A visualization of the cosmic web, showing a complex network of red and orange filaments and nodes against a black background. The nodes are bright, multi-colored points (yellow, orange, red) where filaments intersect, representing galaxy clusters and superclusters. The filaments themselves are composed of smaller, dimmer red and orange points.

# LA COSMOLOGIE SCIENTIFIQUE MODERNE

Jean-Marc Virey

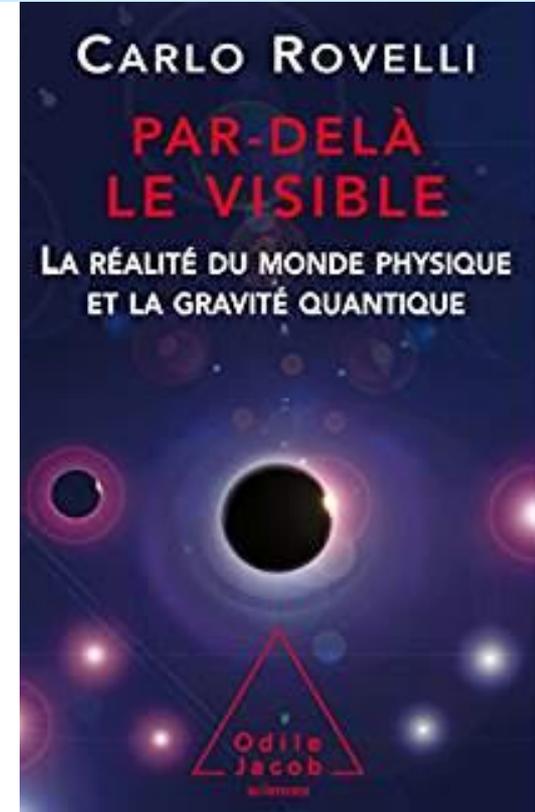
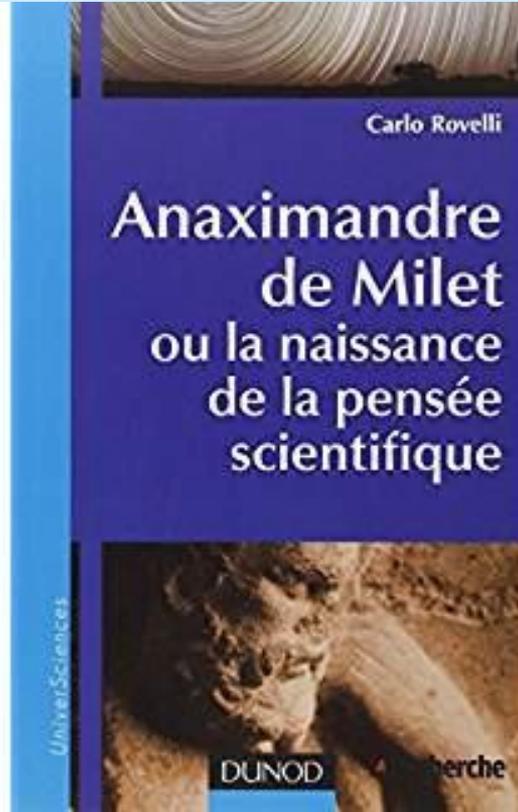
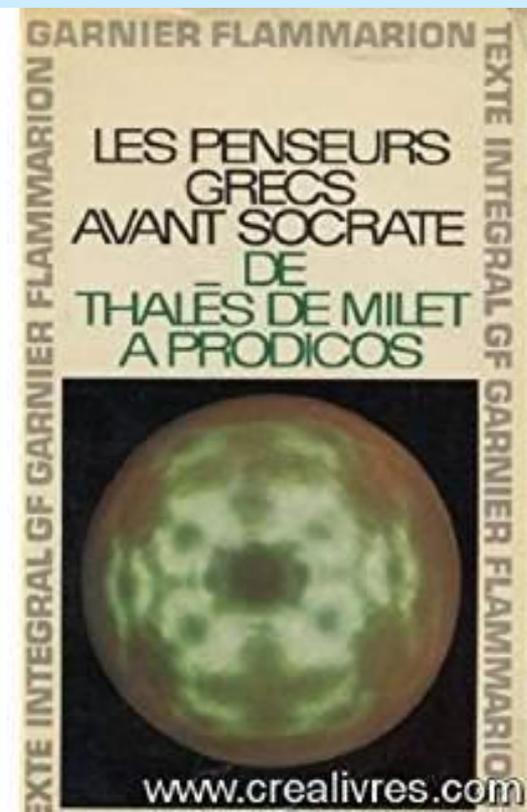
Centre de Physique Théorique & Université d'Aix Marseille

# LA COSMOLOGIE SCIENTIFIQUE MODERNE

- Les cosmologies scientifiques antiques
- Le Modèle du Big Bang
- Problèmes

Sources (partie Antiquité) :

Jean Voilquin



# Les cosmologies antiques

Mythes et mystères au centre 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 et les égyptiens

Les Mésopotamiens (Chaldéens)

Babylone (-1200 ↔ -600)

Invention de l'écriture (-3000)

Début de l'observation du ciel  
précise et systématique :

- math : base 60
- astro : constellations du zodiaque

Découverte des premières « régularités » : **invention du gnomon** (egypte)

- levers et couchers des planètes et des constellations
- premières prédictions

Accumulation du savoir (par des écrits)

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

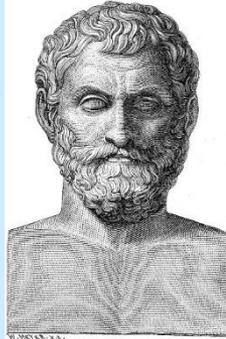
**Les premières mesures !**



# La Grèce antique

## La modélisation du monde et le rôle des mathématiques

**Thalès de Milet** (-625 ↔ -546), un des 7 sages



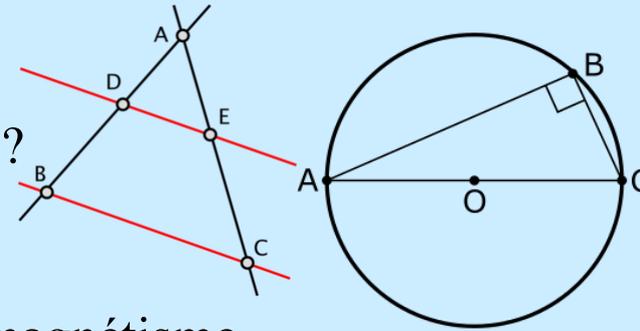
Philosophe de la nature :

La matière et la nature sont compréhensibles par la pensée

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

Mathématicien :

Formule certaines propriétés géométriques. Démonstration ?



Physicien :

Premières connaissances/expériences sur l'électricité et le magnétisme

Astronome :

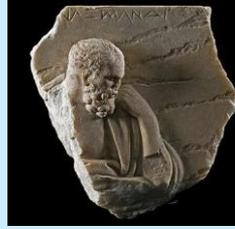
petite ours & nord, prédiction d'une éclipse, année bissextile ... légende/emprunt ???

Cosmologue :

L'eau engendre tous les autres éléments (terre, air, feu) ...

# Anaximandre de Milet (-610 ↔ -546)

Le premier scientifique ?



Philosophe de la nature :

Explication de l'origine et l'organisation du monde avec une approche « scientifique ». **Le premier à écrire ses pensées et travaux !** (*hélas perdus*)

**L'apeiron : principe originel, illimité, source et fin de toute chose (cycle)**

Cosmologie : **La Terre flotte dans l'espace et se meut autour du monde**

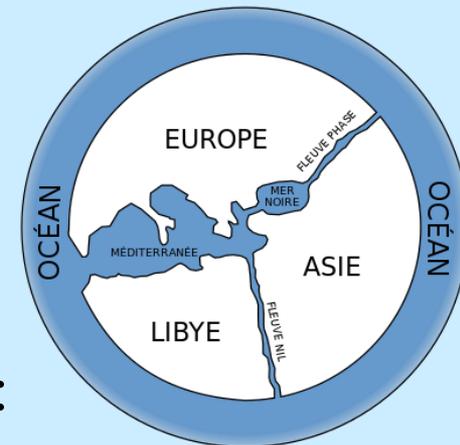
Vision « mécanique » des divers mouvements, astres à des distances différentes, obliquité/écliptique ? pluralité des mondes ?

Biologiste : Origine de la vie vient de la mer ! Évolution des espèces !!

Physicien : Tonnerre et éclairs sont la manifestation des éléments (et non des dieux !)

Cycle de l'eau (évaporation -> pluie, source des vents)

Cartographe :



# Les principaux apports de l'école de Milet :

## Observations et raison remplacent mythes et religions !

### Un nouveau style de pensée :

L'élève peut critiquer et dépasser le maître !

Avoir conscience d'être faillible



Hécatée de Milet : « J'écris ces notes comme elles me paraissent vraies car les récits des Grecs sont, à mon avis, aussi nombreux que ridicules. »

Milet : véritable espace démocratique (1<sup>er</sup> parlement du monde, agora où les citoyens s'expriment), pas de palais impériaux ou de castes religieuses fortes. -494 : le peuple est réduit en esclavage par l'empire Perse suite à une révolte ratée ...

# Pythagore de Samos (-580 ↔ -495)

et les Pythagoriciens ...

Mathématicien :

Tout est nombre ! Pratique de la démonstration.

Acoustique et musique:

Taille des cordes ↔ hauteur du son et harmonie

Cosmologue/Astronome :

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

Même le Soleil est soumis à des règles !

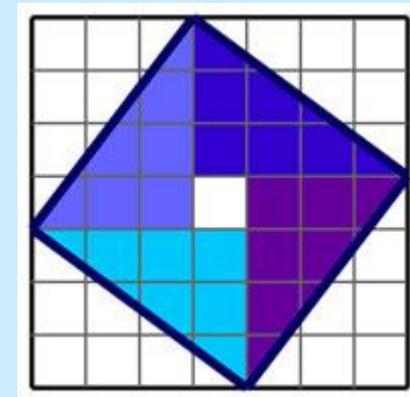
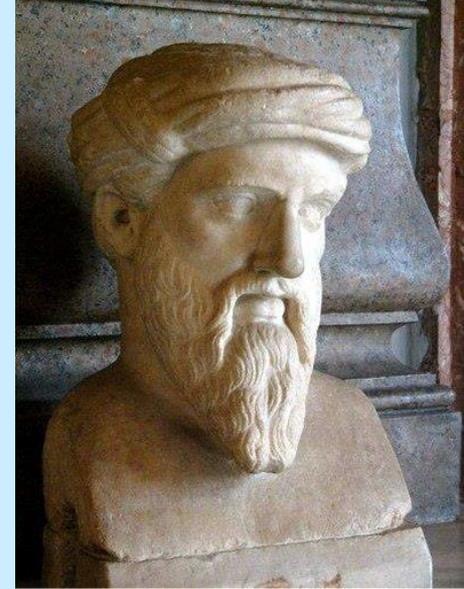
La Terre est ronde ? (Parménide -520 -450)

La Terre tourne sur elle-même – Hicéas de Syracuse -400 -335)

Politique :

Remplace démocratie ( $x=y$ ) par aristocratie ( $A/B=C/D$ ) : élite=savants et mérite,

Mondialisation (répandre cette structuration ...)



**Démocrite d'Abdère** (-460 ↔ -370)

(avec **Leucippe** et **Anaxagore**)

**Père de la science moderne?**



Philosophe humaniste, rationaliste et matérialiste:

L'univers (toute chose) est constitué d'**atomes** et de **vide**

« **Les atomes se meuvent éternellement dans le vide infini** »

Les atomes sont pour le monde ce que les lettres de l'alphabet sont pour l'humanité ...

