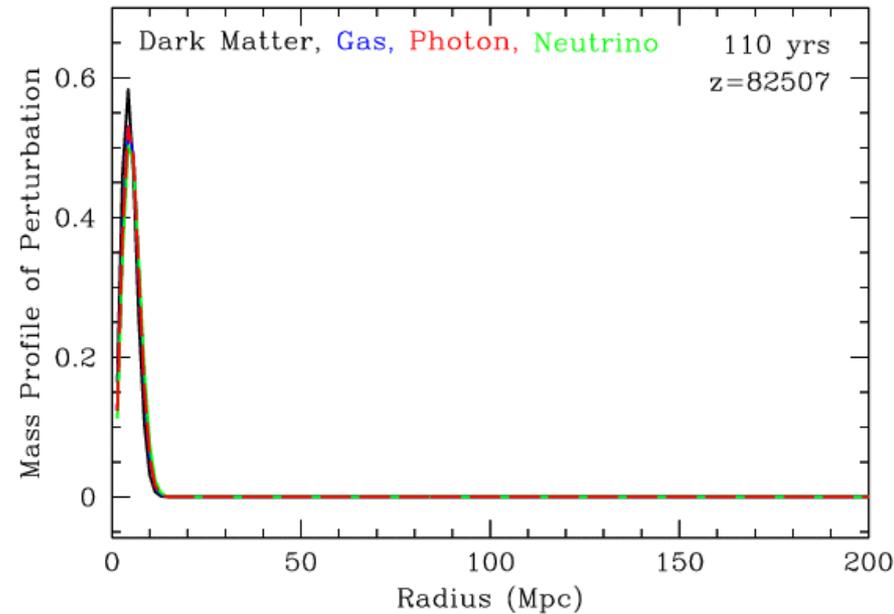
Etape 1 : condition initiale : une (des) perturbation(s) de densité



Baryons



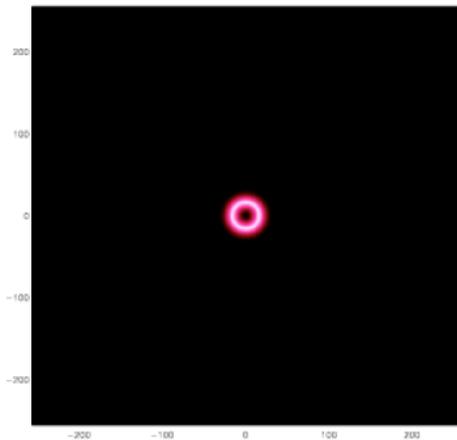
Photons



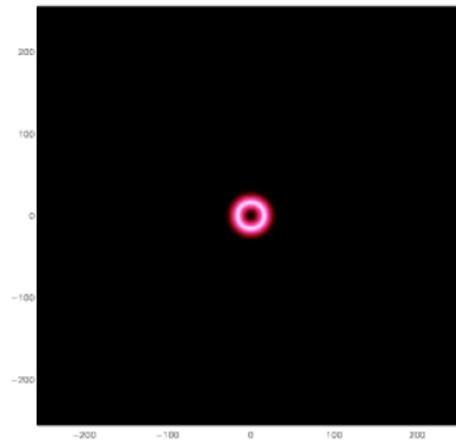
* plasma primordial homogène sauf un léger excès de matière à l'origine

* forte pression pousse $\gamma + b + e + \nu$ loin de l'origine à $c_s \approx c / \sqrt{3}$

