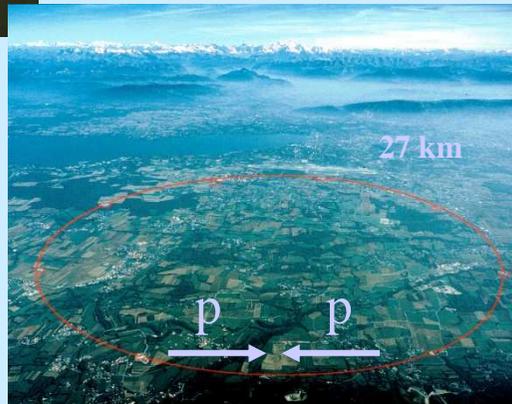
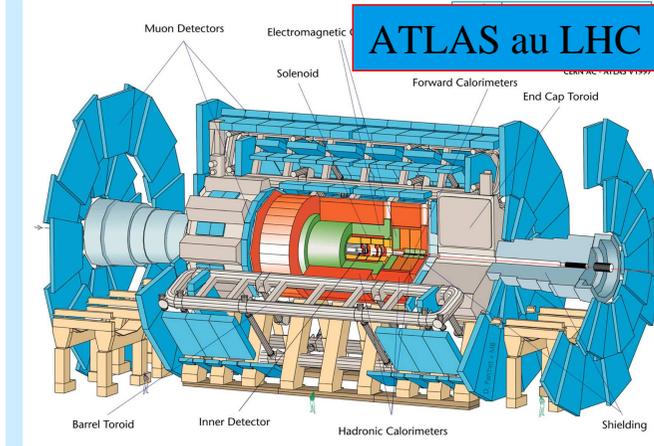
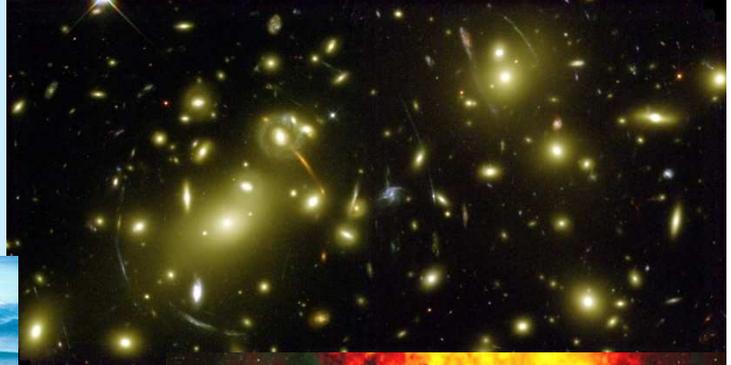
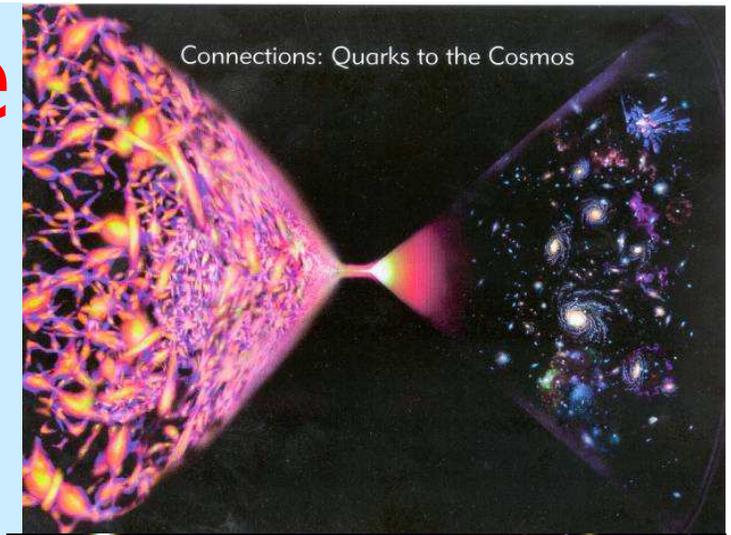
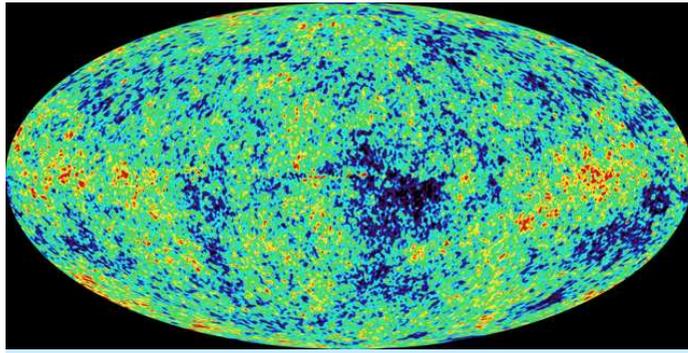


# Un Voyage du Cosmos aux Particules



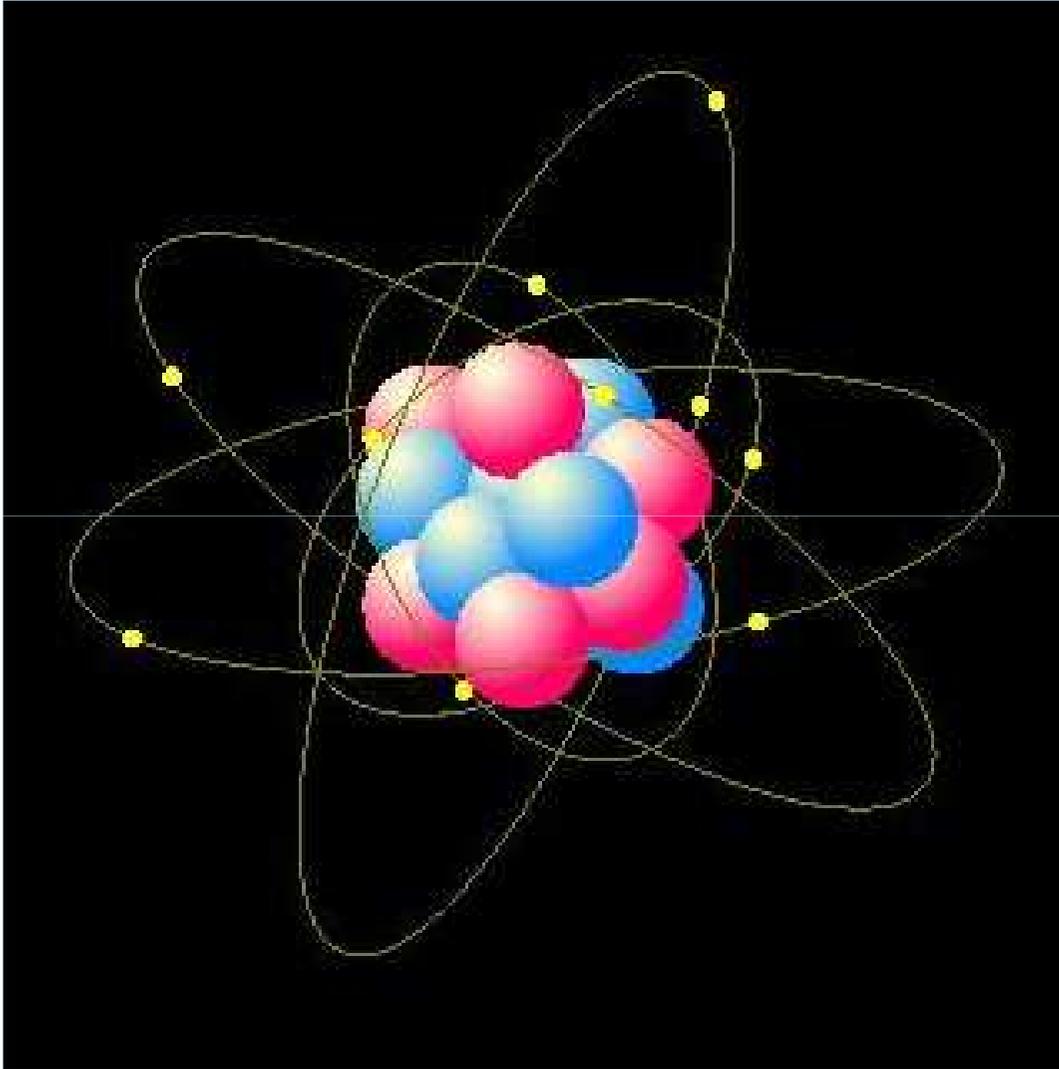
Jean-Marc Virey

Centre de Physique Théorique & Université d'Aix Marseille

*Un bref Aperçu de Physique Fondamentale ...*

- Les 3 « infinis » et les 4 Forces Fondamentales
- Principes de la Physique / Démarche Scientifique
- Masse et Matière ( $\infty$  petit)
- Astres et Univers ( $\infty$  grand)
- (Vie et Vie extra-terrestre ( $\infty$  complexe) )

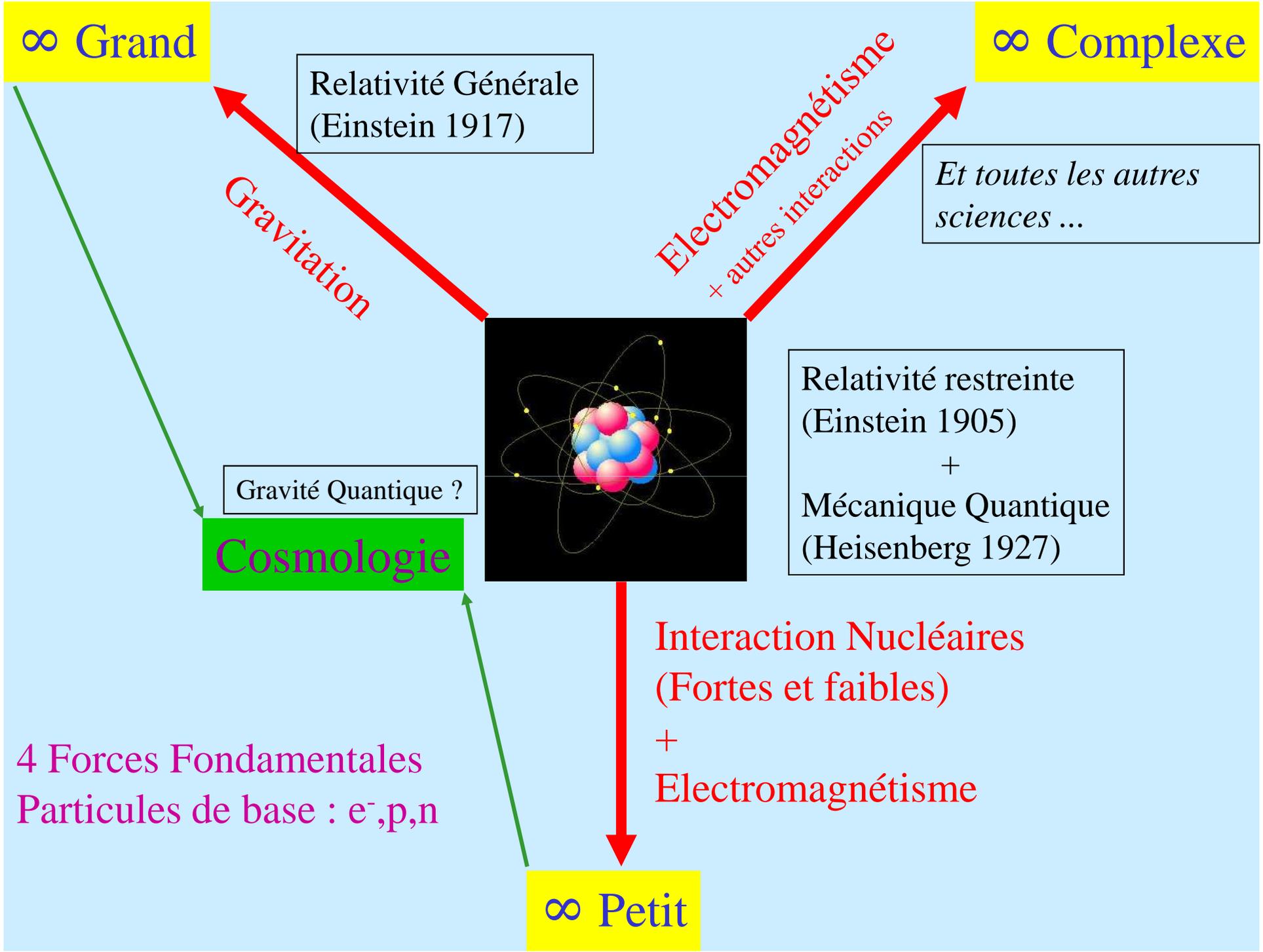
# *La Brique «élémentaire» de la Physique : L'Atome !*



-500 -440 : Ecole Grecque :  
Anaxagore/Démocrite  
(« qui ne peut être divisé »)

Ecole Russe (1700)

Europe : 1760-1870 :  
Lavoisier, Cavendish, Dalton,  
Avogadro, Mendeleïev ...



∞ Grand

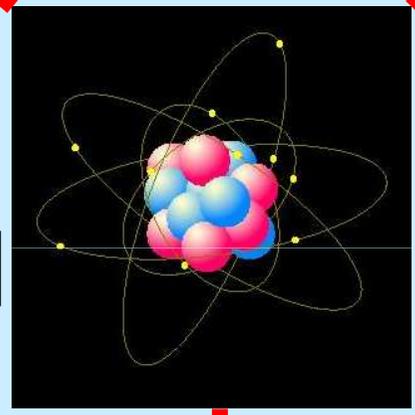
∞ Complexe

Relativité Générale  
(Einstein 1917)

Et toutes les autres  
sciences ...

Gravitation

Electromagnétisme  
+ autres interactions



Relativité restreinte  
(Einstein 1905)  
+  
Mécanique Quantique  
(Heisenberg 1927)

Gravité Quantique ?

Cosmologie

Interaction Nucléaires  
(Fortes et faibles)  
+  
Electromagnétisme

∞ Petit

4 Forces Fondamentales  
Particules de base : e<sup>-</sup>, p, n

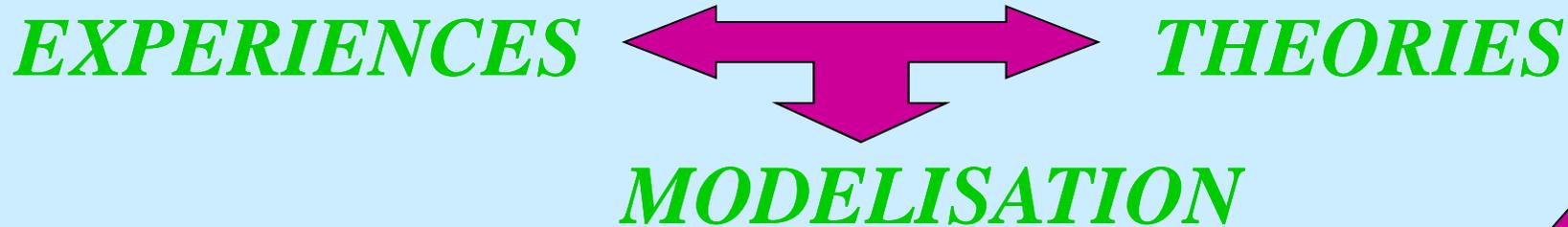
## But de la physique :

- Décrire/Modéliser/Expliquer les phénomènes naturels

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

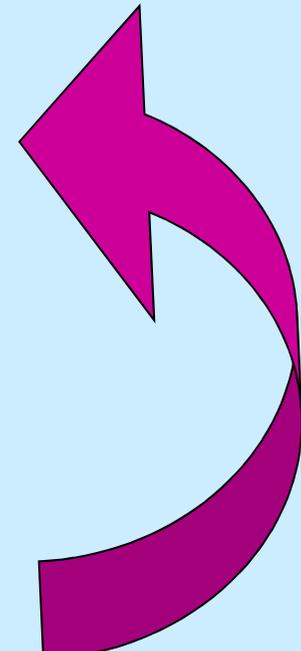
- Expliquer la multiplicité des phénomènes sur la base d'un nombre limité d'hypothèses simples (simplification de la complexité)

## Démarche scientifique :



## Instruments :

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



## Observations et Expériences

Parfois les phénomènes ne sont pas immédiatement évidents ni observables ou parfois les observations sont trompeuses!! Il faut vérifier leur fiabilité à l'aide des expériences (préparée, contrôlée, méthodique, avec des instruments, effectuée en faisant varier les conditions pour étudier la variation des effets/résultats)

Cette démarche nous parait raisonnable .....

mais avant Galilée (1564-1642) l'expérience a toujours été méprisée



Saint-Augustin (354-430, thèse chrétienne dominante jusqu'à la renaissance) :  
«Il y a une autre forme de tentation encore plus dangereuse. C'est la maladie de la curiosité. C'est ce qui nous pousse à essayer de découvrir les secrets de la nature, ces secrets qui dépassent notre entendement, qui ne peuvent nous servir à rien et que l'homme ne devrait pas aspirer à connaître.»

La physique n'accepte comme résultat que ce qui est mesurable et reproductible par les expériences.

# Approximations, Hypothèses et Principes

- **Supposition, conjecture** que l'on accepte provisoirement comme vraie, et dont on se sert pour simplifier et mener au but les calculs  
Ex : négliger influence de l'air, approximation *corps = points matériels* ....
- Invention des physiciens : **principe** unifiant à partir duquel on développe de façon déductive un raisonnement, une loi ou une théorie pour expliquer observations et expériences diverses.

## Les grands principes de la Physique :

Homogénéité du temps = conservation de l'énergie

Homogénéité de l'espace = conservation de l'impulsion

Isotropie de l'espace = conservation du moment cinétique (spin)

Principe de Relativité :  $c$  vitesse limite = notion d'espace-temps

Principe d'Incertitude d'Heisenberg : pas de précision absolue (sur « l'action »)

Principe 2 de la thermodynamique : lors d'une transformation l'entropie croît

Principe d'Equivalence : gravitation = mouvement accéléré de l'observateur ( $m_G = m_I$ )

Principe d'Exclusion de Pauli : Les bosons s'empilent, les fermions non !

Principe cosmologique/Principe de Copernic : pas de point de vue privilégié

Les particules n'ont pas de mémoire = loi (de désintégration) exponentielle

Principe de moindre action : stabilité = état d'énergie la plus faible

Lavoisier 1775 : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »

# Lois et Théories

- Loi et/ou Modèles décrivent la nature. (relation mathématique entre grandeurs physiques)  
Afin de décrire le «comment» d'un certain phénomène

Une loi ne contient pas les informations concernant la relation de cause à effets d'un phénomène ...

- La théorie «explique» la Nature  
Essaye d'expliquer le «pourquoi» d'un phénomène, ou d'une ensemble de lois

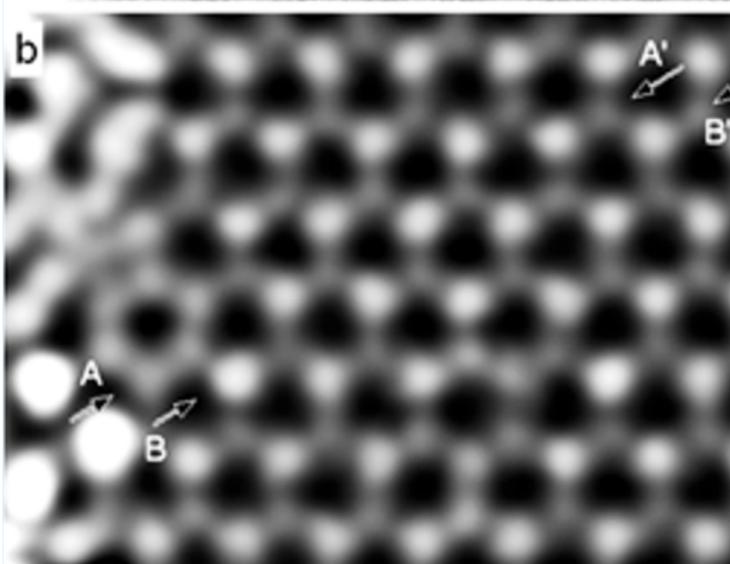
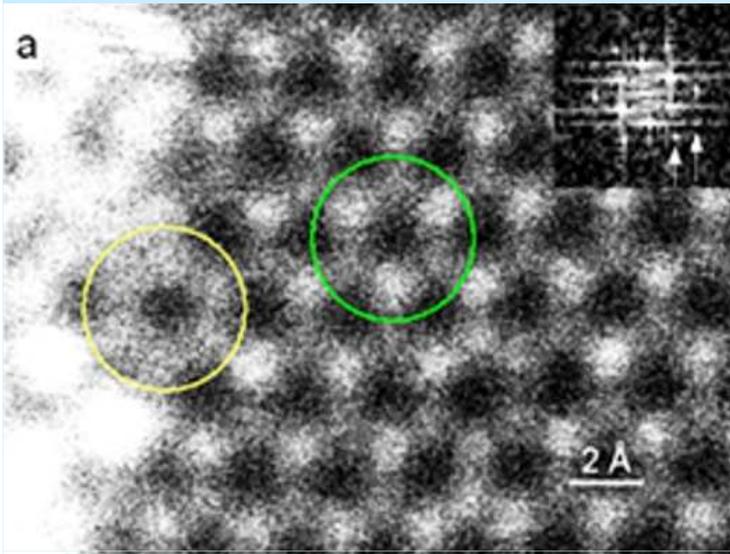
Une théorie doit non seulement nous aider à comprendre l'unité sous-jacente aux différentes lois, mais elle doit aussi faire des prédictions : prévoir des phénomènes nouveaux

Ex : - déviation des rayons lumineux par la matière : relativité générale  
- existence des «anti-particules» : théorie quantique des champs

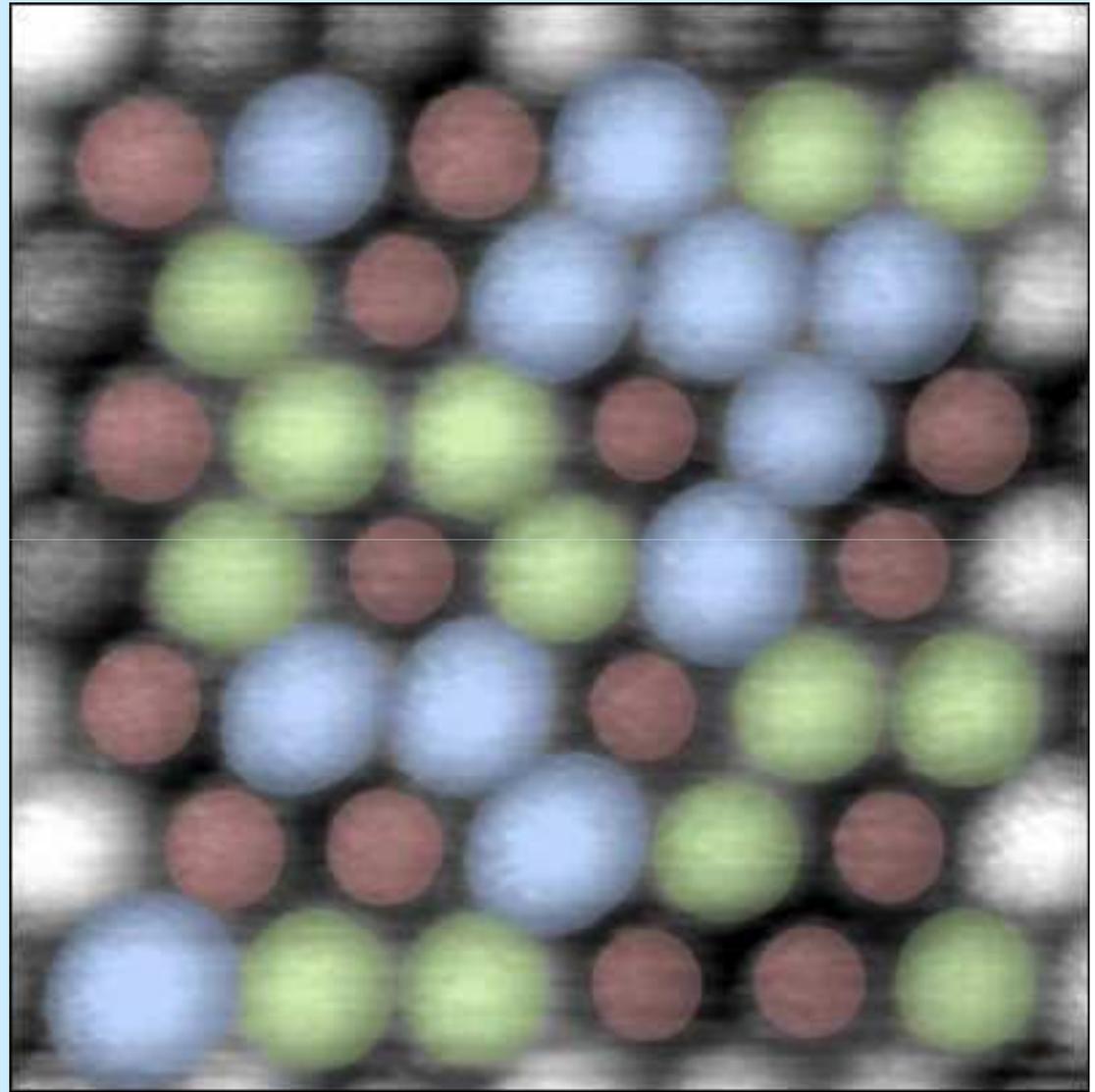
- Une théorie physique n'est jamais « vraie ». Elle est seulement la plus efficace a l'instant t. Chaque théorie a une caractère provisoire.  
On peut jamais prouver, seulement réfuter (Fisher, Popper)
- Un théorie physique n'est jamais « fausse ». Elle a seulement un domaine de validité limité. Une théorie a un temps de vie limité.

Voyage vers l'infiniment petit

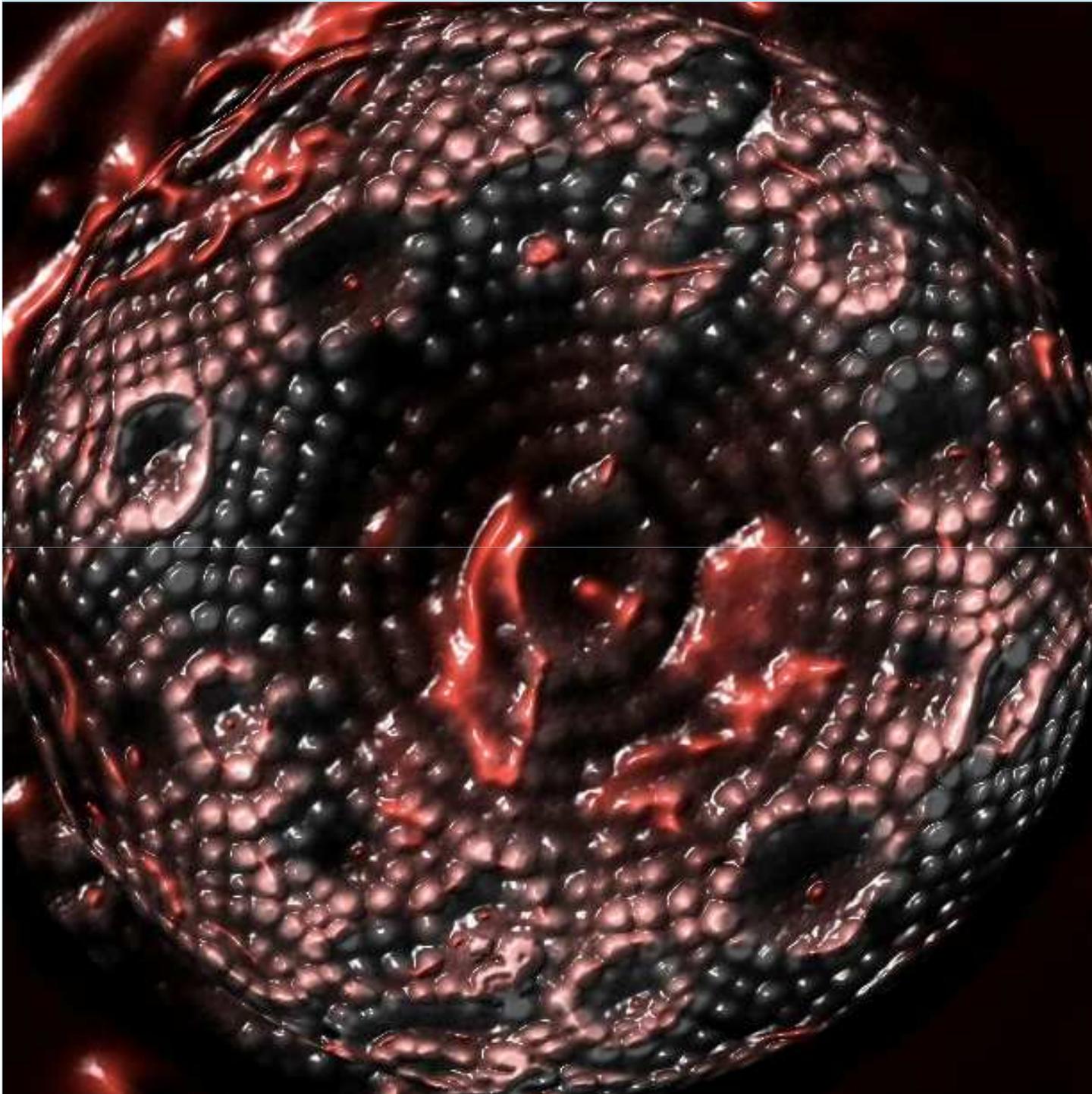
# Le Monde est fait d'Atomes



Microscope à électrons  
sombre : Bore, brillant : Azote



Microscope à force atomique (AFM)  
Bleu : Etain, Vert : Plomb, Rouge : Silicium

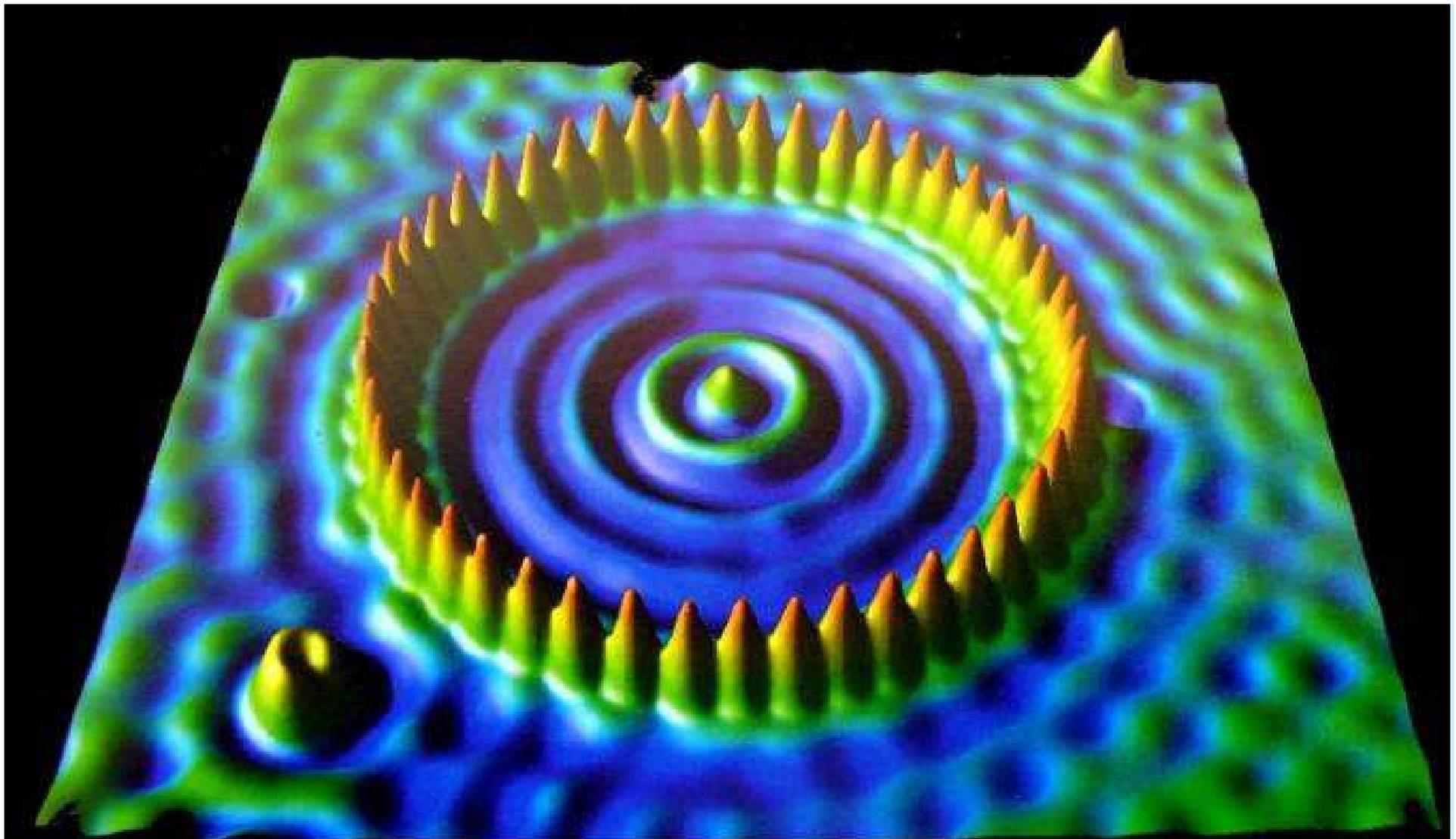


Microscope à  
Ions (effet tunnel)

Pointe de  
Tungstène

Effet «liquide»:  
mouvement  
des atomes

(fausses couleurs)



Cette image, obtenue à l'aide d'un microscope à effet tunnel, montre 48 atomes de fer rangés sur une surface de cuivre le long d'un cercle de 14 nanomètres de diamètre. Les «pics» à la surface du cristal se situent à l'endroit où la densité électronique - la grandeur à laquelle est sensible le microscope - est la plus

élevée. On observe ainsi, à la fois les électrons les plus liés à chaque atome de fer, qui localisent l'«atome», et les moins liés, mis en commun par l'ensemble des 48 atomes et formant des cercles concentriques, assurant la stabilité et la solidité d'une véritable molécule.