Réfute les mythes et le merveilleux : les hommes peuvent agir pour changer le cours des choses ! Les dieux sont matériels ... la mort n'est pas à craindre, finalité = joie (→ Épicure -341 ↔ -270) + modération, équilibre

Cosmologie :

Notion d'espace vide où se trouve une infinité de mondes de toute taille

Tout est dynamique sous l'action de forces aveugles (pas de providence)

Platon n'en parle jamais sauf pour dire qu'il faut brûler tous ses livres

Aristote le cite souvent pour contredire ses idées ...

# La cosmologie de Platon (-428 ↔ -347)

Socrate (-470 ↔ -399)

Philosophe idéaliste et  
*finaliste*

Solides de Platon = images de la perfection

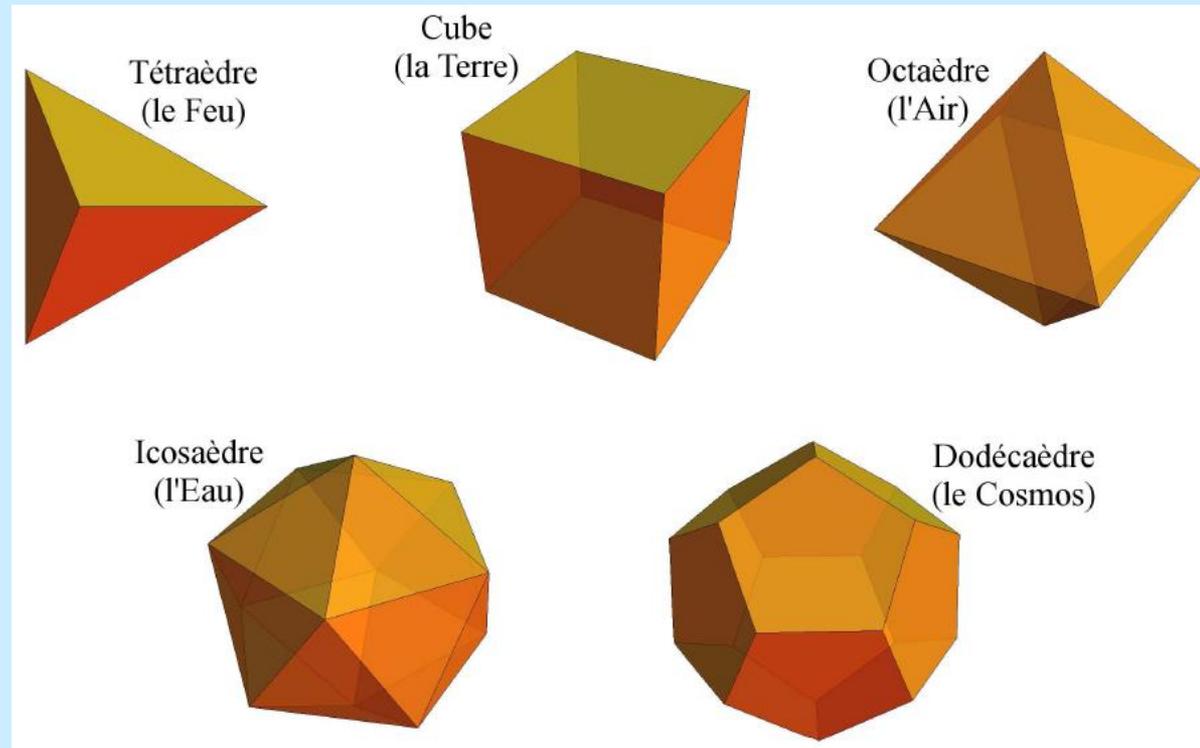
Les éléments sont interchangeables

Univers = Sphère céleste

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

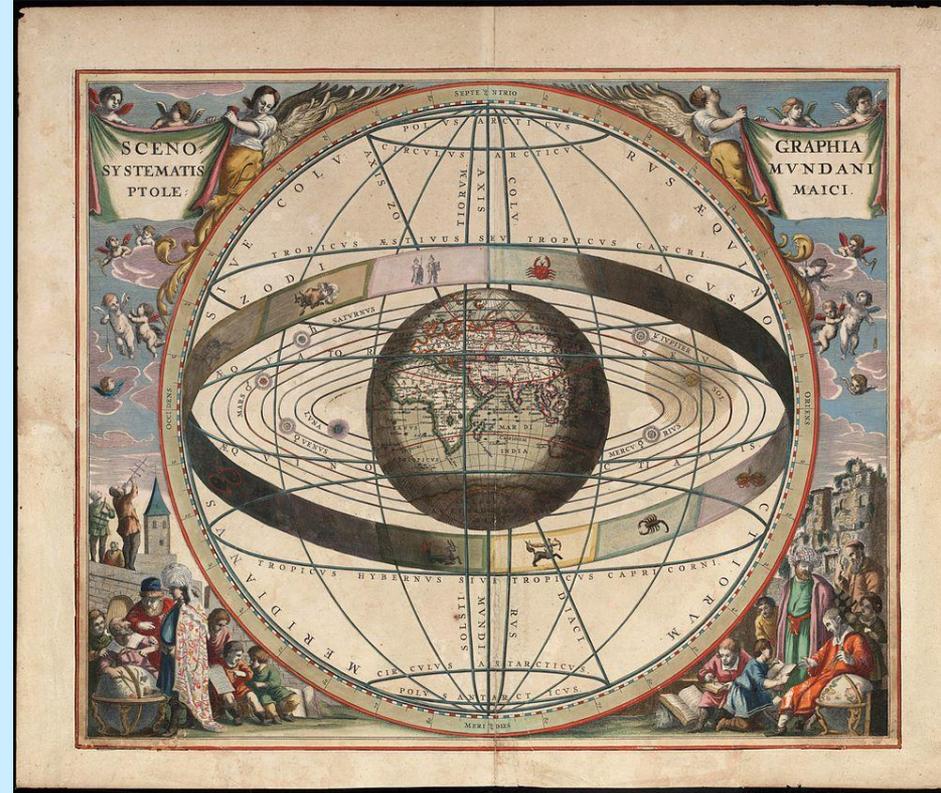
Il décompose la sphère céleste en 2 régions :  
inférieure et supérieure

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<sup>ème</sup> essence : l' **éther**



**Aristarque de Samos** (-310 ↔ -230) (Philolaos de Crotone (-470 ↔ -385) ?)

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

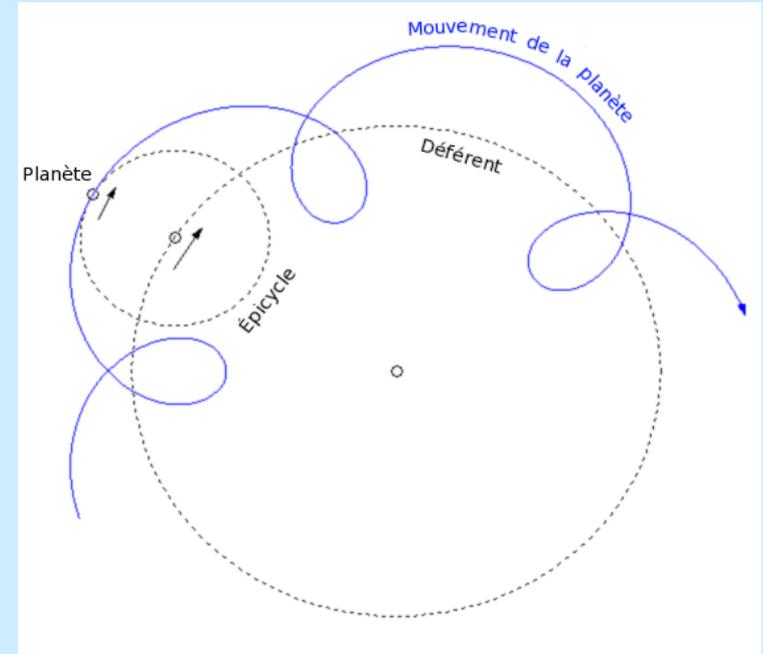
**Hipparque** (-190 ↔ -120)

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'influence d'Aristote & Platon sur le christianisme :

La Terre est au centre de l'Univers et l'Homme de celui du Monde vivant

Terre et Ciel sont séparés : corruptible vs inaltérable

L'âme est immortelle

Explications finalistes et métaphoriques des phénomènes naturels

Crainte de(s) Dieu(x) et de la mort

Peu d'attention à la Nature

Des formes antérieures aux réalités (mythes) dictent la structure du monde

La connaissance a pour sources le passé, la révélation et la tradition

# L'obscurantisme religieux



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

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

390 : Empereur Théodose : Christianisme religion unique & obligatoire  
Fermeture des écoles de pensée antique + destruction des livres  
Platon & Aristote survivent car soutiennent l'immortalité de l'âme ...

## Les mathématiciens de l'islam

Al-Khwârizmî (780-850) : Algèbre

Umar Al-Hayyam (1048-1131) : « géométries non-euclidiennes »

**Mais** ... 1417 : Poggio Bracciolini retrouve

« **De rerum natura** » (**De la Nature**) de **Lucrèce** (-98 -55) décrivant la **philosophie d'Épicure** élève d'un élève de Démocrite ... plus éthique que scientifique, la profondeur de vue de Démocrite manque mais

Pas de crainte des Dieux, ni buts ou causes du monde, ni hiérarchie cosmique, ni distinction entre ciel et terre

Amour de la Nature, les humains, le vivant, les choses ne sont que les parties d'un tout merveilleux et sans hiérarchie

Démocrite : « Pour le sage, toute terre est accessible ; l'univers entier est la patrie d'une âme honnête. »

On peut penser le monde en terme simple, chercher et connaître les secrets de la nature, pouvoir en savoir plus que nos pères, et, bien-sûr, l'idée atomiste base de ces réflexions avec la pensée de l'école de Milet

1516 -1551 : l'ouvrage est interdit mais c'est trop tard, la renaissance est en marche !

# La renaissance

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

=> 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 ...