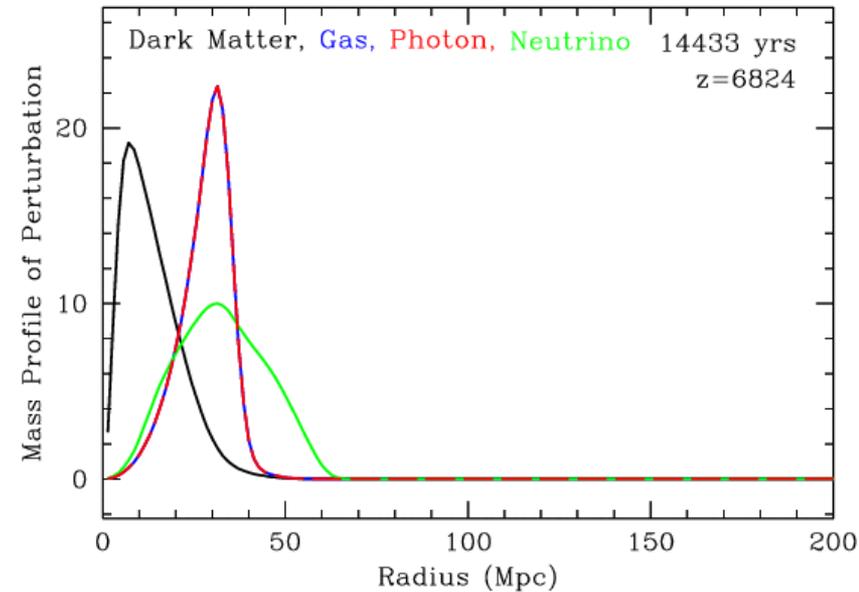
Etape 2 : propagation avant découplage



Baryons

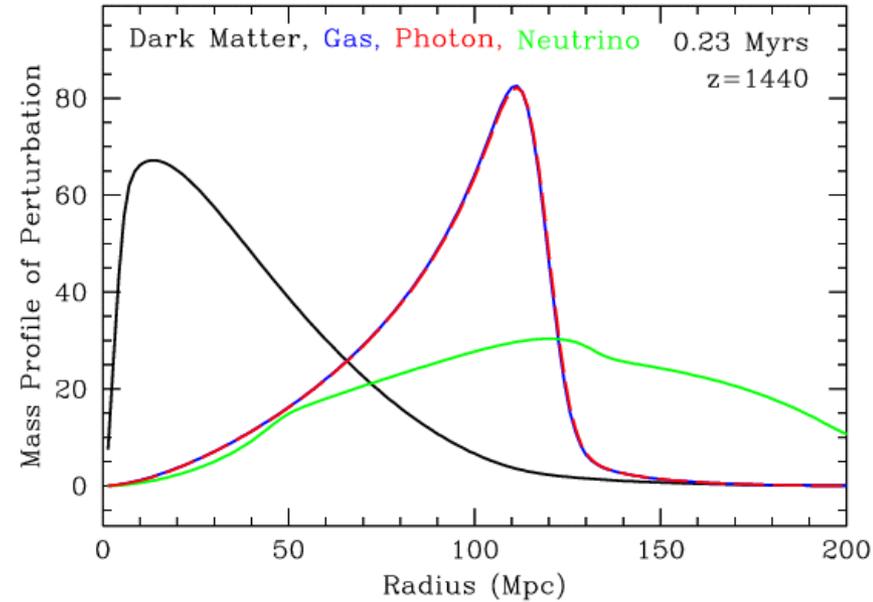
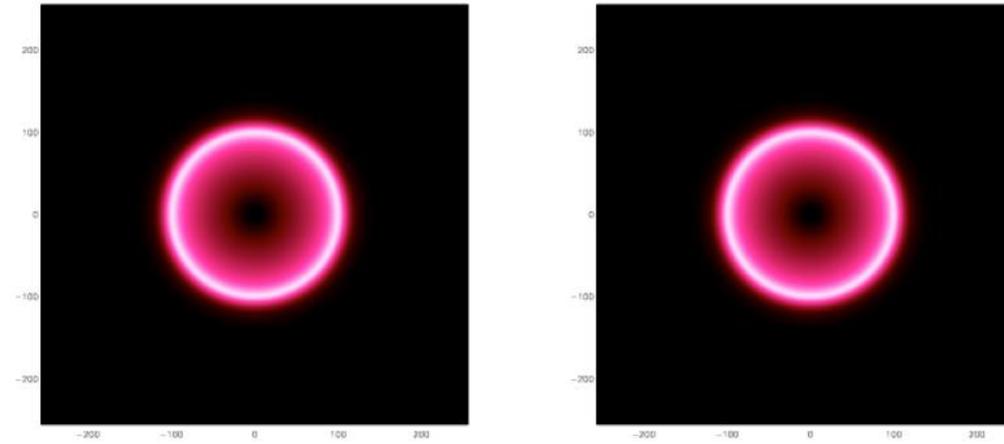


Photons



- * Propagation initiale : gaz(=b+e) + γ se déplacent simultanément
- * DM et ν ne couplent pas (peu) au gaz ou au γ
- * Les ν sont relativistes \Rightarrow propagation à vitesse c
- * DM sans pression \Rightarrow reste au centre (ou presque ...)

Etape 3 : propagation avant découplage dure $4 \cdot 10^5$ ans !



$$l_{dec} \approx c_s t_{dec} = c / \sqrt{3} 4 \cdot 10^5 t_{1an} \approx 3 \cdot 10^5 AL$$

$$l_0 \approx \frac{a_0}{a_{dec}} l_{dec} \approx 10^3 l_{dec} \approx 100 \text{ Mpc}$$

