

Astrophysique I : introduction à l'astrophysique

Prof. Jean-Paul KNEIB (jean-paul.kneib@epfl.ch)

Laboratoire d'Astrophysique: <https://lastro.epfl.ch/>

aussi Directeur Académique du EPFL Space Center: <https://space.epfl.ch/>

Assistants Doctorants: Aurélien Verdier, Mathilde Guittot, Shengyu He,

Shreeyam Krishna, Ashutosh Mishra, Elisabeth Rachith

Postdoctorant: Antoine Rocher

Cours: Lundi à 10h15, (MXF1) > **2h**

Exercices: lundi 16h15 (GRC 001) > **1h**

Exercices, corrigés et diapositives sur le Moodle:

<https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=18624>

- Polycopié couleur PDF (189 pages)
 - BOOC du MOOC

Observatoire à Sauverny





Enseignement Astrophysique à l'EPFL

Astrophysique I : introduction à l'astrophysique (Bachelor 6)

Jean-Paul Kneib : les constituants de l'univers, la formation des étoiles, des planètes, des galaxies. Les méthodes d'observation, introduction à l'astrophysique extragalactique et à la cosmologie observationnelle.

Astrophysique II : bases physiques de l'astrophysique (Master) - Automne

Pascale Jablonka : physique du rayonnement, formation des raies spectrales, thermodynamique et physique stellaire.

Astrophysique III: Formation et évolution des galaxies (Master) - Automne

Michaela Hirschmann

Astrophysique IV : dynamique stellaire et galactique (Master) - Printemps

Yves Revaz : théorie du potentiel, problème à trois corps et à N-corps, structure de la Voie Lactée et des galaxies spirales, méthode de Schwarzschild.

Astrophysique V : cosmologie observationnelle (Master) - Printemps

Jean-Paul Kneib : structure et évolution de l'univers, univers d'Einstein-De Sitter, le big-bang, matière et énergie noires, mirages gravitationnels.

TP4 Astrophysique (Master)

Astrophysique à l'EPFL

Histoire de la cosmologie

| Cours | Séminaire et travaux personnels | Prérequis | Mode d'évaluation | Particularité dans les inscriptions

Responsable(s): Pascale Jablonka (Professeure adjoint EPFL)

Intervenant(s): Pascale Jablonka (Professeure adjoint EPFL), Jamil Alioui (assistant diplômé UNIL)



Cours

Semestre: Printemps

Horaire: Vendredi 14h15 à 16h00

Salle de cours: Géopolis 1620

Nombre d'heures: 28

Histoire de la Cosmologie @UNIL:

<https://www.unil.ch/unil/fr/home/meninst/etudier/sciences2/bachelor/cosmologie.html>

Semestre: Printemps

Horaire: Vendredi 14h15 à 16h00

Salle de cours: Géopolis 1620

Nombre d'heures: 28

EPFL Astrophysics sur facebook



EPFL Astrophysics
@EPFLAstrophysics · Établissement public d'enseignement supérieur

[Modifier](#) [S'inscrire](#)

[Accueil](#) [Photos](#) [Vidéos](#) [Plus ▾](#) [Promouvoir](#) [🔍](#) [...](#) [EPFL ▾](#)

Créez une publicité [Voir tout](#)
Comment voulez-vous développer votre entreprise ?

[Booster une publication](#) [Obtenir plus de messages](#)

Publicités automatisées
Obtenez des pubs personnalisées qui s'ajustent avec le temps pour vous aider à obtenir de meilleurs résultats.

Outils Facebook Business gratuits

[Ajoutez des réservations de rendez-vous](#)
Affichez vos services et votre disponibilité afin que les...

[Organisez des événements en ligne payants](#)
Créez des événements en ligne que les participants peuvent...

[Affichez votre menu](#)
Facilitez la navigation de votre menu et la commande sur...

Créer une publication

[Photo/Vidéo](#) [Recevoir des messages](#)

[Créer](#) [En direct](#) [Événement](#) [...](#)

EPFL Astrophysics
Publié par Frederic Courbin · 19 février, 13:20 ·

219 Personnes touchées 17 Interactions [Booster la publication](#)

[Vous et 10 autres personnes](#)

[J'aime](#) [Commenter](#) [Partager](#)

[Commenter en tant que EPFL Astrophys...](#) [Foto](#) [Video](#) [Galerie](#) [Partager](#)

Astrophysique à l'EPFL

Club astro CALLISTA -> <https://callistaepfl.ch/>

Callista – Association d'astronomie

Le club d'astronomie de l'EPFL



Callista est une association d'étudiants dont les buts sont la **pratique** et la **promotion de l'astronomie amateur** sur le campus de Lausanne.