# PERIODIC TABLE Atomic Properties of the Elements

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

Big Bang

**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	
	<i>m<sub>e</sub>c<sup>2</sup></i>	0.5110 MeV	
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	
fine-structure constant	<i>α</i>	1/137.036	
Rydberg constant	<i>R<sub>∞</sub></i>	10 973 732 m <sup>-1</sup>	
	<i>R<sub>H</sub></i>	3.289 842 × 10 <sup>15</sup> Hz	
	<i>R<sub>∞</sub>hc</i>	13.6057 eV	
Boltzmann constant	<i>k</i>	1.3807 × 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup>	

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Produced

Physic Laboratory <a href="http://physics.nist.gov">physics.nist.gov</a>		Standar Reference Data <a href="http://www.nist.gov/srd">www.nist.gov/srd</a>	
13 III A B	14 IV A C	15 V A N	16 VI A O
13 Al	14 Si	15 P	16 S
Aluminum 26.981538 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p	Silicon 28.0855 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	Phosphorus 30.973761 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	Sulfur 32.065 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>

ELEMENTS

Group 1 IA	Group 2 IIA	Groups 3-10 IIIB, IVB, VB, VIB, VIIB, VIII, IIB										Group 11 IB	Group 12 IIB	Group 13 IIIA	Group 14 IVA	Group 15 VA	Group 16 VIA	Group 17 VIIA	Group 18 VIIIA
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			
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			

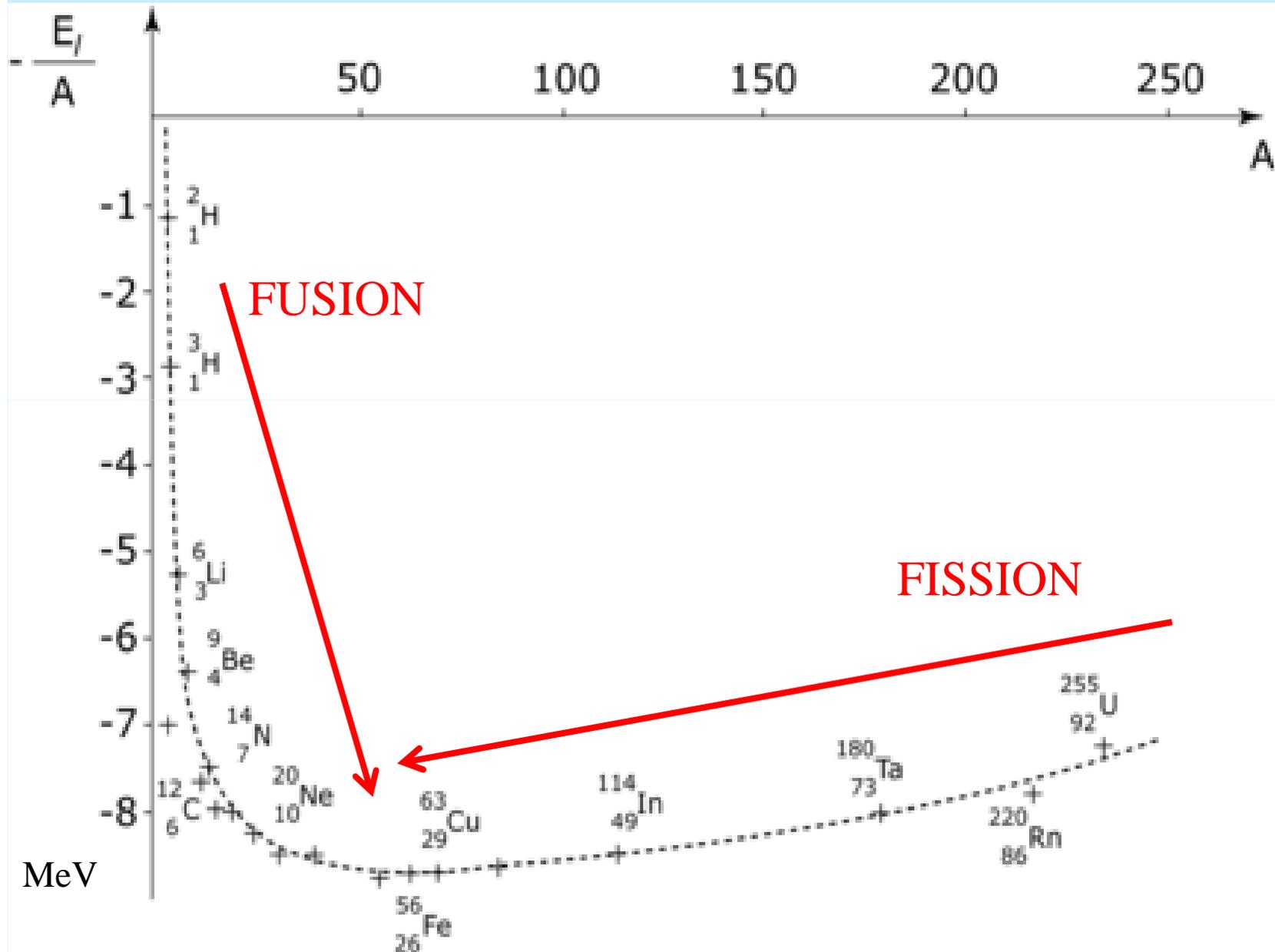
Atomic Number: 58  
Ground-state Level: <sup>1</sup>G<sub>4</sub>  
Symbol: Ce  
Name: Cerium  
Atomic Weight: 140.116  
Ground-state Configuration: [Xe]4f<sup>1</sup>5d<sup>1</sup>6s<sup>2</sup>  
Ionization Energy (eV): 5.5387

<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 Fer a le noyau le plus stable



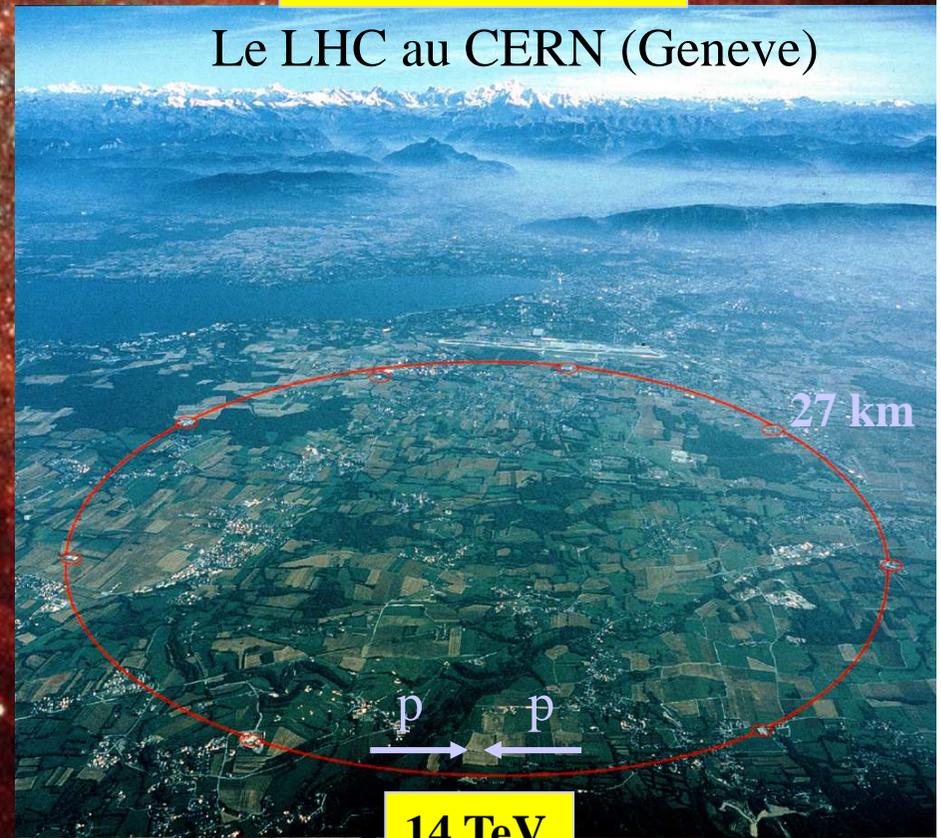
# Les outils: Les sources de particules

L'univers

- Proton (noyaux)
- Photon
- Neutrino (muon)

Les accélérateurs

Le LHC au CERN (Geneve)



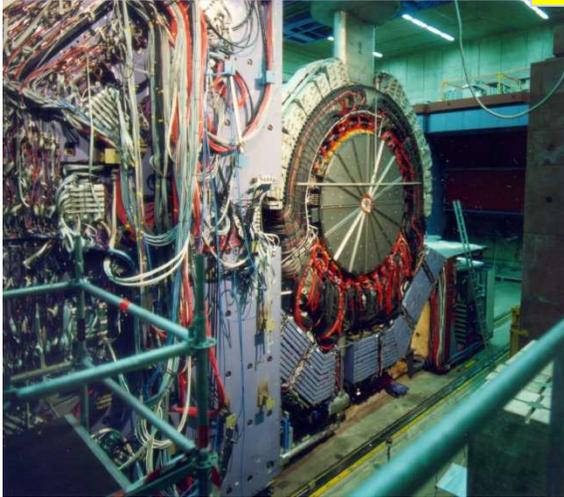
...mais aussi les centrales nucléaires



Neutrino, neutron

Proton, electron, muon, neutrino  
... mais aussi neutron, pion, Kaon

# H1 a HERA (Hambourg) Les outils: Les détecteur de particule



Auprès des accélérateurs en plaine

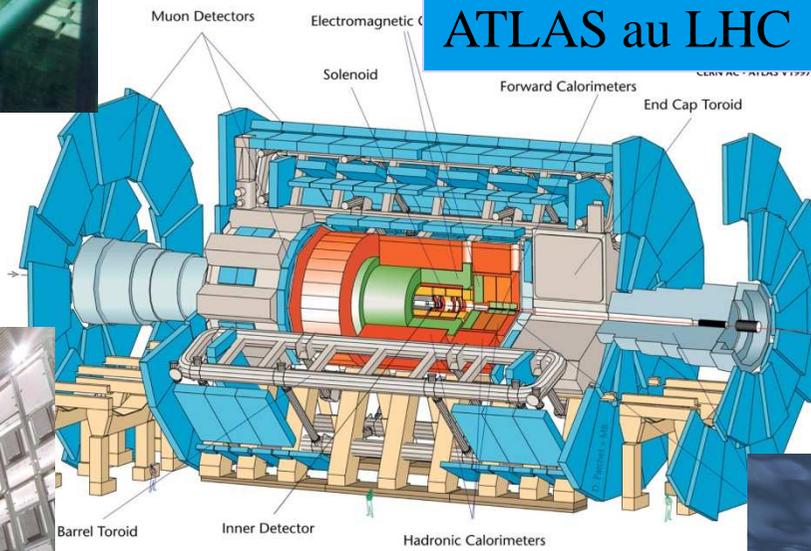
D0 au Tevatron (Chicago)



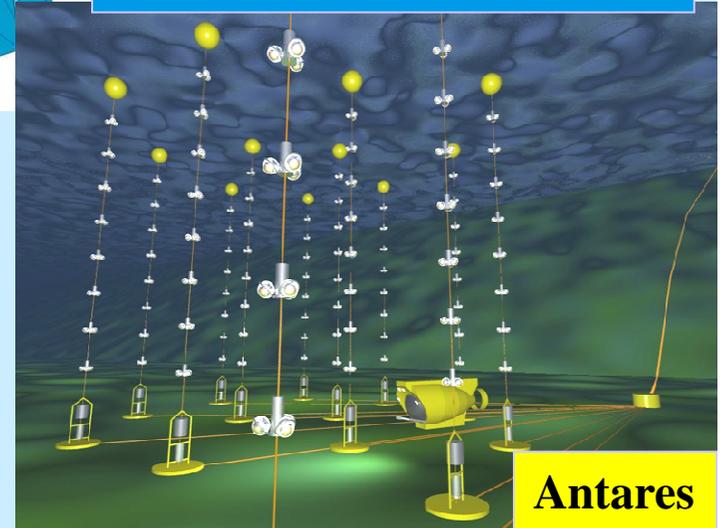
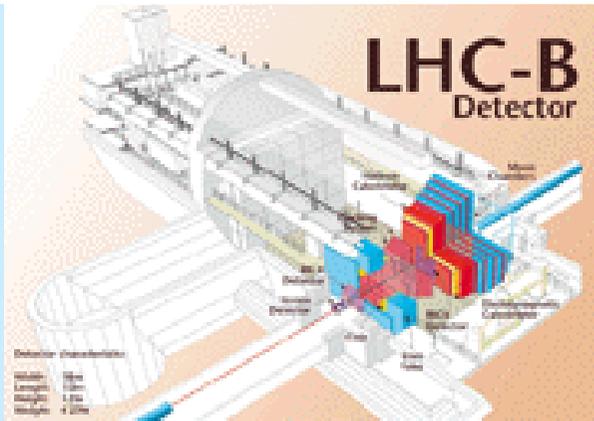
Dans l'espace

Au sommet des montagnes

SNLS



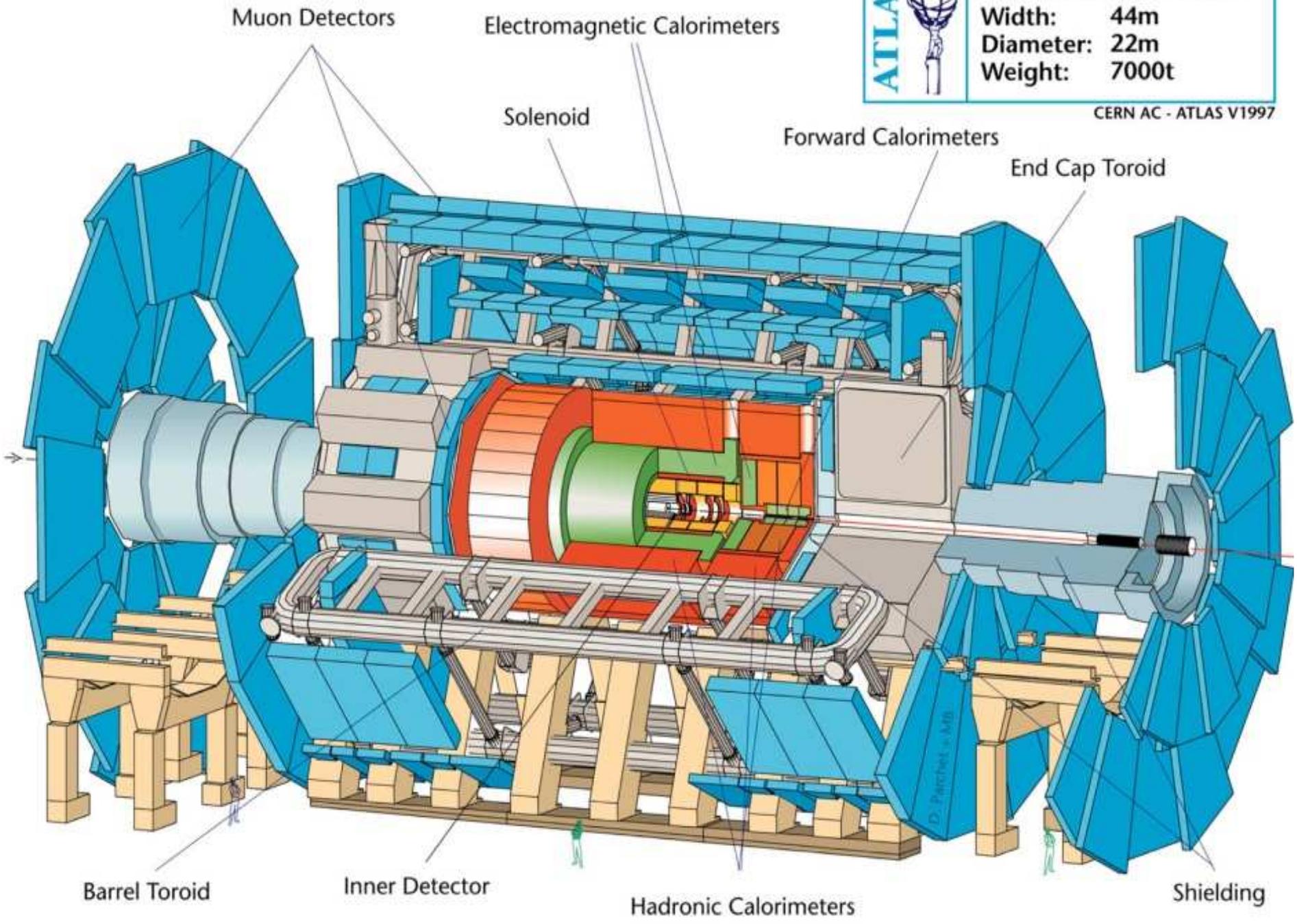
Au fond de la mer (2400 m)





Detector characteristics	
Width:	44m
Diameter:	22m
Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997



Muon Detectors

Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Forward Calorimeters

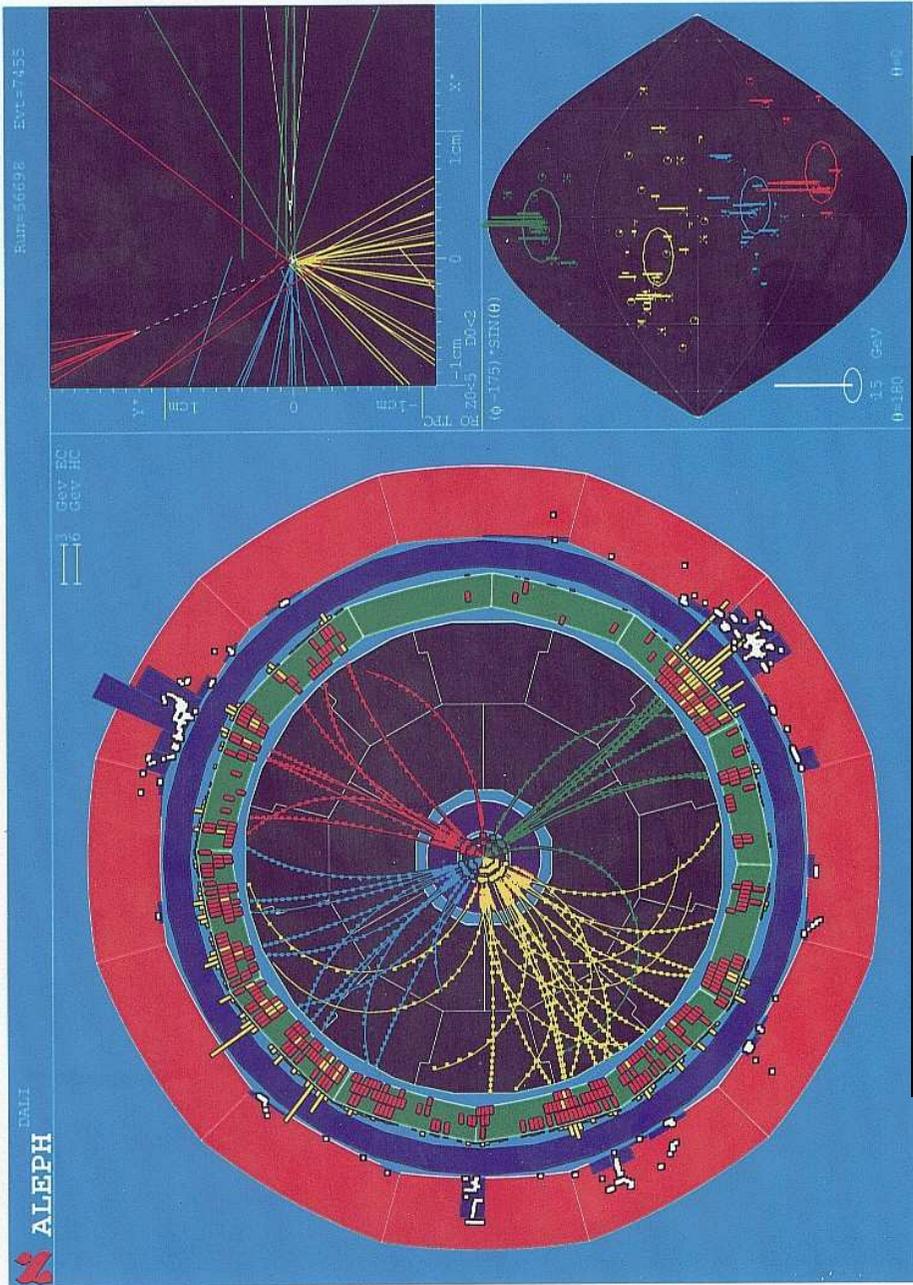
End Cap Toroid

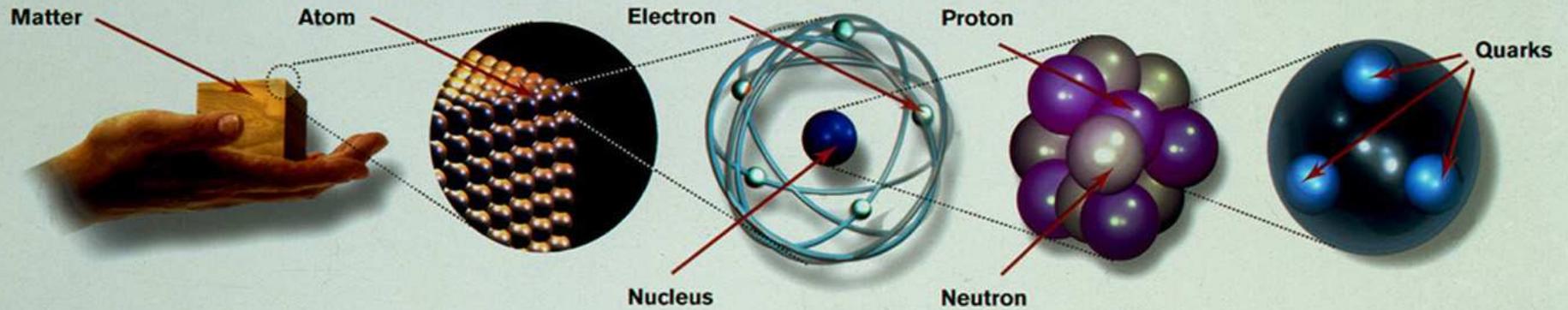
Barrel Toroid

Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shielding





**Matter particles**  
All ordinary particles belong to this group

LEPTONS		
FIRST FAMILY	<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1	<b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second
SECOND FAMILY	<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second	<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay
THIRD FAMILY	<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975	<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist

QUARKS	
<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one	<b>Down</b> Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two
<b>Charm</b> A heavier relative of the up; found in 1974	<b>Strange</b> A heavier relative of the down; found in 1964
<b>Top</b> Heavier still	<b>Bottom</b> Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory

**Force particles**  
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

**Gluons**  
Carriers of the **strong force** between quarks

Felt by: quarks

The explosive release of nuclear energy is the result of the **strong force**

**Photons**  
Particles that make up light; they carry the **electromagnetic force**

Felt by: quarks and charged leptons

Electricity, magnetism and chemistry are all the results of **electro-magnetic force**

**Intermediate vector bosons**  
Carriers of the **weak force**

Felt by: quarks and leptons

Some forms of radio-activity are the result of the **weak force**

**Gravitons**  
Carriers of **gravity**

Felt by: all particles with mass

All the weight we experience is the result of the **gravitational force**

# Origine de la masse ?

Masse Matière = Masse des Atomes (énergie chimique)  $\Delta m / m \approx 10^{-9}$

Masse de l'Atome = Masse du Noyau (transition plasma-matière)

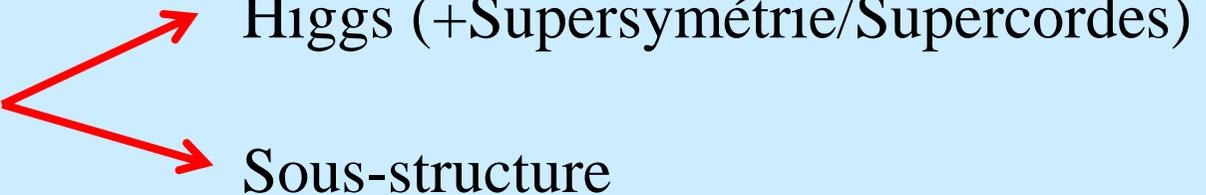
Masse du Noyau = Masse des Nucléons (énergie nucléaire)  $\Delta m / m \approx 10^{-3}$

Masse du Nucléon (proton/neutron) = Interaction entre les quarks !!

$\Delta m / m \approx 1$

Masse des quarks, leptons, bosons = ????? A priori, « pure interaction »

2 modèles s'affrontent :

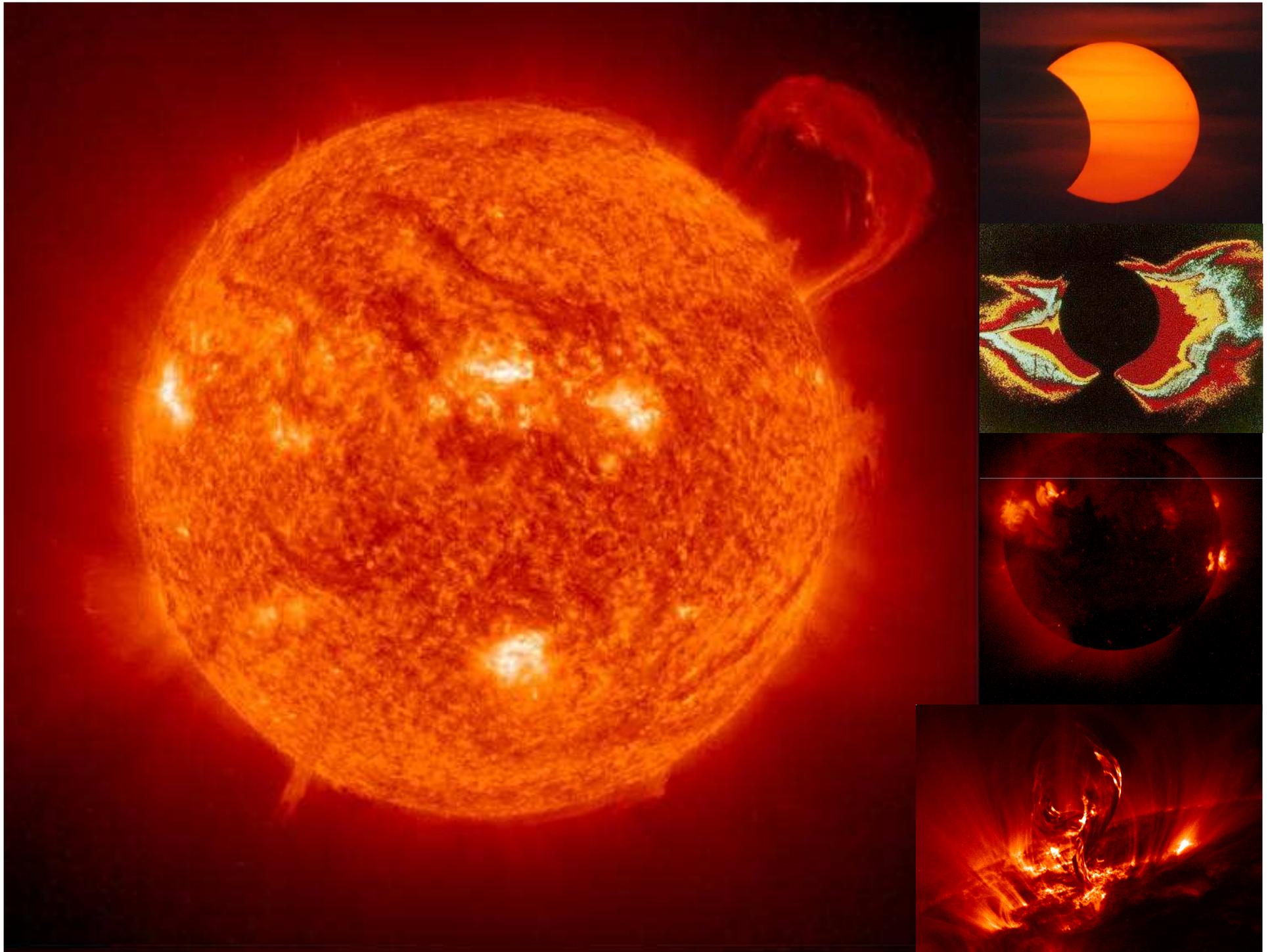


- Higgs (+Supersymétrie/Supercordes)
- Sous-structure

En route pour l'infiniment grand

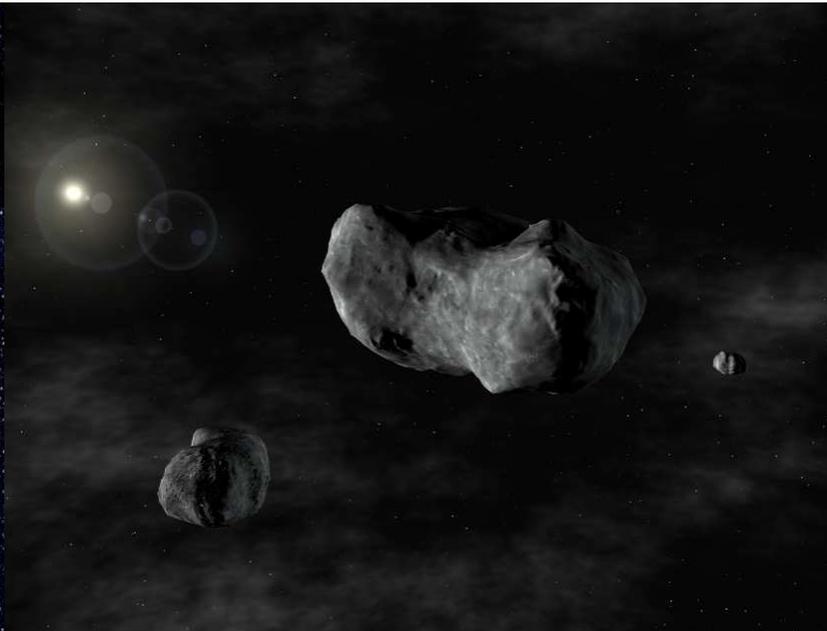




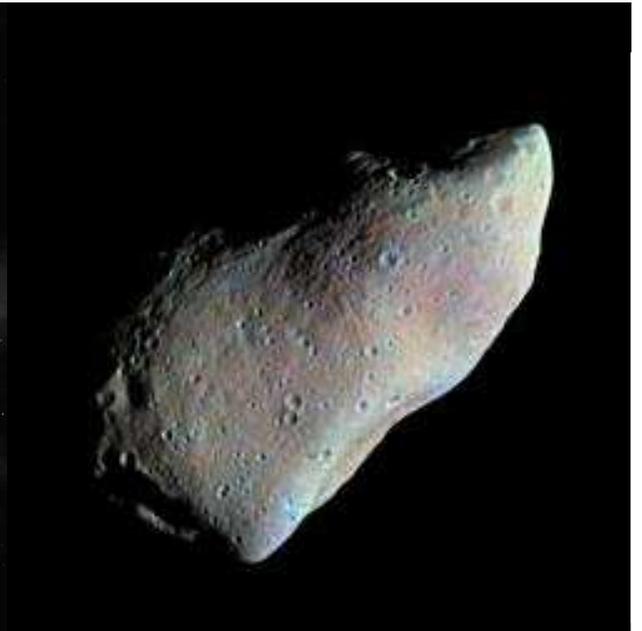




Sun



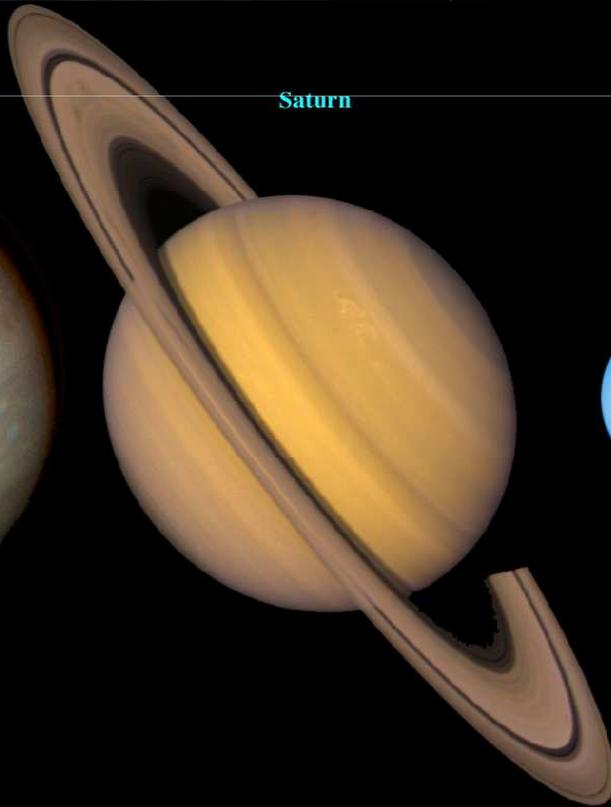
Jupiter



Saturn



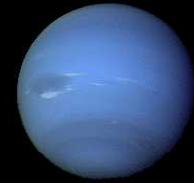
Mercury  
Venus  
Earth  
Mars



Uranus

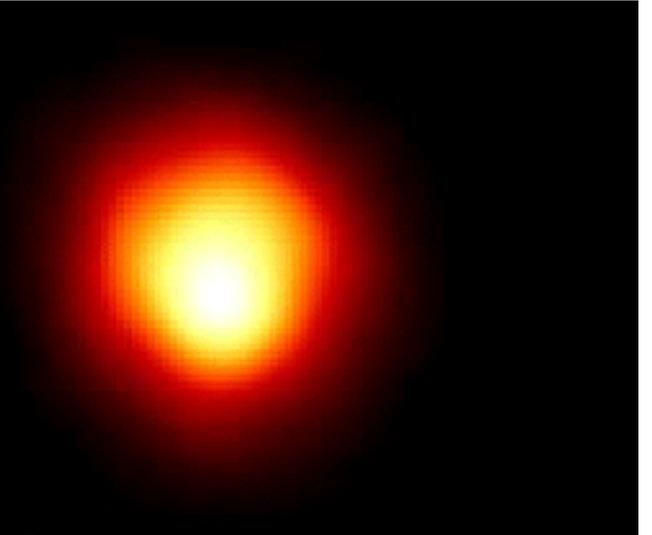


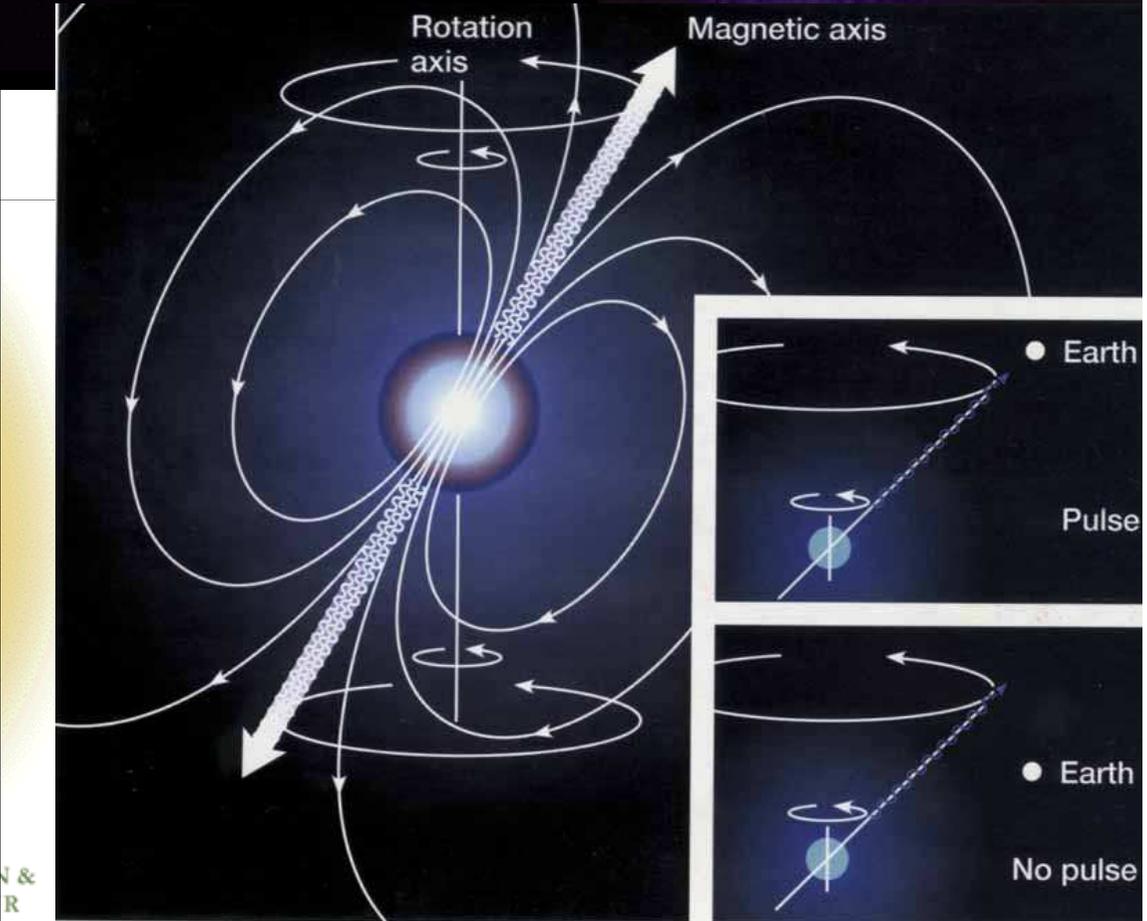
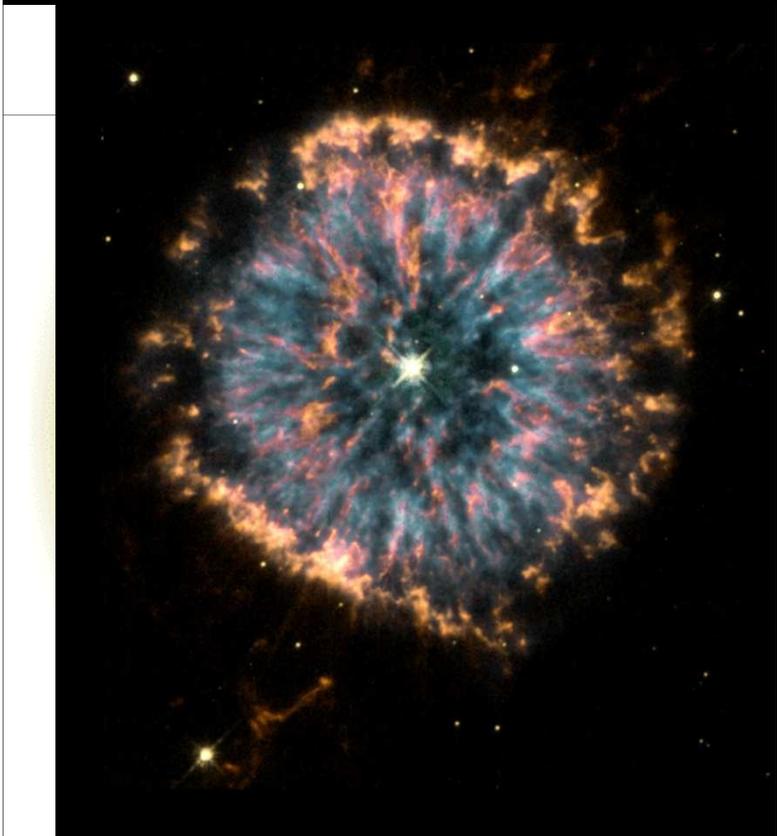
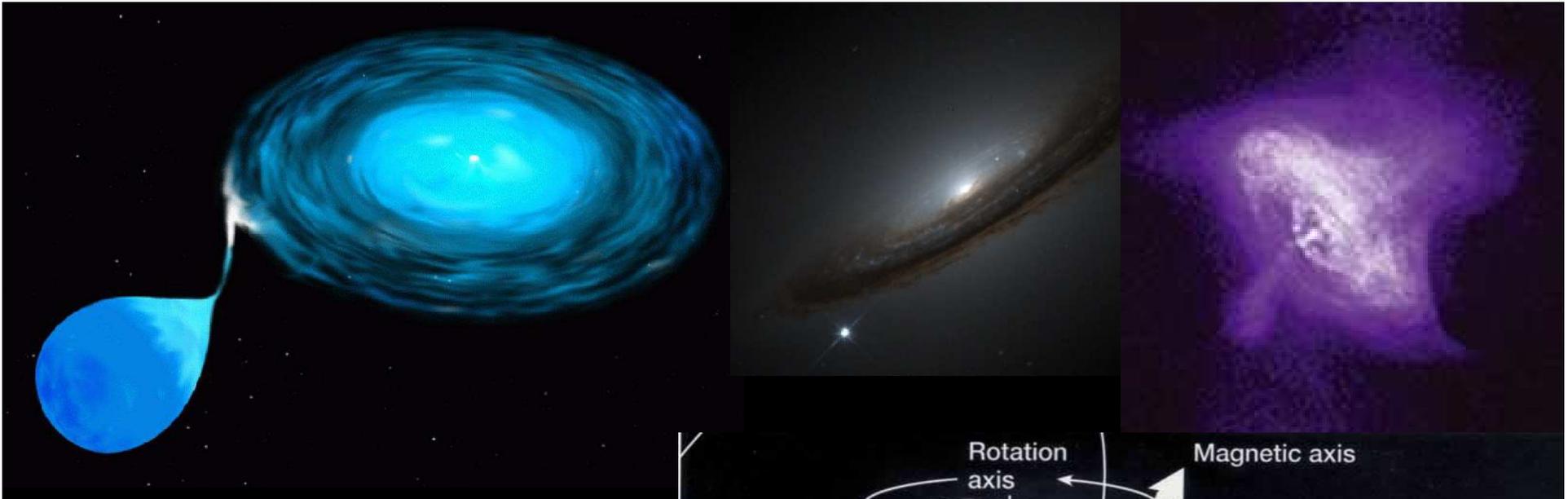
Neptune