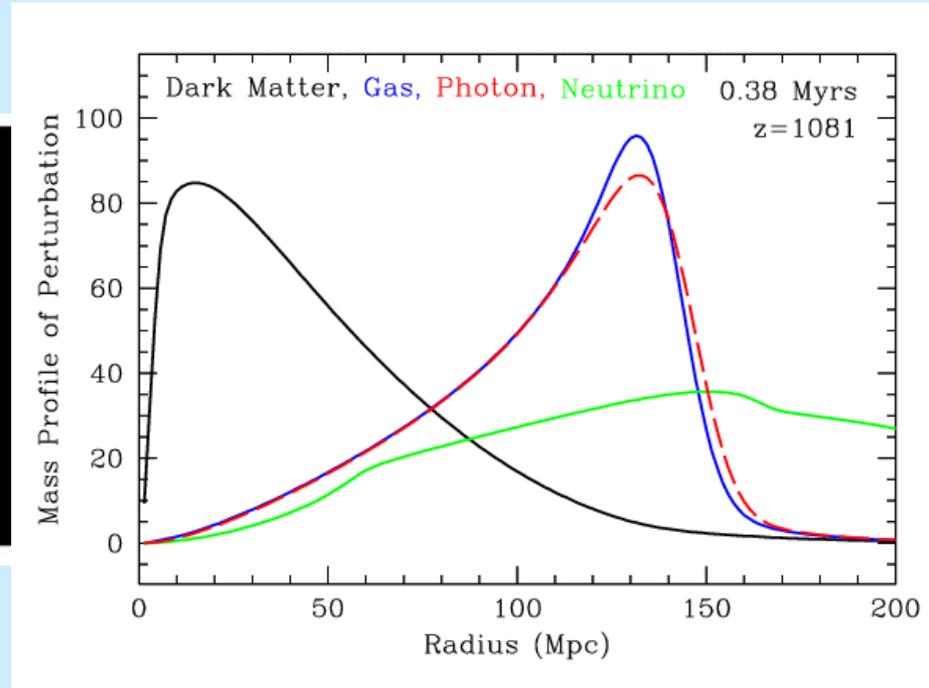
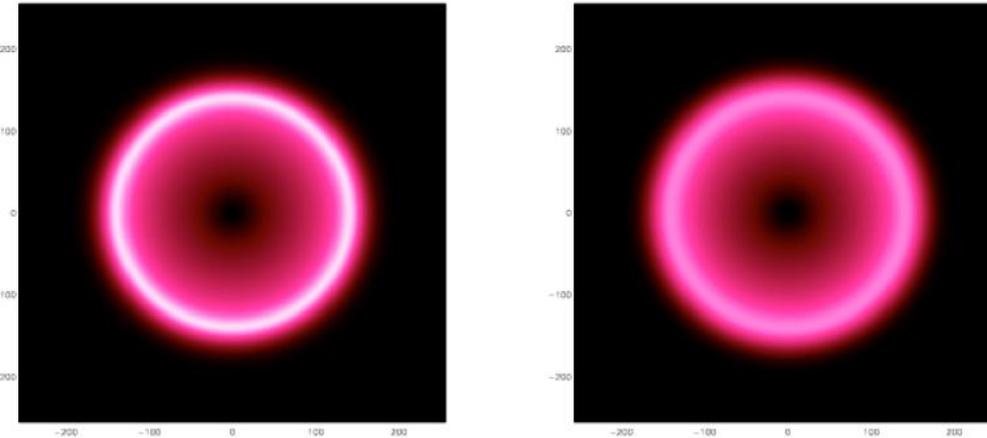
(Horizon sonore)

Le découplage n'est pas instantané =>

$$l_0 \approx 150 \text{ Mpc}$$

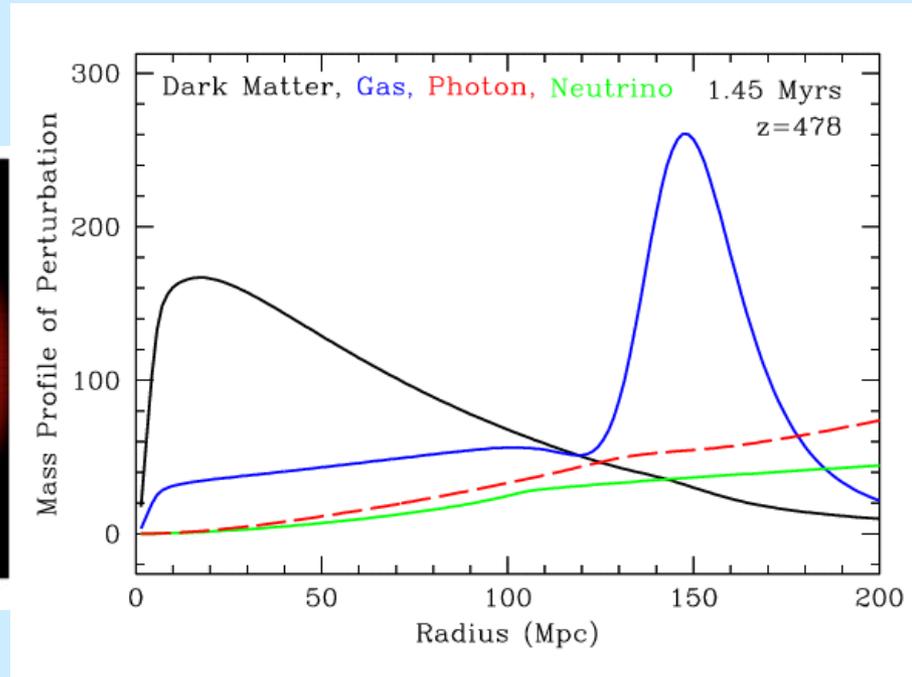
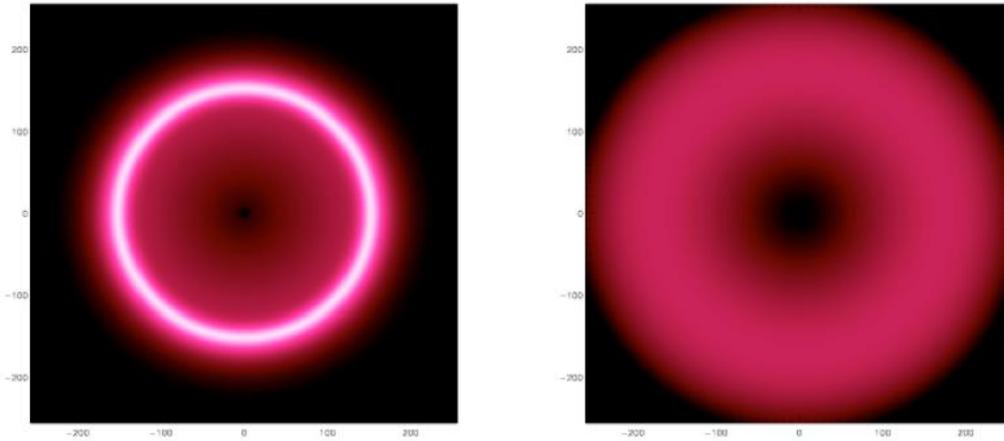
Etape 4 : Découplage !!