Événements



[Calendrier des événements du club](#)

[Observations](#)

[Des Lumières dans la nuit](#)
19 Mars 2020

Plusieurs projets, dont SSA (Space Situation Awareness):

<https://ssaepfl.com/>



<https://courseware.epfl.ch/courses/course-v1:EPFL+astrophysics+2024/about>

MOOC d'astrophysique



Courses ▾ How It Works ▾ Schools & Partners About ▾

I want to learn about...

Dashboard



Introduction à l'astrophysique - Introduction to Astrophysics

Ce cours décrit les principaux concepts physiques utilisés en astrophysique. Il est proposé à l'EPFL aux étudiants de 2eme année de Bachelor en physique. This course describes the main physical concepts used in astrophysics. It is proposed, at EPFL, to the 2nd year students from the Bachelor in Physics.

Starts on February 29, 2016

You Are Enrolled

EPFL <http://courseware.epfl.ch>

About this course

2 Reviews 4/5

Comment étudier l'Univers dans lequel nous vivons en utilisant la seule information qu'il nous envoie: la lumière ? Ce cours donne un aperçu des phénomènes physiques qui se cachent derrière les objets astronomiques qui nous entourent, des planètes et des étoiles jusqu'aux filaments cosmiques, en passant par les galaxies comme notre Voie Lactée et les amas de galaxies. Le cours met l'accent sur le

See more

What you'll learn

Vision globale de l'univers depuis les échelles planétaires au échelles cosmologiques (Global perception of the universe from planetary to cosmological scales)

Les échelles de temps et d'espace qui caractérisent les objets célestes (Typical temporal and spatial scales in celestial bodies)

Les processus physiques expliquant notre perception des astres (Physical processes at play in

Length: 7 weeks

Effort: 4 hours/week

Price: FREE
Add a Verified Certificate for \$50

Institution: EPFLx

Subject: Math

Level: Intermediate

Languages: English, Français

Video Transcripts: English, Français

Astrophysique I : quelques ouvrages de référence

The new cosmos : Unsöld et al. (Springer)

Fundamental astronomy : Karttunen et al. (Springer)

Modern astrophysics : Carroll & Ostlie (Addison Wesley)

Galactic dynamics : Binney & Tremaine (Princeton Univ. Press)

Galactic astronomy : Binney & Merrifield (Princeton Univ. Press)

Extragalactic astronomy and cosmology : Schneider (Springer)

+ **MOOCs (Massive Open Online Course)** sur [edx.org](#) et [coursera.org](#)

Réponses aux « questions fréquentes »

Faut-il venir aux cours?

OUI, le cours, (le polycopié), le MOOC et les exercices sont complémentaires

L'examen porte-t-il aussi sur les exercices?

OUI

Y a-t-il un travail écrit à rendre?

En général non - probablement exercices sur Jupyter notebook (à confirmer)

Que doit-on retenir?

Vision globale du sujet et les bases physiques, qui sont techniquement simples.

En quoi consiste l'examen?

Examen écrit - pas de documents

L'astrophysique: que fait-on en pratique ?

1. Recherche théorique et observationnelle : universités partout dans le monde
2. Recherche en observatoire : grands observatoires optiques (Hawaii, Chili, Iles Canaries, Australie, Afrique du Sud ...) et radio (USA, UK, Hollande, Australie, Afrique du Sud ...)
3. Assistance d'observations spatiales (USA, Canada, Europe, Japon, Chine, Inde, ...)
4. Agences spatiales NASA, ESA (ESTEC), CNES, DLR, JAXA, CNSA, ...
5. Liens avec les entreprises : en général à travers une participation à la construction d'un satellite ou à d'un instrument pour les télescopes au sol.

Les grandes questions du XXI^{ème} siècle

1. Comment l'Univers s'est-il formé et comment évolue-t-il ?
2. Existe-t-il de la vie ailleurs que sur Terre, autour d'autres étoiles ?
3. Tests de la physique fondamentale (relativité générale, variation des constantes physique, ondes gravitationnelles)

La Suisse est fortement impliquée dans les trois sujets !