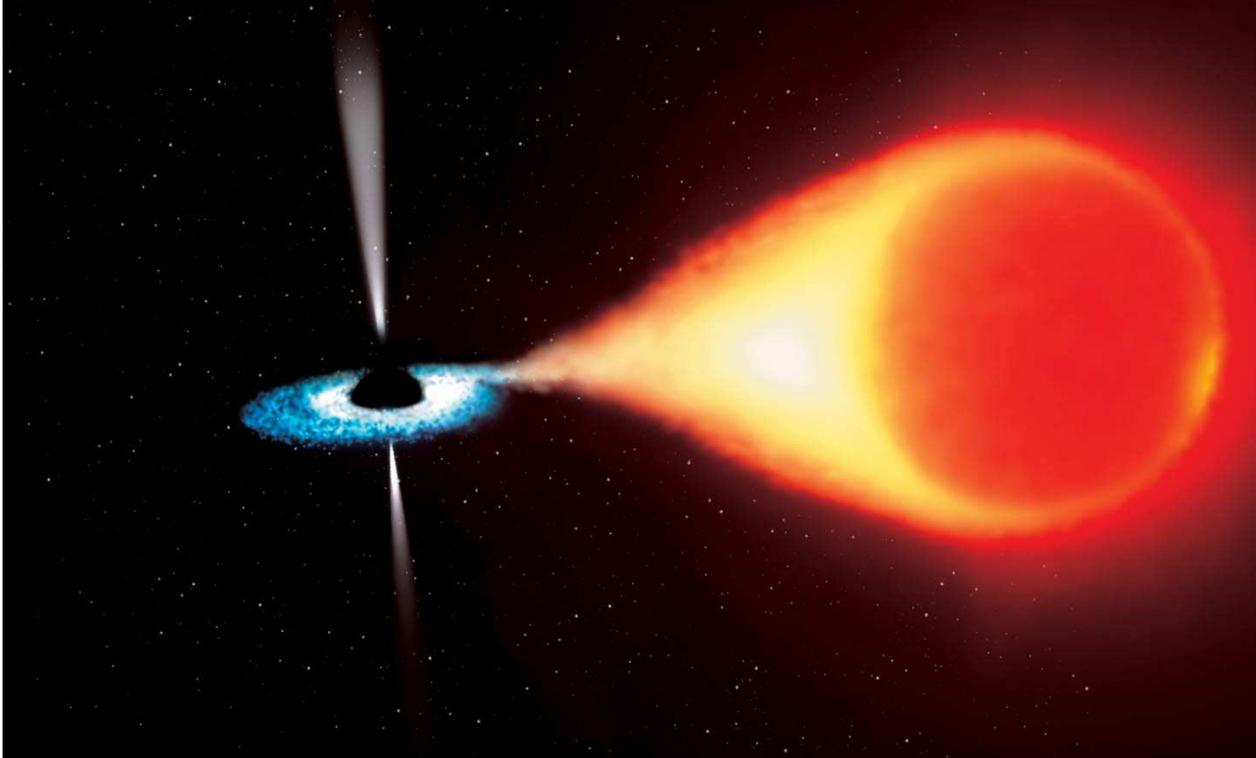
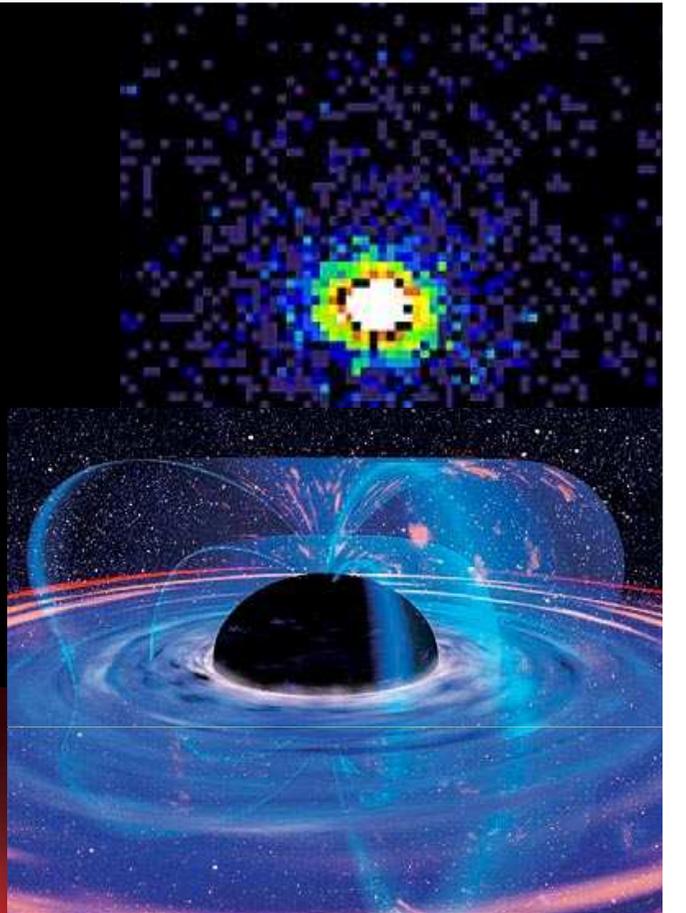


Pluto  
&  
Charon

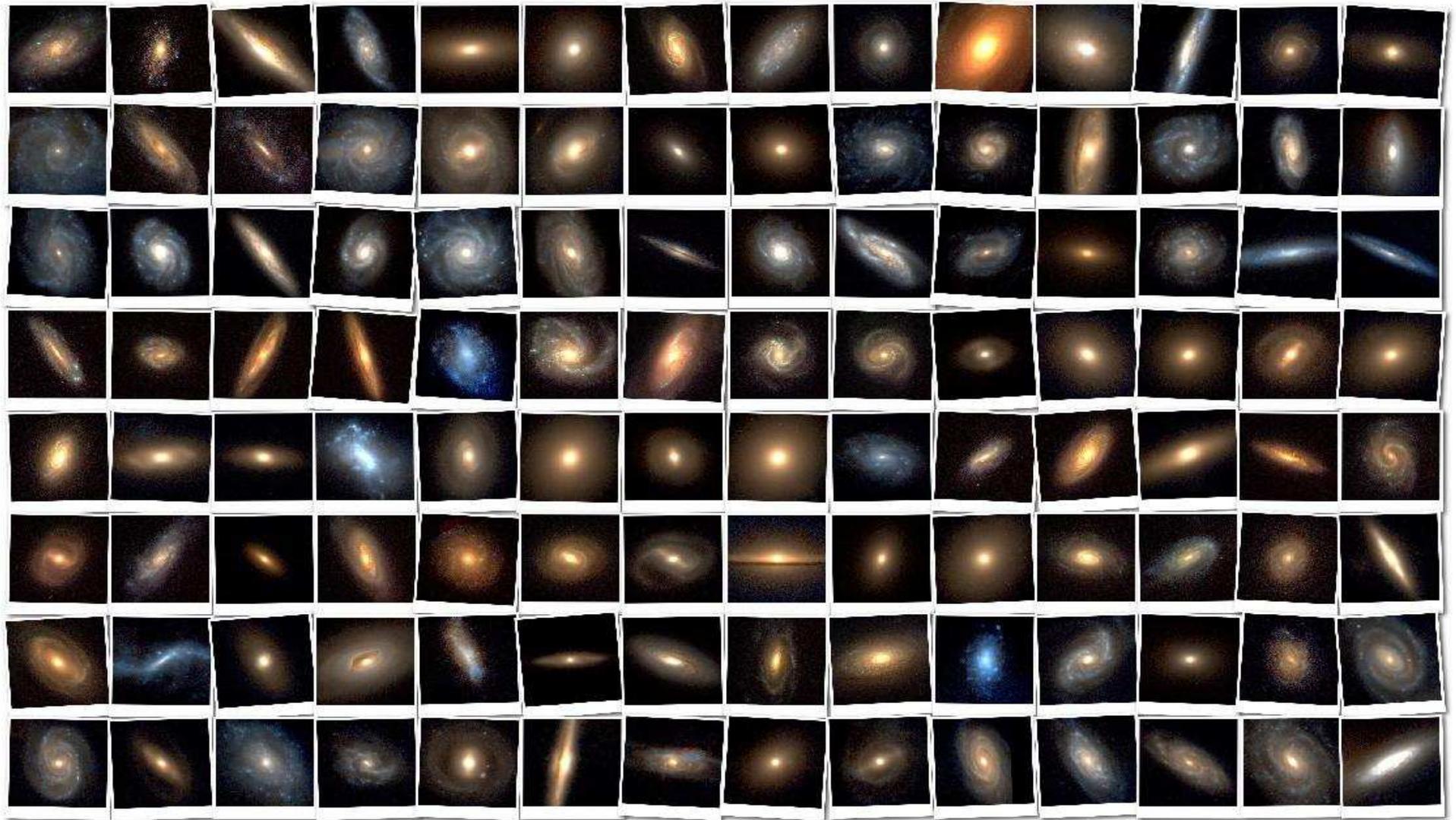




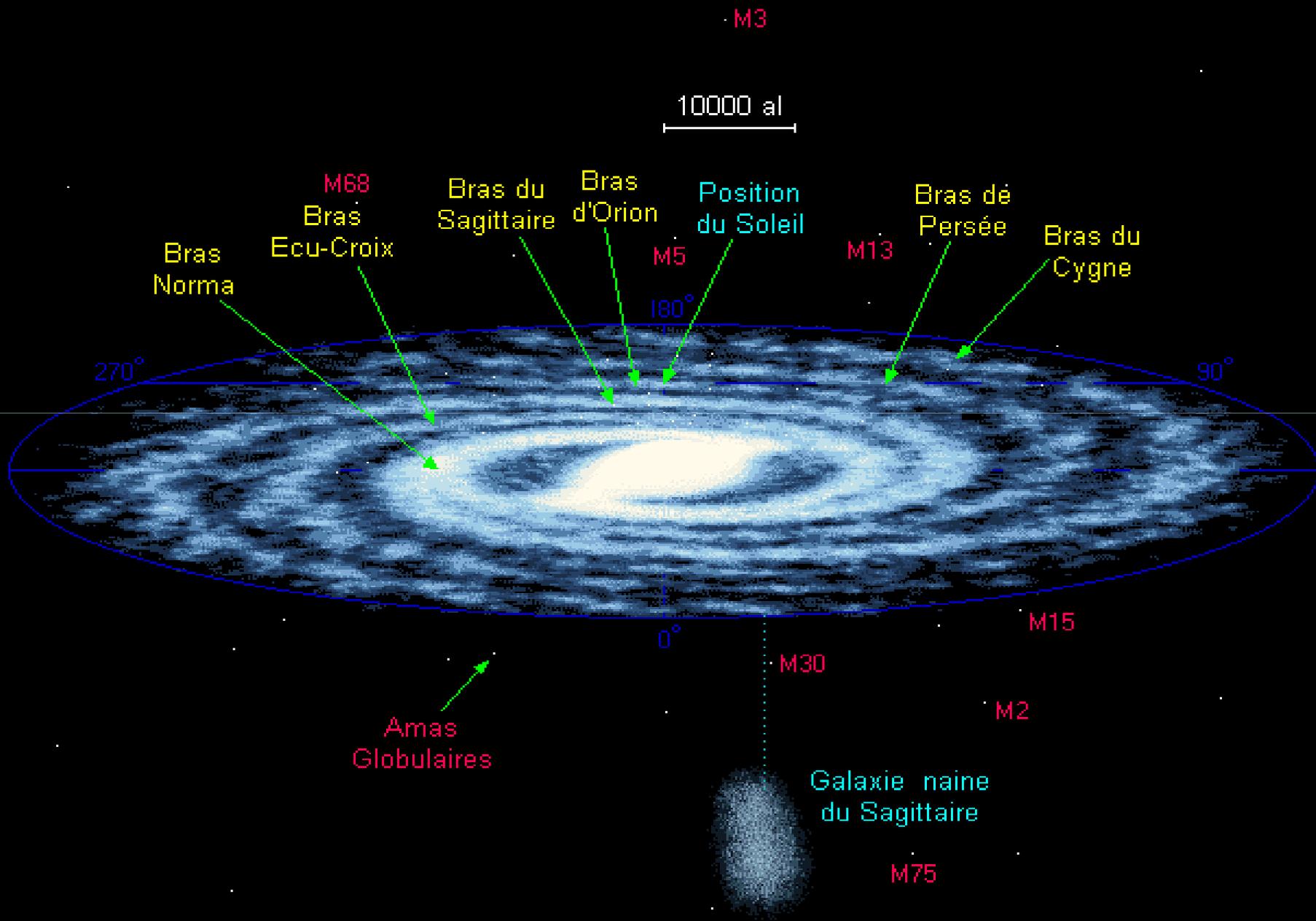




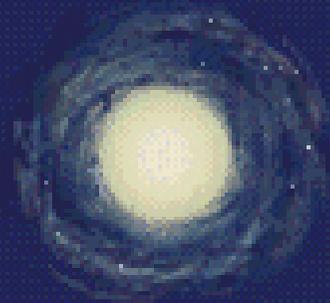
# *Rentrons dans l'Univers des Galaxies ...*



# La Voie Lactée (100 000 AL)



2 millions de galaxies



M31  
Andromeda



Milky Way Galaxy



M51  
Whirlpool Galaxy



M33  
Triangulum Galaxy



Nubecula Minor  
Small Magellanic Cloud

M87  
Virgo A



U  
N  
E

V  
U  
E

P  
R  
O  
F  
O  
N  
D



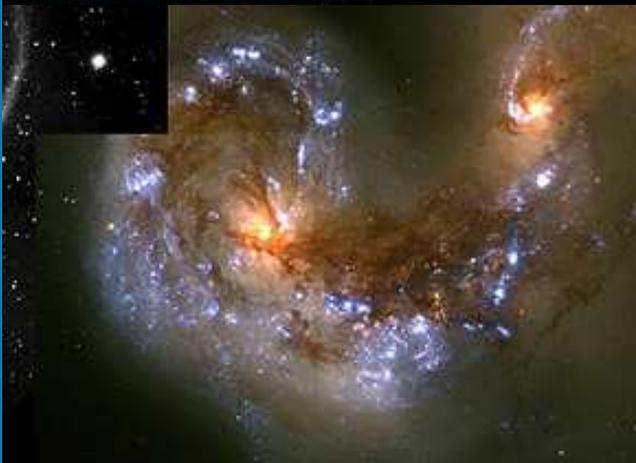
Étoile

Spirales barrées

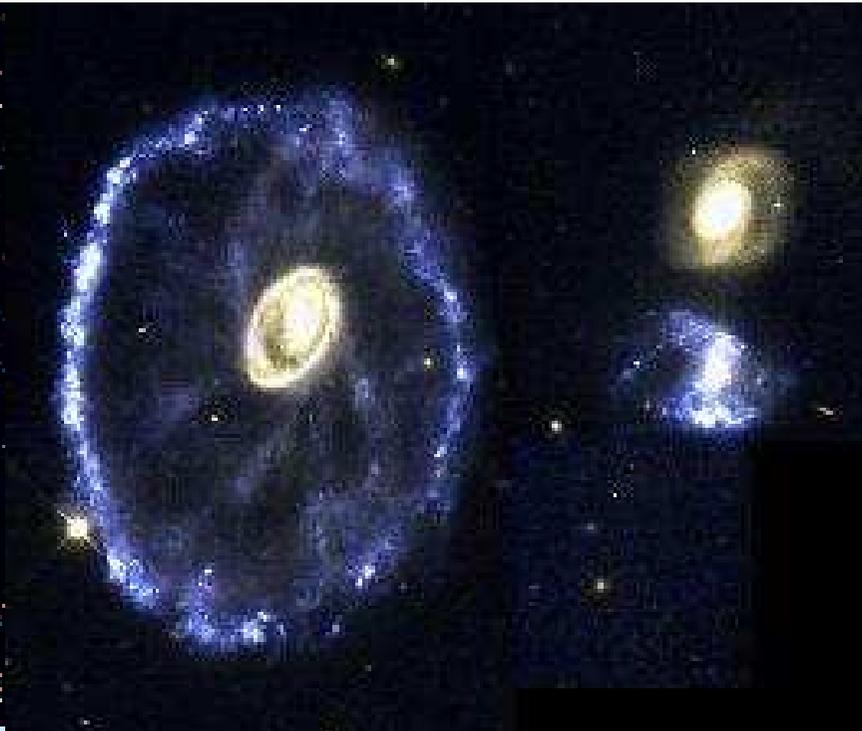
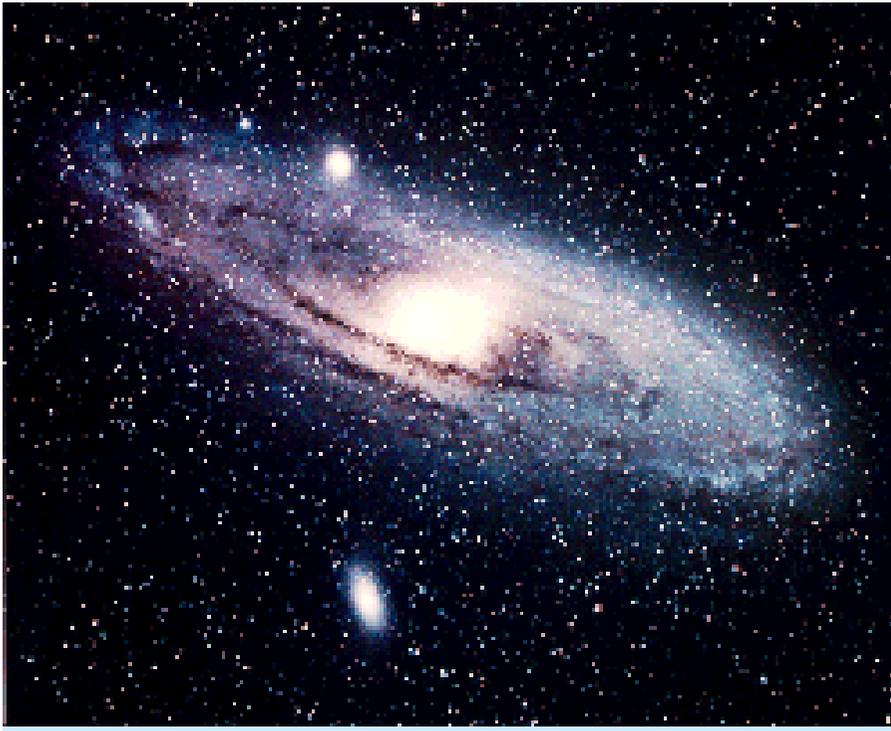
Elliptique

Vue de côté

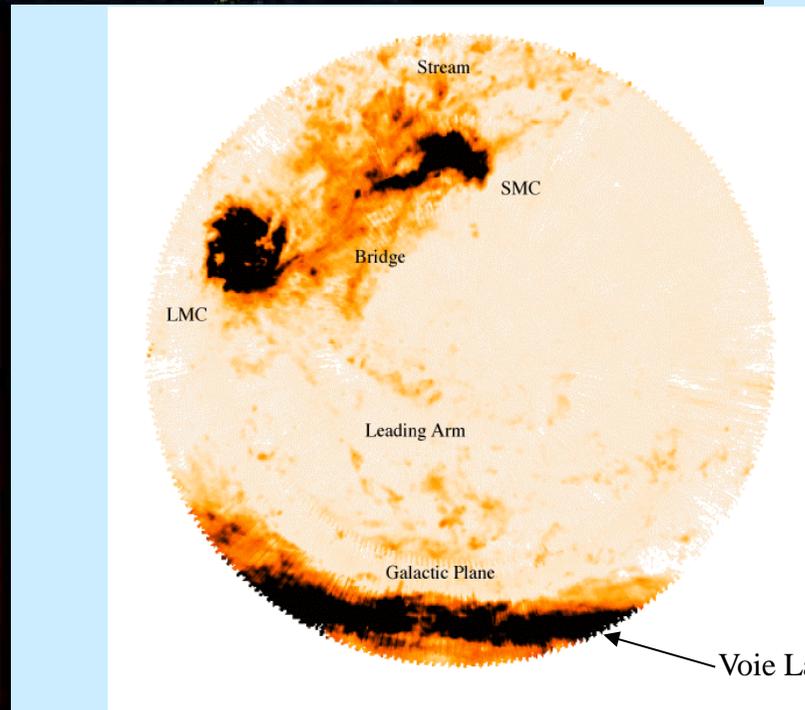
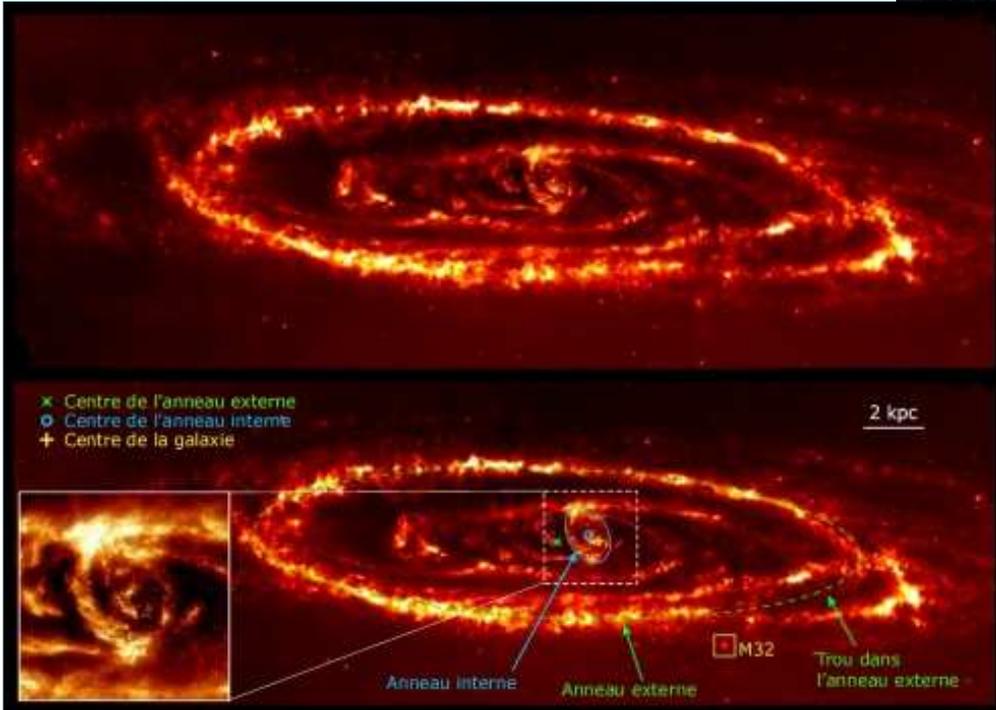
Vue de face



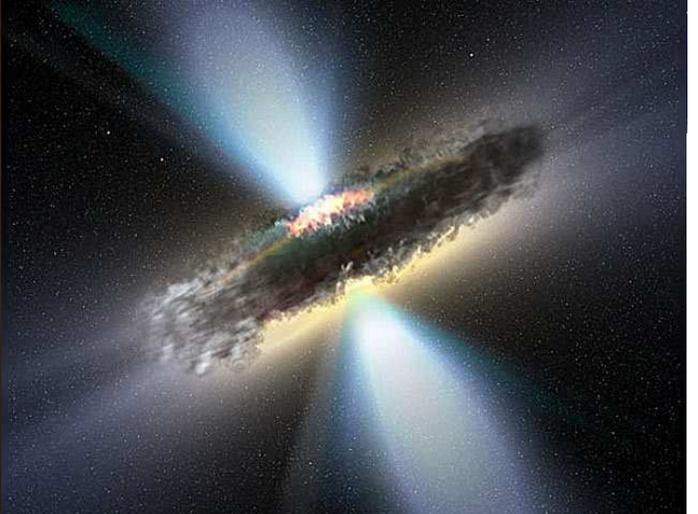
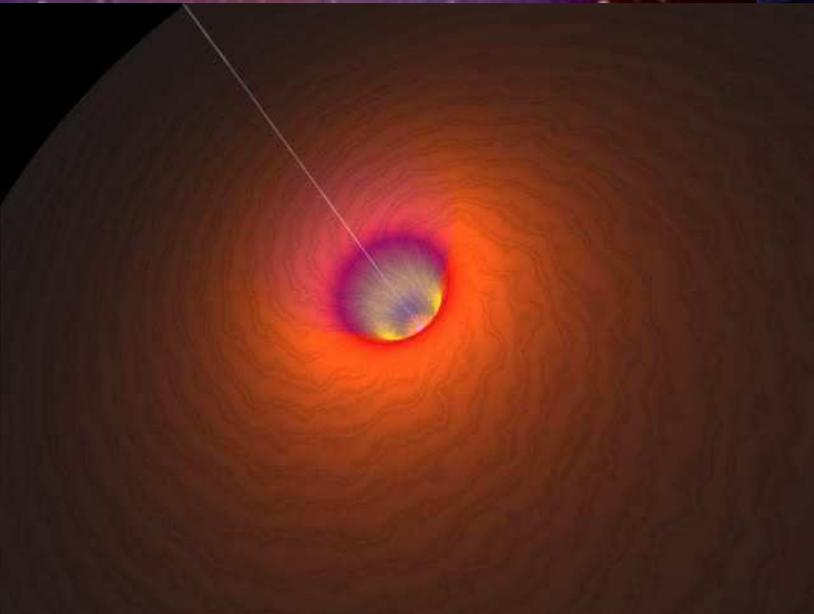
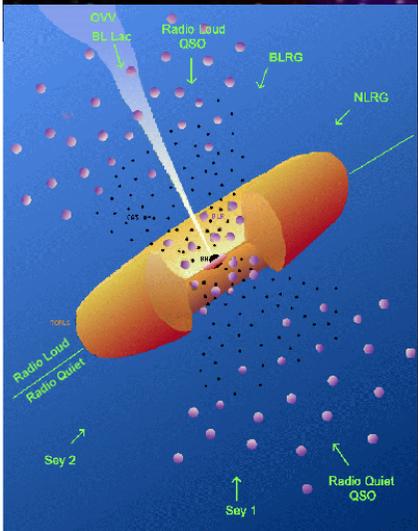
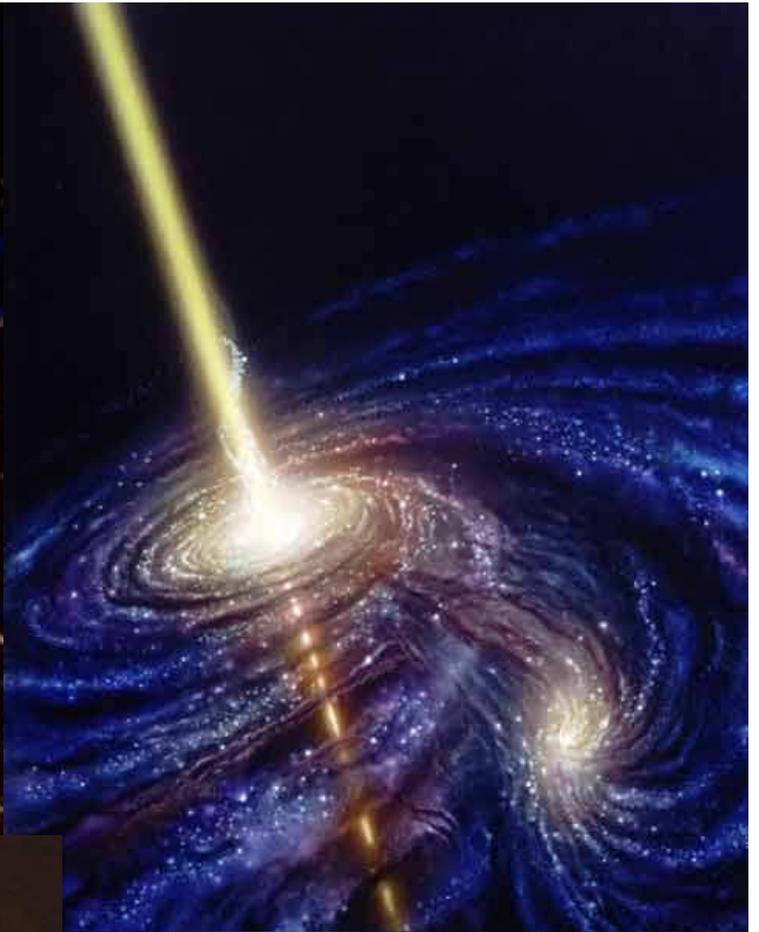