Le CMB est né !!



- * Découplage : les baryons capturent les électrons : phase neutre
- * Les photons γ se découplent des baryons \Rightarrow propagation libre
- * Les baryons (atomes) ont une pression nulle \Rightarrow déplacement s'arrête

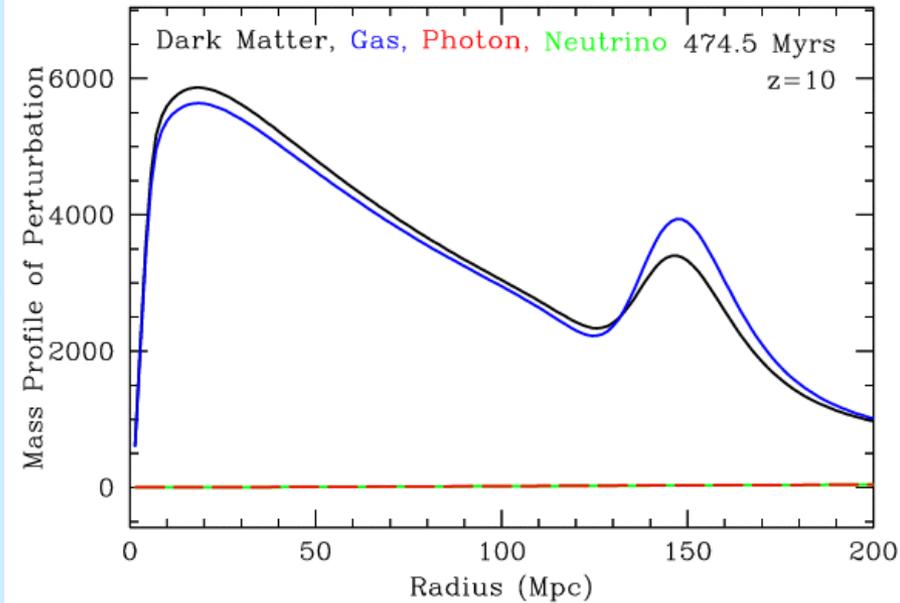
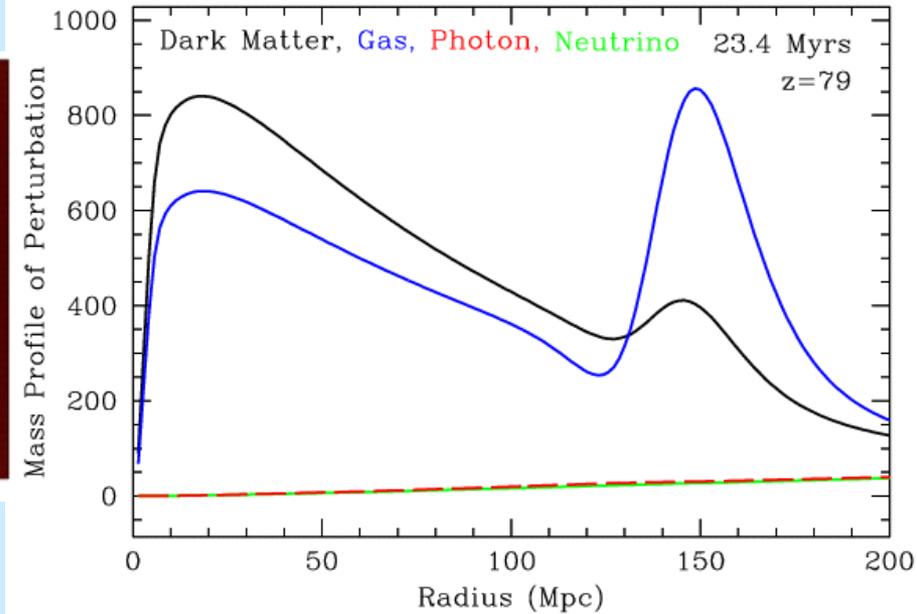
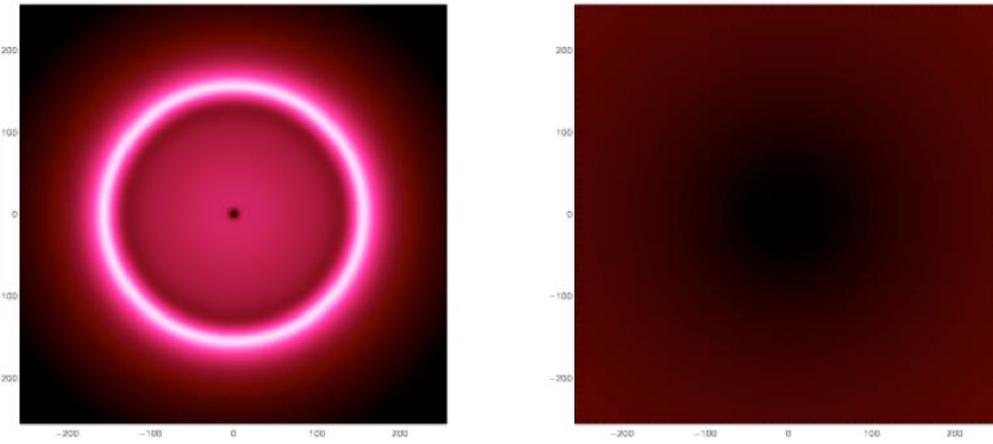
Etape 5 : Propagation libre des photons + croissance perturbation densité