La Terre vue depuis Saturne et Mercure le 19 juillet 2013



Le Very Large Telescope (VLT) de l'ESO (European Southern Observatory)



Le Very Large Telescope de l'ESO: 4 x 8m de diamètre (European Southern Observatory)



Etudiants de l'EPFL à Cerro Paranal (2011)



ALMA: Atacama Large Millimeter Array
(interférométrie avec 66 antennes : ESO, USA, Japon)



50 antennes de 12 m de diamètre sur le site de Llano de Chajnantor Observatory (5000 m),
plus 4 x 12 m et 12 x 7 m antennes

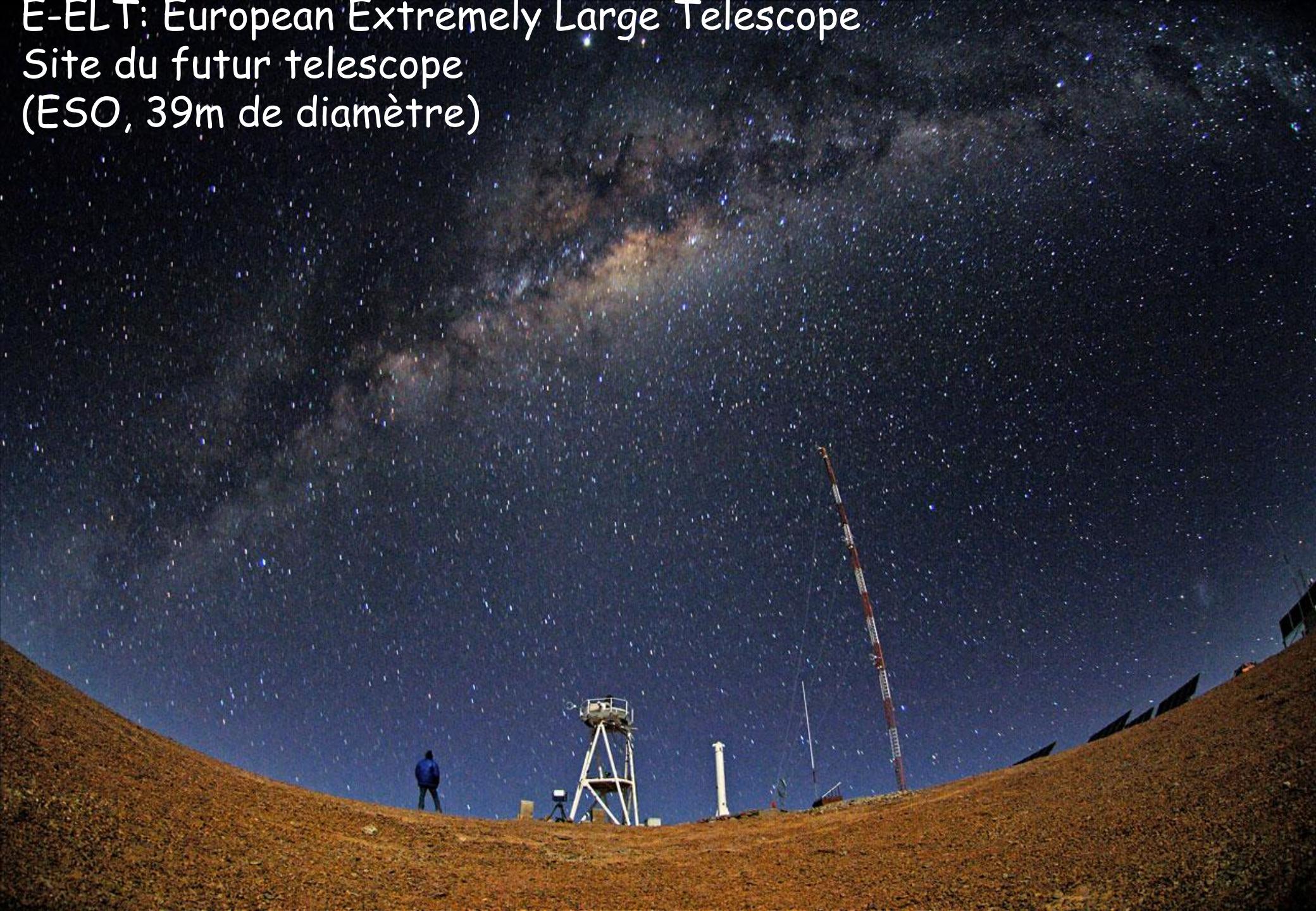
ALMA: Atacama Large Millimeter Array (interférométrie avec 66 antennes : ESO, USA, Japon)