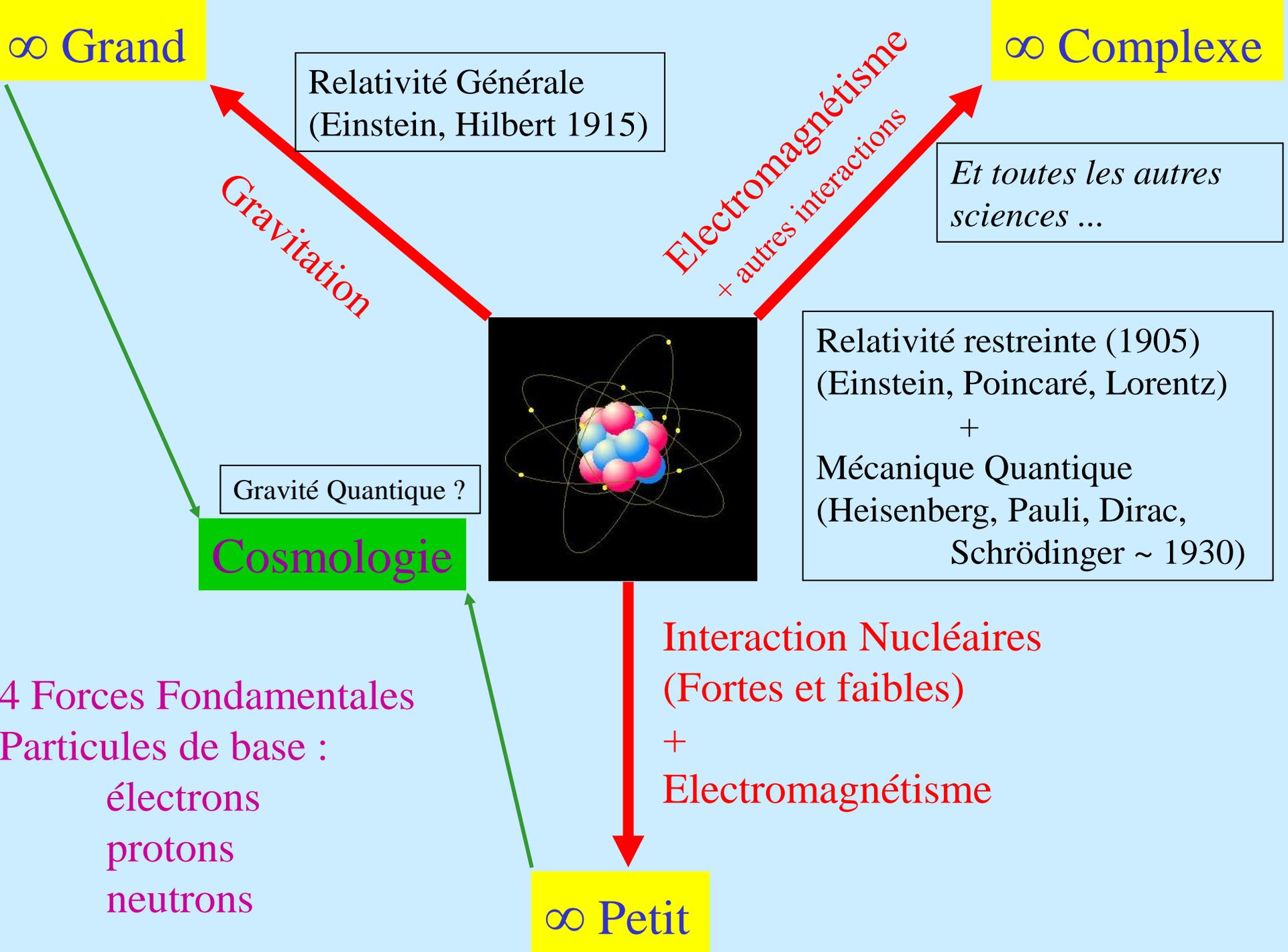
**Le paradoxe d'Olbers** (1823) :

*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/une force répulsive à grande échelle ...)

La cosmologie

scientifique moderne



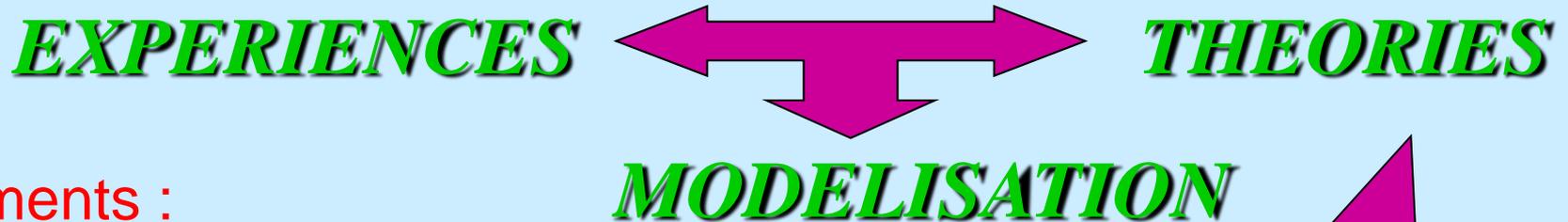
# La démarche scientifique en physique

## But de la physique :

- Décrire/Modéliser/Expliquer les phénomènes naturels

« La chose la **plus incompréhensible** du monde **est** que le monde **soit compréhensible** » *Albert Einstein*

- Expliquer la multiplicité des phénomènes sur la base d'un nombre limité d'hypothèses simples (simplification de la complexité)



## Instruments :

- Observations
- Expériences
- Hypothèses et Approximations
- Lois et Modélisation
- Théories (& Principes)
- Prédications
- Esprit critique : Limites/Doutes/Remise en question

# Notre galaxie

## La Voie Lactée



U  
N  
E  
  
V  
U  
E  
  
P  
R  
O  
F  
O  
N  
D  
E

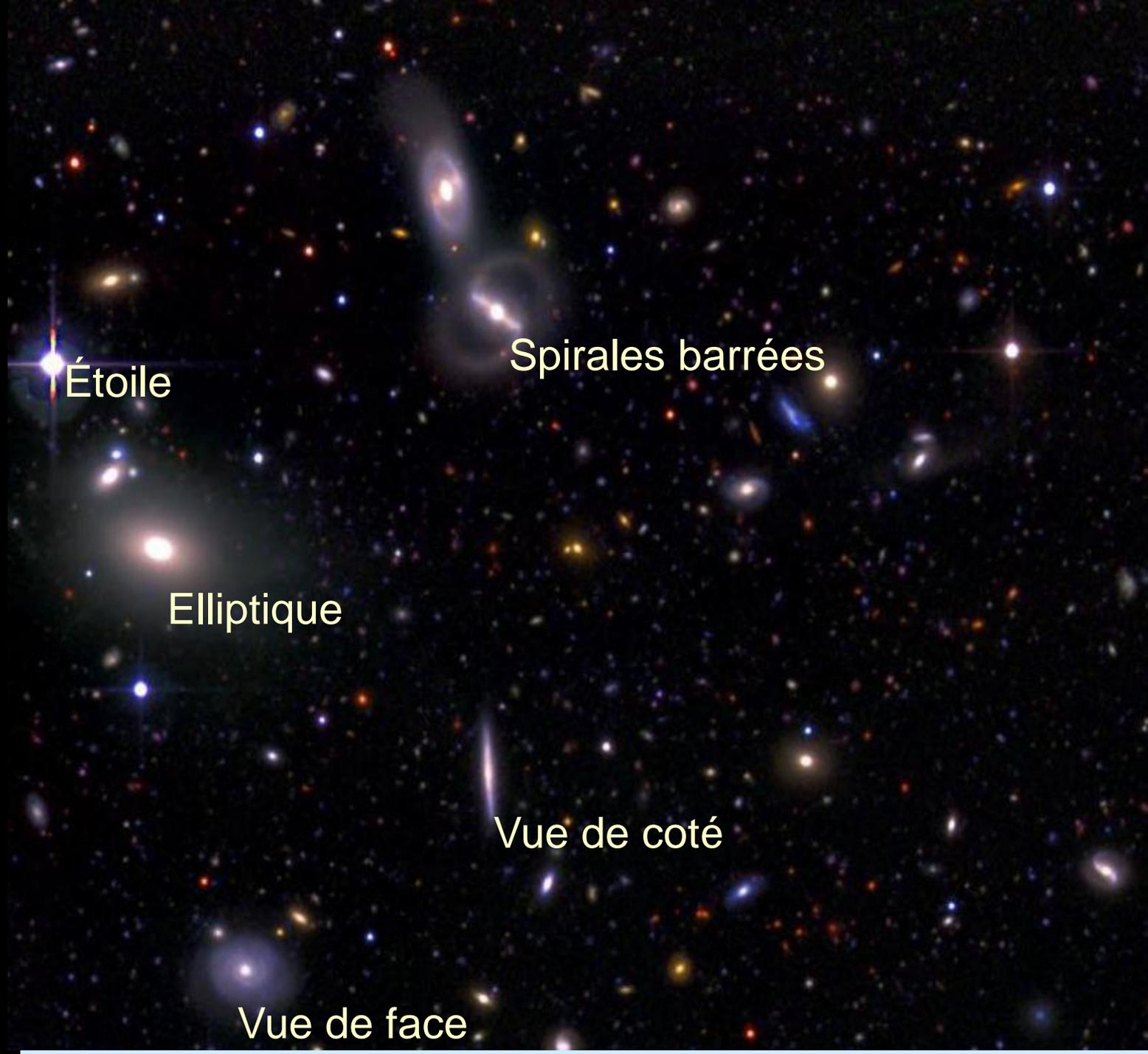
Étoile

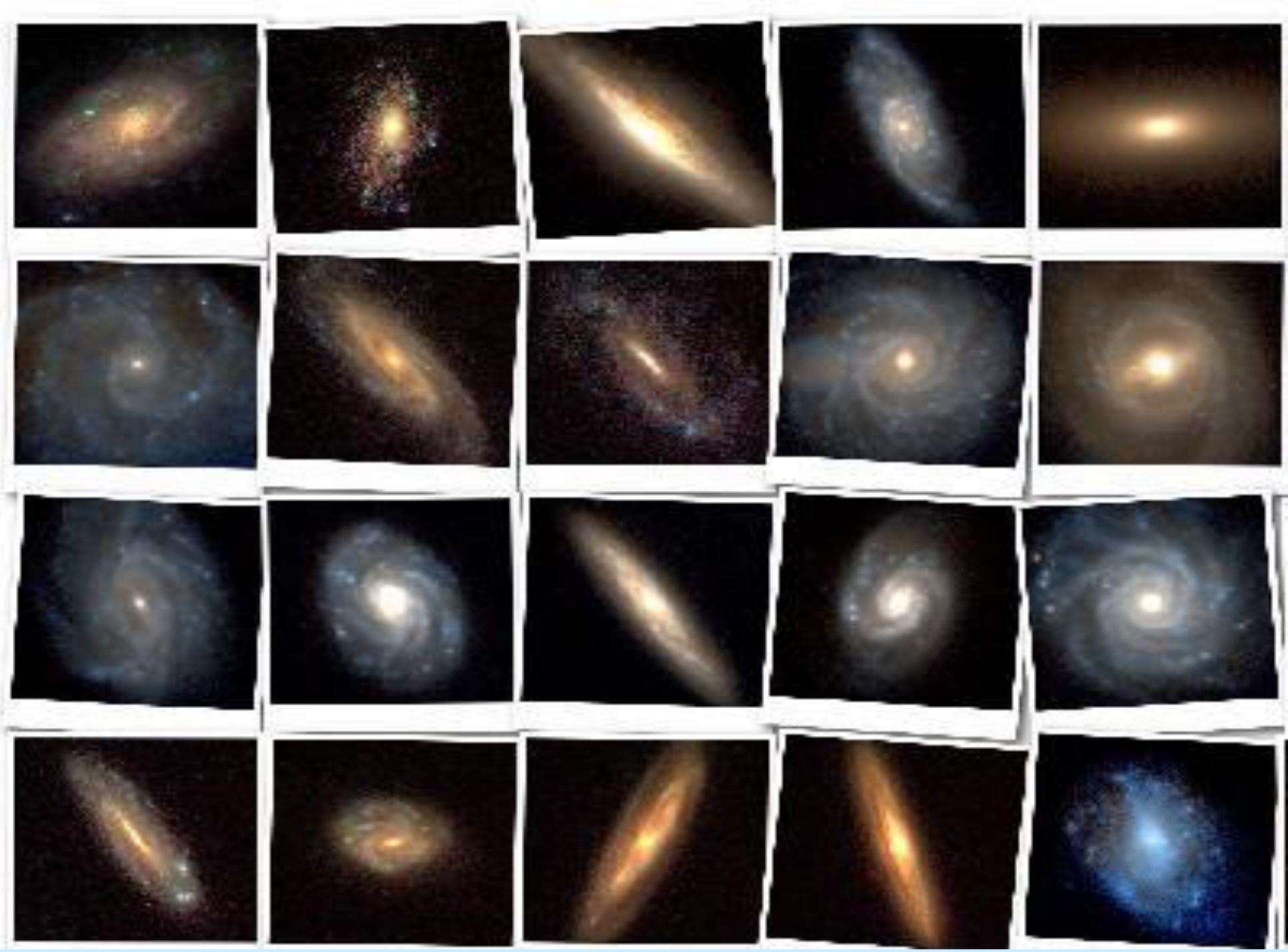
Spirales barrées

Elliptique

Vue de côté

Vue de face





Le sextette de Seyfert :  
Groupe compact de 4  
galaxies en interaction  
(la 5<sup>e</sup> en projection)  
(la 6<sup>e</sup> est la queue de la 1<sup>re</sup>)