* Les photons diffusent dans le milieu : homogénéisation

* Les baryons forment un pic de densité à «150 Mpc» de la densité initiale de matière noire

Etape 6 : Action de la gravité pendant 500 millions d'années

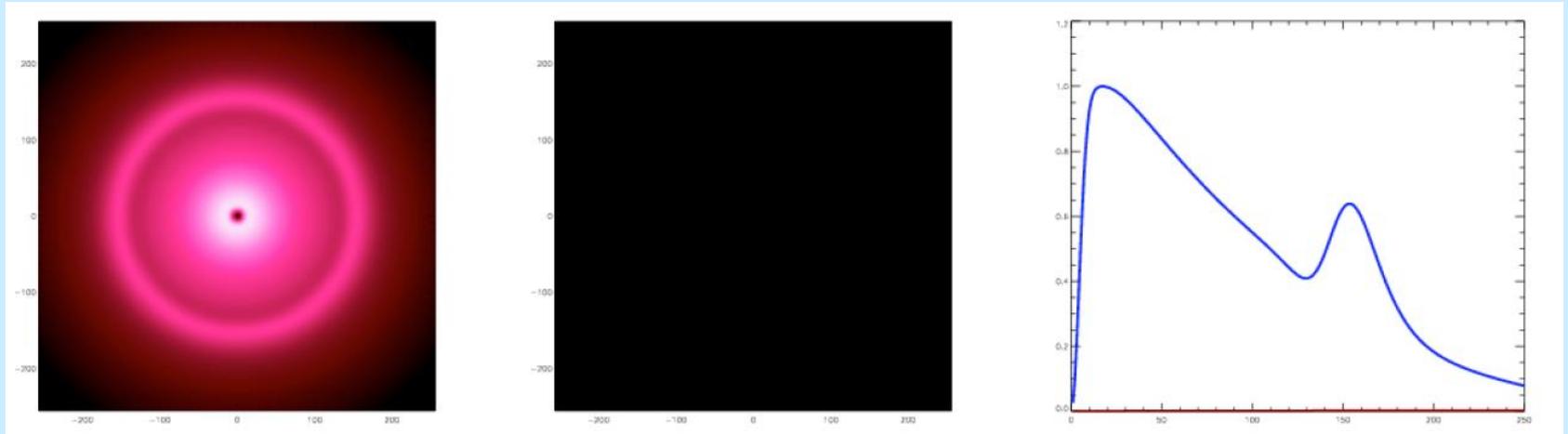


Les γ sont quasiment uniformes

Le pic de DM initial attire les baryons

Le pic de baryons attire de la DM

Etape 7 : Aujourd'hui après 14 milliards d'années



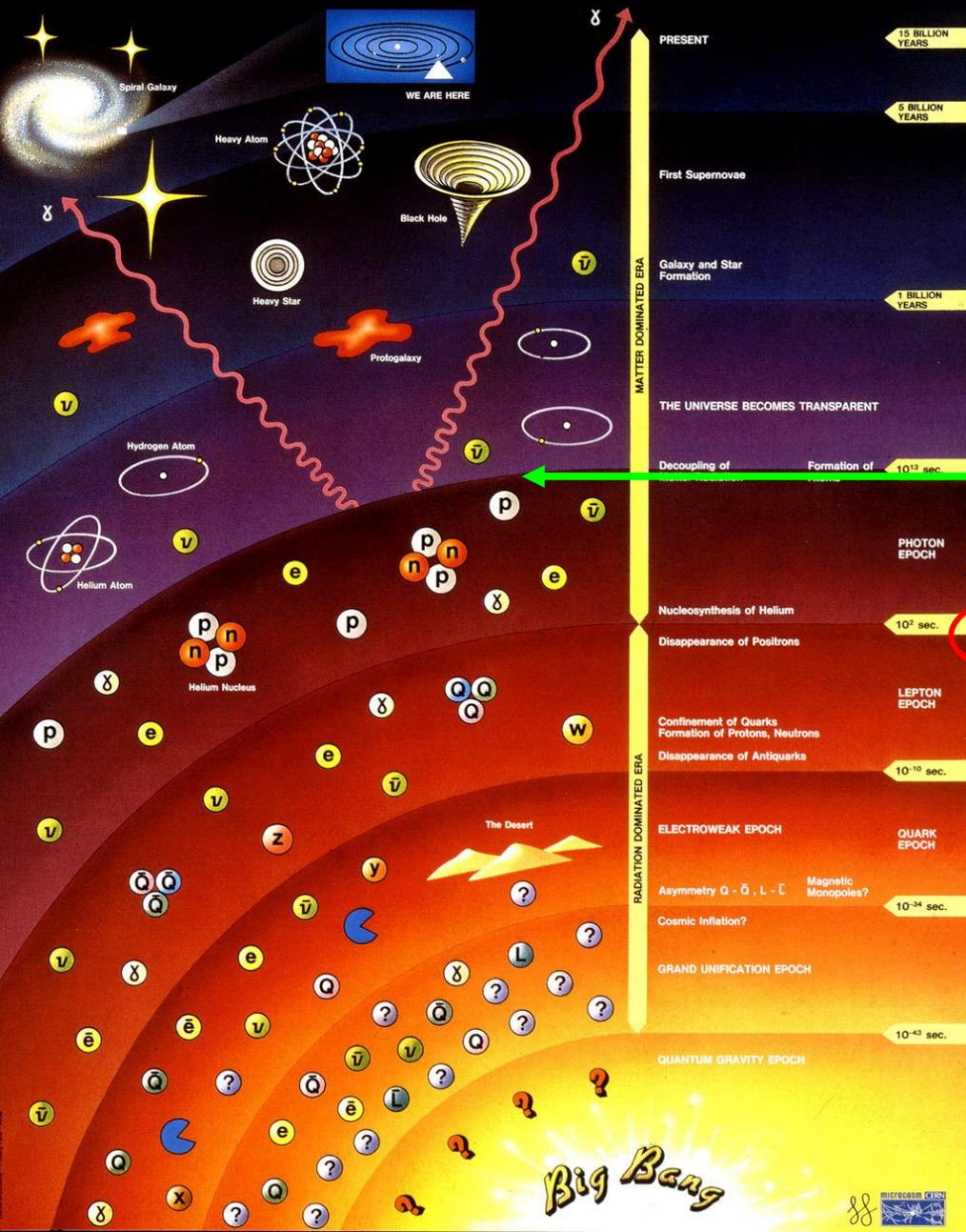
Baryons et DM ont atteint leurs densités d'équilibre dans le rapport Ω_b / Ω_M

Configuration finale : pic initial + écho à 150 Mpc

Formation des galaxies : phénomène local (<10 Mpc)

=> les évolutions ultérieures des deux pics sont découplées

History of the Universe



Formation structures

Le modèle du Big-Bang repose sur :

- l'expansion
- La nucléosynthèse
- Le bruit de fond cosmique
- Les oscillations de baryons

recombinaison

BAO

nucléosynthèse

Baryogénèse

- Les protons et les neutrons sont créés

inflation ?

Brisure des symétries

- Les interactions se distinguent
- L'antimatière disparaît
- Les particules deviennent massives

Gravité quantique ?