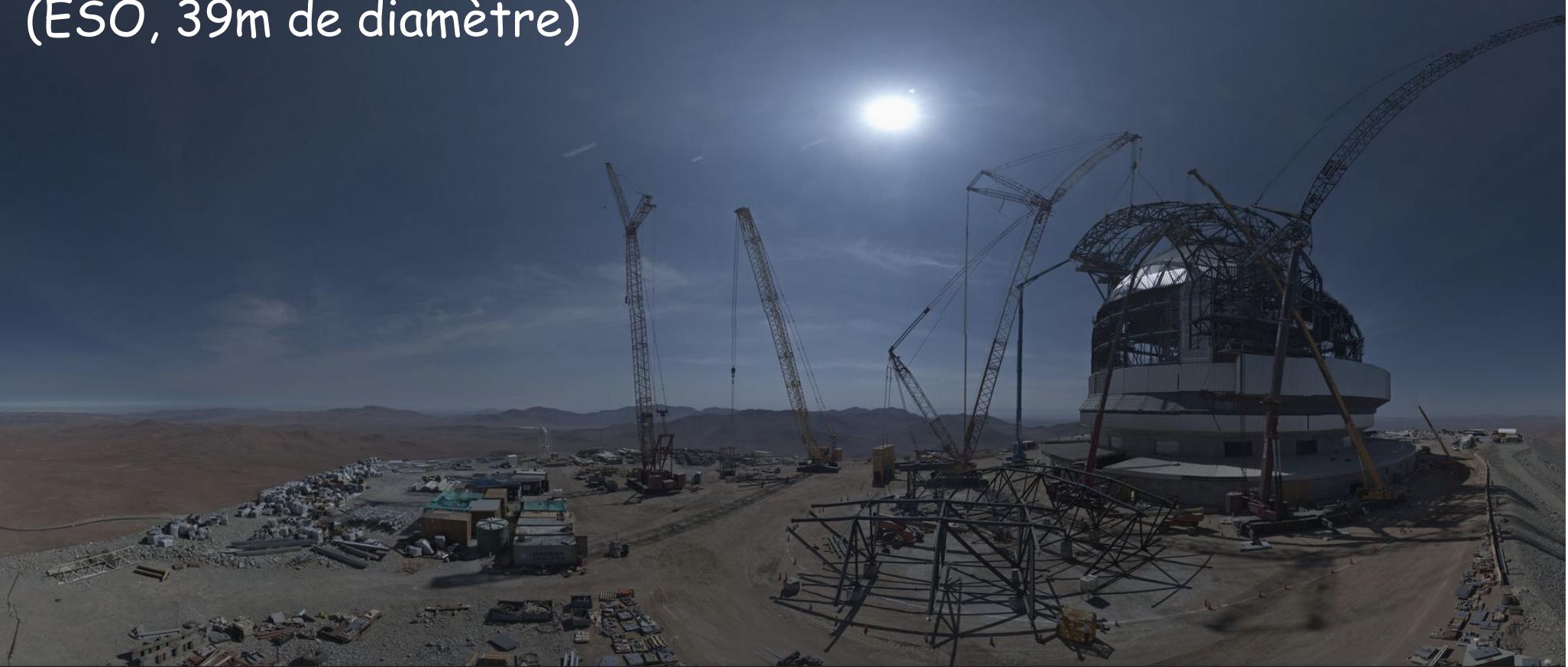
50 antennes de 12 m de diamètre sur le site de Llano de Chajnantor Observatory (5000 m),
plus 4 × 12 m and 12 × 7 m antennes

E-ELT: European Extremely Large Telescope

Site du futur telescope (ESO, 39m de diamètre)



E-ELT: European Extremely Large Telescope
14 février 2025
(ESO, 39m de diamètre)



MeerKAT: précurseur du Square Kilometer Array (onde centimétriques) Afrique du sud et Australie



SKAO: Square Kilometer Array Observatory
(onde centimétriques - métriques)
Afrique du sud et Australie



Bref historique

Astronomie et Astrophysique « avant »



Hevelius à Dantzig, 1673, 30 ans après Galilée.
Carte lunaire, « premiers » catalogues d'étoiles.