~6%  
ont  
des  
traces  
de  
colli-  
sions

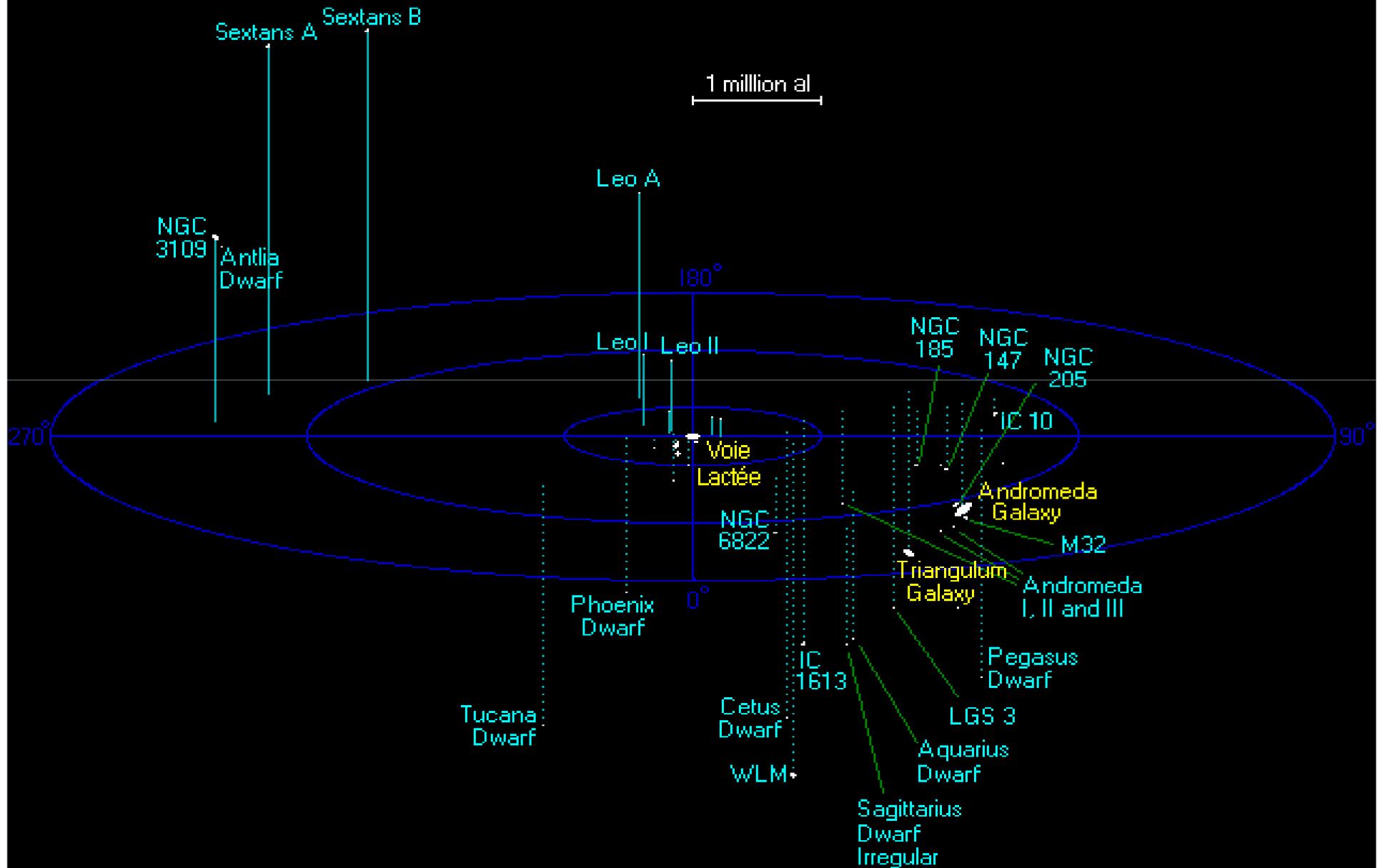


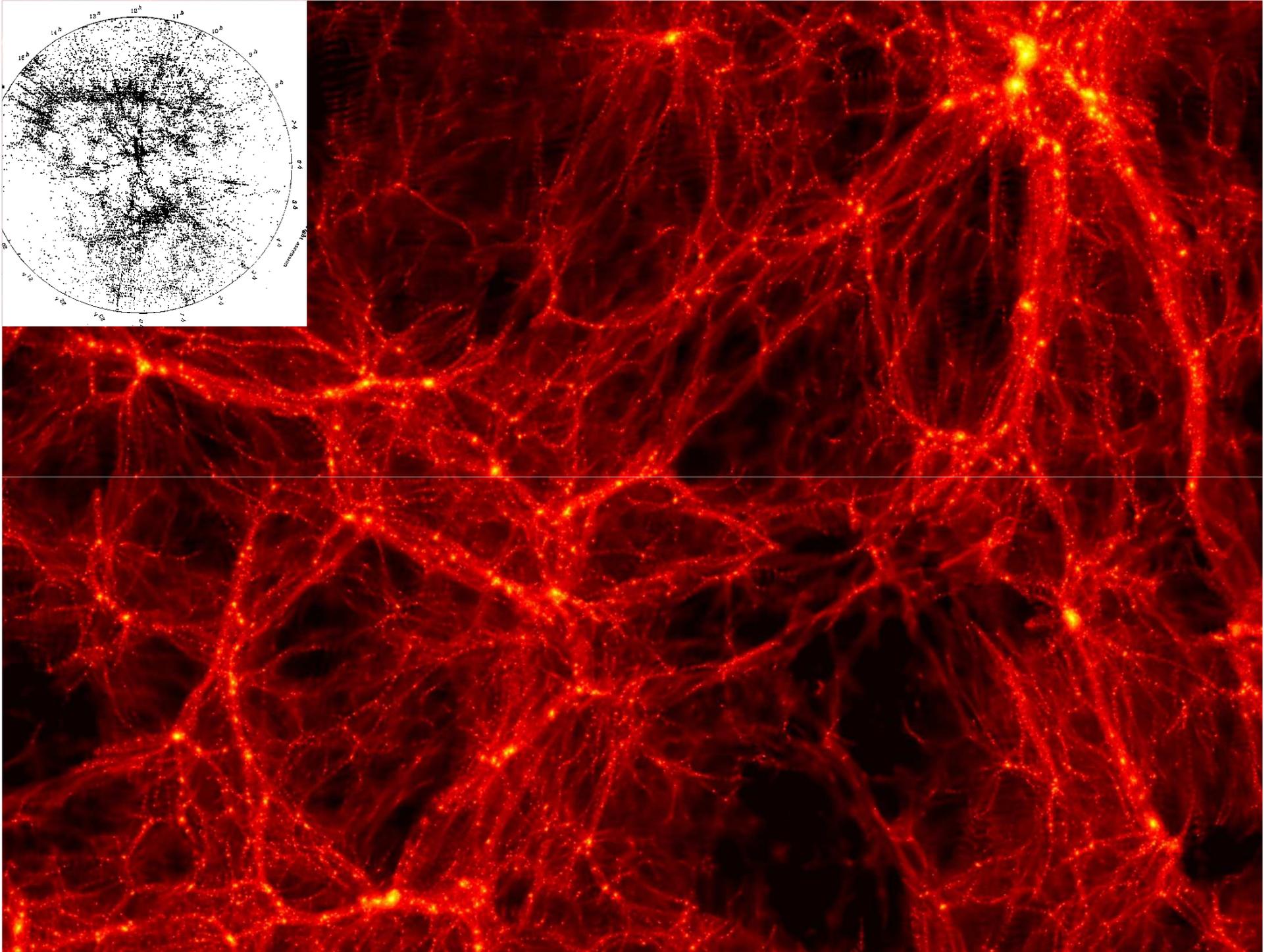
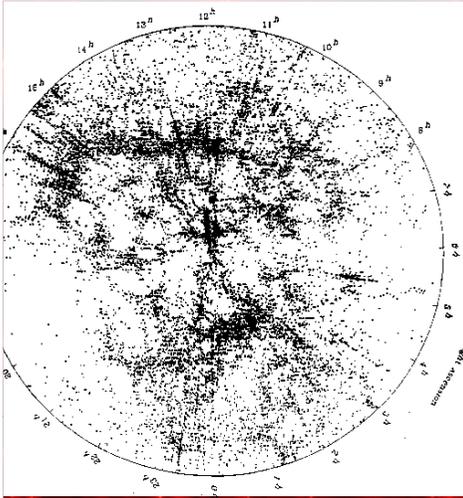
Voie Lactée

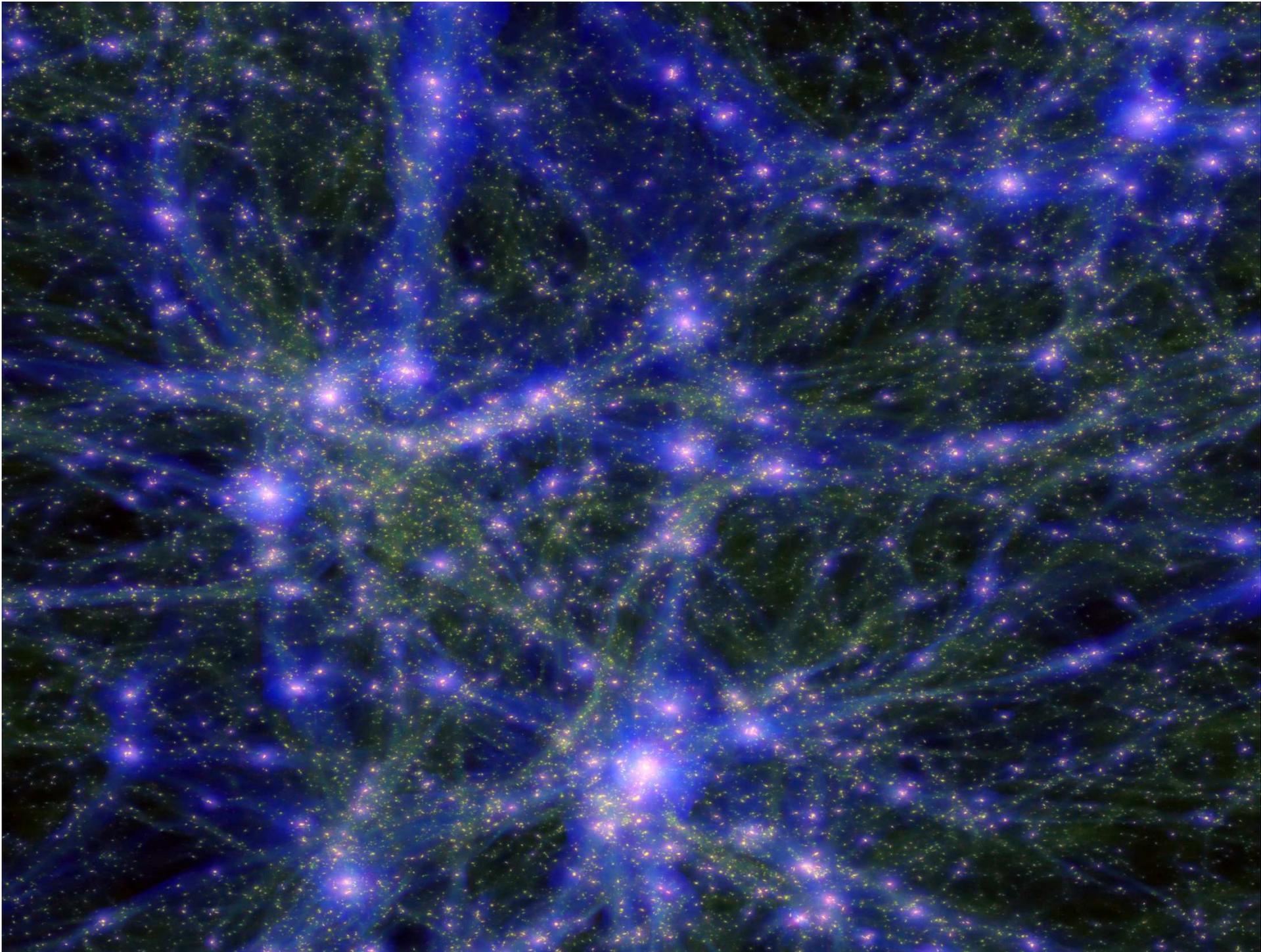




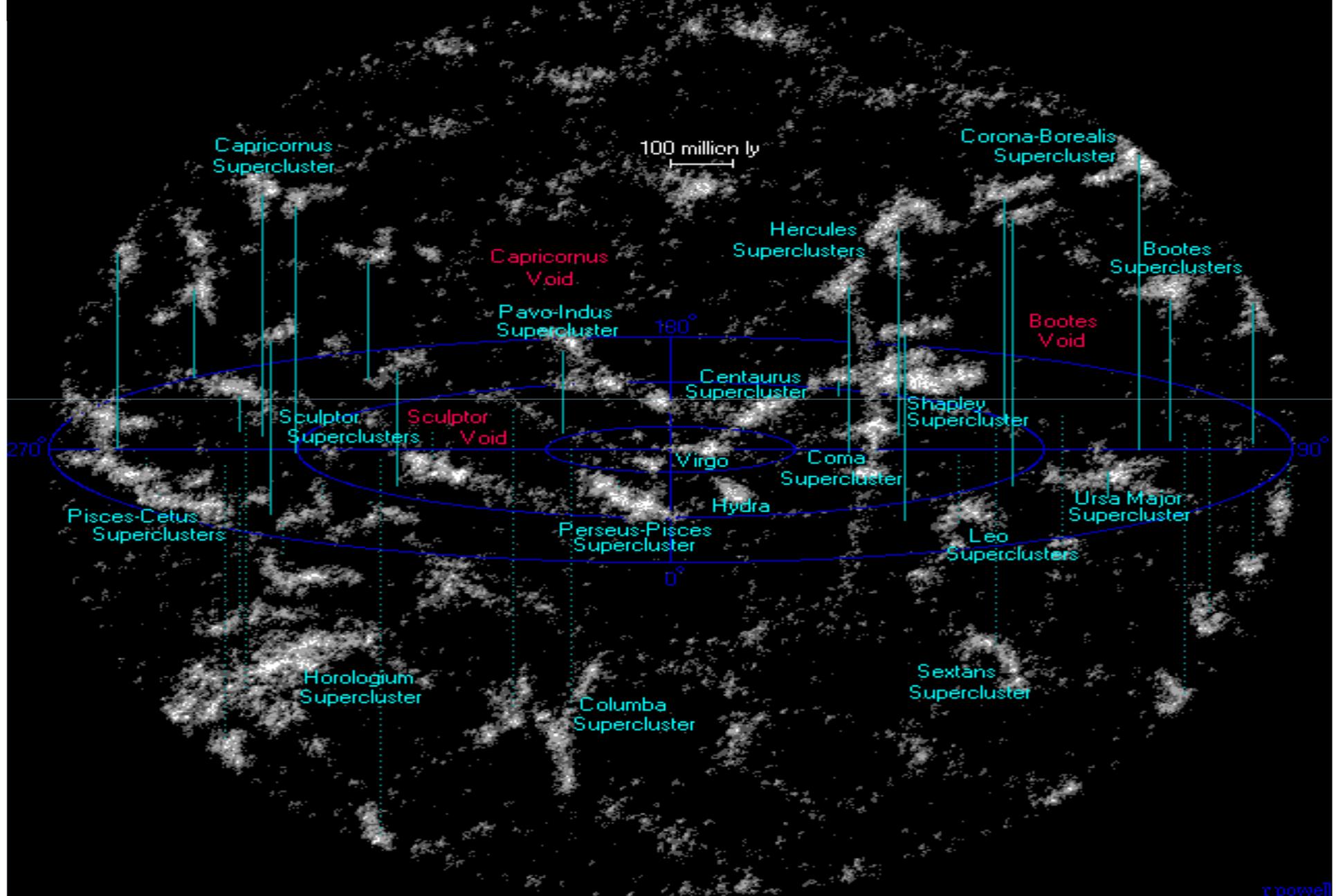
# Le Groupe Local (5 millions AL)



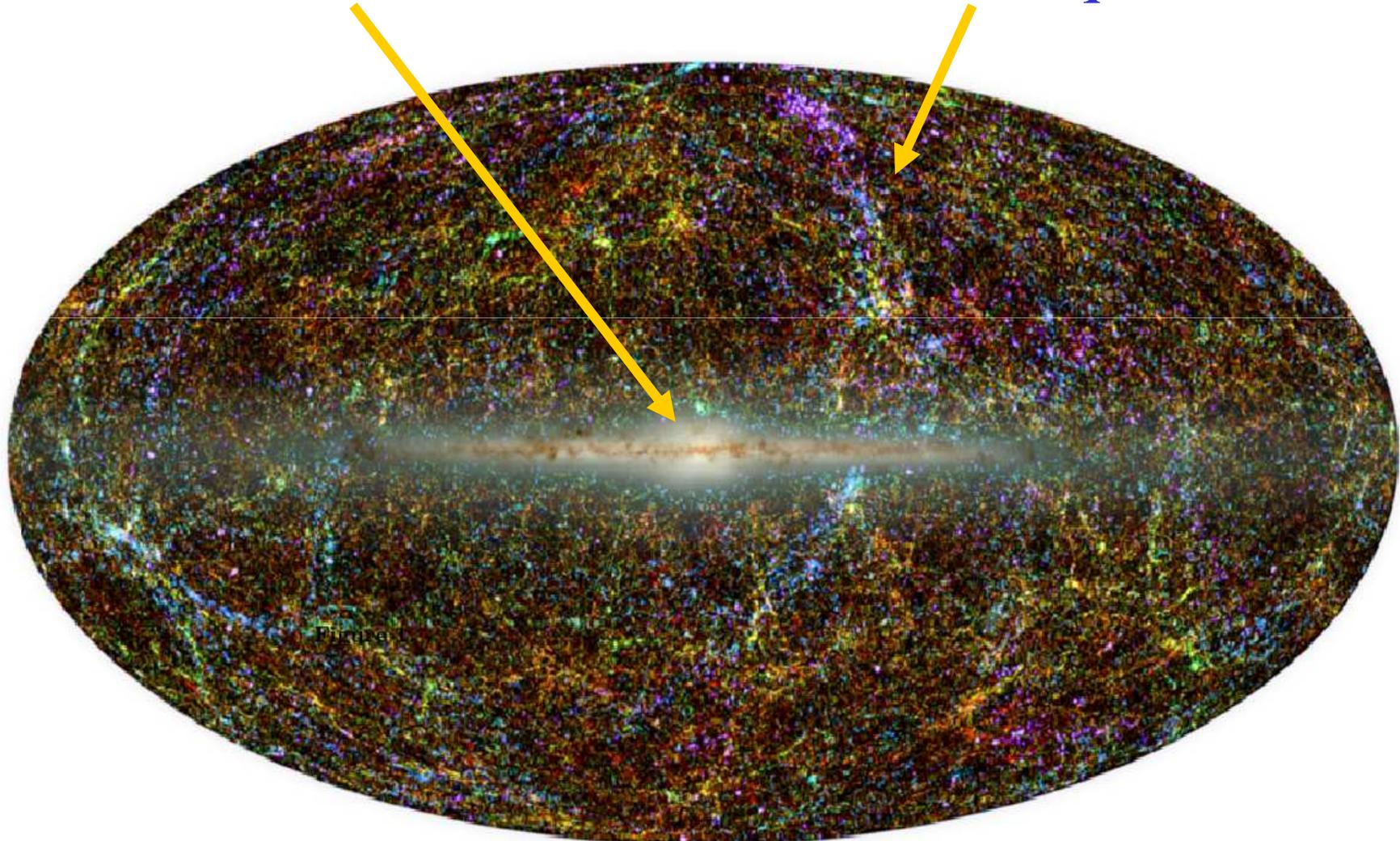




# Filaments cosmiques (1 milliard AL)



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



**Relevé dans l'infra-rouge 2MASS**

# Le BIG BANG

Toutes ces structures sont dynamiques !

(Naissance - Vie - Mort/Transformation)

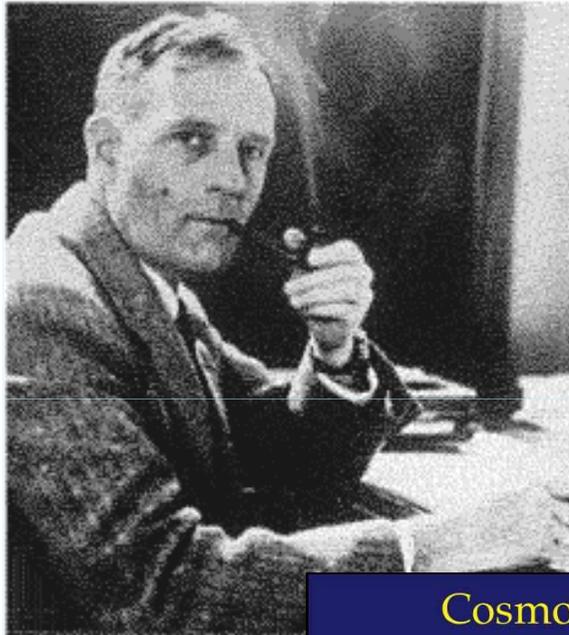
Selon les échelles de temps/distances/énergies on mélange plus ou moins la physique microscopique avec la théorie de la gravitation pour rendre compte des observations.

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

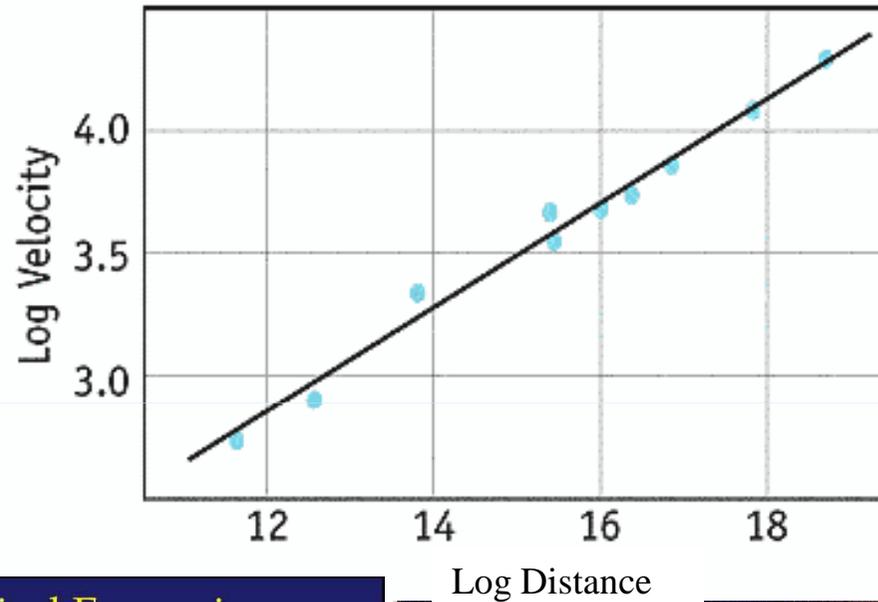
Modèle du Big-Bang chaud et de la croissance des structures

# OBSERVATION DE LA FUITE DES GALAXIES : LA LOI DE HUBBLE

# EXPANSION DE L'UNIVERS !

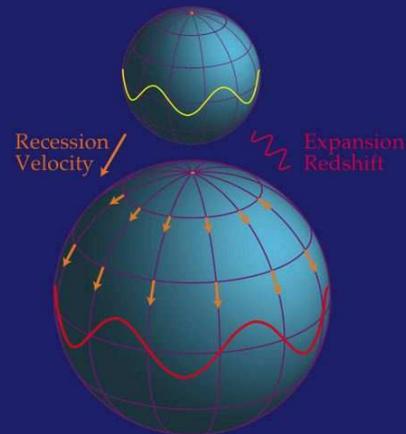


Edwin Hubble

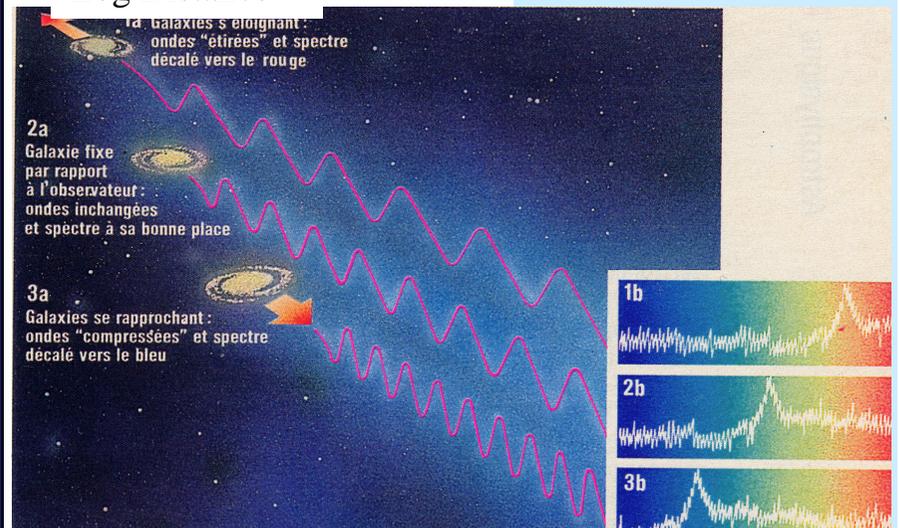


$$V \cong H_0 r$$

## Cosmological Expansion



W. Hu



# Nucléosynthèse Primordiale

Cadre : expansion +  
physique nucléaire

Prédictions :

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

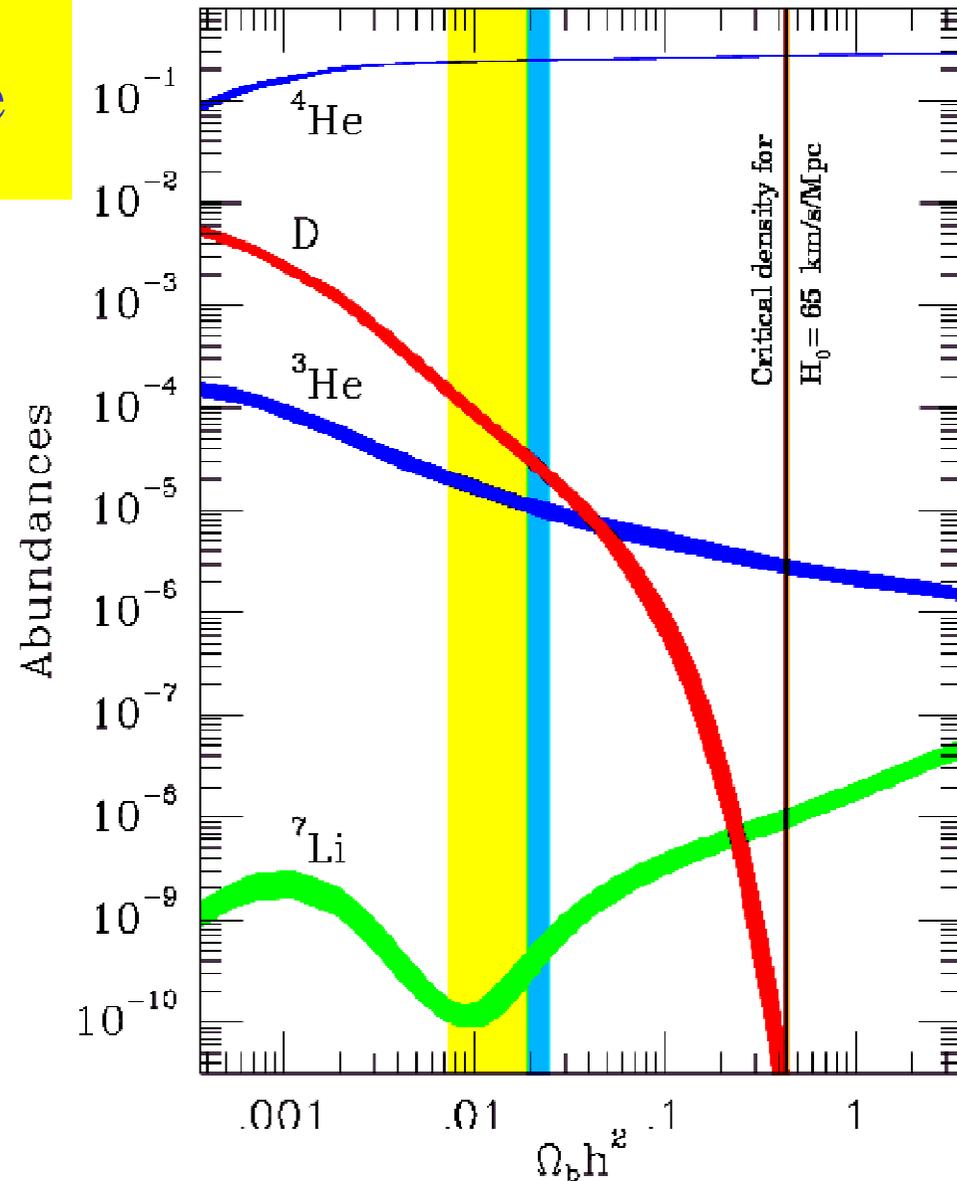
→ rapport photon/baryon :

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

→ peu de baryons :

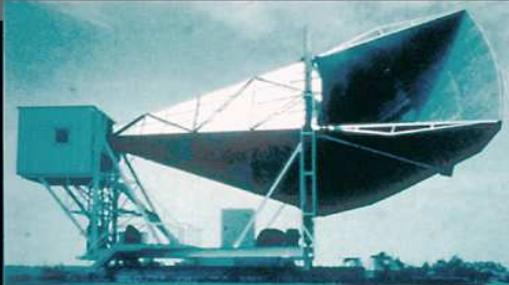
$$\Omega_b / \Omega_T \ll 1$$

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

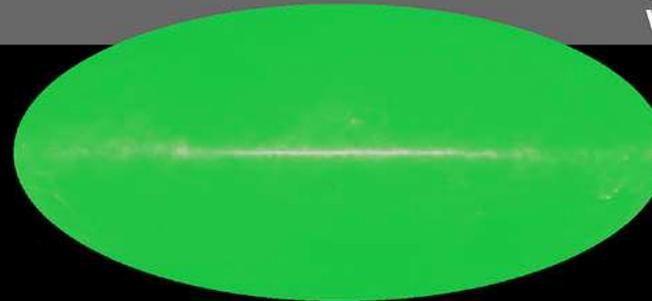


# OBSERVATION DU RAYONNEMENT A $T = 3\text{ K}$ FOSSILE DES PHASES TRES CHAUDES DE L'UNIVERS

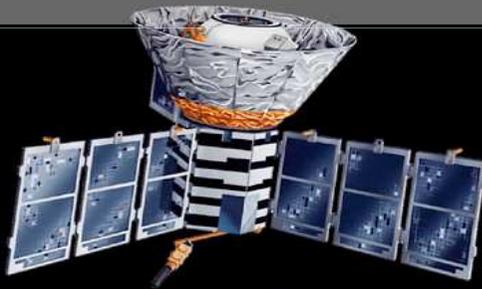
1965



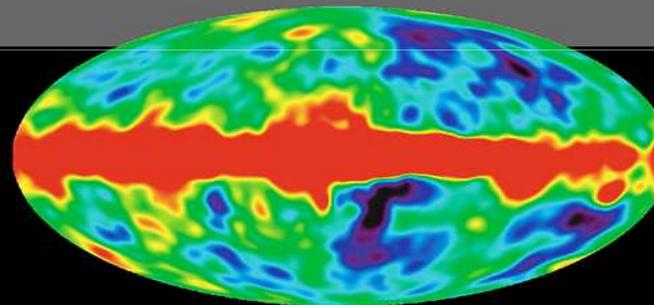
Penzias and  
Wilson



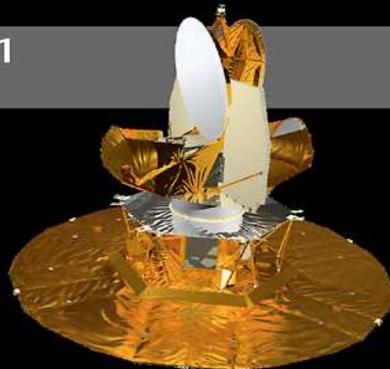
1992



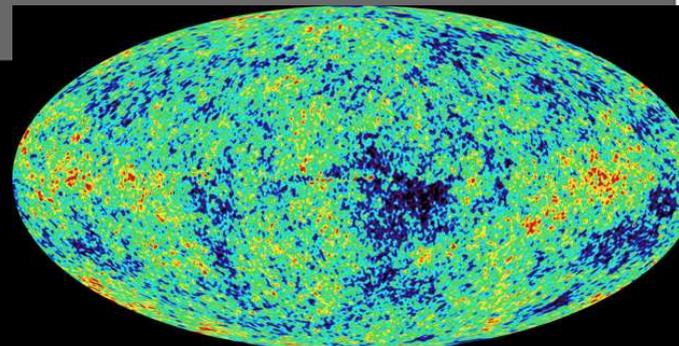
COBE



2001

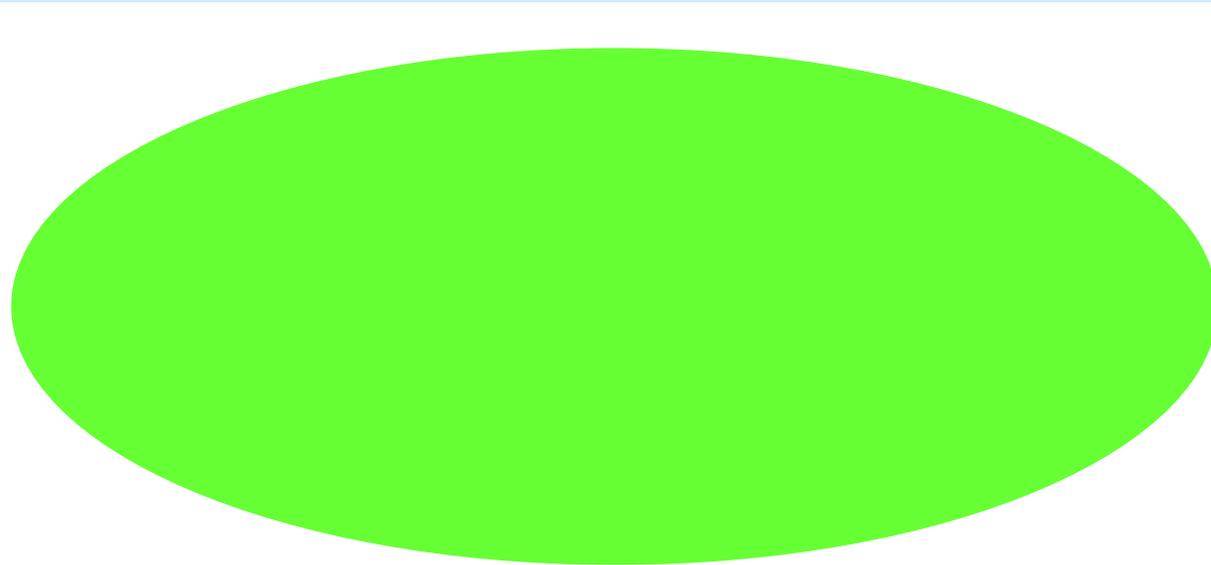


MAP  
(simulated)