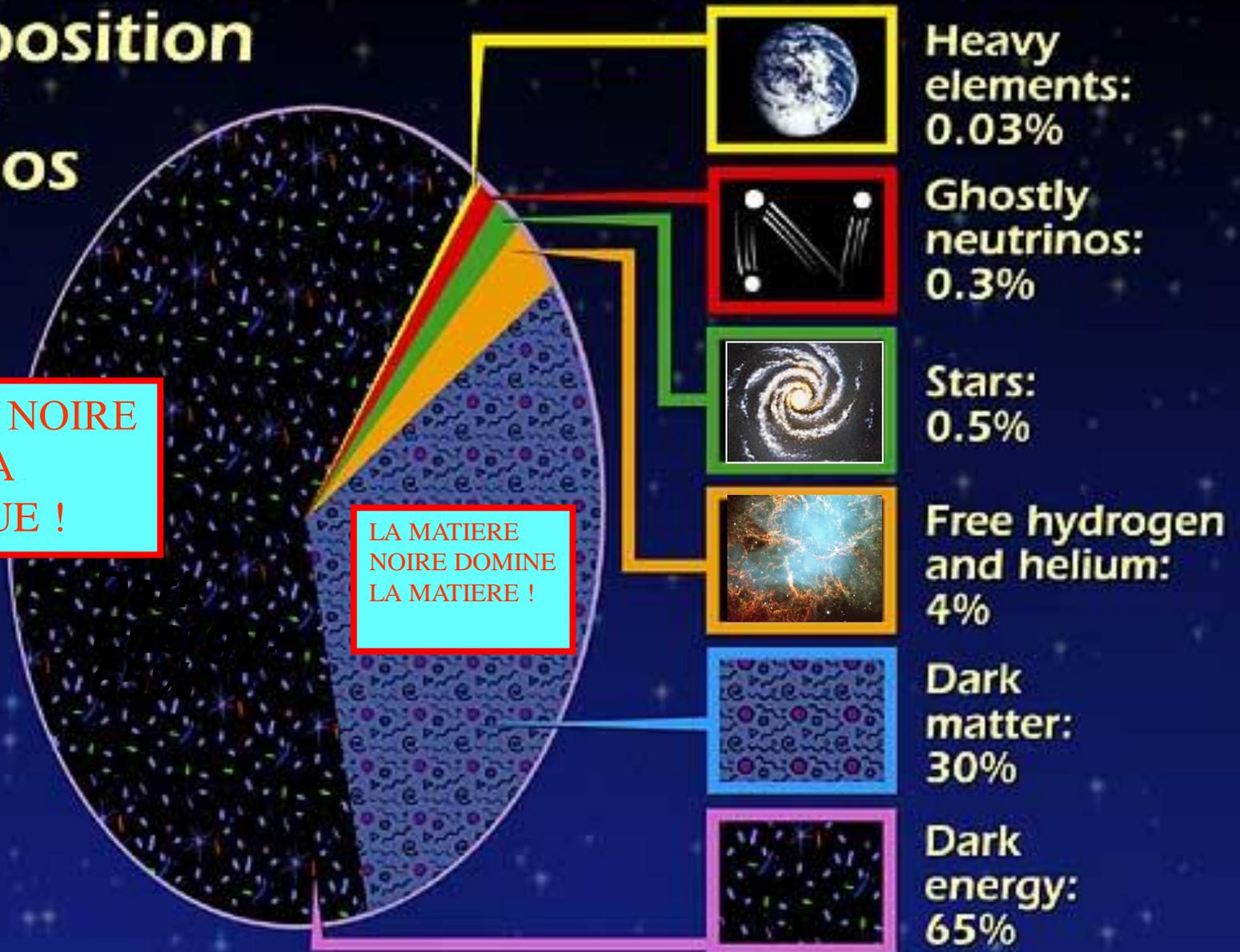
Les problèmes de la cosmologie moderne

Energy budget of Universe

Composition of the Cosmos

L'ENERGIE NOIRE
DOMINE LA
DYNAMIQUE !

LA MATIERE
NOIRE DOMINE
LA MATIERE !