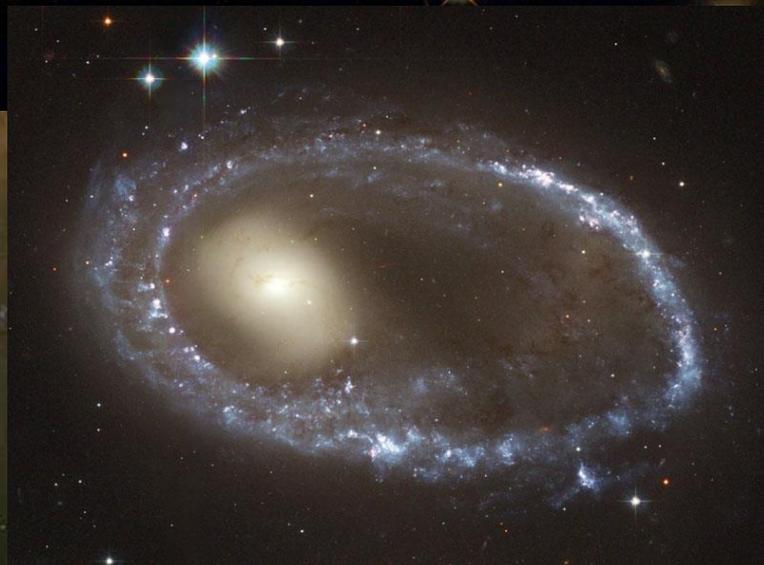


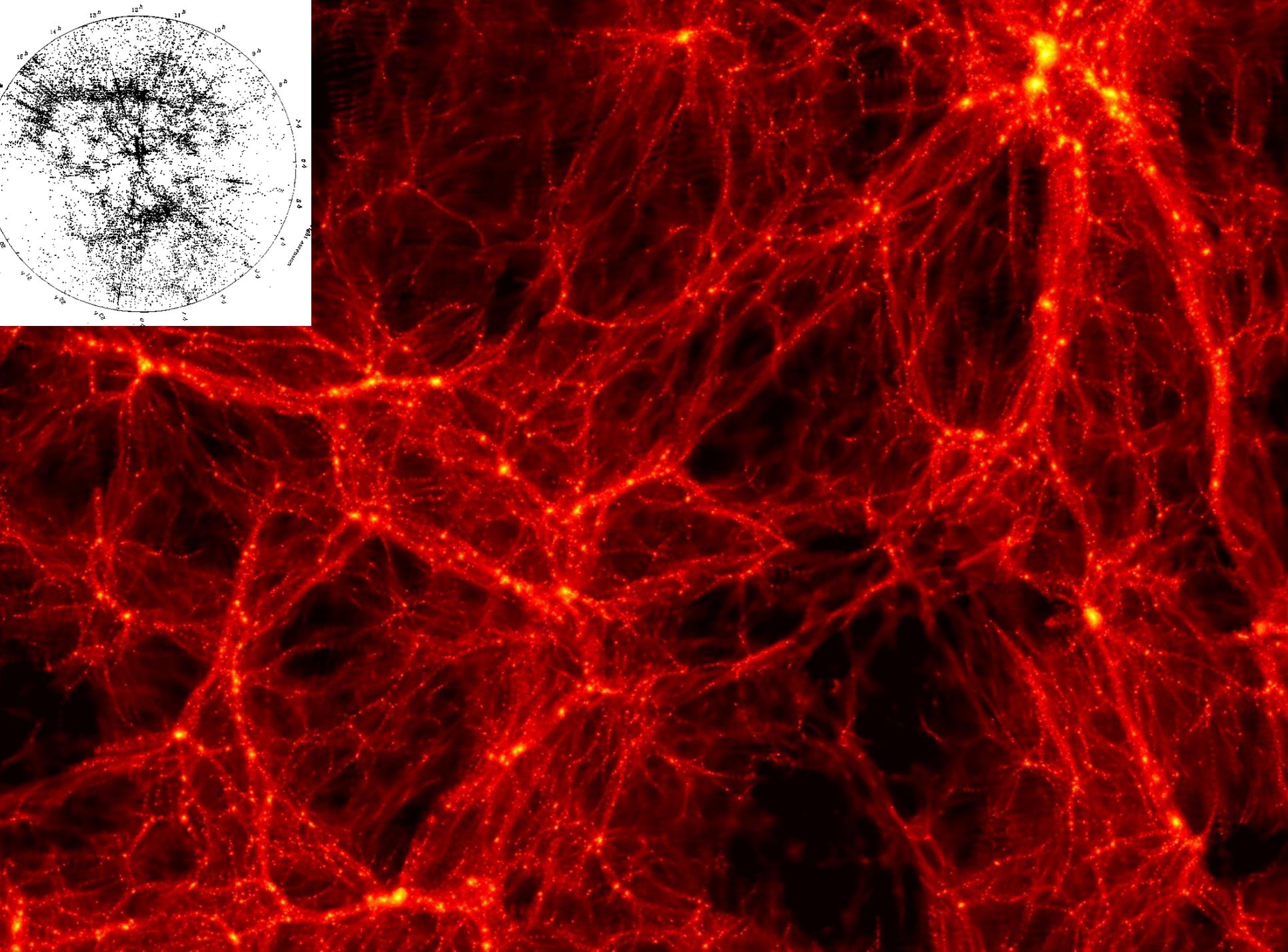
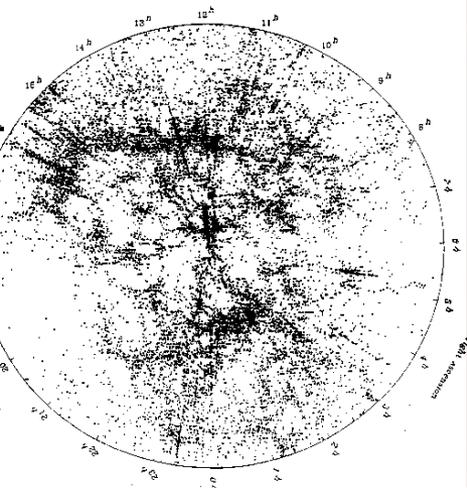


La galaxie du Tourbillon  
M51

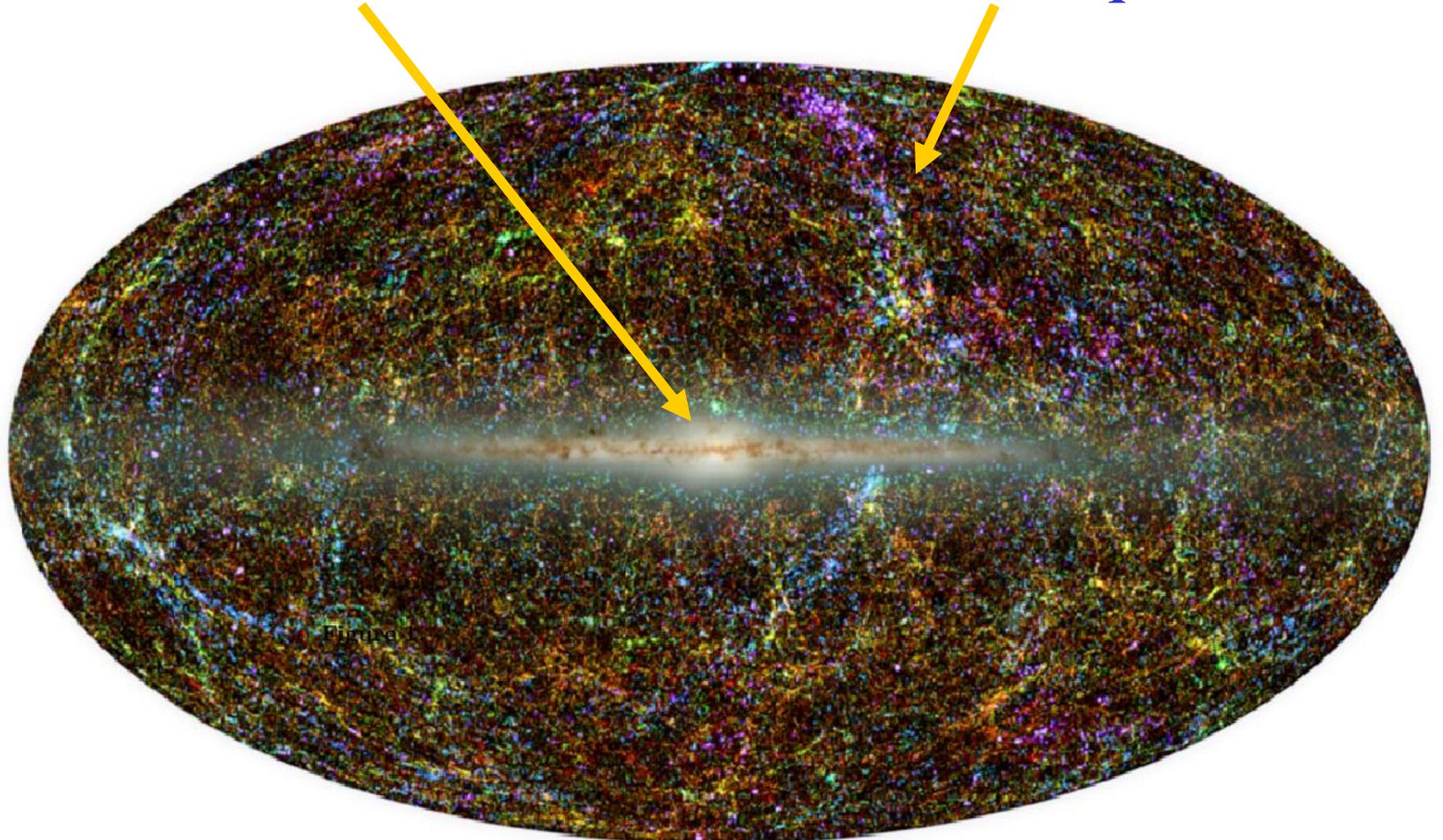


La galaxie du  
Sombrero  
M104





# 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)

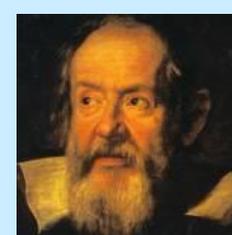
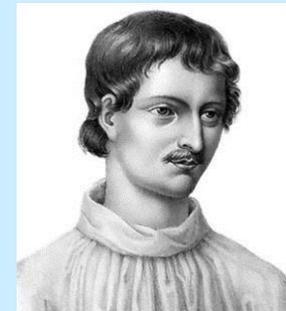
La Relativité Générale permet de décrire l'Univers dans sa globalité

**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.

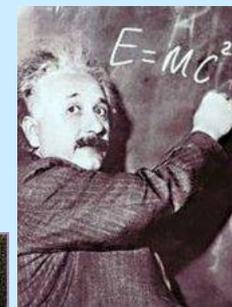
## S'appuie sur :

- 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)