Astronomie et Astrophysique « maintenant »

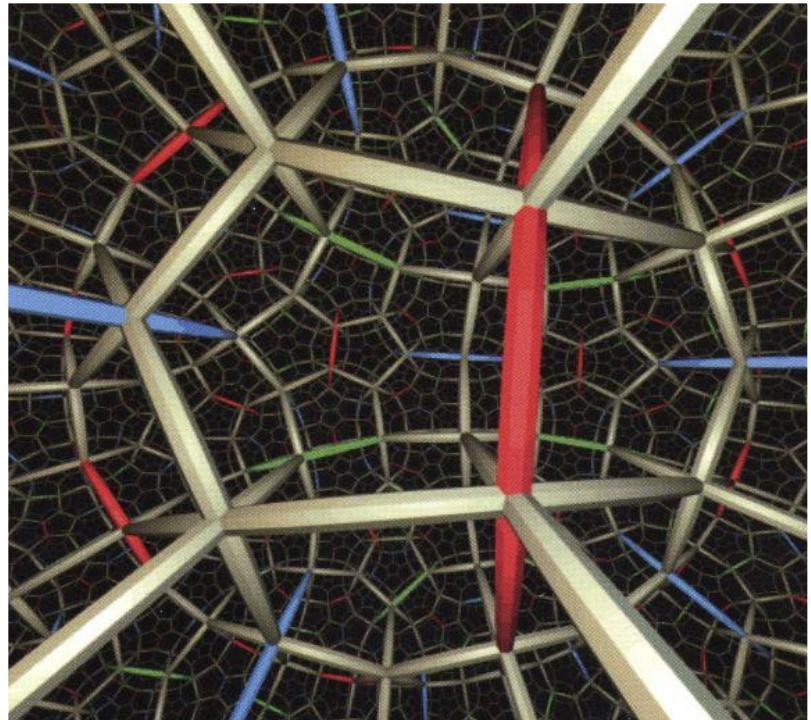


Paradoxe du bord ou ce que l'astrophysique n'explique pas ... ou presque



Gravure de 1888: est-il possible d'envisager un Univers fini, mais sans frontières ?

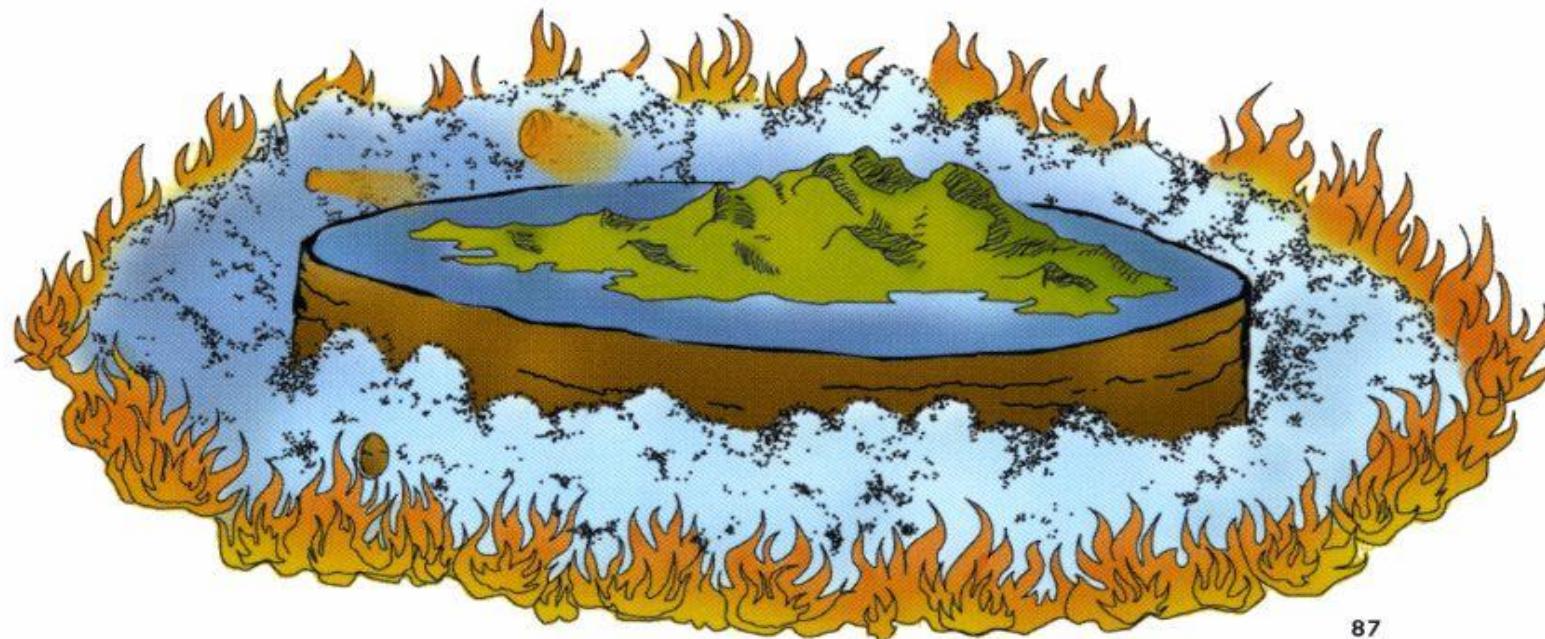
Univers multi-connexes,
donnant l'impression d'infini