Heavy elements:
0.03%

Ghostly neutrinos:
0.3%

Stars:
0.5%

Free hydrogen and helium:
4%

Dark matter:
30%

Dark energy:
65%

SCALE OF THE UNIVERSE

BIG BANG

DECELERATION

ACCELERATION

PRESENT

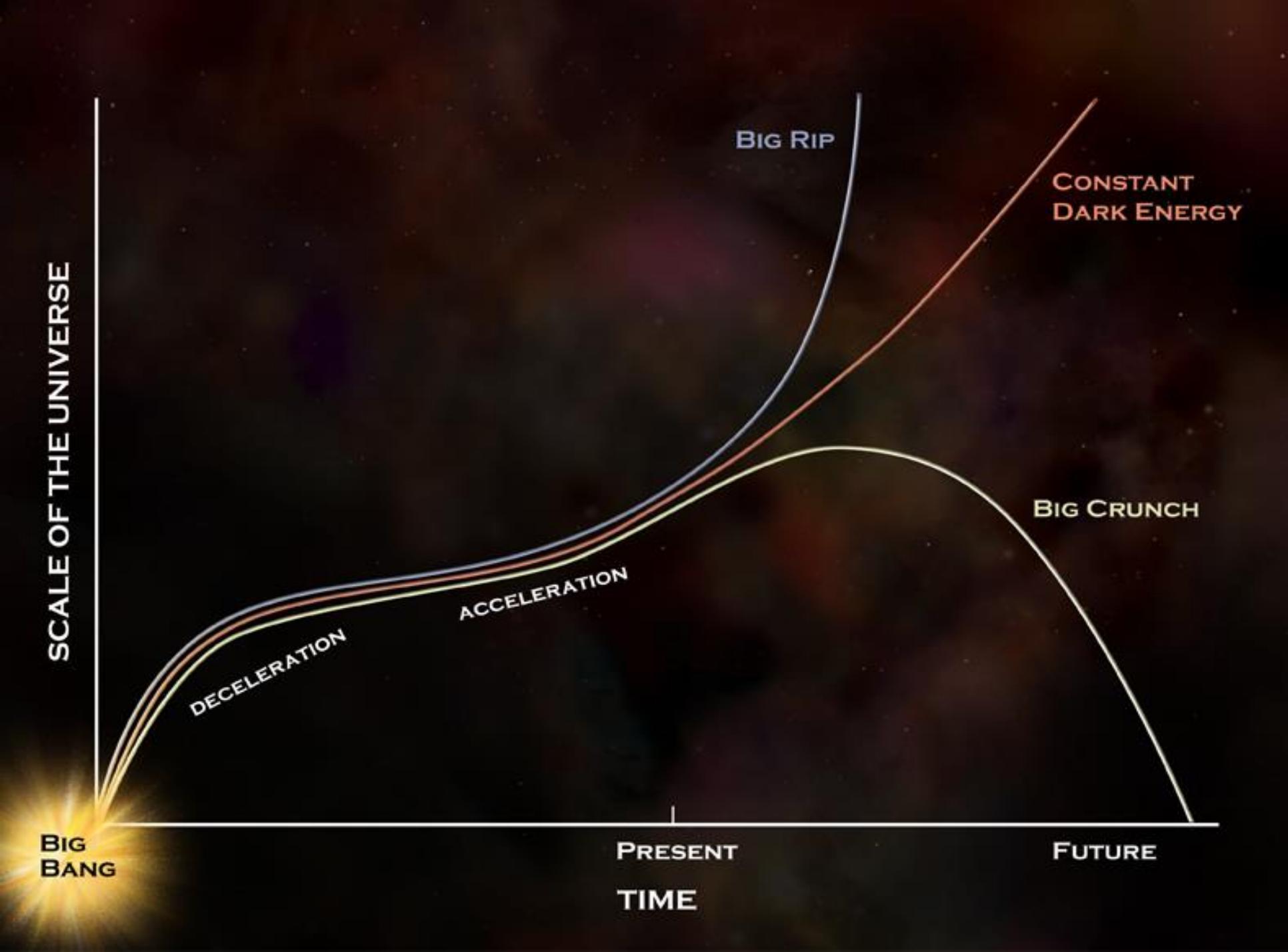
TIME

CONSTANT DARK ENERGY

BIG RIP

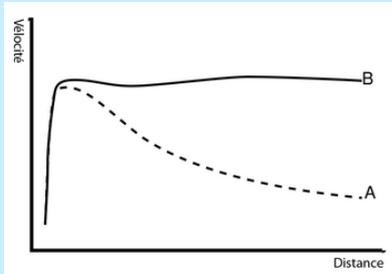
BIG CRUNCH

FUTURE



Matière Noire : Observations

⇒ Galaxies :



- rotation des étoiles (Rubin 1970)
- *forme des galaxies spirales (débat)*
(Peebles – Ostriker 1970)

⇒ Amas de Galaxies :

- dynamique des galaxies (Zwicky 1931)
- effet de lentille gravitationnelle

⇒ Structure à grande échelle :

- formation des structures (Peebles 1980)
- sondes cosmiques (CMB, BAO, SNIa)

Matière Noire : Interprétations

⇒ Matière ordinaire : MACHO (Massive Compact Halo Objects)

Défavorisé : pas assez d'objets détectés

⇒ Nouvelle forme de Matière : WIMPs
(Weakly Interactive Massive Particles)

Toujours aucune détection

⇒ Nouvelle théorie : ex. MOND (MOdified Newtonian Dynamics)

existence d'une accélération limite : $a_0 = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$

fonctionne à l'échelle des galaxies

Energie Noire : Observations

2 phénomènes s'opposent : Expansion vs Gravitation

Conclusion : l'expansion doit décélérer

Observations des SNIa1998 : l'expansion accélère (prix Nobel 2011)

Conclusion :

La dynamique de la matière est dominée par une force répulsive :

L'énergie noire !

Energie Noire : Interprétations

Il existe une nouvelle composante dans l'Univers :

- ⇒ La constante cosmologique
- ⇒ L'énergie du vide (quantique)
- ⇒ Une nouvelle force : La Quintessence ($F \sim r$)