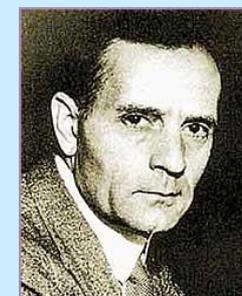


GALILEE  
1564-1642

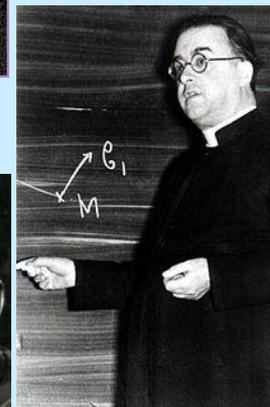
BRUNO  
1548-1600



EINSTEIN  
1879-1955



HUBBLE  
1889-1953



LEMAITRE  
1894-1966



GAMOW  
1904-1968

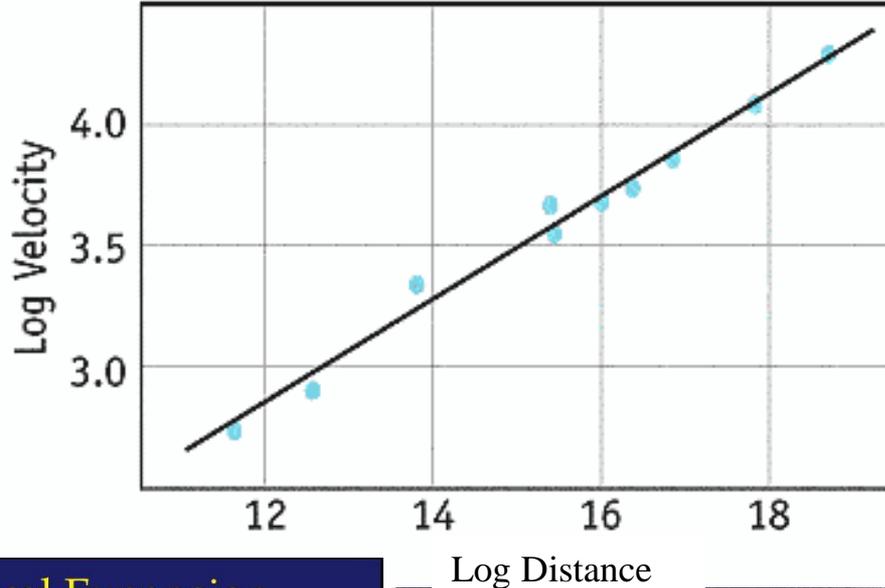
## Repose sur 4 piliers observationnels :

- 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 !

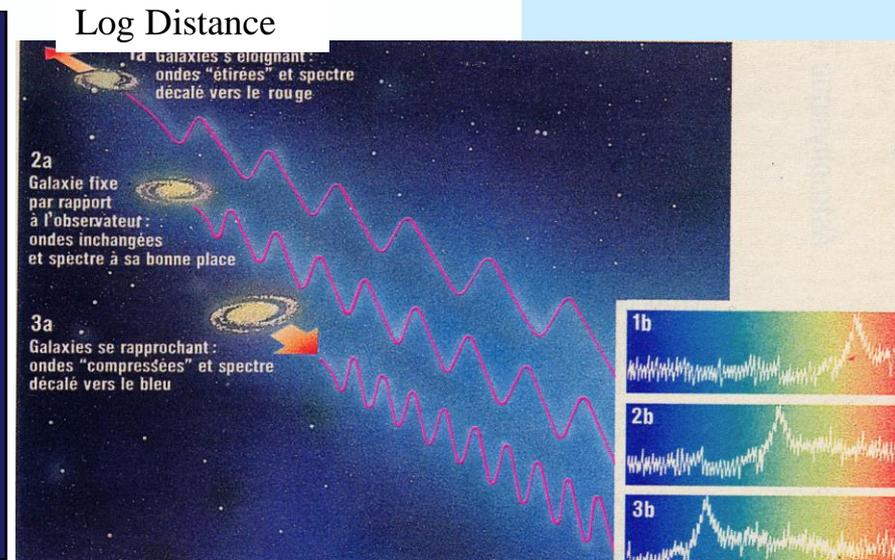
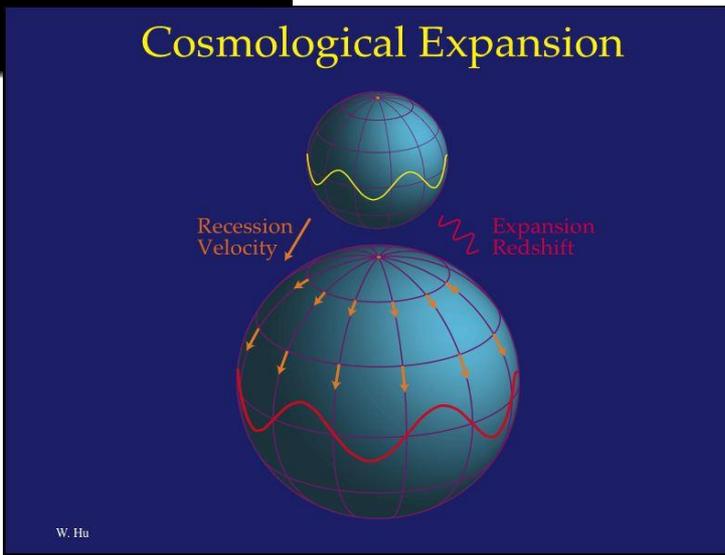
Les galaxies  
s'éloignent de  
nous d'autant  
plus vite  
qu'elles sont  
loin !



$$V \cong H_0 r$$

(Lemaître 1927)

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



# Nucléosynthèse Primordiale

Cadre : expansion + physique nucléaire

Prédictions :

→ Abondance élts légers :

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

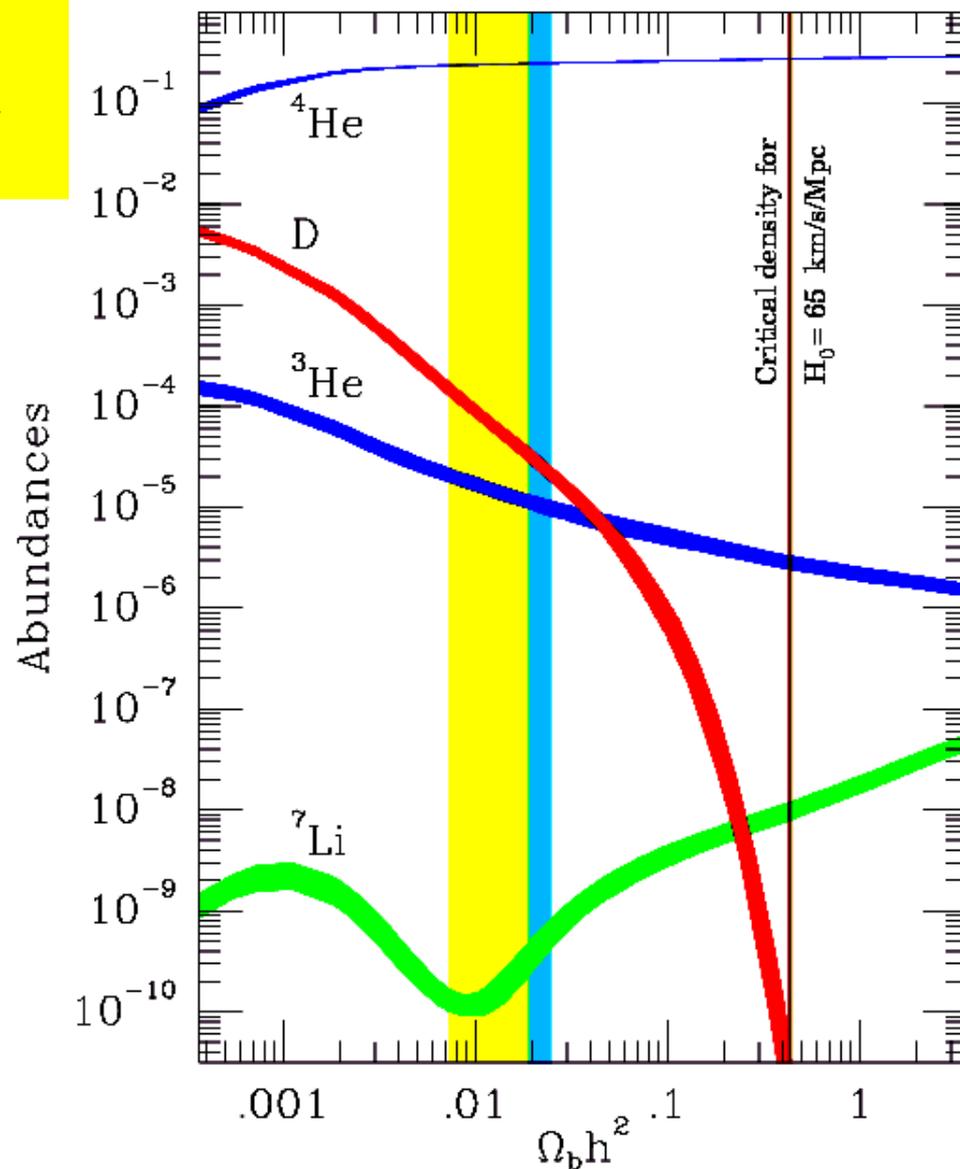
→ rapport photon/baryon :

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

→ 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](http://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 <sup>133</sup>Cs

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

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

13 III A B Boron 10.811	14 IV A C Carbon 12.011	15 V A N Nitrogen 14.007	16 VI A O Oxygen 15.999	17 VII A F Fluorine 18.998	18 VIII A Ne Neon 20.180
31 III A Al Aluminum 26.982	32 IV A Si Silicon 28.086	33 V A P Phosphorus 30.974	34 VI A S Sulfur 32.06	35 VII A Cl Chlorine 35.45	36 VIII A Ar Argon 39.948
49 III A In Indium 114.818	50 IV A Sn Tin 118.710	51 V A Sb Antimony 121.760	52 VI A Te Tellurium 127.6	53 VII A I Iodine 126.904	54 VIII A Xe Xenon 131.29
81 III A Tl Thallium 204.383	82 IV A Pb Lead 207.2	83 V A Bi Bismuth 208.980	84 VI A Po Polonium (209)	85 VII A At Astatine (210)	86 VIII A Rn Radon (222)

**ETIOPIES**

1 IA H Hydrogen 1.008	2 IIA Li Lithium 6.941	3 IIIA Na Sodium 22.990	4 IIA Be Beryllium 9.012	5 IIIA Mg Magnesium 24.305	6 IIIA Al Aluminum 26.982	7 IIA Ca Calcium 40.078	8 IIIA Sc Scandium 44.956	9 IIA K Potassium 39.098	10 IIA Ca Calcium 40.078	11 IIIA Sc Scandium 44.956	12 IIA Ti Titanium 47.88	13 IIIA V Vanadium 50.942	14 IIA Cr Chromium 51.996	15 IIIA Mn Manganese 54.938	16 IIA Fe Iron 55.845	17 IIIA Co Cobalt 58.933	18 IIA Ni Nickel 58.69	19 IIIA Cu Copper 63.546	20 IIA Zn Zinc 65.409	21 IIIA Ga Gallium 69.723	22 IIA Ge Germanium 72.64	23 IIIA As Arsenic 74.922	24 IIA Se Selenium 78.96	25 IIIA Br Bromine 79.904	26 IIA Kr Krypton 83.798
-----------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	--	---------------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--	--------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---	-----------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------

**Lanthanides**

57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.054	71 Lu Lutetium 174.967
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244	95 Am Americium 243	96 Cm Curium 247	97 Bk Berkelium 247	98 Cf Californium 251	99 Es Einsteinium 252	100 Fm Fermium 257	101 Md Mendelevium 258	102 No Nobelium 259	103 Lr Lawrencium 262

Atomic Number: 58  
Ground-state Level: 1G<sub>4</sub>  
Symbol: Ce  
Name: Cerium  
Atomic Weight: 140.116  
Ground-state Configuration: [Xe]4f145d6s2  
Ionization Energy (eV): 5.5387

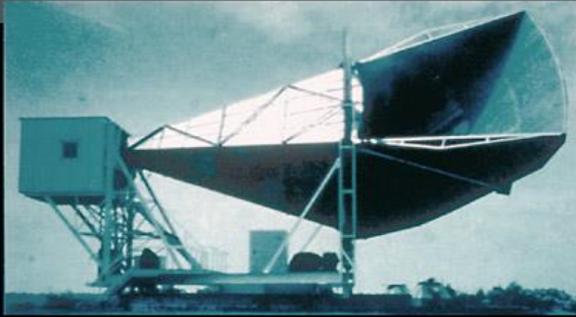
<sup>†</sup>Based upon <sup>12</sup>C. () indicates the mass number of the most stable isotope.