Anaximandre (c. 610 - c. 546 av. J.-C.)

La Terre est fixe au centre du monde. Elle est composée des éléments fondamentaux: l'eau chez Thalès, l'air et le feu, chez Anaximandre.

Il en est de même chez Aristote et Platon au IV ème av. J.-C.



87

La Terre est plate - très vieux concept !

Le Soleil au centre du monde

- Héraclide (c. 388 - c. 315 av. J.-C., né à Héraclée du Pont) Tandis que Platon, Aristote et leurs disciples repoussent les théories hasardées sur la mobilité de la Terre, Héraclide les étudie.
- Héraclide explique le mouvement diurne par une rotation directe et uniforme du globe terrestre autour de son axe passant par les deux pôles. Cette rotation s'effectue en un jour sidéral, et Héraclide a bien observé que sa durée est légèrement inférieure (de quatre minutes) à celle du jour solaire.
- Mercure et Vénus déconcertent les astronomes: leur marche sur la sphère céleste dépend visiblement de celle du Soleil. Le modèle d'Héraclide postule que le Soleil est immobile au centre du monde. La Terre et cinq autres planètes décrivent autour du Soleil des orbites circulaires. Les cercles de Mercure et Vénus sont à l'intérieur de l'orbite terrestre, tandis que les cercles de Mars, Jupiter et Saturne sont à l'extérieur. La Lune tourne autour de la Terre, dont la rotation propre produit l'apparence du mouvement diurne.
- Dès lors, la sphère céleste est brisée et Héraclide soutient un univers sans borne, peuplé à l'infini de mondes. Ces nouveautés sont considérées alors comme des jeux de l'esprit, sans sérieux et sans importance.
- Aristarque (c. 310 - c. 230 av. J.-C., né à Samos) Le rayon de la sphère céleste est beaucoup plus grand que l'orbite terrestre, sinon les tailles des constellations changerait avec la position de la Terre sur son orbite.