Notre interprétation est fausse / nos équations ne fonctionnent plus :

- ⇒ La Gravitation est modifiée à grande échelle
- ⇒ La relativité générale ne fonctionne plus
- ⇒ Le principe cosmologique/ principe de Copernic n'est pas valable

Spéculation :

Le Multivers

Paradoxes quantiques (Everett 1950)

Théories des cordes (Veneziano 1968)

Inflation (Linde 1984),

La vie du cosmos **Lee Smolin** 1992

Constatations :

- plus on remonte le temps plus l'univers est chaud et homogène.
La densité de matière est énorme $\rho = M / V \rightarrow +\infty$
- les trous noirs ont la même propriété
- La théorie physique décrivant ces états de la matière, la gravité quantique, n'existe pas !! (Tentatives actuelles : théorie des cordes et gravité quantique à boucles)
- Les constantes fondamentales de la physique (~ 25) ont des valeurs qui s'étalent sur 120 ordres de grandeurs ($E_P / E_\Lambda \approx 10^{120}$)
- Une infime variation d'une de ces constantes amène à des univers très différents du notre (absence d'étoiles, $t_U \approx 10^{-43} s$, ...)
- Le principe de sélection naturelle est totalement absent de la physique

Hypothèses :

- Chaque trou noir est un univers, et notre univers est un des trous noirs d'un univers parent
- Lors de la formation d'un trou noir, les constantes de la physique changent un tout petit peu

Conséquences :

- Notre univers n'est que l'infime partie d'une structure beaucoup plus complexe : Le Multivers
- Notre monde (galaxies, étoiles, planètes, vie) résulte d'un processus de sélection naturelle des constantes de la physique qui tend à maximiser le nombre de trous noirs créés dans un univers donné !!