For a description of the data, visit [physics.nist.gov/data](http://physics.nist.gov/data)

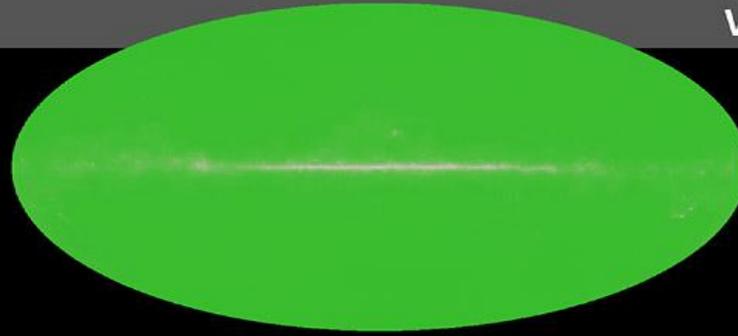
**Supernovae**

# Le rayonnement cosmologique fossile

1965



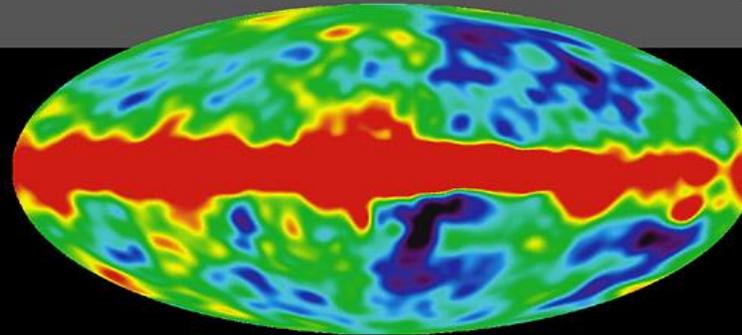
Penzias and  
Wilson



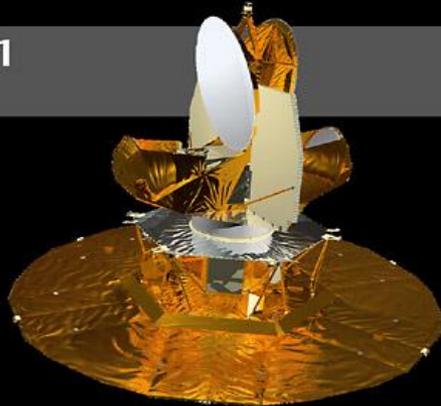
1992



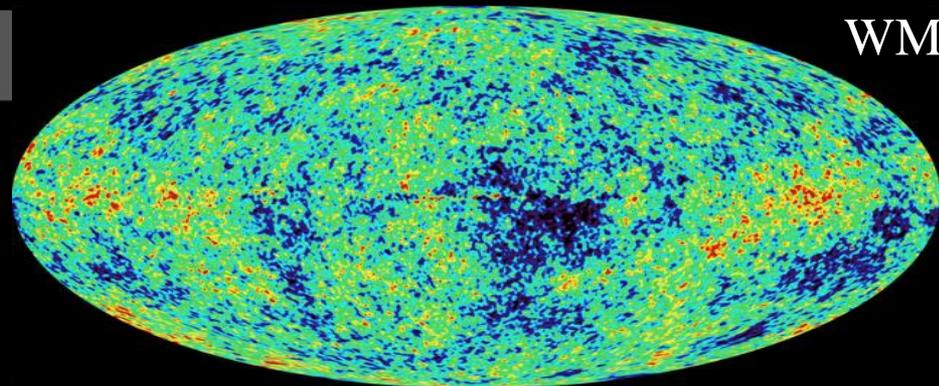
COBE



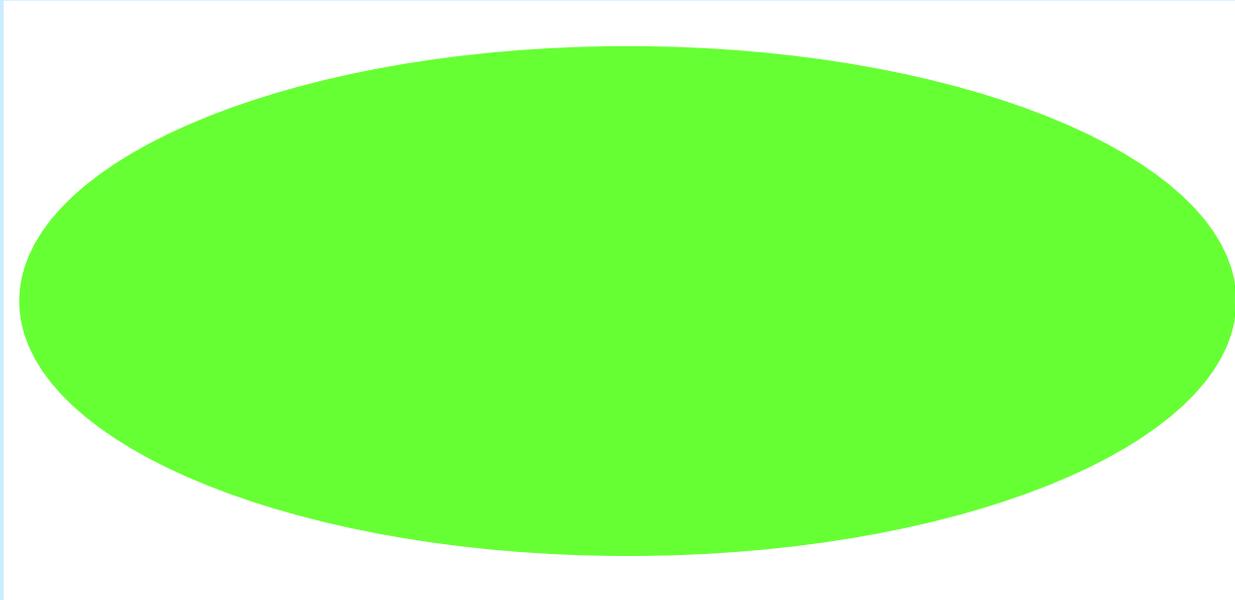
2001



WMAP



# L'univers primordial est homogène

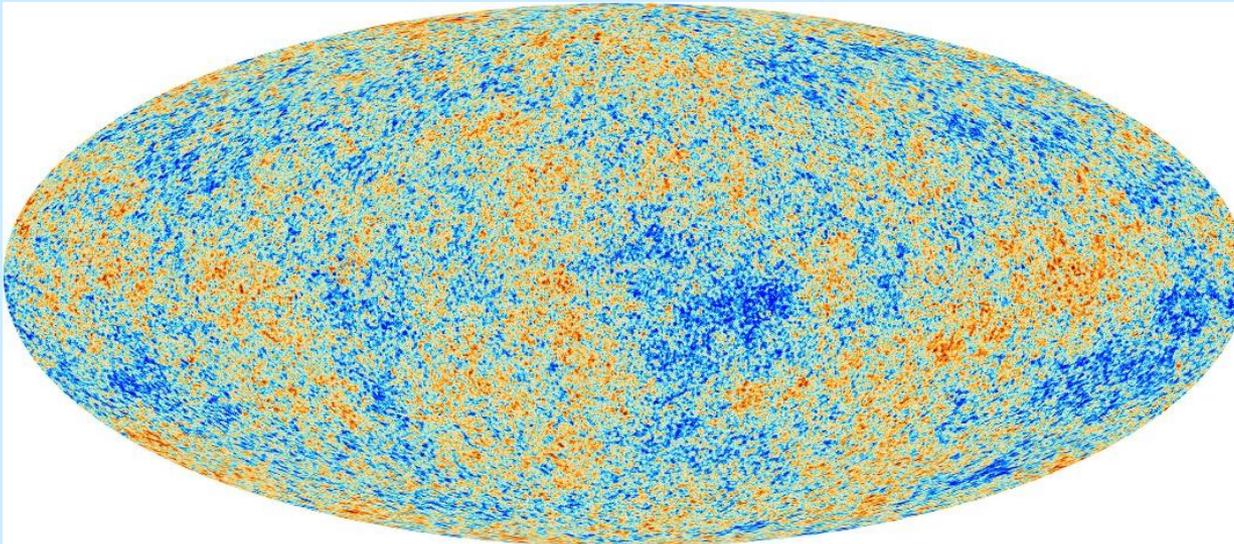