Idées en contradiction avec l'époque, ne parviennent pas à s'imposer

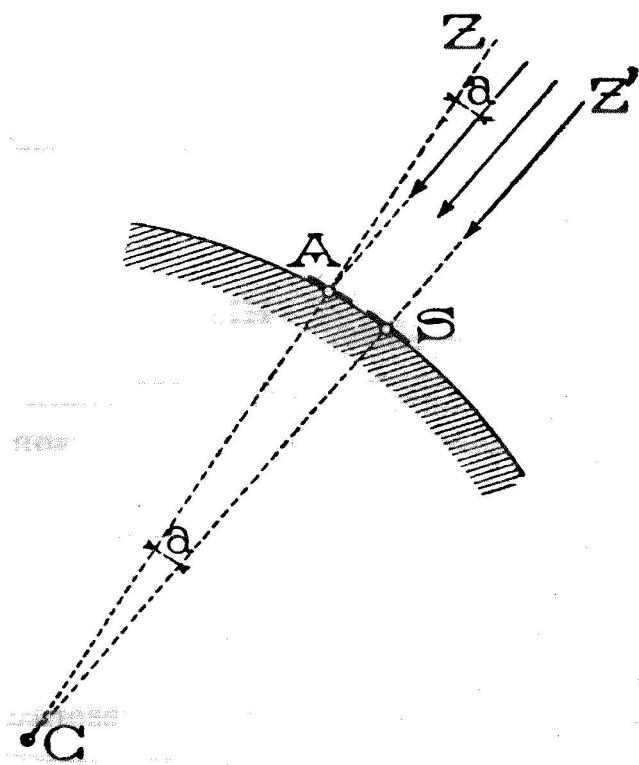
La mesure de la taille de la Terre

- Eratosthène (c. 276 - c. 196 av. J..C., né à Cyrène, Libye)
- Malgré les progrès réalisés par les théories géométriques de mieux en mieux adaptées aux observations, il demeure impossible alors de fixer - sauf par des rapports, d'ailleurs inexacts - les distances des astres à la Terre et les dimensions du monde.
- Une fois la sphéricité de la Terre reconnue, un problème fondamental se pose: Quelle est la grandeur du globe terrestre ?
- Eratosthène propose de considérer comme parallèles les rayons envoyés simultanément de n'importe quel point du Soleil à n'importe quel point de la Terre.

□ Voir exercice 1 de la série #1

La mesure de la circonference de la Terre

- Eratosthène (c. 276 - c. 196 B.C., né à Cyrène, Libye)



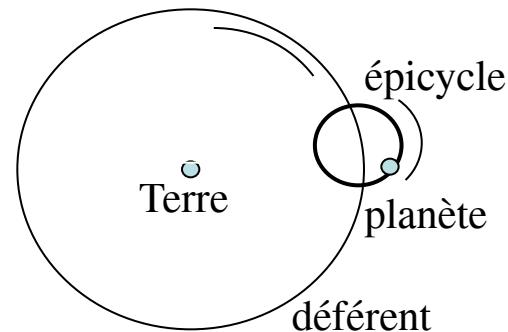
Il sait qu'à **Syène en Haute-Egypte**, au solstice d'été à midi les gnomons ne portent aucune ombre. Le Soleil est donc à la verticale du lieu, SZ' , au zénith, et l'on aperçoit au fond des puits l'image de l'astre. Il sait également que Syène est à peu près sur le méridien d'Alexandrie, à la distance AS de 5000 stades. Il suffit alors de mesurer à Alexandrie, au solstice, la hauteur h du Soleil à midi et de calculer la distance zénithale correspondante, soit l'angle α . Il trouve que α , égal à l'angle ACS , est la cinquantième partie de quatre droits ($7^{\circ}12'$). L'arc AS est donc la cinquantième partie de méridien entier. Ce dernier vaut 250'000 stades de 157.5 mètres, ce qui équivaut à **39'375 km** au lieu de **40'074 km** actuels. Il faudra attendre le XVI^e siècle pour trouver plus précis...

Précession des équinoxes



Hipparche
né ~ 190 av. J.-C. à Nicée
mort ~ 120 av. J.-C. à Rhodes (?)
astronome, géographe et mathématicien grec
actif au moins entre 147 et 127 av. J.-C.

- Etude du mouvement des astres (planètes) à l'aide de la théorie des épicycles



- Prédiction des éclipses
- Tailles et distances du Soleil et de la Terre

Précession des équinoxes grâce à un catalogue d'étoiles

Une nova donne à **Hipparque** l'idée de composer un catalogue de 1025 étoiles et leurs coordonnées, afin de permettre à la postérité de connaître les changements accomplis dans le ciel. C'est en confrontant ses propres observations à ce catalogue, contenant des **observations vieilles de 170 ans environ** (le plus ancien système d'archives scientifiques ?!), qu'il découvrit, en ~135 av. J.-C., la **précession des équinoxes** : les longitudes des étoiles croissent de 50 secondes d'arc par an. La sphère céleste a donc, outre la rotation diurne autour de l'axe du monde, une rotation directe, très lente, autour de l'axe normal à l'écliptique.

La position du Soleil à l'équinoxe de printemps se déplace par rapport aux étoiles fixes de $1,5^\circ$ par siècle.