# L'univers primordial est homogène

**T=2.7K**

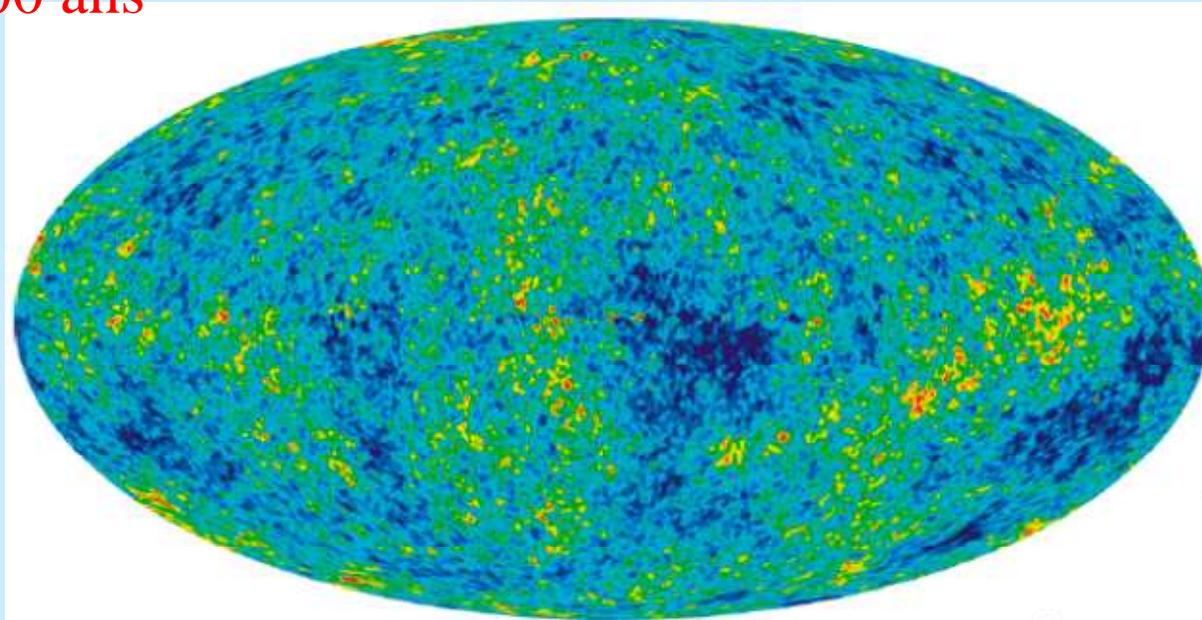


Copernic,  
Principe  
cosmologique

sont vérifiés

**t = 380 000 ans**

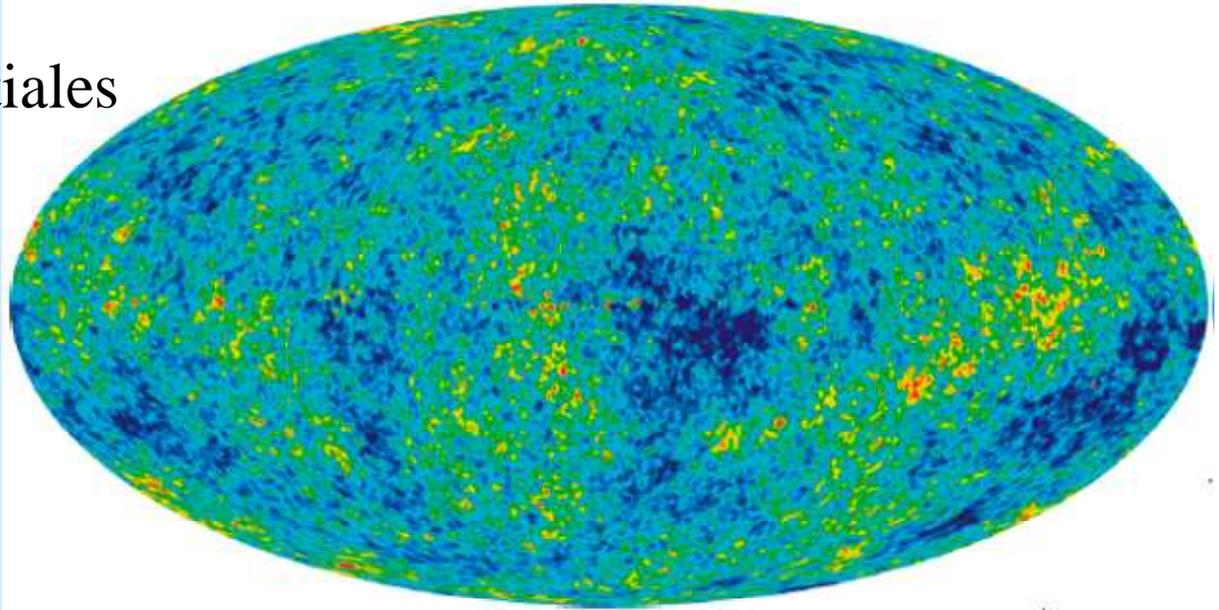
**$\Delta T=20\mu$  K**



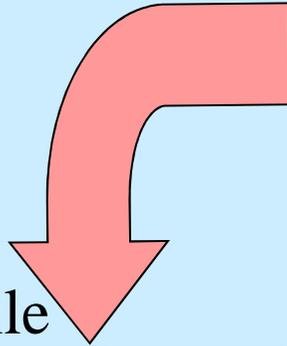
Inhomogéné-  
ités, graines  
des structures  
visibles à  
partir d'une  
résolution de  
1/100 000

# La formation des structures : Observations

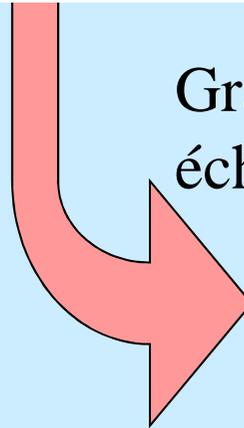
Conditions initiales



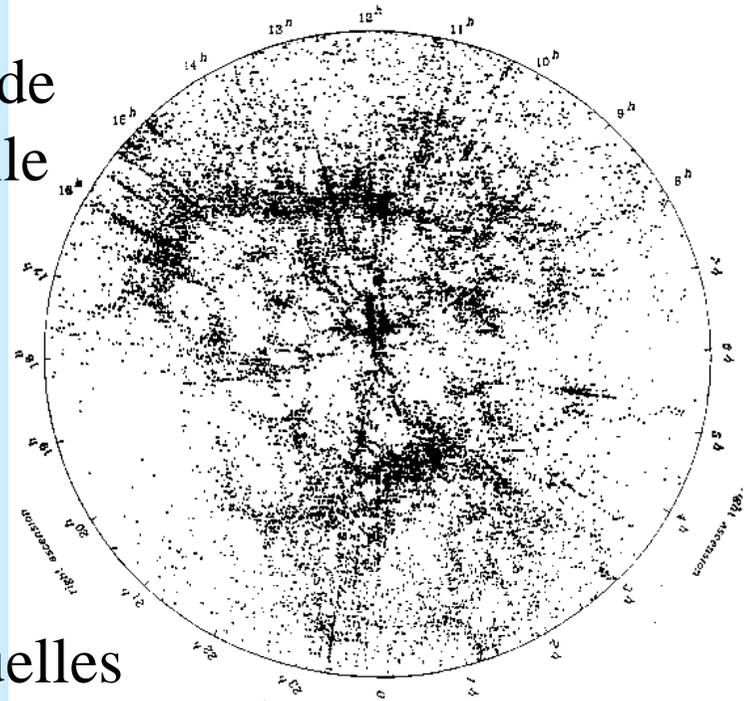
«Petite» échelle



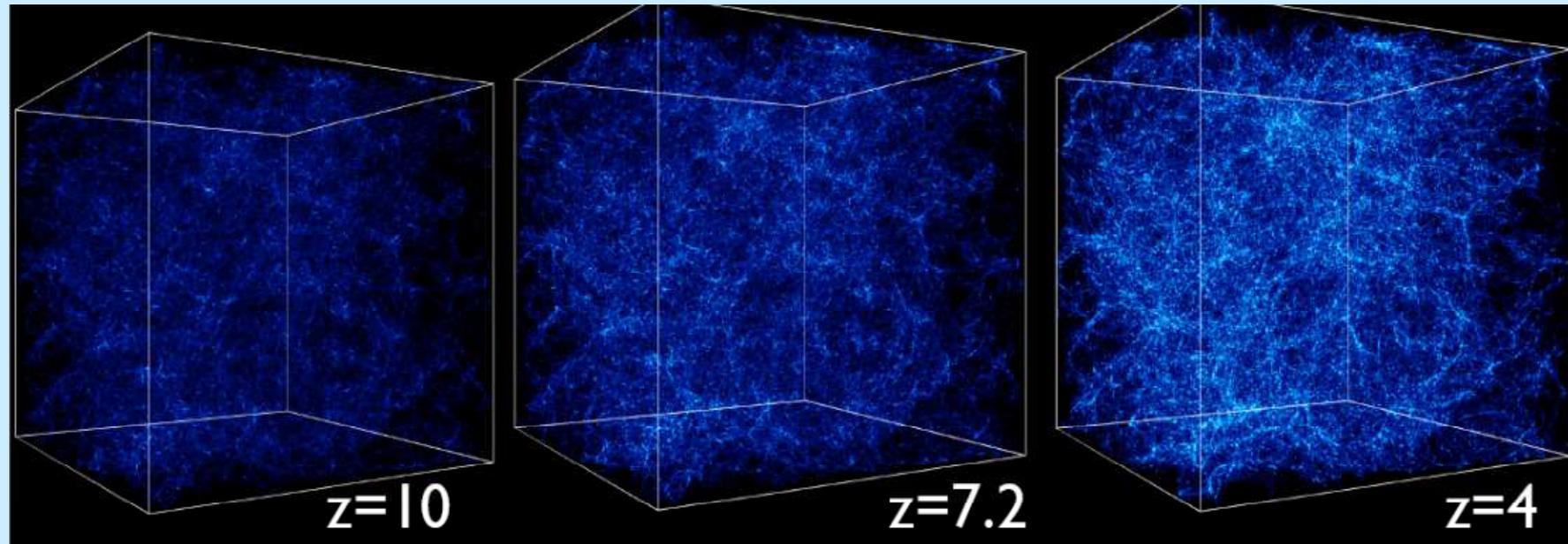
Grande  
échelle



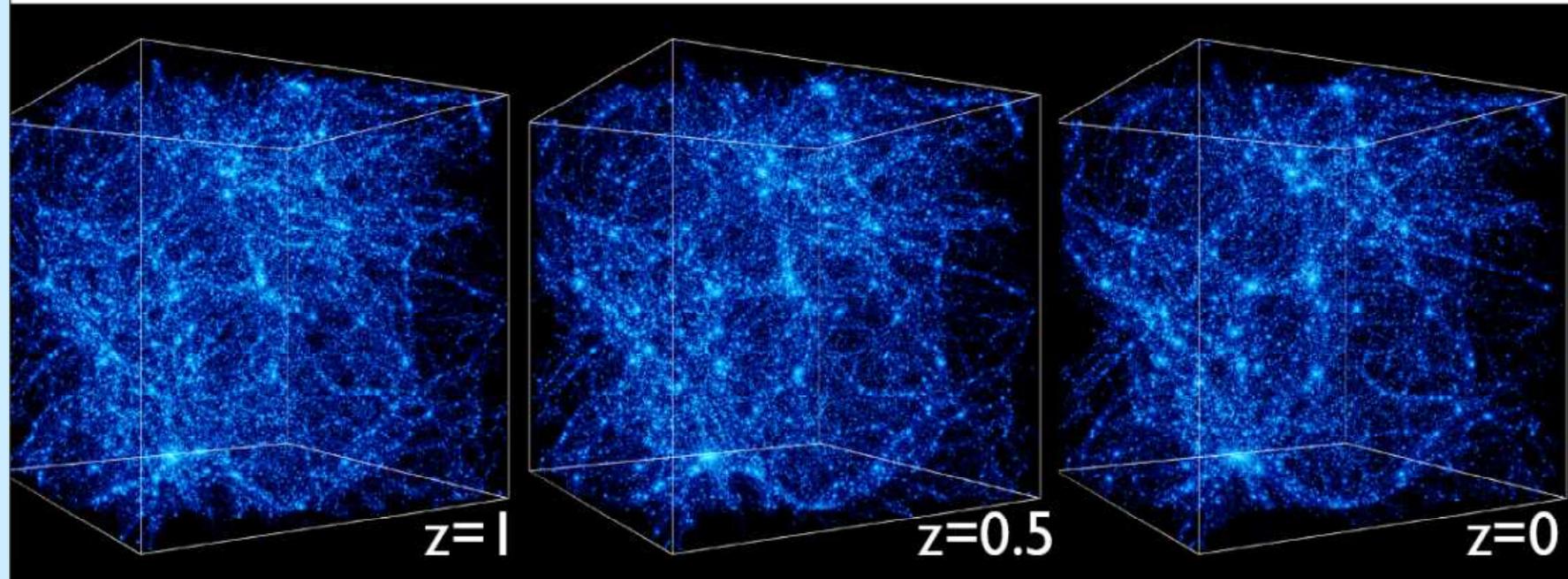
Situations actuelles



# Evolution temporelle : très sensible à l'expansion + RG

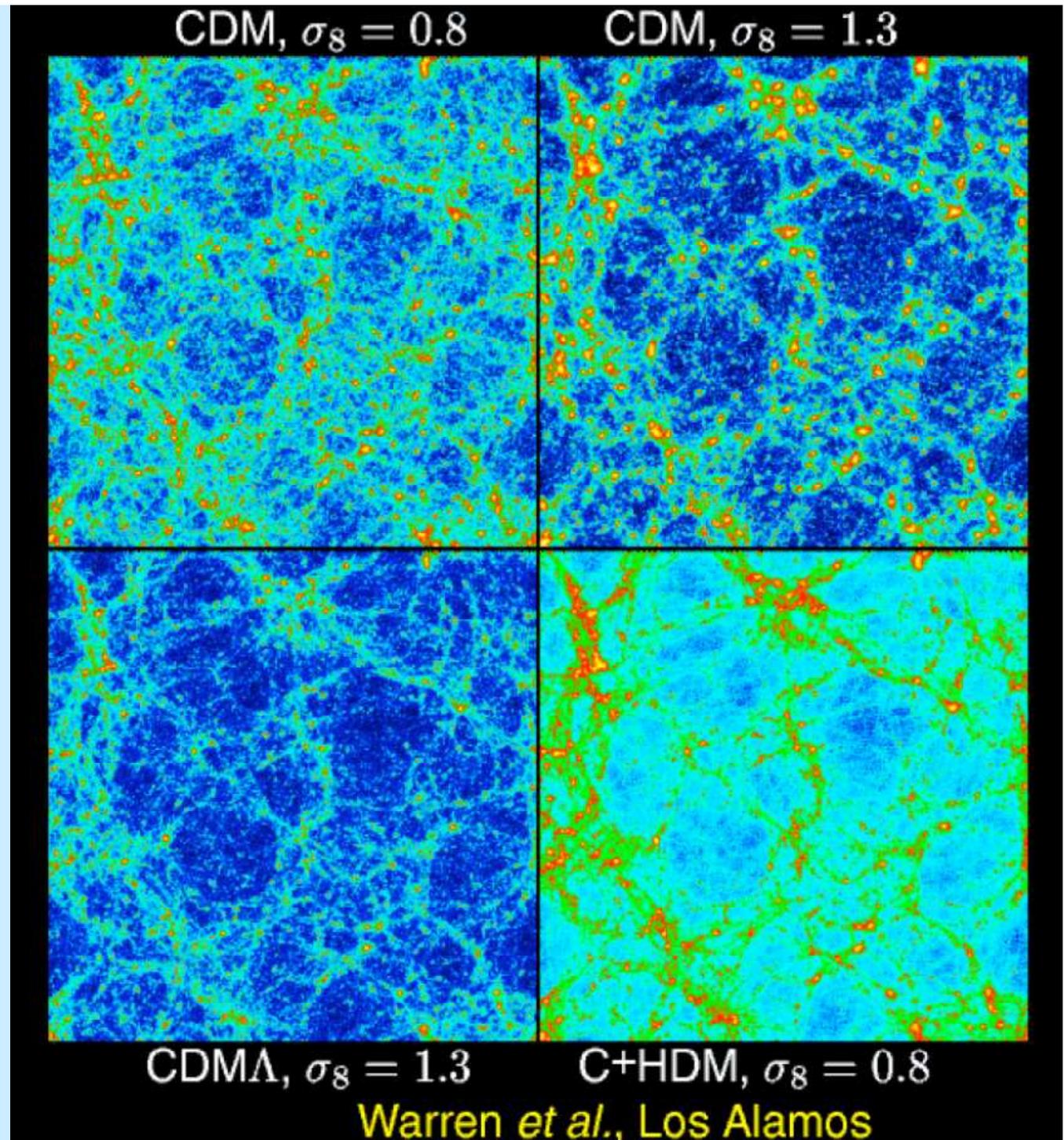


$$a = 1/(1+z)$$

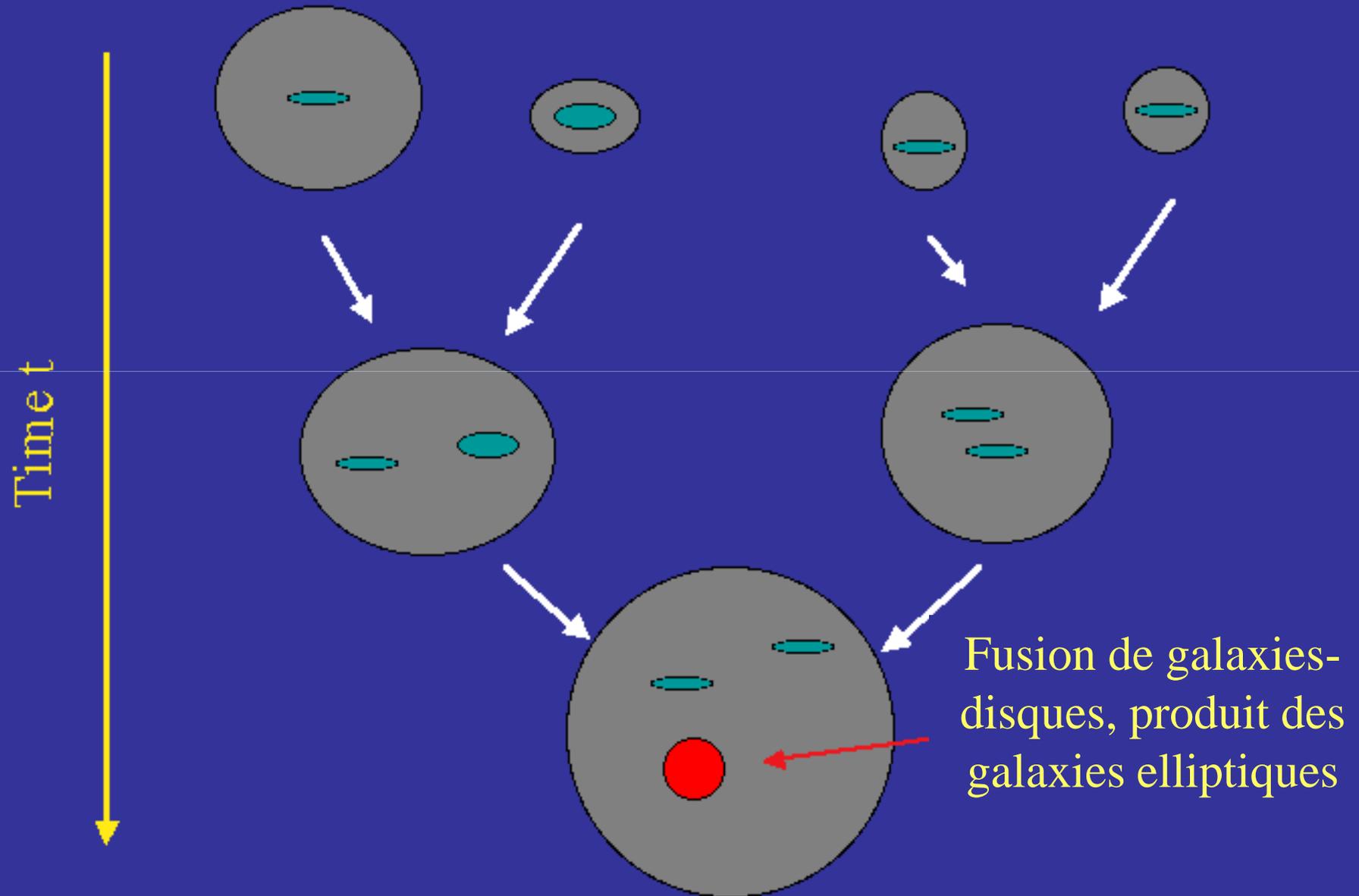


Et sensible a de  
très nombreux  
paramètres  
cosmologiques

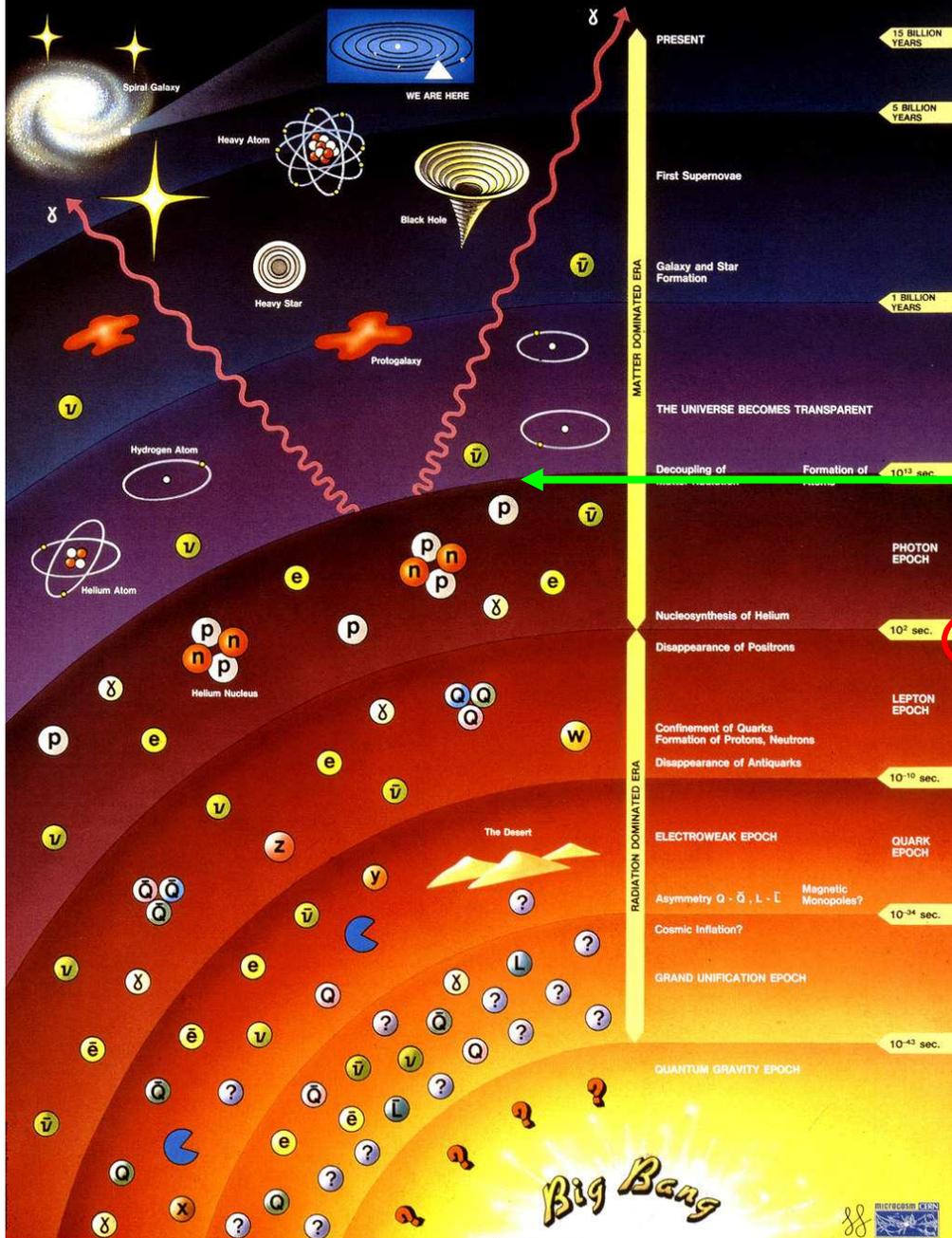
Ex : abondance et  
type de Matière  
Noire et/ou  
d'Énergie Noire



# Formation hiérarchique des structures



# 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

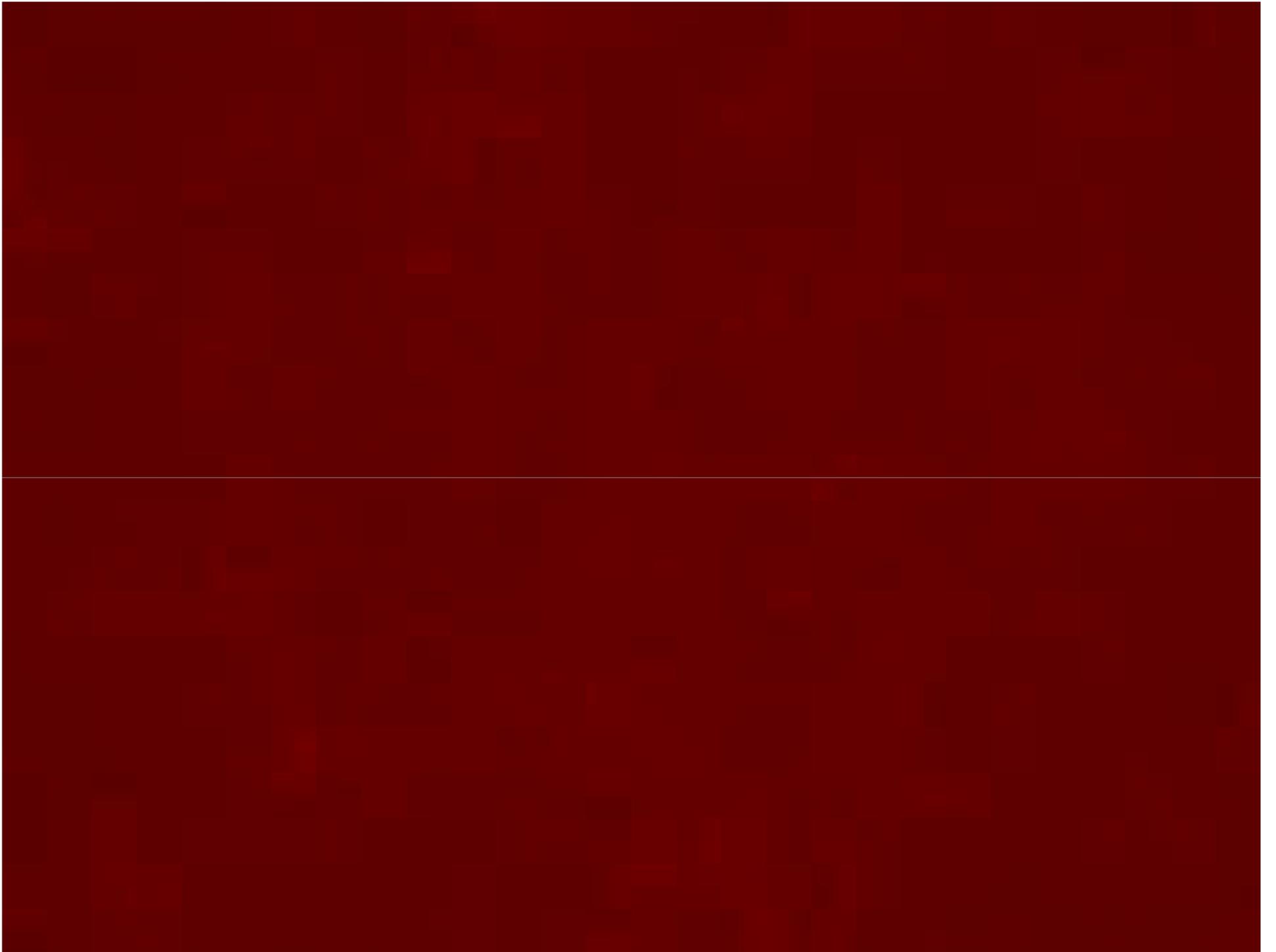
nucléosynthèse

**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 ?



# 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%



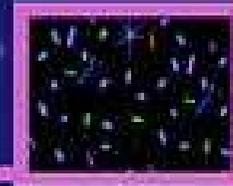
Stars:  
0.5%



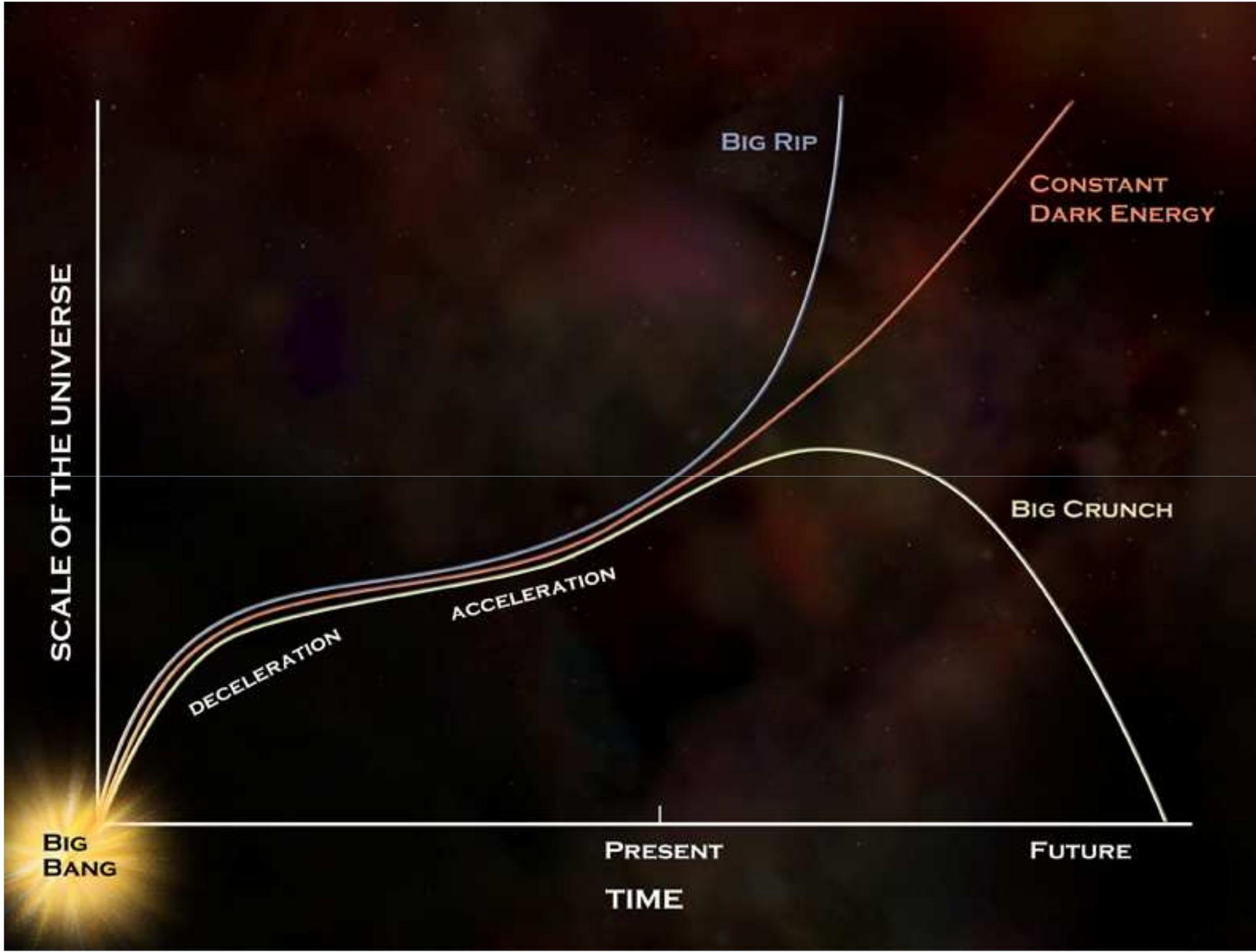
Free hydrogen  
and helium:  
4%



Dark  
matter:  
30%



Dark  
energy:  
65%



SCALE OF THE UNIVERSE

BIG BANG

DECELERATION

ACCELERATION

BIG RIP

CONSTANT DARK ENERGY

BIG CRUNCH

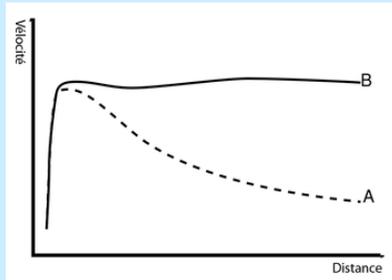
PRESENT

FUTURE

TIME

# 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





Une route vers l'infiniment complexe

La vie existe-t-elle ailleurs ?

## **En Résumé :**

Nous sommes tous de la poussière d'étoile (H Reeves),

1 milliard d'années pour obtenir une étoile

12 milliards d'années pour obtenir la première cellule,

3 milliards d'année pour obtenir un mammifère,

Collectivité harmonieuse de  $10^{13}$  cellules

# Quelle(s) définition(s) donner au vivant ?

**Cycle « Naissance – Evolution – Mort »**

**Composition chimique (CHON)**

**Capacité de se reproduire**

**Autoréplication**

# Les atomes de la vie

## Les 10 premiers éléments du corps humain

	% atomes	% masse
1: Hydrogène (H)	61,56	9,5 (eau + Mat. Org.)
2: Oxygène (O)	26,33	65,0 (eau + MO)
3: Carbone (C)	9,99	18,5 (MO)
4: Azote (N)	1,48	3,2 (protéine)
5: Calcium (Ca)	0,24	1,5 (os, dents, coagul.)
6: Phosphore (P)	0,20	1,0 (os/dents, acide nucl.)
7: Soufre (S)	0,06	0,3 (protéines)
8: Sodium (Na)	0,06	0,2 (contrôle balance eau)
9: Chlore (Cl)	0,04	0,2 (mvt eau inter-cellulaire)
10: Magnésium (Mg)	0,03	0,1 (nerfs, contract. muscu.)

# Notre connexion cosmique avec les éléments

National Aeronautics and Space Administration

## What is Your Cosmic Connection to the Elements?

The infographic features a central image of a woman sitting on a globe, holding a 'Happy Birthday!' balloon. The globe is divided into colored segments representing different cosmic sources of elements. Lines connect these segments to specific elements on a periodic table. The background includes a starry sky, a nebula, and a supernova.

**Small Stars**

- Carbon
- Nitrogen

**Large Stars**

- Sulfur
- Calcium
- Oxygen
- Silicon

**Supernovae**

- Gold
- Iron
- Titanium

**Big Bang**

- Hydrogen
- Helium

**Cosmic Rays**

- Lithium

**Periodic Table Elements:** H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, La, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr.

Imagine the Universe  
<http://imagine.gsfc.nasa.gov/>  
<http://www.nasa.gov/>

# A la recherche de la vie extra-terrestre

Que veut-on et que peut-on chercher ?