**T=2.7K**

Le principe cosmologique: l'univers est homogène et isotrope

est vérifié

**$t_U = 380\,000$  ans**

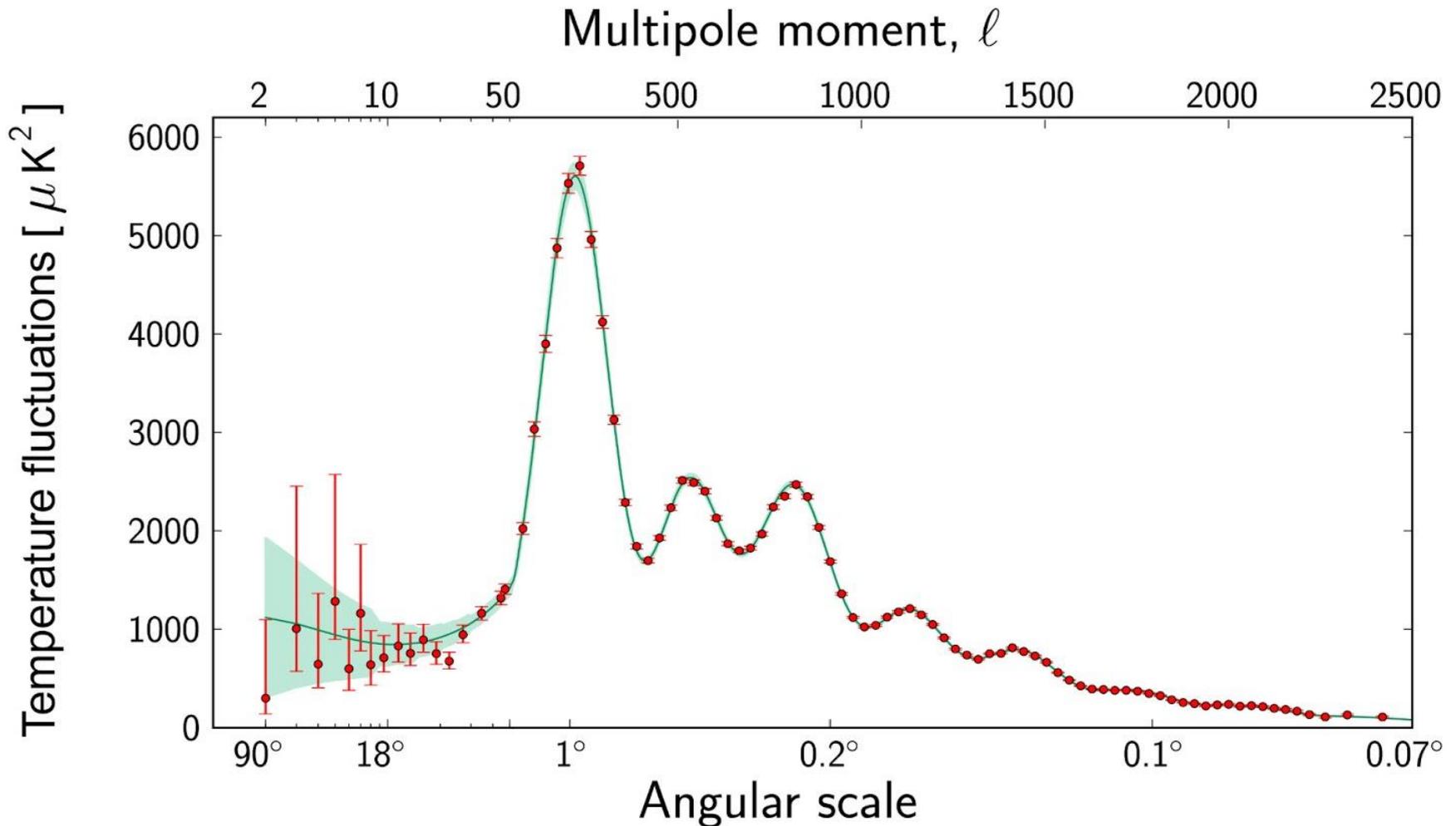


**$\Delta T = 20\mu\text{K}$**

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

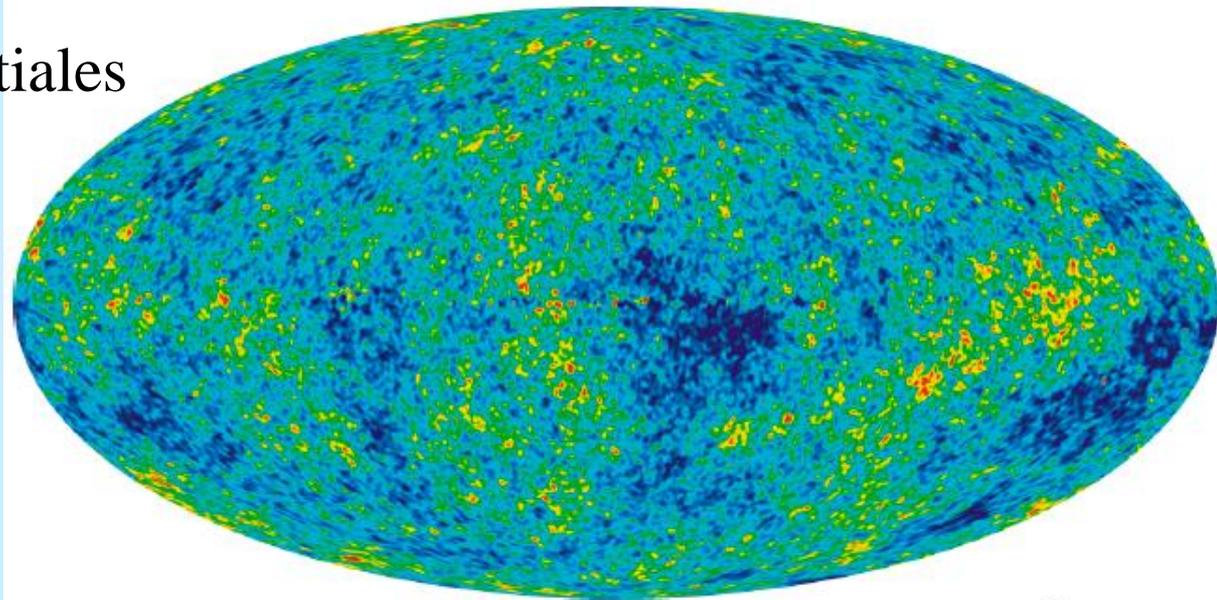
**PLANCK  
2012**

# Les ondes acoustiques (baryoniques) primordiales

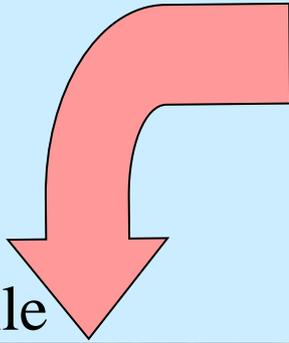


# La formation des structures : Observations

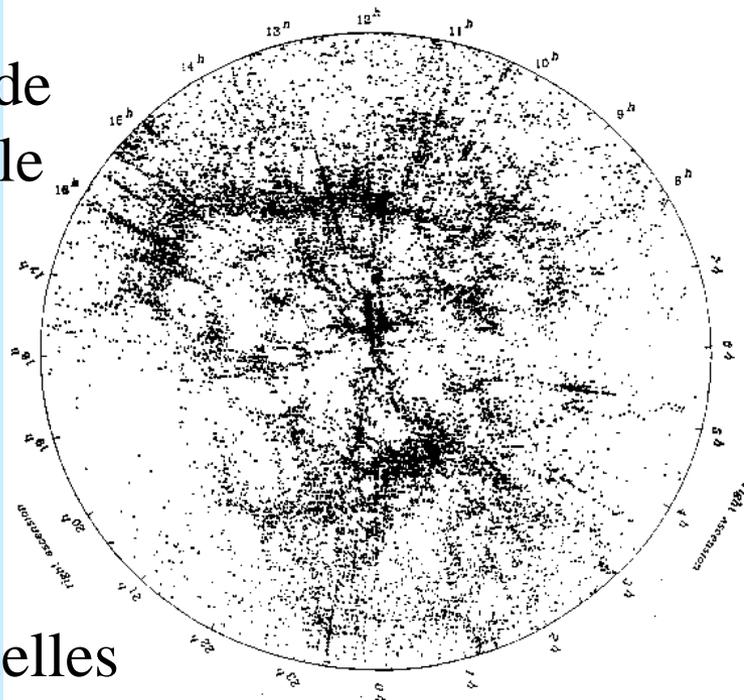
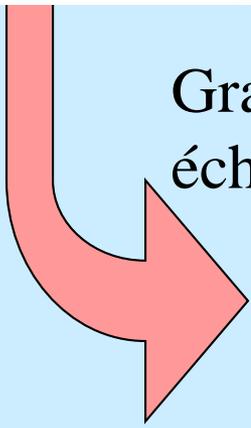
Conditions initiales