- Vie intelligente : analyse de signaux radio/optique : programme SETI
- Réplicateur microscopique : ARN ? Aujourd'hui, a priori impossible ... (trop complexe et trop fragile pour existence/détection dans l'espace.
- Réplicateur macroscopique : rayonnement infrarouge, oxygène, ozone, méthane ..... Détection « spectroscopique » ...
- Chimie « prébiotique » : briques élémentaires des cellules (telles qu'on les connaît sur Terre ...) : molécules simples

Exemples :

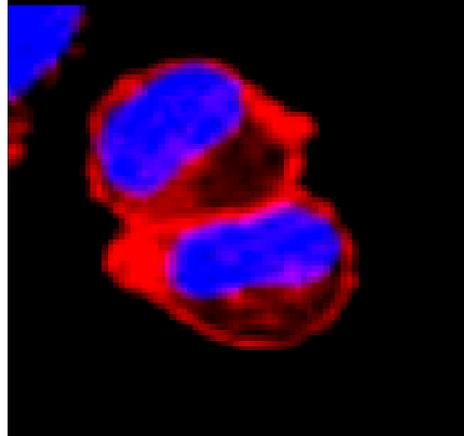
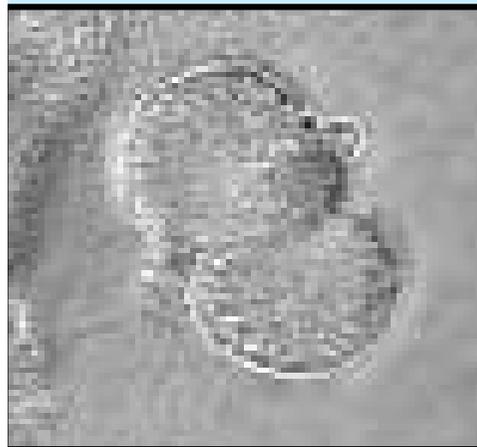
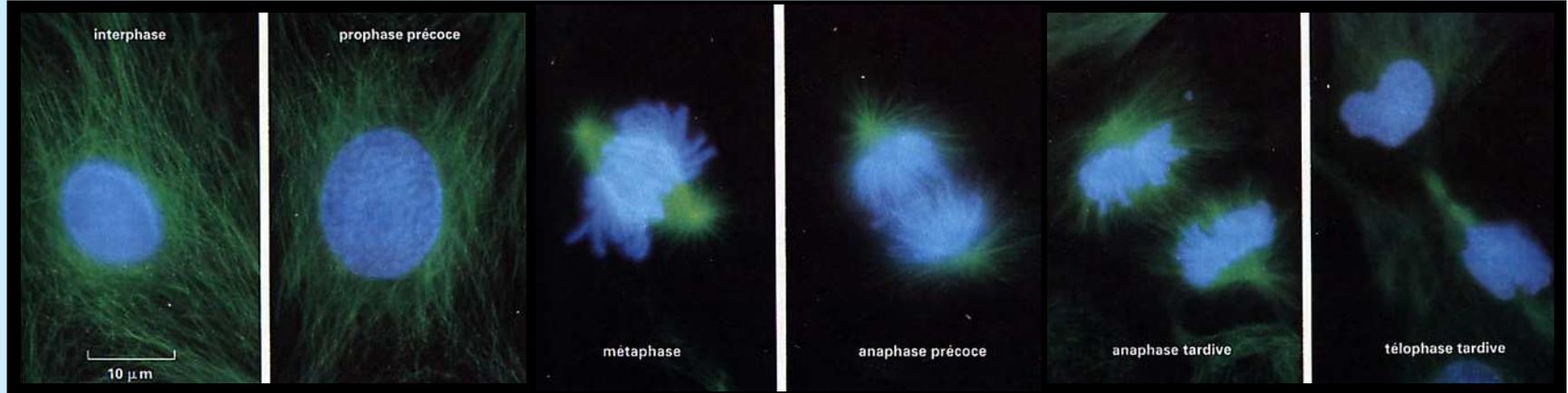
- Nécessité source de chaleur + cadre d'évolution (système exoplanétaire)
- Présence d'eau liquide (solvant)
- Présence de molécules simples (début de la complexité)

## *La brique élémentaire du vivant : La Cellule*

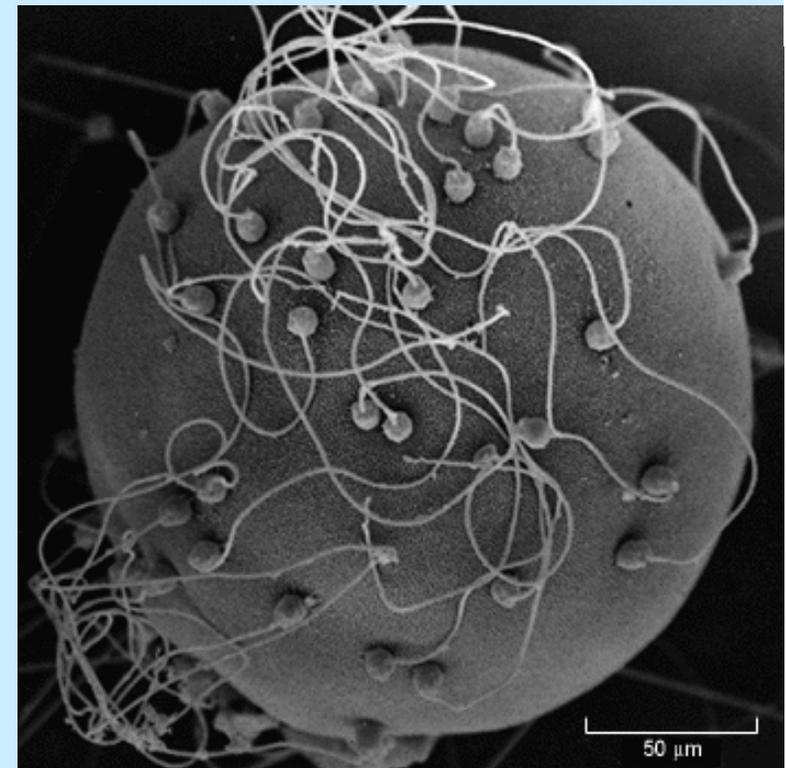
La cellule représente l'unité  
**fondamentale** de tout être vivant,  
c'est la plus petite portion de matière  
**vivante** qui puisse vivre isolée  
et se reproduire (Virchow 1858)

# La mitose :

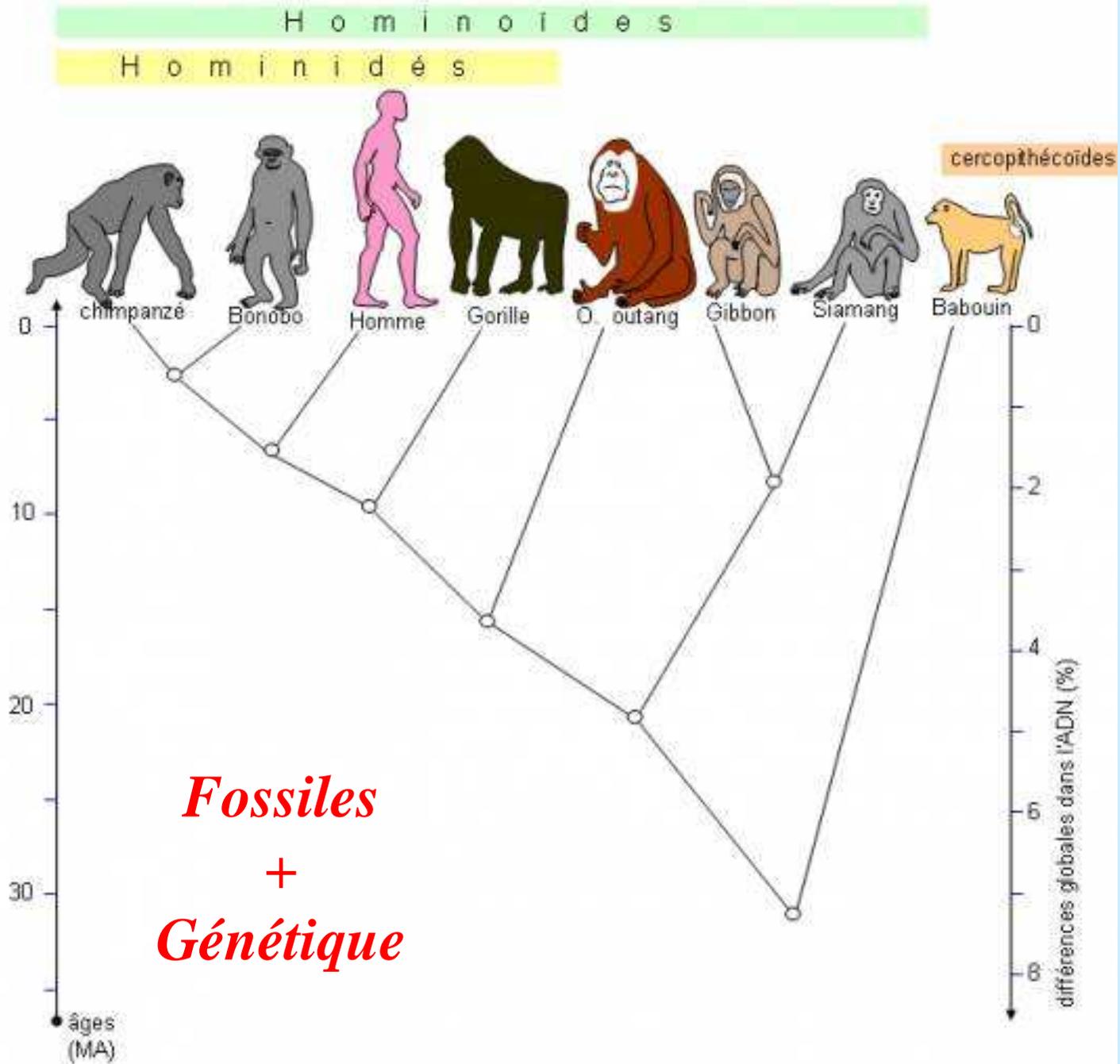
être vivant  $\sim 10^{13}$  cellules

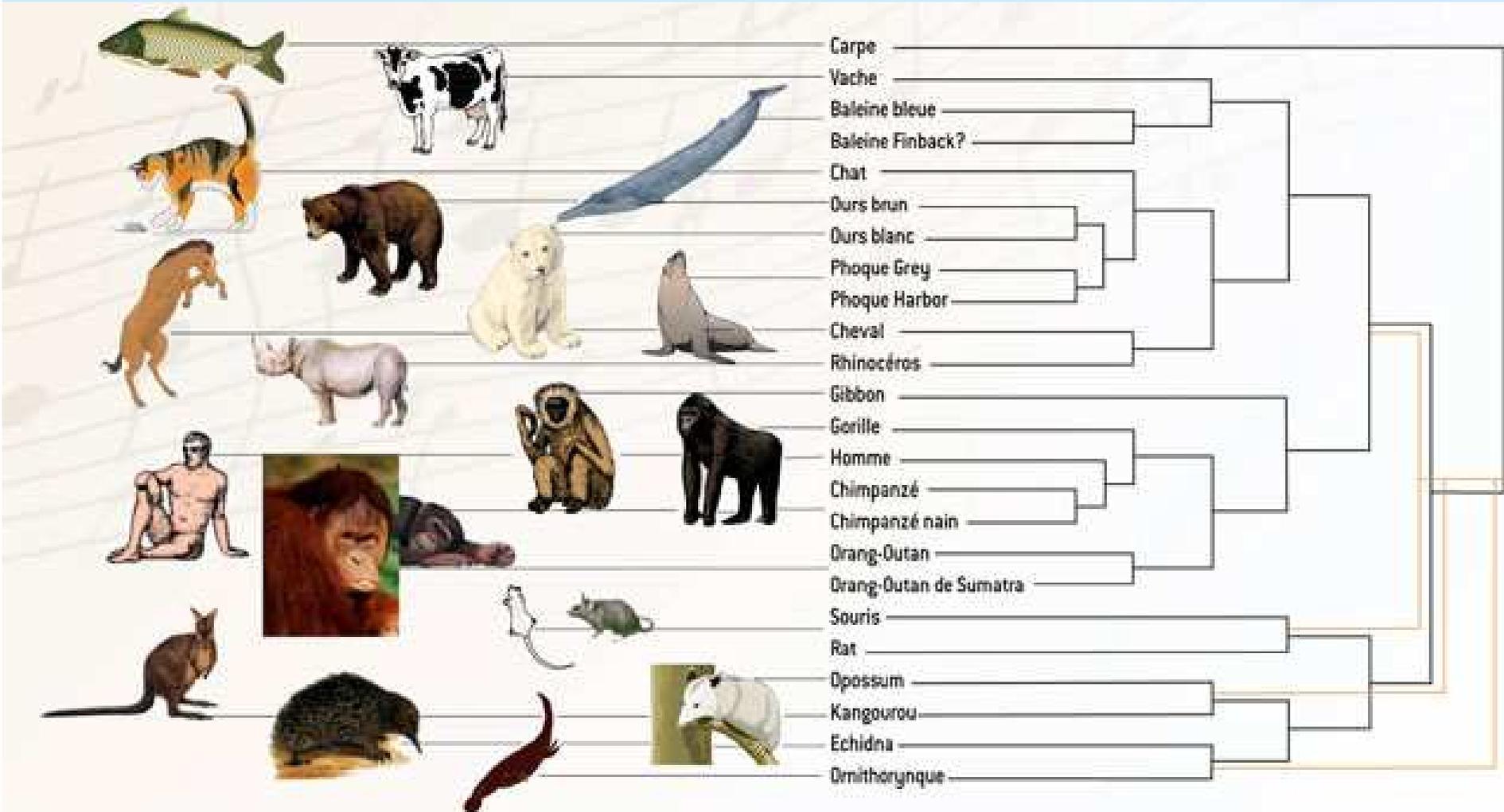


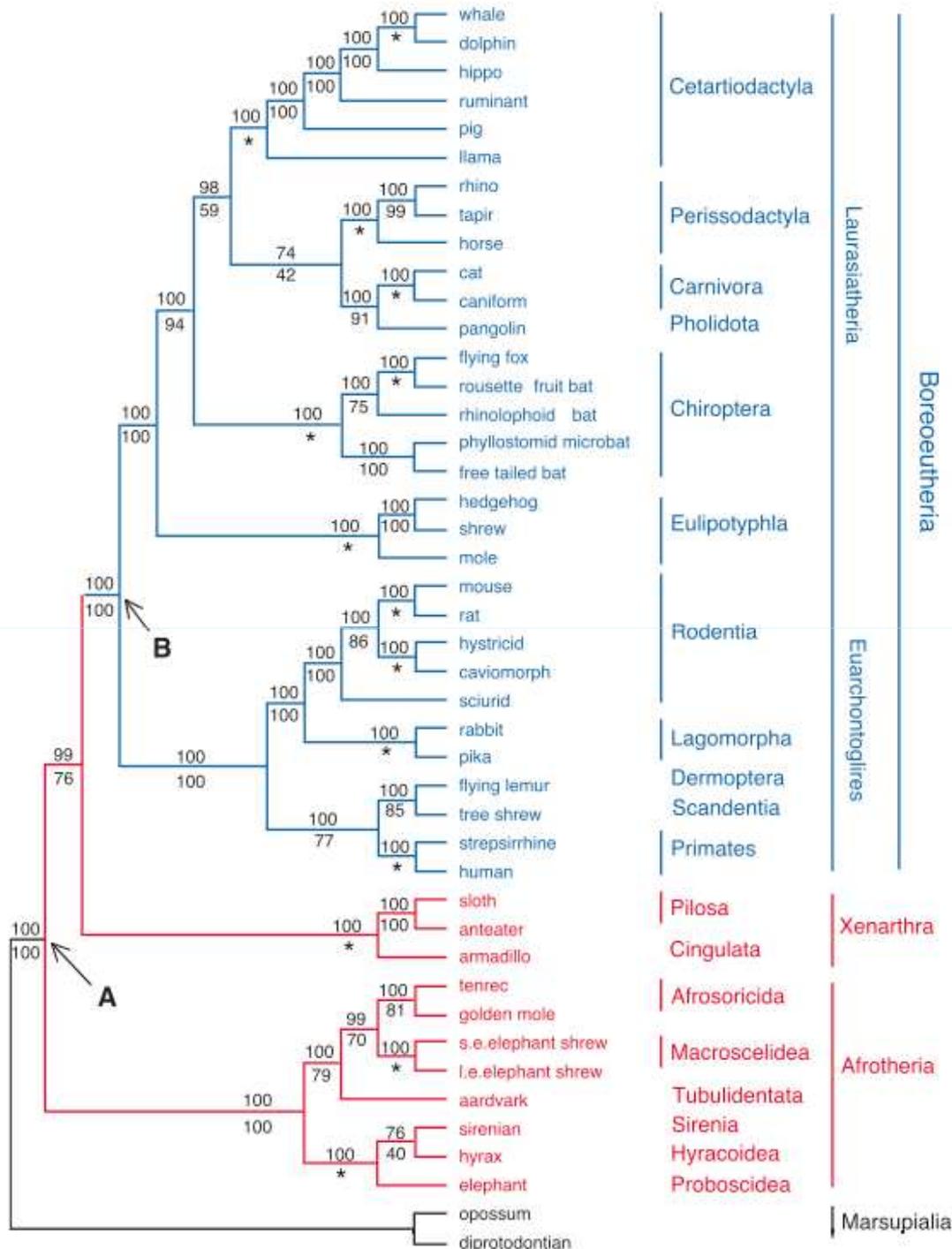
# La méiose :



# arbre phylogénétique des Hominoïdes – comparaison des ADN-







## La phylogénie des mammifères.

Les ordres (périsso-dactyles, rongeurs, primates,...) classiquement définis sont confirmés pour la plupart (sauf cétacés).

Des groupements supra-ordinaux émergent.

## Resolution of the Early Placental Mammal Radiation Using Bayesian Phylogenetics

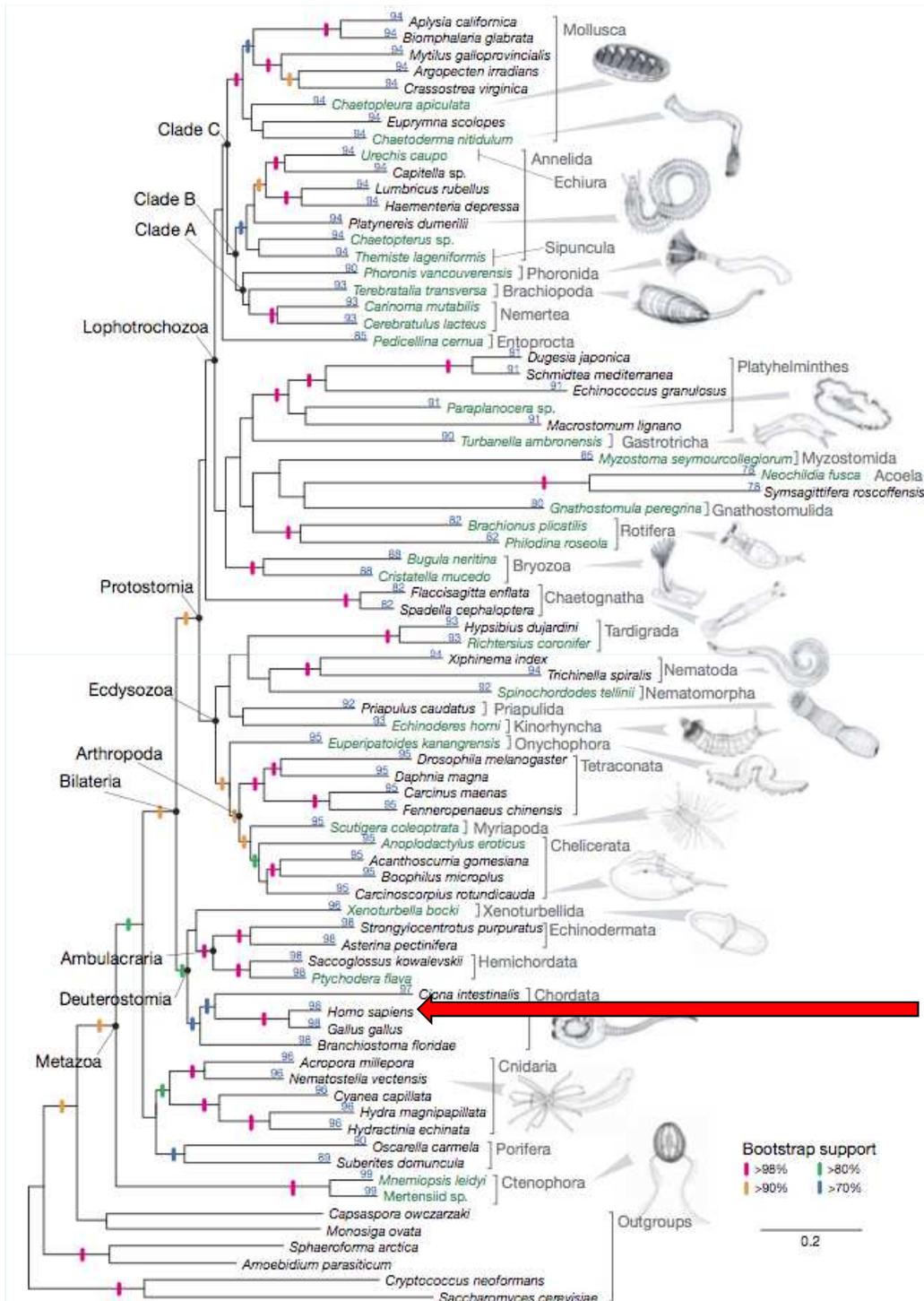
William J. Murphy,<sup>1\*</sup> Eduardo Eizirik,<sup>1,2\*</sup> Stephen J. O'Brien,<sup>1†</sup> Ole Madsen,<sup>3</sup> Mark Scally,<sup>4,5</sup> Christophe J. Douady,<sup>4,5</sup> Emma Teeling,<sup>4,5</sup> Oliver A. Ryder,<sup>6</sup> Michael J. Stanhope,<sup>5,7</sup> Wilfried W. de Jong,<sup>3,8</sup> Mark S. Springer<sup>4†</sup>

# La phylogénie des métazoaires (animaux)

- Bilatériens vs. cnidaires, porifères et cténophores

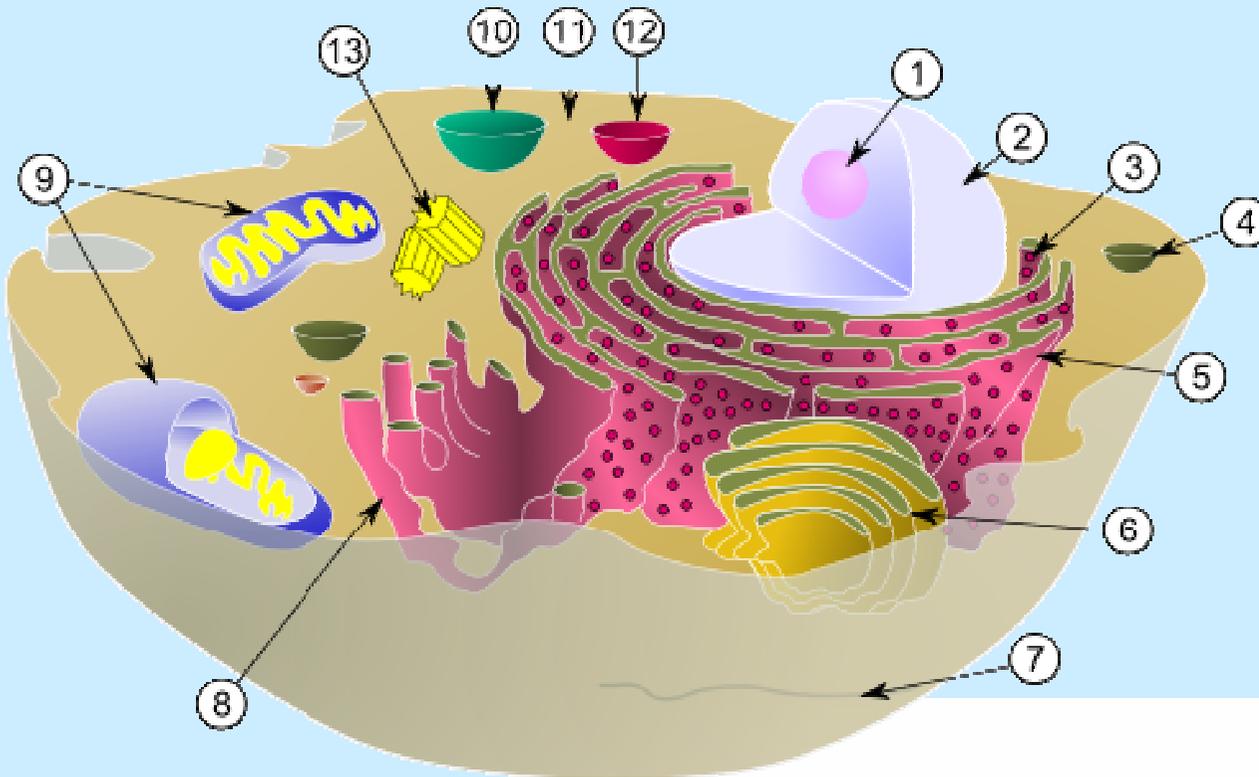
- Protostomes vs. Deutérostomes

- Abandon du concept acoelomate, pseudocoelomate, coelomate pour la phylogénie: division lophotrochozoa / ecdysozoa

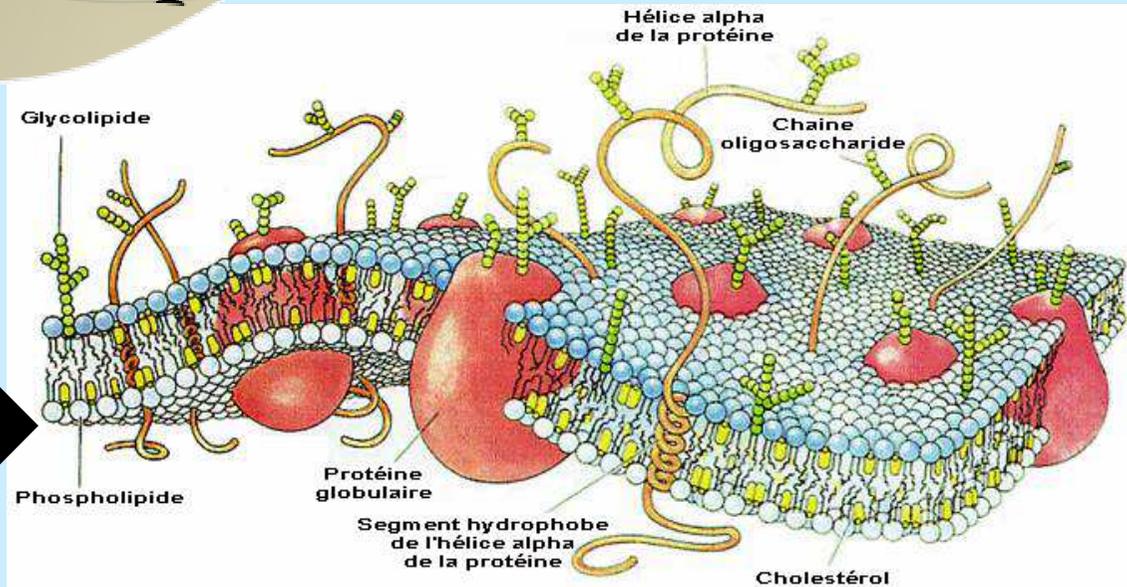
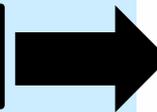


# Cellule eucaryote typique actuelle

- 1 : Nucléole
- 2 : Noyau
- 3 : Ribosome
- 4 : Vésicule
- 5 : Réticulum rugueux
- 6 : Appareil de Golgi
- 7 : Microtubule
- 8 : Réticulum lisse
- 9 : Mitochondrie
- 10 : Lysosome
- 11 : Cytoplasme (Cytosol)
- 12 : Peroxysome
- 13 : Centrosome

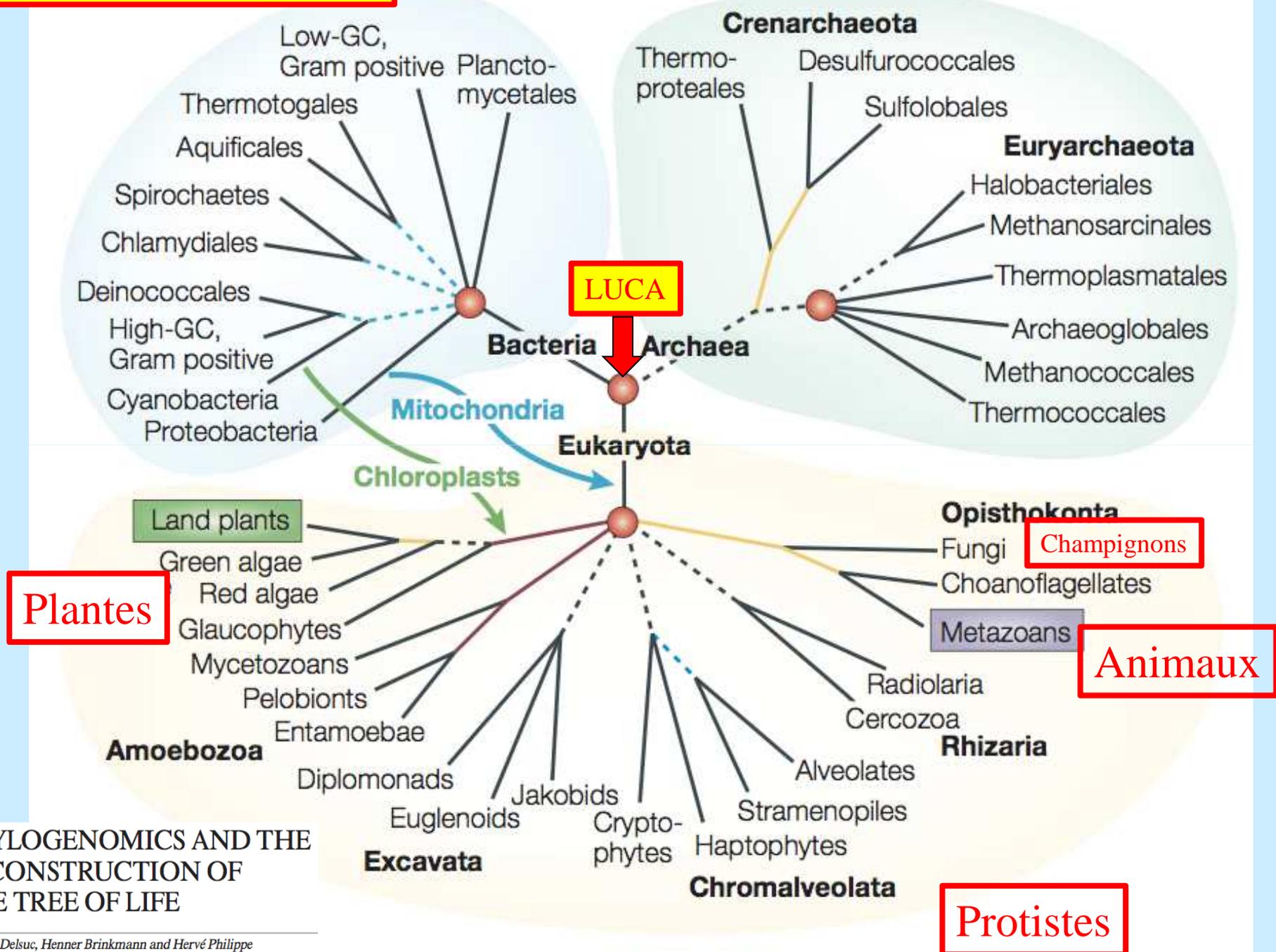


Membrane cellulaire



# Unité du monde vivant

LUCA est thermophile (80°C) ?

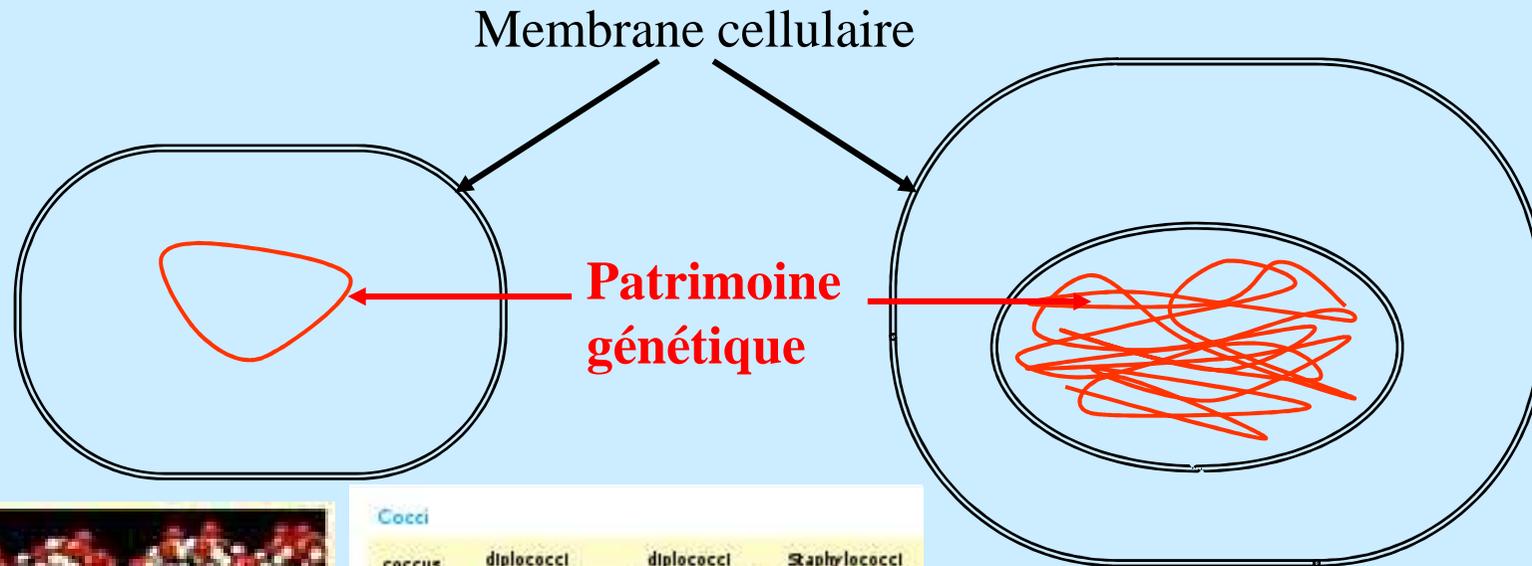


PHYLOGENOMICS AND THE RECONSTRUCTION OF THE TREE OF LIFE

# Les premières cellules : 3,8 milliard d'années

Archée / Bactérie

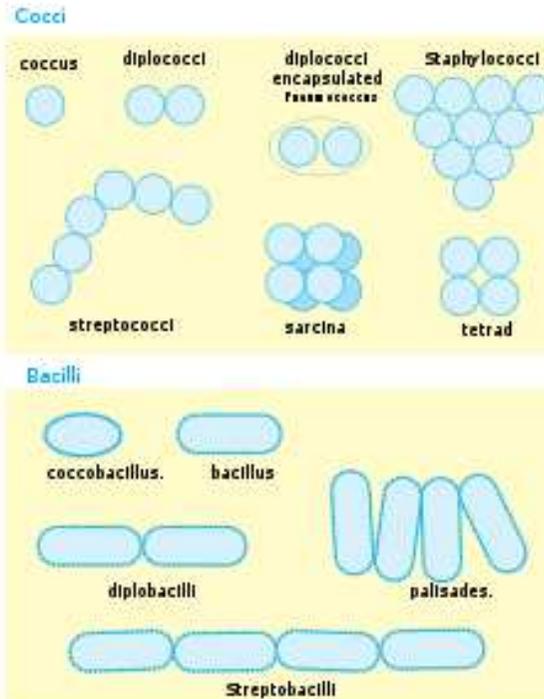
Eucaryote ancestral



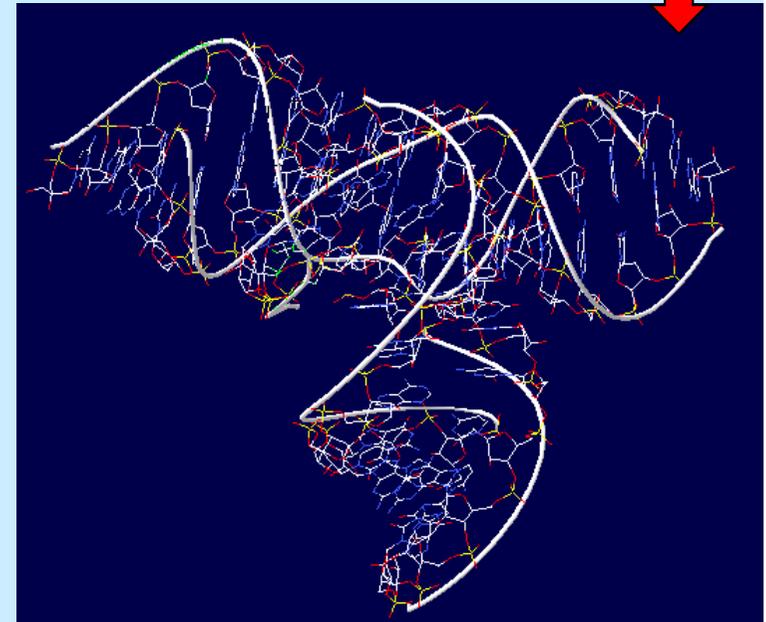
modèle d'ADN →



modèle de protéine →



ARN



## De la cellule aux éléments

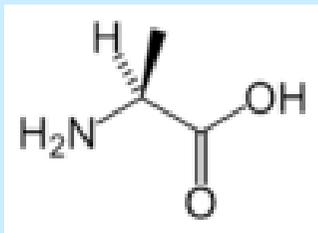
Protéine : macromolécule composée d'une ou plusieurs chaîne d'acides aminés  
(peptide : assemblage de petite taille)



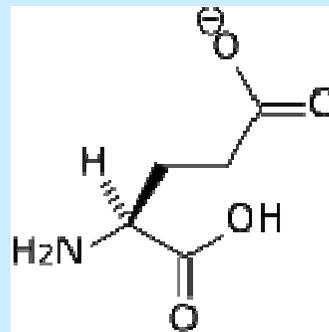
modèle de protéine →

Les acides aminés : composés chimiques possédant un groupe carboxyle  $-\text{COOH}$  et un groupe amine  $-\text{NH}_2$

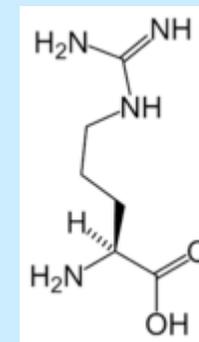
Monde vivant : 22, Humain : 9(essentiels/vitamines/extérieur) + 12 (code ADN)



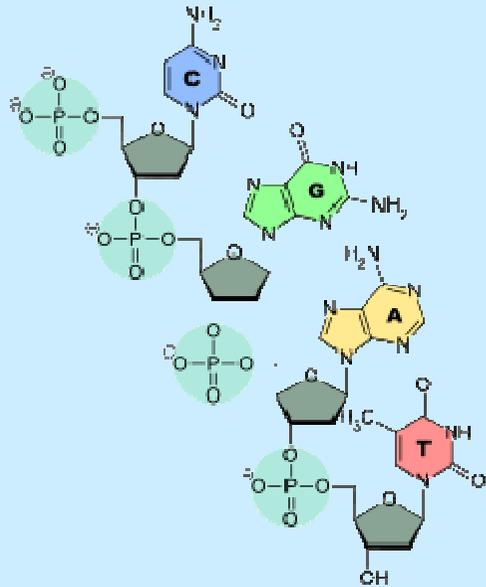
L-alanine



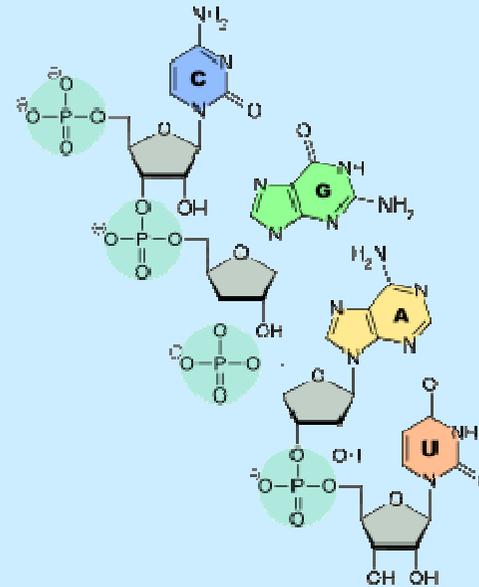
L-glutamate



L-arginine



Structure d'un brin d'**ADN**. Les quatre bases nucléiques **C**, **G**, **A** et **T** sont liées à une chaîne poly(2-désoxy-D-ribose-5-phosphate).



Structure d'un brin d'**ARN**. Les quatre bases nucléiques **C**, **G**, **A** et **U**, sont liées à une chaîne poly(D-ribose-5-phosphate).

A: Adénine G: Guanine C: Cytosine T: Thymine U: Uracile

Il faut 3 nucléotides (bases nucléiques) pour coder un acide aminé

Alanine : GCU, GCC, GCA, GCG

Arginine : CGU, CGC, CGA, CGG, AGA, AGG

Glutamate : GAA, GAG

# Synthèse prébiotique

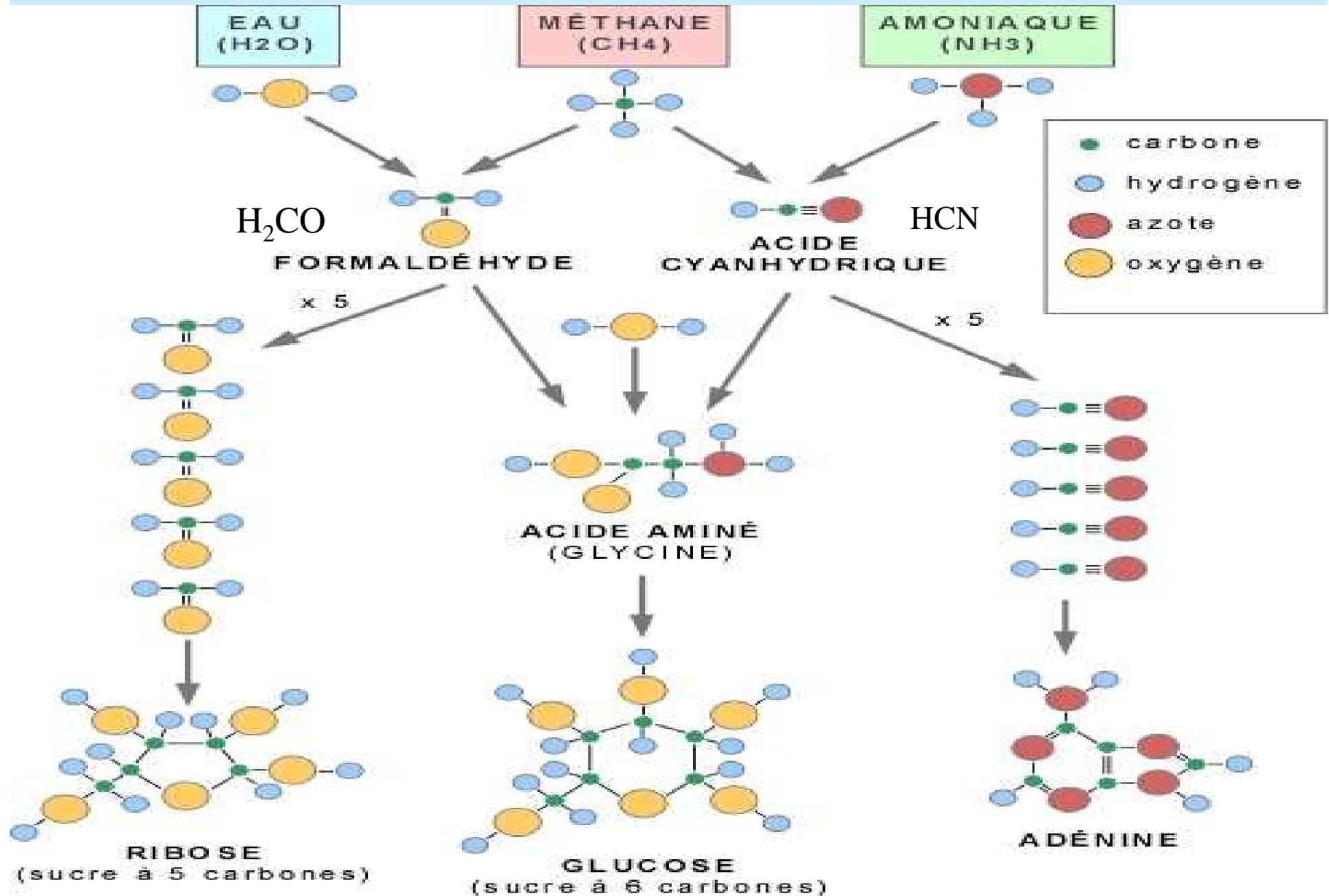
Enigme : Comment passer des molécules simples à des macromolécules puis au premier répliqueur ????

2 origines possibles :  
→ interne : atmosphère primitive  
→ externe : bombardement météoritique (1 Ga)

Expérience de Miller (1953) :  $\text{CH}_4 + \text{NH}_3 + \text{eau} + \text{décharge électrique}$  (simulation de l'atmosphère primitive) nous donne 10 acides aminés + cyanure d'hydrogène

Présence de nombreuses molécules dans l'espace ....

# Synthèse prébiotique



ACIDE AMINÉ	MÉTÉORITE MURCHISON	EXPÉRIENCE DE DÉCHARGE
GLYCINE *	• • • •	• • • •
ALANINE *	• • • •	• • • •
ACIDE $\alpha$ -AMINO-N-BUTYRIQUE	• • •	• • • •
ACIDE $\alpha$ -AMINO-ISOBUTYRIQUE	• • • •	• •
VALINE *	• • •	• •
NORVALINE	• • •	• • •
ISOVALINE	• •	• •
PROLINE *	• • •	•
ACIDE PIPÉCOLIQUE	•	•
ACIDE ASPARTIQUE *	• • •	• • •
ACIDE GLUTAMIQUE *	• • •	• •
$\beta$ -ALANINE	• •	• •
ACIDE $\beta$ -AMINO-N-BUTYRIQUE	•	•
ACIDE $\beta$ -AMINO-ISOBUTYRIQUE	•	•
ACIDE $\gamma$ -AMINOBUTYRIQUE	•	• •
SARCOSINE	• •	• • •
N-ÉTHYLGLYCINE	• •	• • •
N-MÉTHYLALANINE	• •	• •

\* Utilisé par la "vie terrestre" dans les protéines naturelles.

## A la recherche des Exoplanètes

Distinction étoile-planète :

-Étoile : \* effondrement d'un nuage de gaz

\* possède une source d'énergie interne (masse > 13 masses de Jupiter  $\sim 0.08 M_{\odot}$ )

-Planète : \* condensation de "poussières" et de glace dans un disque protoplanétaire de matériaux divers en orbite autour d'une étoile

\* n'a pas de source d'énergie interne (masse < 13 masses de Jupiter  $\sim 0.08 M_{\odot}$ )

**Une exoplanète est un corps de masse maximum environ 13 masses de Jupiter en orbite autour d'une étoile.**

Planètes flottantes :

Si par effondrement d'un nuage de gaz et de poussières le corps n'atteint pas la masse limite de 13 jupiters on a une planète flottante.

Elle n'orbite pas autour d'une étoile.

GQ Lupi

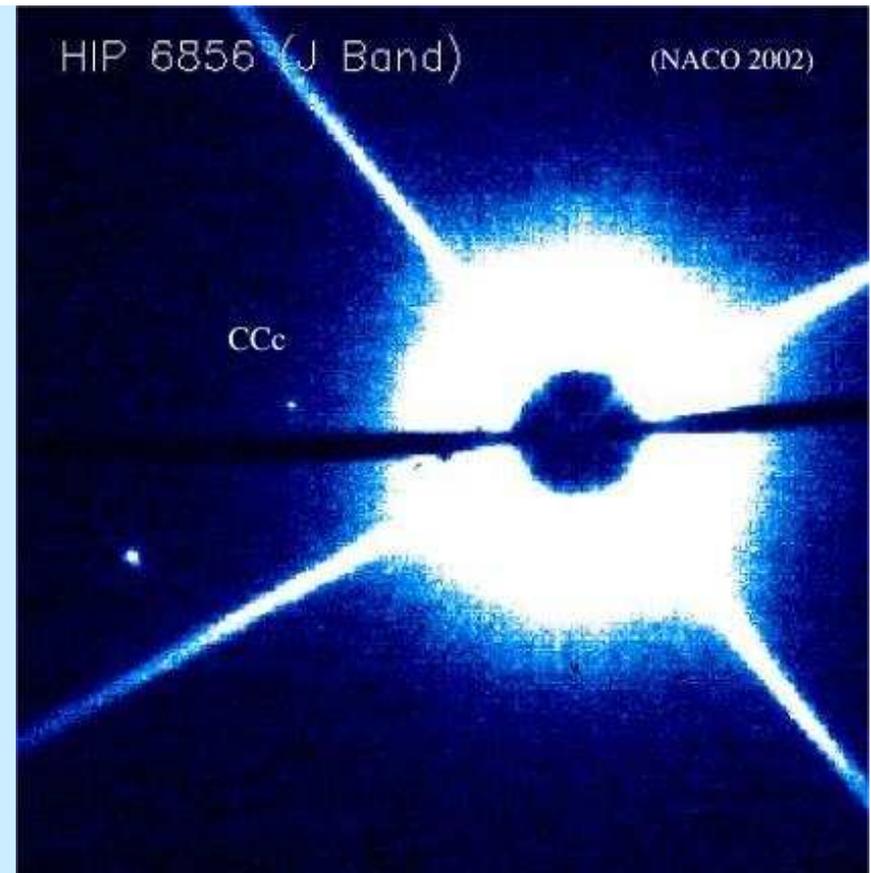
ESO VLT NACO June 2004



Neuhäuser, Guenther, Wuchterl, Mugrauer, Bedalov, Hauschildt

HIP 6856 (J Band)

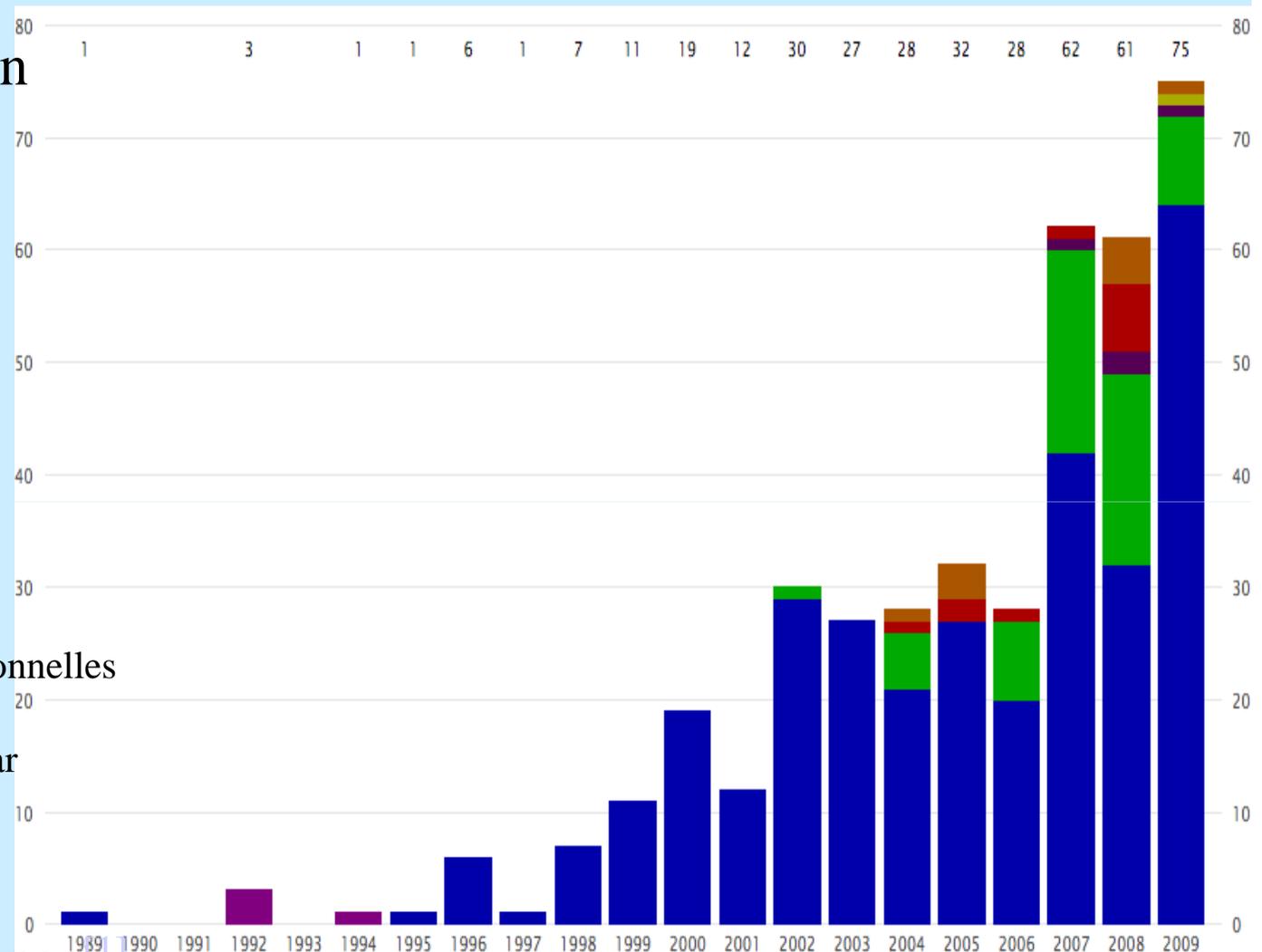
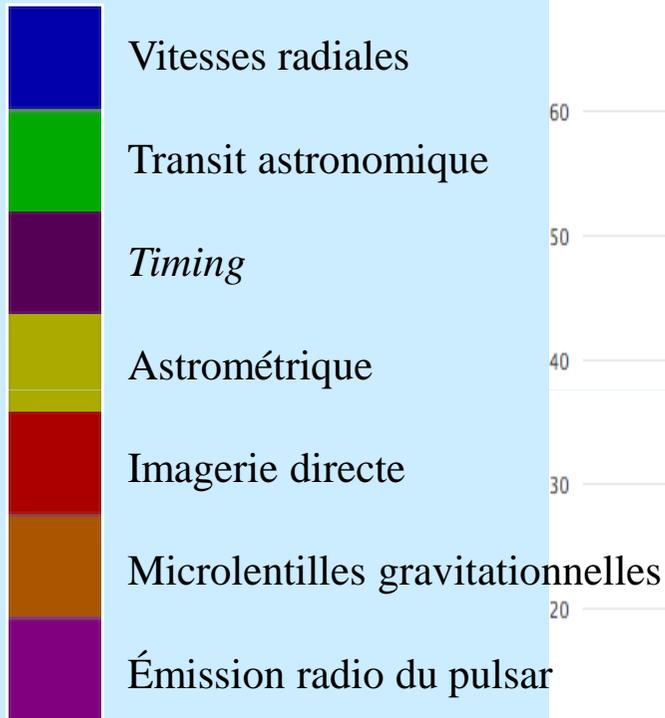
(NACO 2002)



<i>Détection</i>		<i>Vision directe</i>
<i>Méthodes</i>	<i>Techniques</i>	
Dynamiques	Vitesses radiales	Flux réfléchi - Flux thermique
	Astrométrie	Coronographie
Photométriques	Transits planétaires	
	Lentilles gravitationnelles	
	Détection décimétrique	

# Évolution du nombre d'exoplanètes découvertes chaque année

méthode de détection

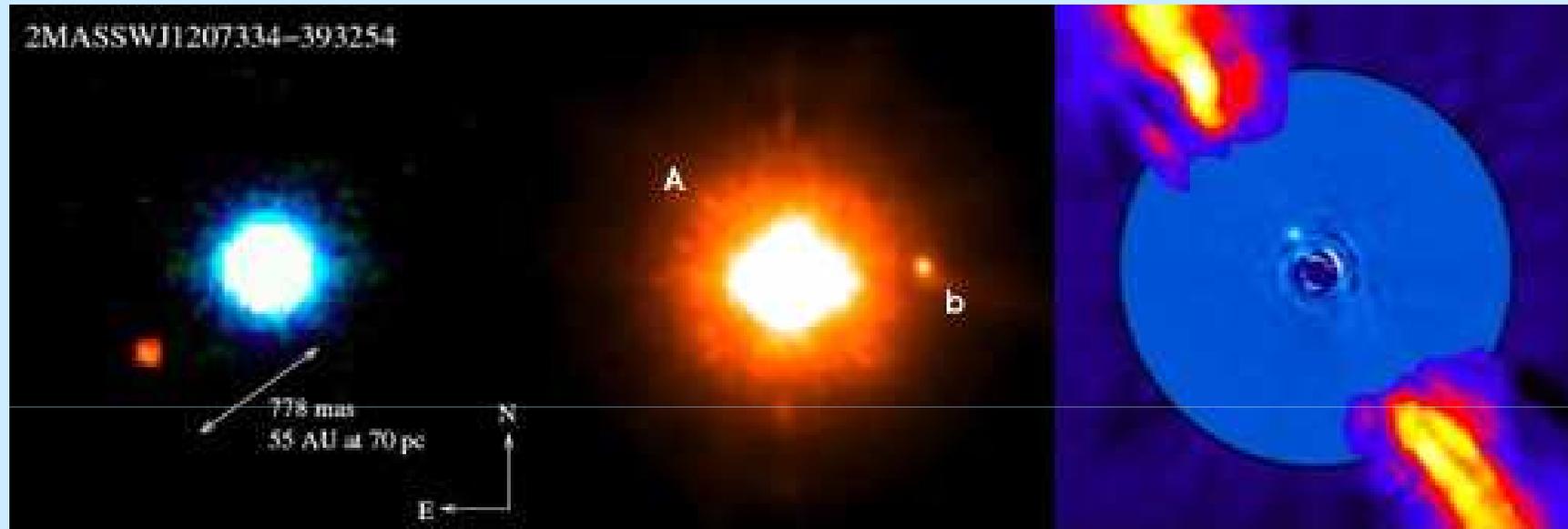


Au 9/2/2011 on recense :

528 exoplanètes.

425 systèmes planétaires dont 52 multiples.

## Images de planètes obtenues au VLT



2M1207b  
(5 MJ, 46 UA)

Gl86 b  
(17 MJ, 100 UA)

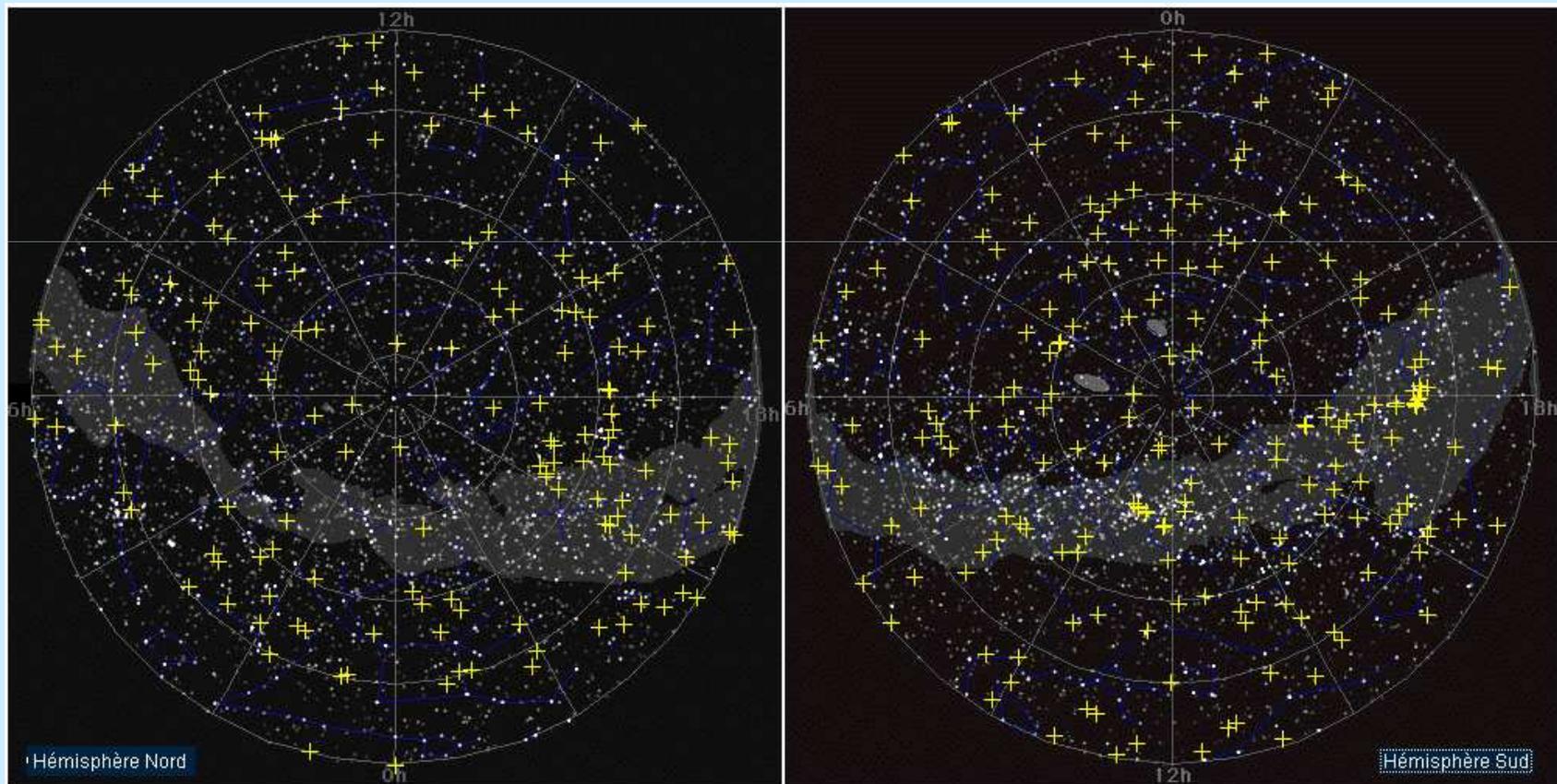
$\beta$  Pictoris b  
(8 MJ, 8 UA)

MJ : masse de Jupiter

UA : unité astronomique (150 000 000 km, distance Terre - Soleil)

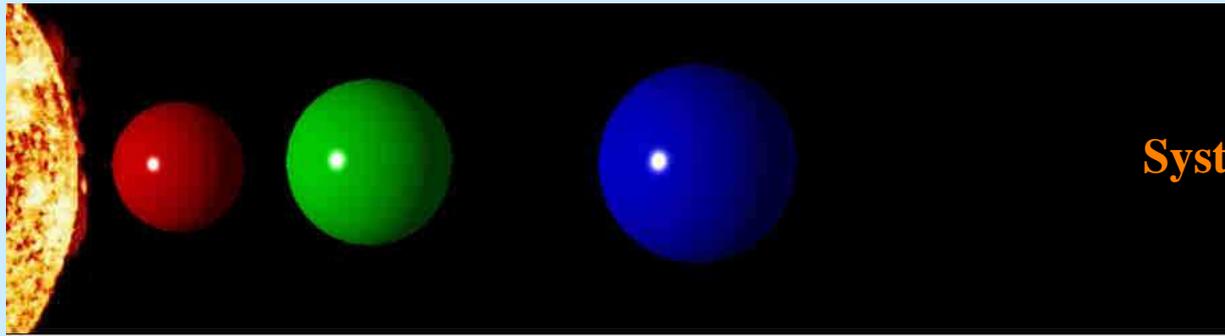
# Distribution des exoplanètes

<http://media4.obspm.fr/exoplanetes/base/>



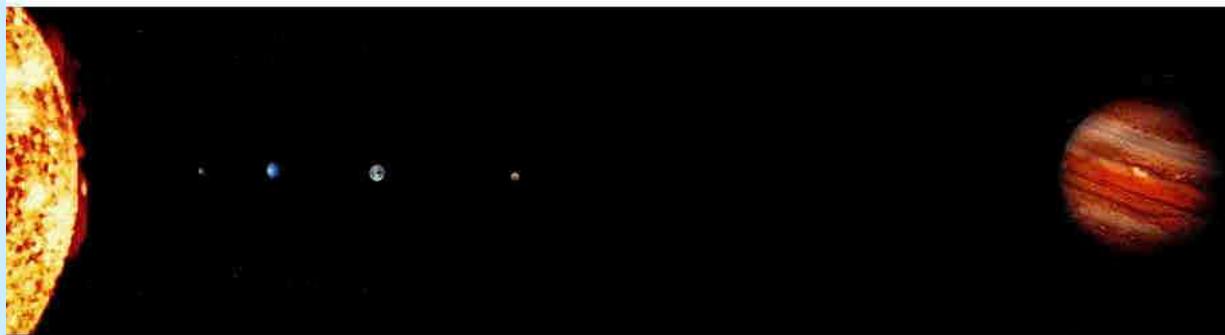
# Exemple de système exoplanétaire

**Etoile**



**Système de U Andromède**

**Soleil**



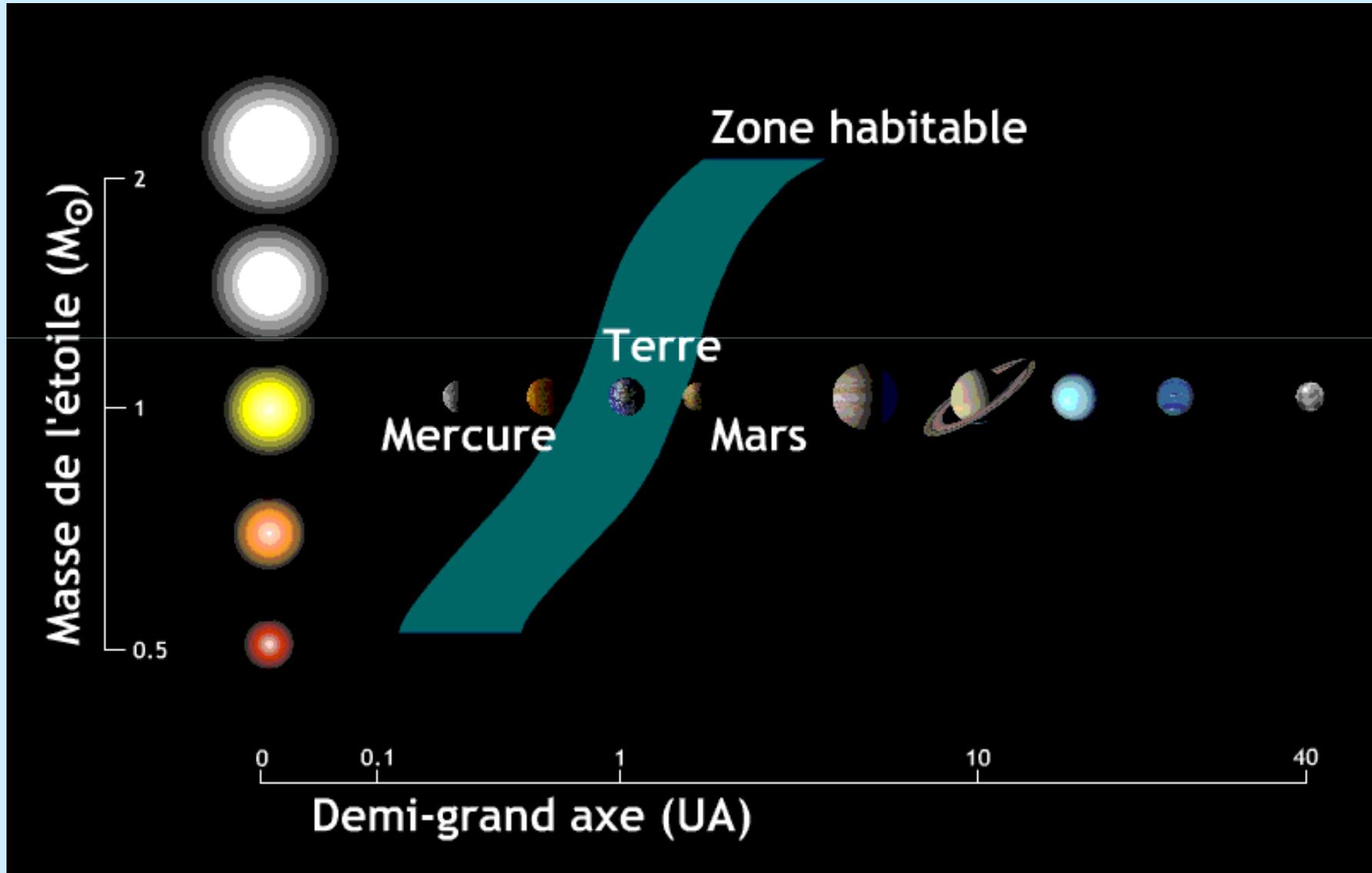
**Système solaire**

**Terre**

**Jupiter**

# La notion de zone habitable

Nécessité d'eau liquide  $\Rightarrow T \sim 10 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$



## Mission spatiale DARWIN

Prévue d'être lancée en 2015

Découvrir des planètes comparables à la Terre

Analyser leurs atmosphères

Recherche, dans l'atmosphère la présence d'ozone (O<sub>3</sub>).

Déceler éventuellement la signature chimique

*Darwin* : flottille de huit véhicules spatiaux

Six avec des télescopes d'au moins 1,5 m

Le septième combinera la lumière provenant des six premiers

Le huitième communiquera avec la Terre et le reste de la flottille. [http://www.esa.int/esaSC/120382\\_index\\_0\\_m.html](http://www.esa.int/esaSC/120382_index_0_m.html)



Le projet de mission DARWIN de l'ESA.





## But de la physique :

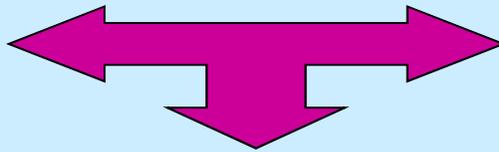
- Décrire/Modéliser/Expliquer les phénomènes naturels

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

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

## Démarche scientifique :

*EXPERIENCES*

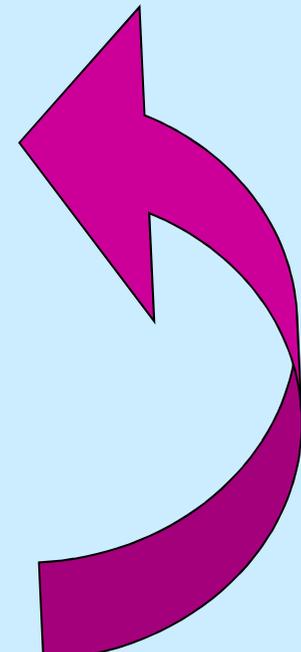


*THEORIES*

*MODELISATION*

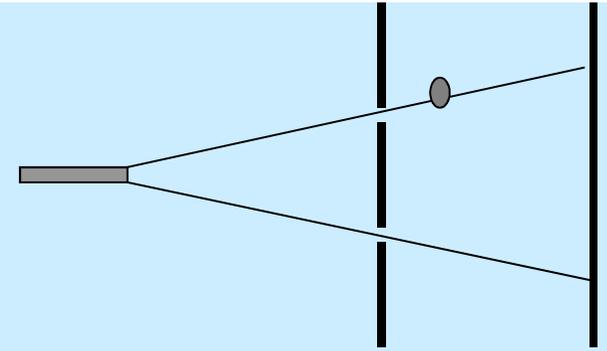
## Instruments :

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



# La dualité onde-particule

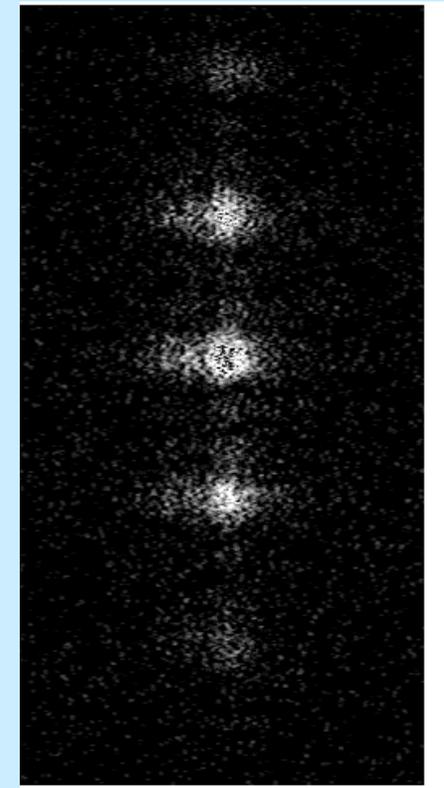
avec électron/photon/atome/neutron/proton



Comportement



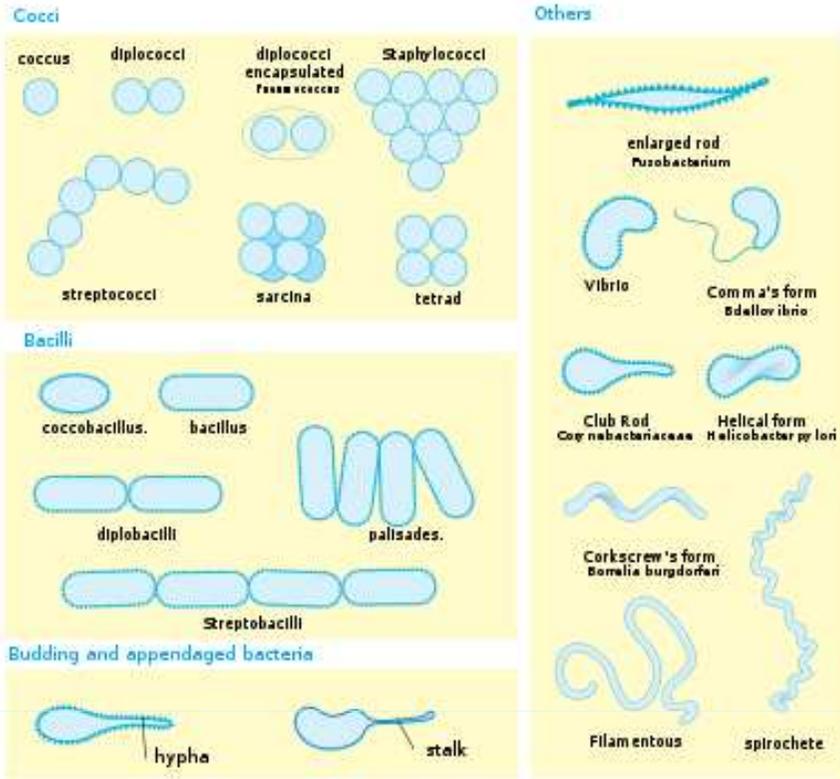
d'une particule et



d'une onde !!!!