«Petite» échelle



Grande échelle



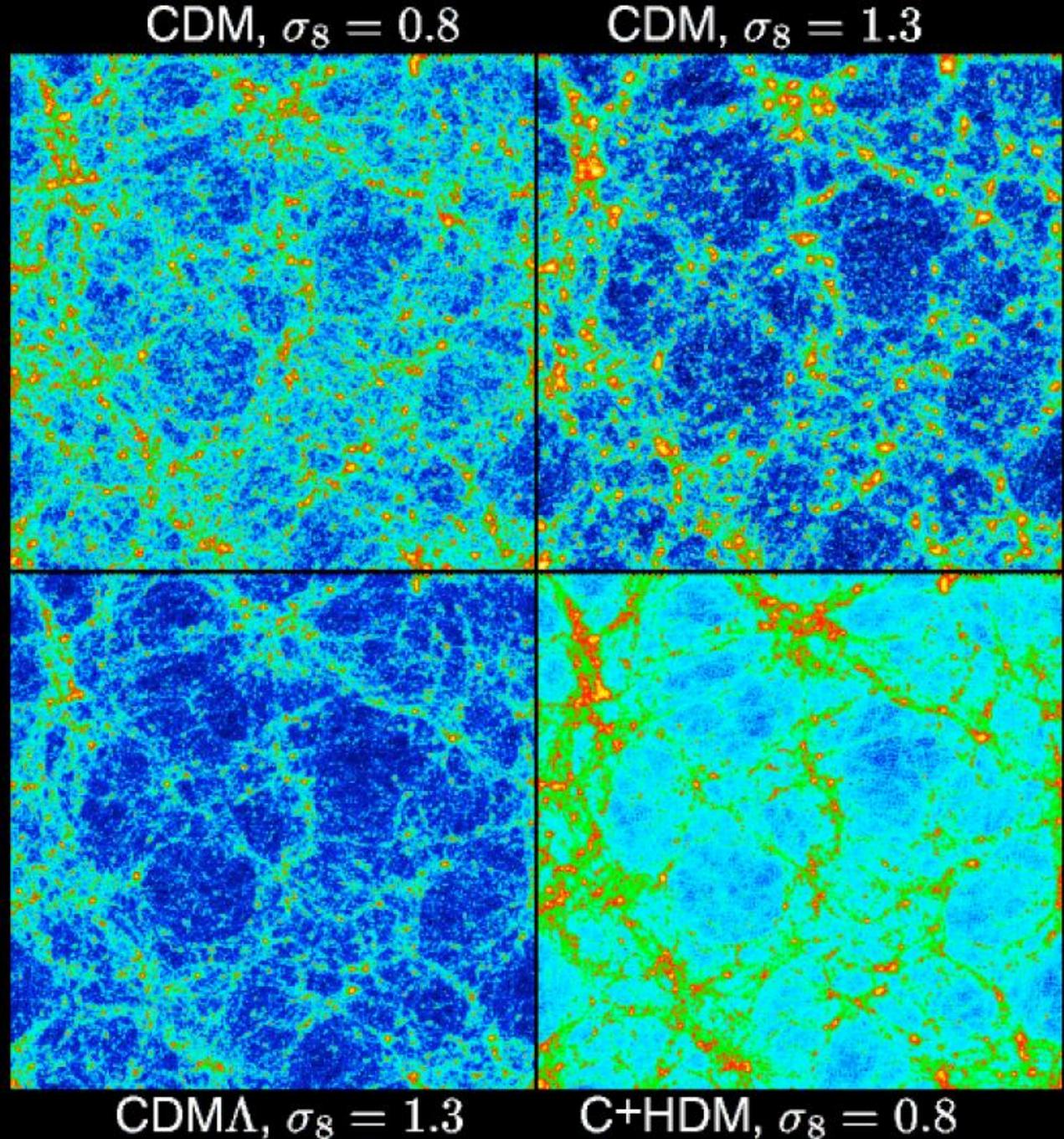
Situations actuelles

Et sensible a de  
très nombreux  
paramètres  
cosmologiques

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

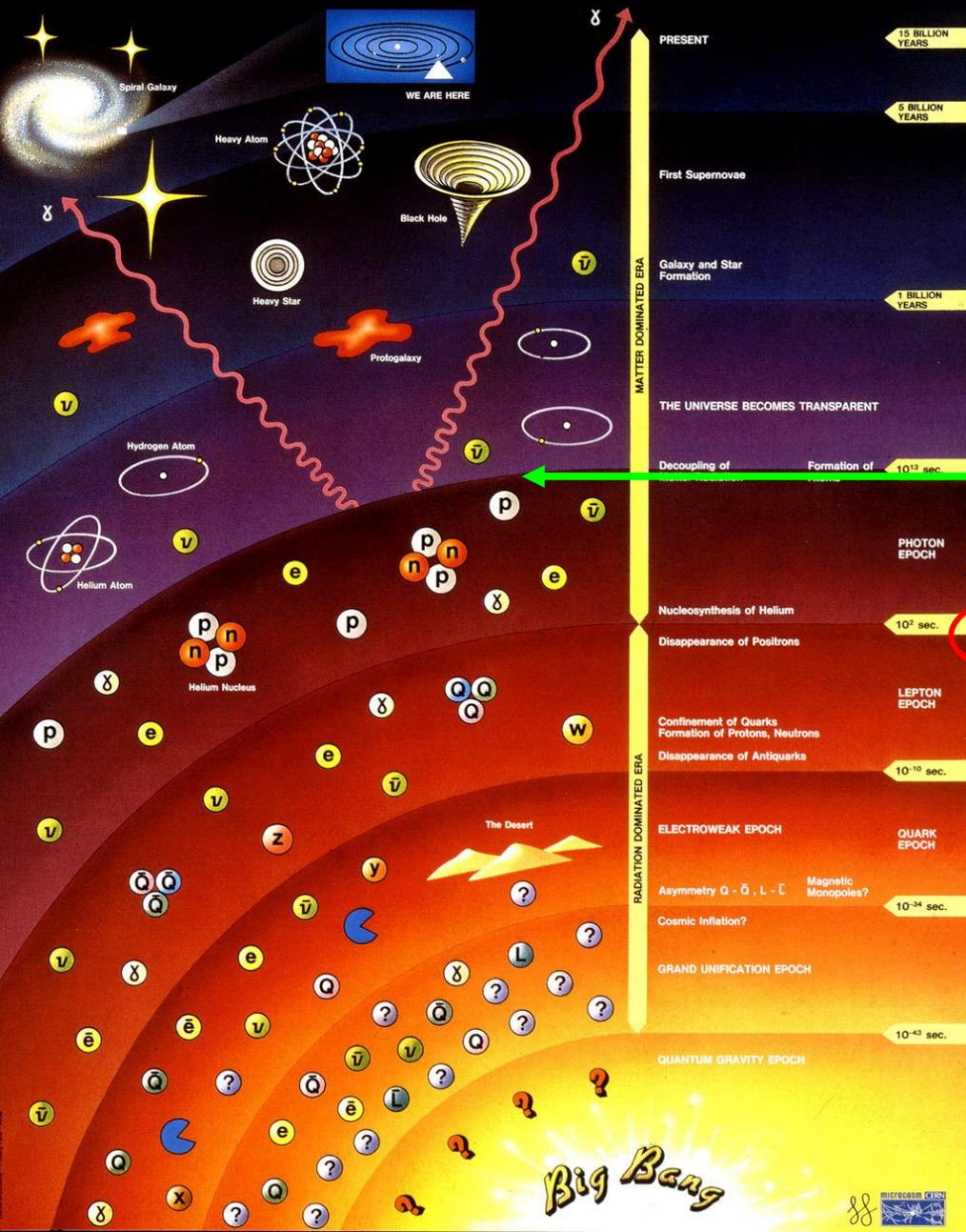
Sondes cosmiques :  
Comptage d'amas  
Distrib. des galaxies  
SNIa  
Lentilles gravitat.

...



Warren *et al.*, Los Alamos

# 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 ?



# L'évolution de l'Univers simulé par ordinateur

13,6 milliards d'années résumé en 25 secondes

Au début : l'Univers est homogène

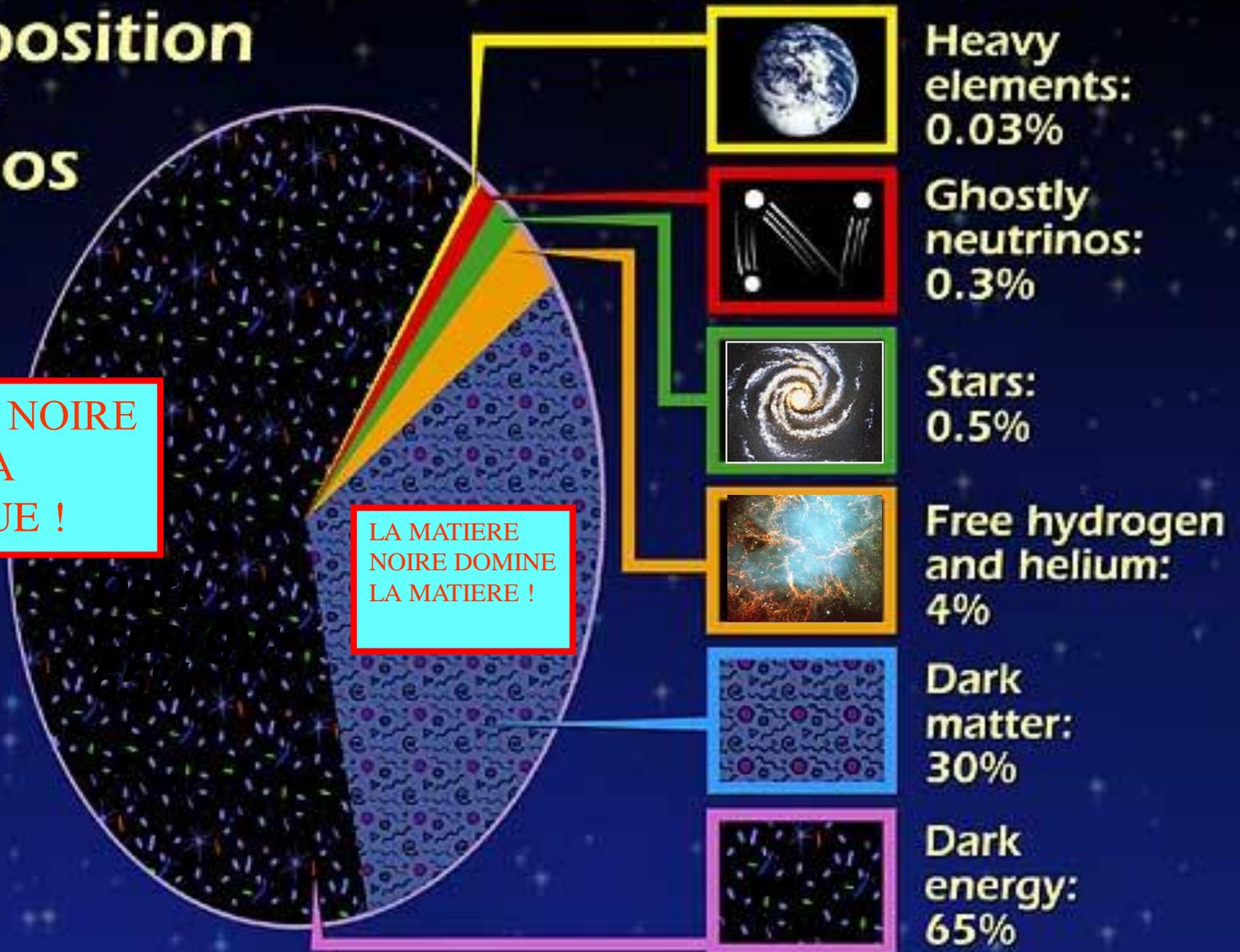
# Les problèmes de la cosmologie moderne

# 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

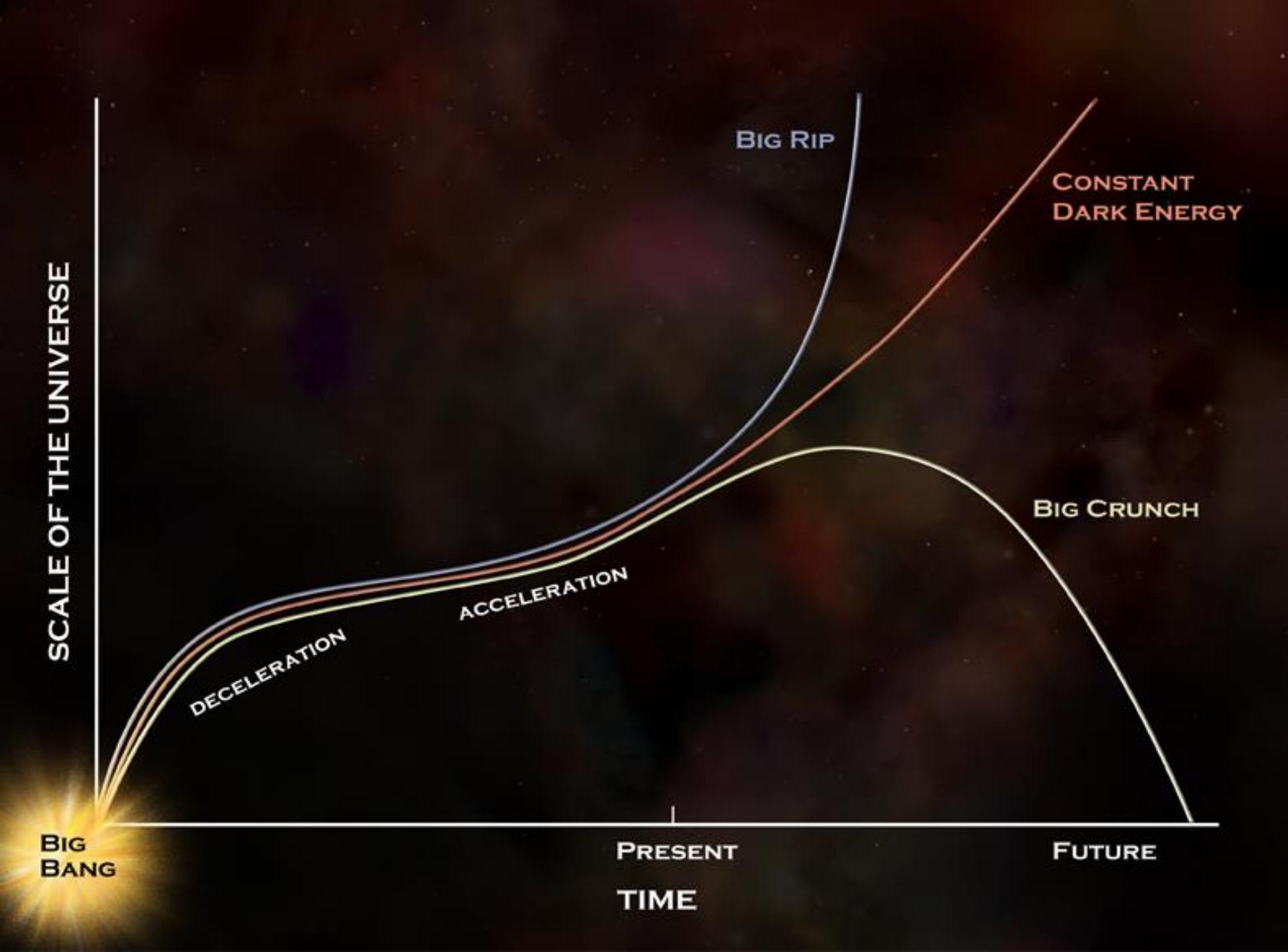
TIME

BIG RIP

CONSTANT DARK ENERGY

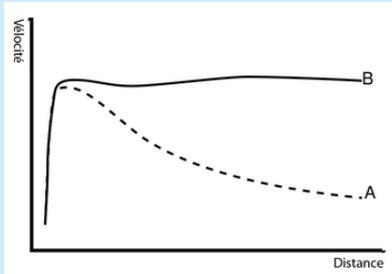
BIG CRUNCH

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 ( $\sim 25$ ) 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 !!

Question en suspens : cette idée est-elle testable ?