# Bactéries



Cyanobactérie

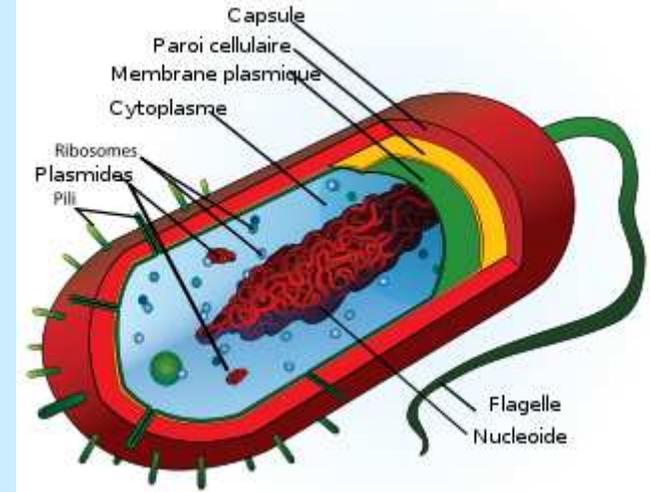
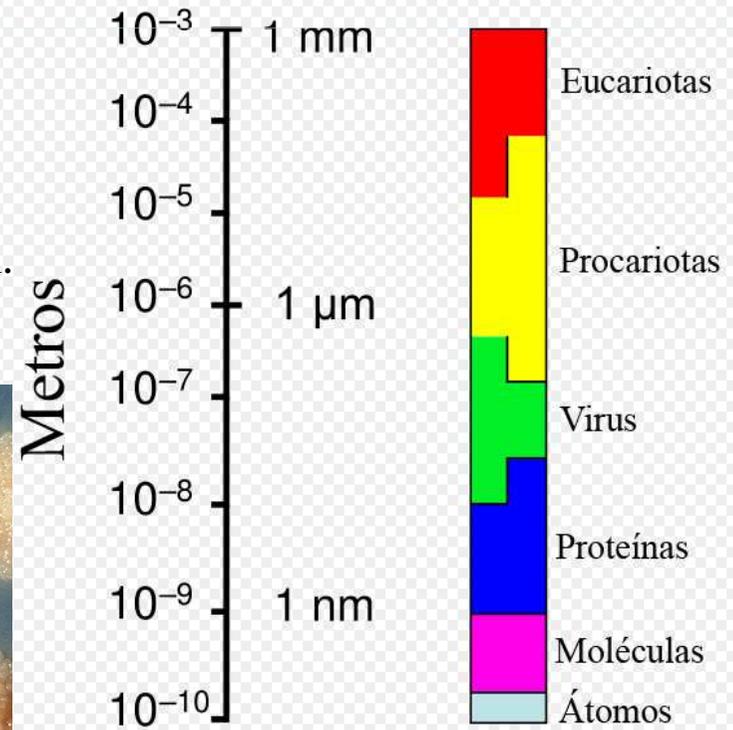
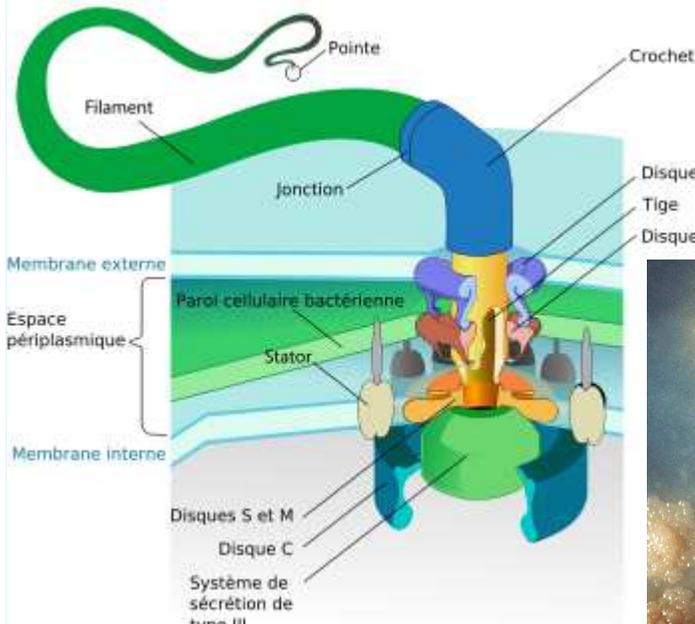


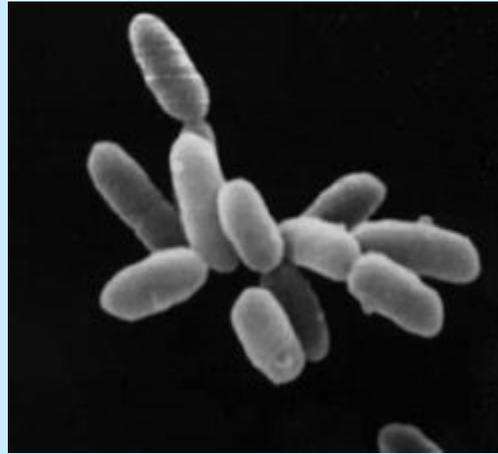
Schéma de la structure cellulaire d'une cellule bactérienne typique.

$10^{10}$  : bouche  
 $10^{12}$  : peau  
 $10^{14}$  : intestin  
 $10^{13}$  : cel. Hum.

tuberculose



## Archées

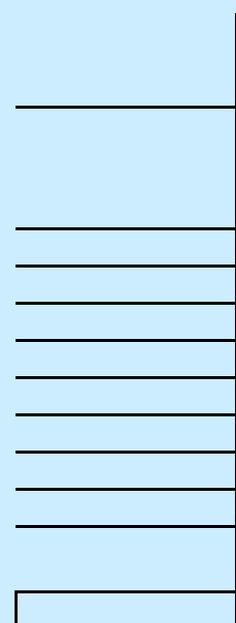


Halobacterium

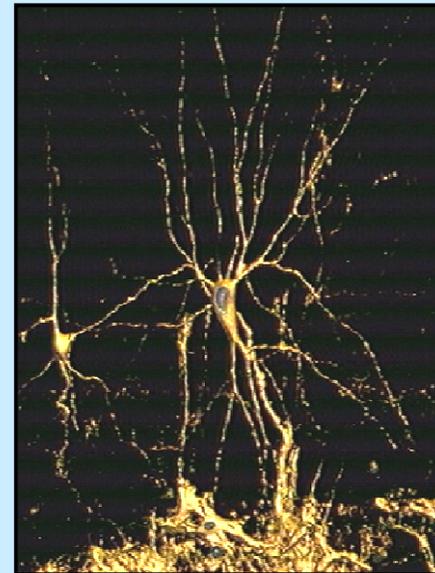
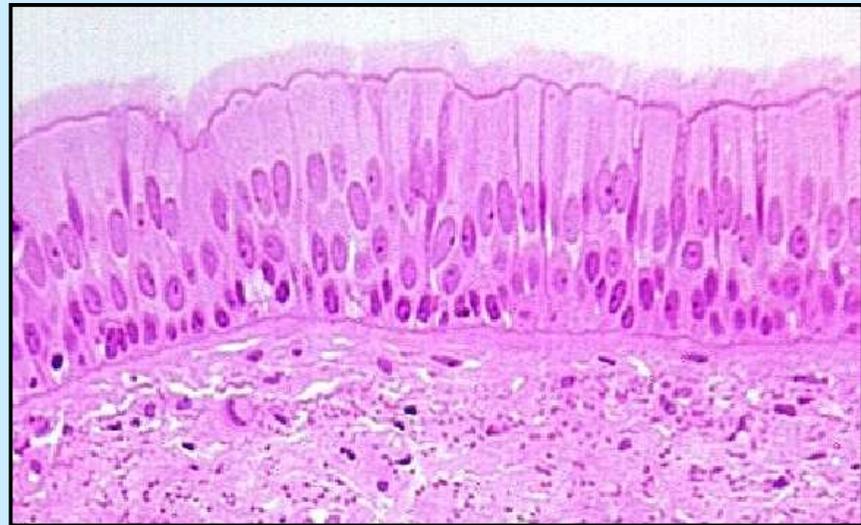
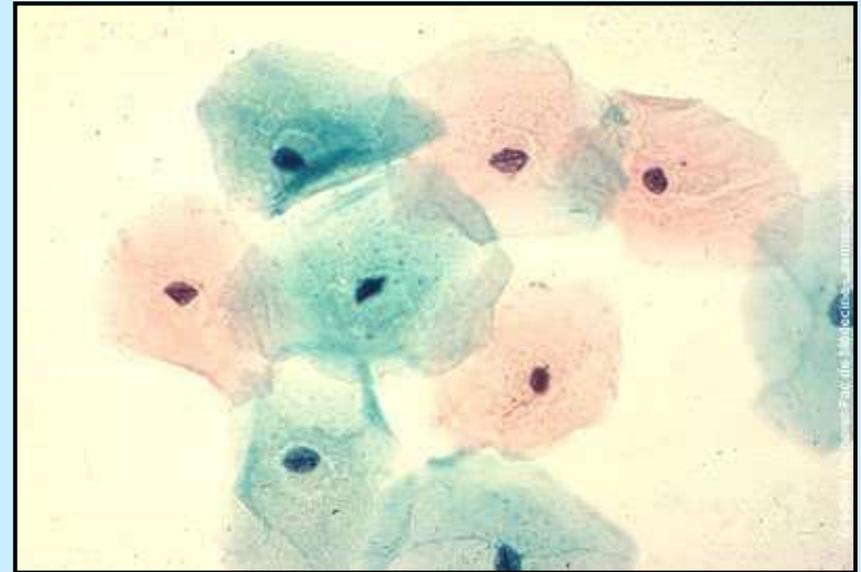
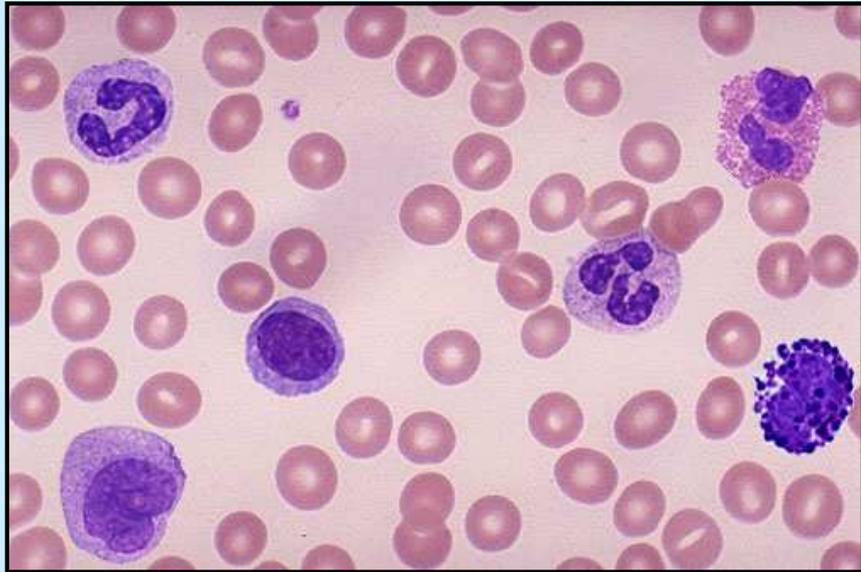
Similaire aux bactéries en taille (unicellulaire) mais différent beaucoup:

- Métabolisme (fonctionnement énergétique)
- Membrane cellulaire
- Reproduction
- Plus proche d'eucaryote que des bactéries ...
- 20% de la biomasse
- peuvent vivre en conditions extrêmes

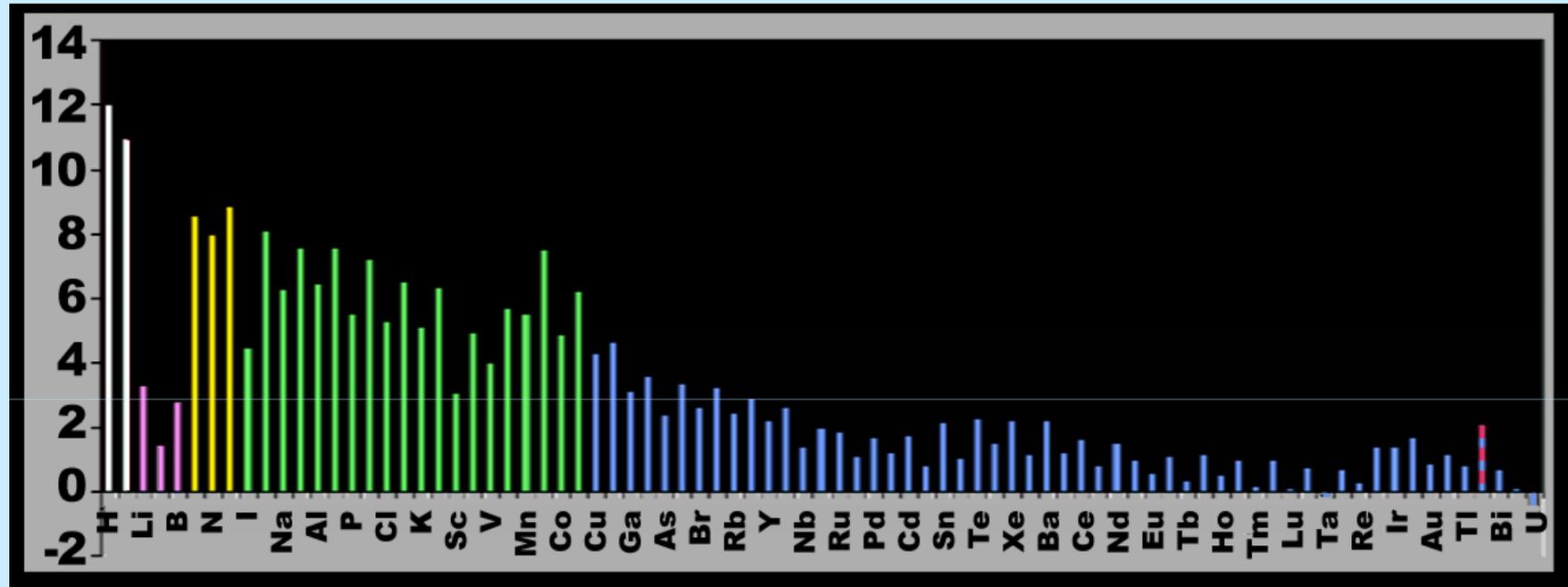
Espèce (animale)	Nombre de chromosomes	Espèce (végétale)	Nombre de chromosomes
Drosophile	8	Seigle	14
Cobaye	64	Blé	42
Mouton	54	Fougère	1200
Pigeon	16	Oignon	16
Chien	78	Crocus	6
Escargot	24	Tabac sauvage	24
Poule	78	Tabac cultivé	48
Ver de terre	36	Pomme de terre	48
Carpe	104	Pois	14
Porc	38	Tomate	36
Vache	60	Betterave	18, 27 ou 36
Chat	38	Ivraie(Ray Grass)	14 ou 28
Grenouille	24	Levure	16
Cheval domestique	64		
Cheval de Przewalski(sauvage)	66		
Mouche	10		
Zèbre	38		
Colombe	16		
Souris	40		
Rat	42		
Lièvre	48		
Hamster	22		
Vache	60		
Chimpanzé	48		
Homme	46		



# Les cellules se différencient



# Composition de l'Univers



En fait, celle du système solaire

Elle varie pour chaque astre selon divers paramètres (age, environnement ...)

constante d'Einstein

$$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = kT$$

constante de Boltzmann

$$k = 8.62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$$

constante de Planck

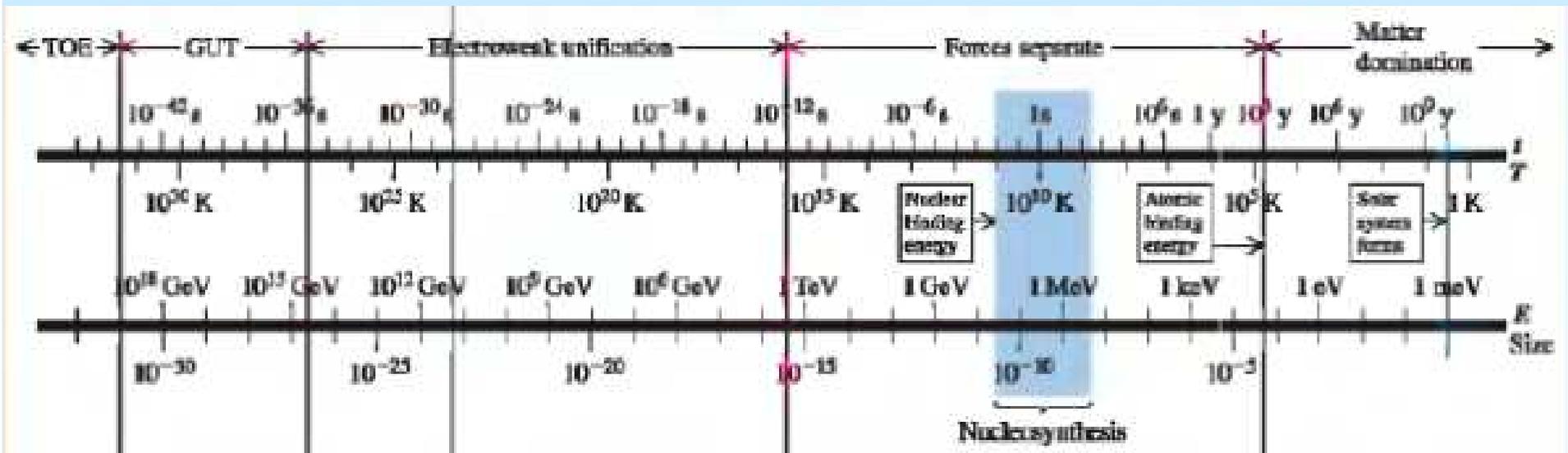
$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar$$

constante de Newton

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$$



$$M_p = \sqrt{\hbar c / G}$$

$$\approx 10^{-8} \text{ kg}$$

$$E_p = M_p c^2$$

$$\approx 10^{19} \text{ GeV}$$

$$t_p = \hbar / E_p$$

$$\approx 5 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

$$T_p = E_p / k$$

$$\approx 10^{32} \text{ K}$$

$$r_p = c t_p$$

$$\approx 10^{-35} \text{ m}$$

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> CO	HCOOH	* C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H	CH <sub>3</sub> OCHO	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO ?	HC <sub>9</sub> N	HC <sub>11</sub> N
HD	HCO	NH <sub>3</sub>	HC <sub>3</sub> N	C <sub>6</sub> H	CH <sub>3</sub> CHO	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	CH <sub>3</sub> C <sub>5</sub> N ?		
CH	HCO <sup>+</sup>	HNCO	CH <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	HCH <sub>2</sub> OH	HC <sub>5</sub> N		CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN			
CH <sup>+</sup>	CCH	H <sub>2</sub> CS	NH <sub>2</sub> CN	NH <sub>2</sub> CHO	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>		HC <sub>7</sub> N			
CN	HCN	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ?	H <sub>2</sub> CCO	CH <sub>3</sub> CN	CH <sub>2</sub> CHCN		CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H			
CO	HNC	C <sub>3</sub> H	CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> NC	C <sub>6</sub> H					
CP	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	C <sub>3</sub> O	C <sub>4</sub> H	CH <sub>3</sub> SH						
CS	H <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S	CH <sub>2</sub> NH	H <sub>2</sub> C <sub>4</sub>						
OH	OCS	C <sub>3</sub> N	* SiH <sub>4</sub>	HCC <sub>2</sub> HO						
NH	SO <sub>2</sub>	* C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>							
SO	HNO	HCCN	CH <sub>2</sub> CN							
NS	HCS <sup>+</sup>	HCNH <sup>+</sup>	C <sub>4</sub> Si							
PN	H <sub>3</sub> D <sup>+</sup> ?	HOCO <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> C <sub>5</sub>							
SiC	SiH <sub>2</sub> ?	HNCS	* C <sub>6</sub>							
SiN	* SiC <sub>2</sub>									
SiO	C <sub>2</sub> S									
SIS	C <sub>2</sub> O									
* C <sub>2</sub>	* C <sub>3</sub>									
CO <sup>+</sup> ?										
NO										
HCl ?										
* NaCl										
* AlCl										
* KCl										
* AlF ?										

Acide cyanidrique  
Alcool éthylique

Glycine :  
Premier Acide  
Aminé décou-  
vert dans  
l'espace (dans  
le Sagittaire)  
en mai 1994

Molécules, radicaux et ions détectés au début des années quatre-vingt-dix. La molécule la plus abondante dans l'espace est celle d'hydrogène. Les autres n'y sont présentes qu'à l'état de traces, dans les nuages et les complexes moléculaires. Certaines ne représentent que moins d'un millionième de la masse de ces nuages. Mais on ne peut malheureusement pas y observer directement la molécule H<sub>2</sub>, dont les raies dans l'ultraviolet sont fortement absorbées par le gaz et les poussières. Ce sont donc d'autres molécules, au premier rang desquelles on trouve le monoxyde de carbone <sup>12</sup>CO, ou sa substitution isotopique <sup>13</sup>CO, qui permettent la détection du gaz moléculaire dans l'espace. Certaines molécules composées de longues chaînes rectilignes de carbone ou d'autres, très instables au laboratoire, n'ont pas encore pu être synthétisées en laboratoire, où règnent des conditions très éloignées de celles qui prévalent dans les nuages moléculaires. Leur identification repose sur des calculs théoriques de structure moléculaire. Les molécules sont classées en fonction du nombre d'atomes. L'astérisque signifie que l'espèce a été détectée uniquement dans les enveloppes circumstellaires ; le point d'interrogation indique une incertitude sur l'identification de l'espèce.

H<sub>2</sub> + He = 99%

Tout le reste ~ 1%

TABLE 10.5.1  
Concentrations and Molecular Characteristics of Soluble Organic Compounds of Meteorites<sup>a</sup>

Class	1 Concentration (ppm)	2 Compounds Identified	3 Chain Length	4 Homologous Decline	5 Branched- or Straight-Chain Predominance	6 Structural Diversity	7 Chirality
<u>Amino acids</u>	60	74	C <sub>2</sub> -C <sub>7</sub>	yes	Br	yes	R
Aliphatic <u>hydrocarbons</u>	> 35	140	C <sub>1</sub> -C <sub>≥23</sub>	?	{ < C <sub>10</sub> Br > C <sub>10</sub> St }	{ yes no }	?
Aromatic <u>hydrocarbons</u>	15-28	87	C <sub>6</sub> -C <sub>20</sub>	NA	(Br)	yes	?
Carboxylic acids	> 300	20	C <sub>2</sub> -C <sub>12</sub>	yes	Br	yes	?
Dicarboxylic acids	> 30	17	C <sub>2</sub> -C <sub>9</sub>	yes	Br	yes	R
Hydroxycarboxylic acids	15	7	C <sub>2</sub> -C <sub>6</sub>	yes	St	yes	R
<u>Purines &amp; Pyrimidines</u>	1.3	5	NA	NA	NA	no	NA
<u>Basic N-heterocycles</u>	7	32	NA	NA	NA	yes	?
Amines	8	10	C <sub>1</sub> -C <sub>4</sub>	yes	Br	yes	?
Amides	55-70	> 2	NA	NA	NA	yes	?
Alcohols	11	8	C <sub>1</sub> -C <sub>4</sub>	yes	?	yes	?
Aldehydes & Ketones	27	9	C <sub>1</sub> -C <sub>5</sub>	yes	?	yes	?
Total	≥560	411					

<sup>a</sup>NA: not applicable; Br: branched; St: straight; R: racemic; ?: unknown.

Orgueil (Tarn et Garonne)  
14 mai 1864, à la tombée de  
la nuit

# Tableau périodique des éléments chimiques

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	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	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	--	--	--	114 --	--	116 --	--	118 --																													
<table border="1"> <tr> <td>58 Ce</td> <td>59 Pr</td> <td>60 Nd</td> <td>61 Pm</td> <td>62 Sm</td> <td>63 Eu</td> <td>64 Gd</td> <td>65 Tb</td> <td>66 Dy</td> <td>67 Ho</td> <td>68 Er</td> <td>69 Tm</td> <td>70 Yb</td> <td>71 Lu</td> </tr> <tr> <td>90 Th</td> <td>91 Pa</td> <td>92 U</td> <td>93 Np</td> <td>94 Pu</td> <td>95 Am</td> <td>96 Cm</td> <td>97 Bk</td> <td>98 Cf</td> <td>99 Es</td> <td>100 Fm</td> <td>101 Md</td> <td>102 No</td> <td>103 Lr</td> </tr> </table>																		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	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
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																																
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																																

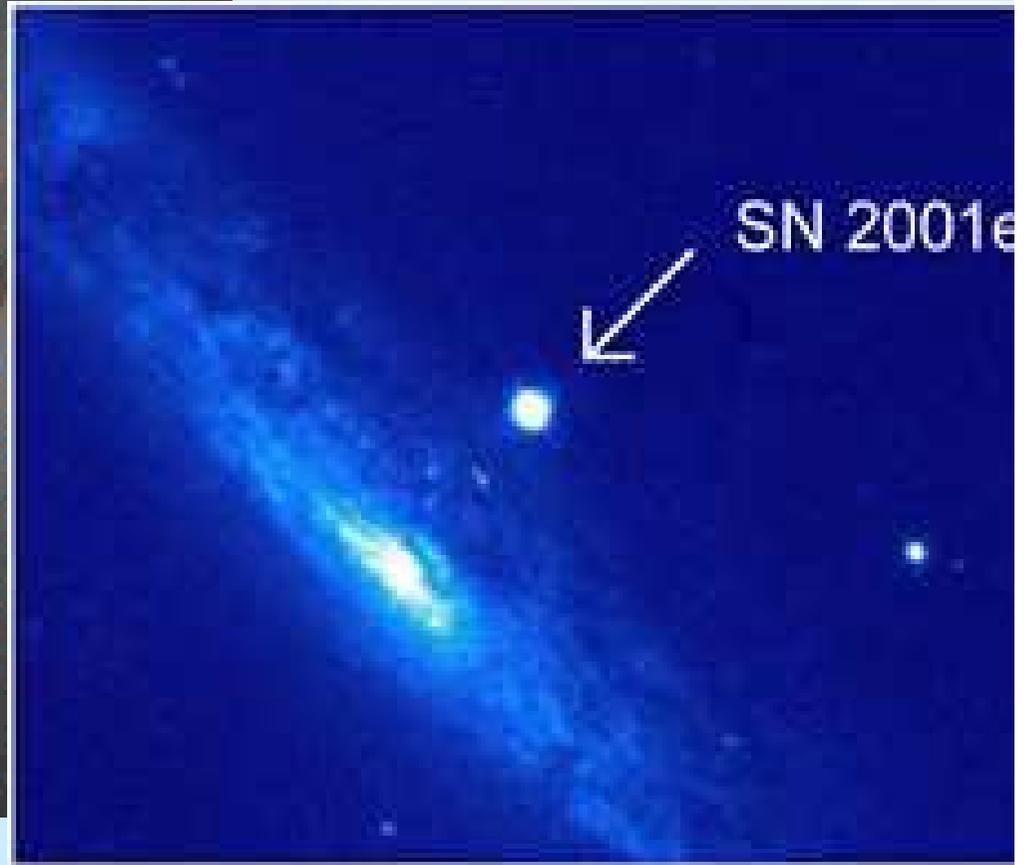
Blanc - Big Bang

Rose - Rayons Cosmiques

Jaune - Petites Etoiles

Vert - Grosses Etoiles

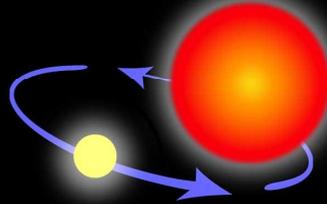
Bleu - Supernovae



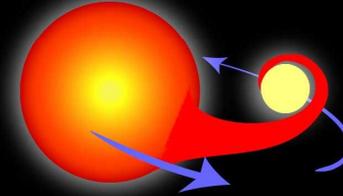
## The progenitor of a Type Ia supernova



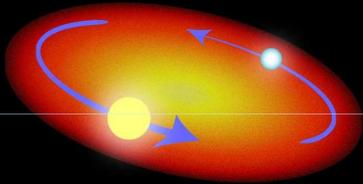
Two normal stars are in a binary pair.



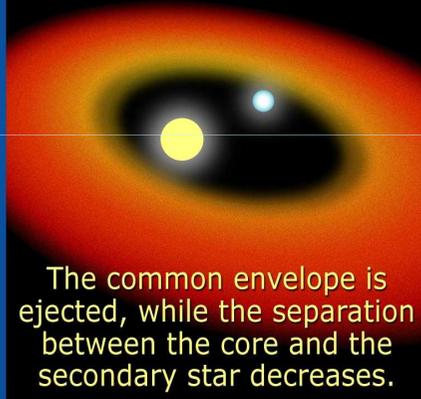
The more massive star becomes a giant...



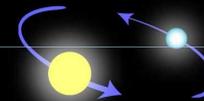
...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.



The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral inward within a common envelope.



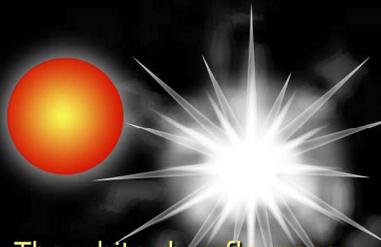
The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



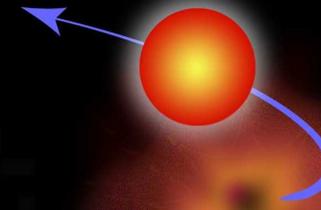
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



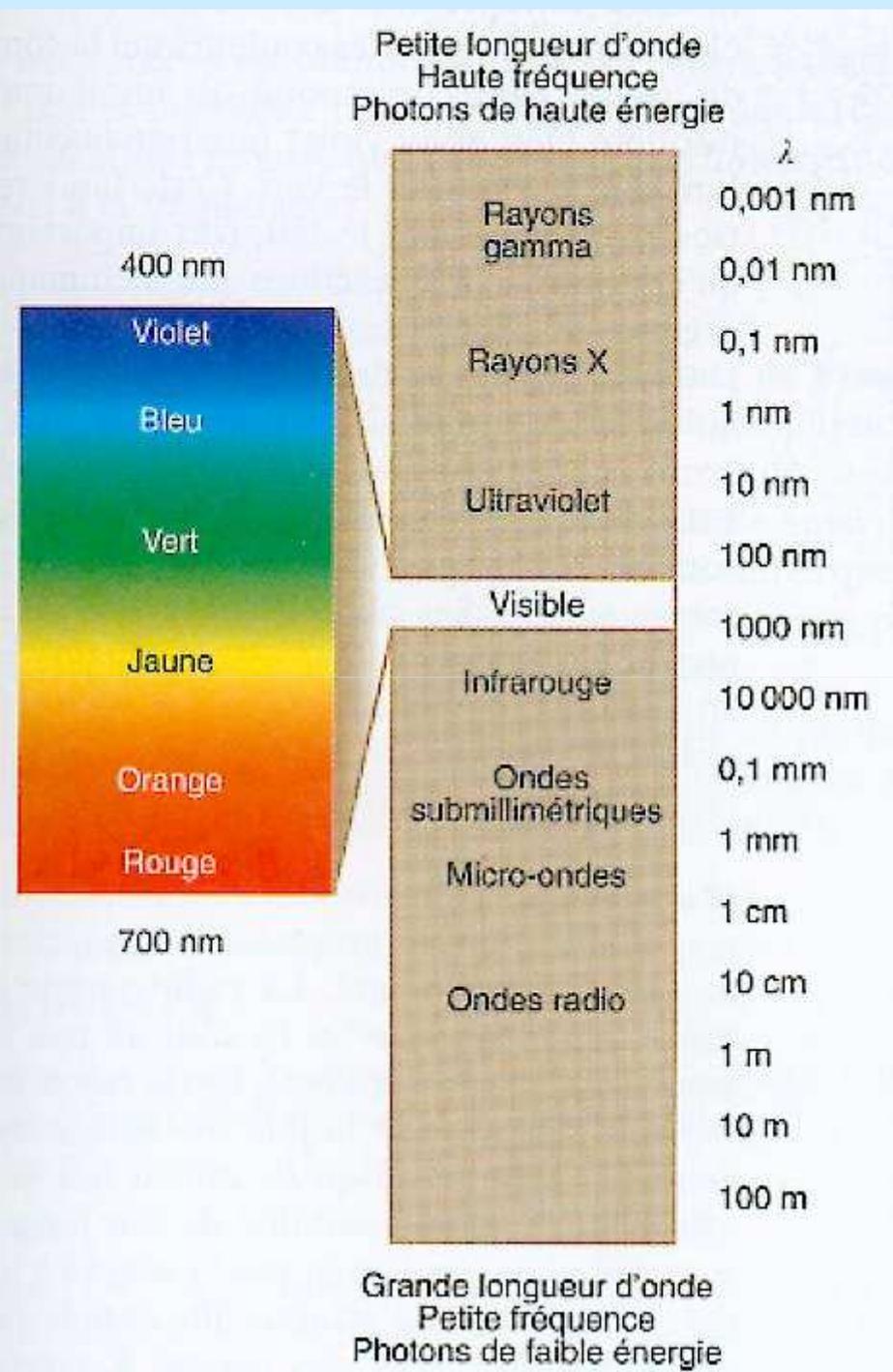
The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.



The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...



...causing the companion star to be ejected away.



Densité d'énergie/MJ.m<sup>-4</sup>