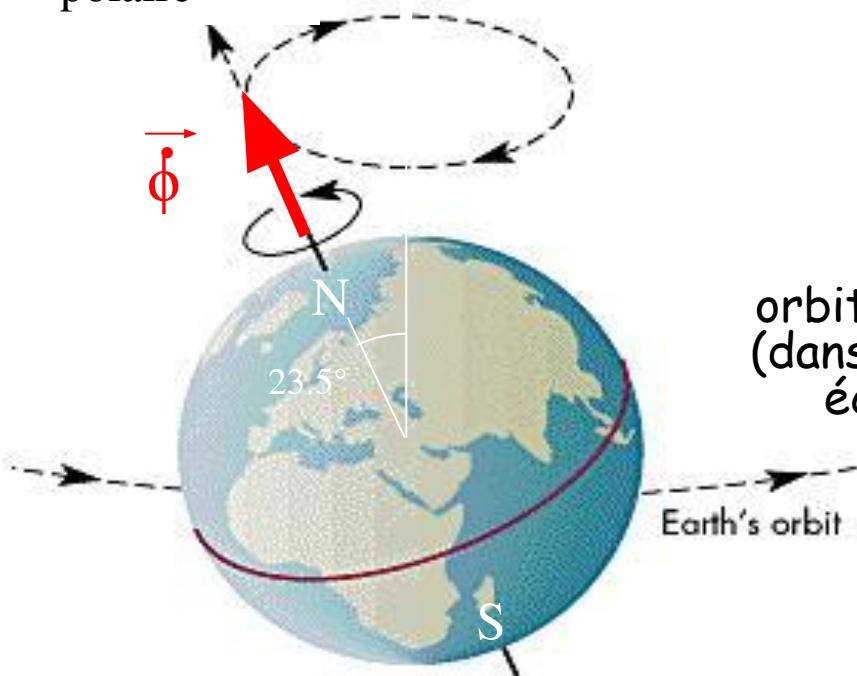
Précession de l'axe de rotation de la Terre autour de la normale au plan de l'écliptique : période ~ 26'000 ans (25'725 ans).

Egalement petite **nutation** de 9,2" d'arc : période ~19 ans (18.6 ans).

Cause: moment des forces exercées par la Lune et le Soleil sur la Terre, par rapport au centre de masse de la Terre, pas sphérique mais ellipsoïdale.

Précession des équinoxes

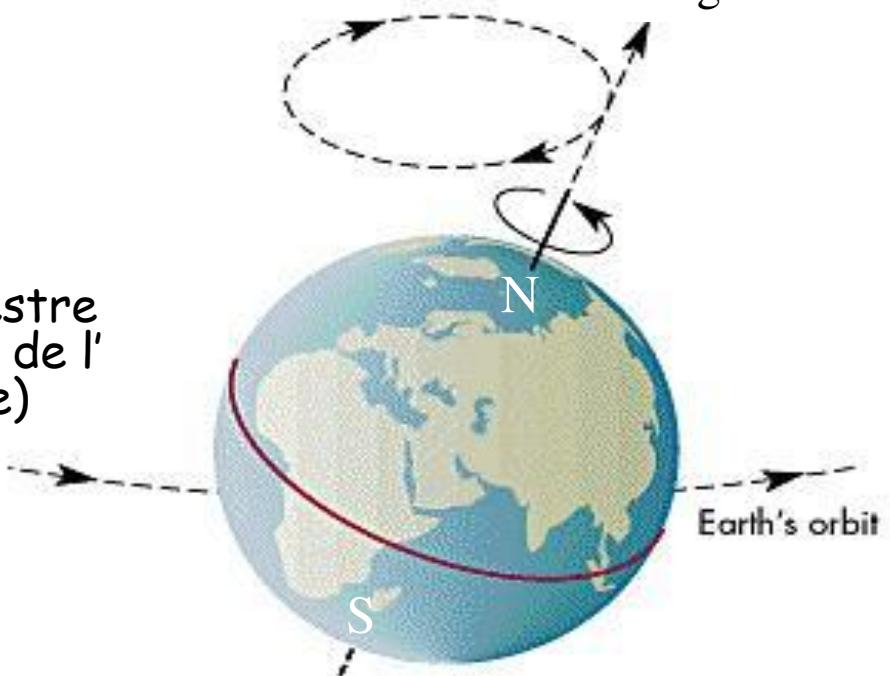
vers étoile
polaire



aujourd'hui

orbite terrestre
(dans le plan de l'
écliptique)

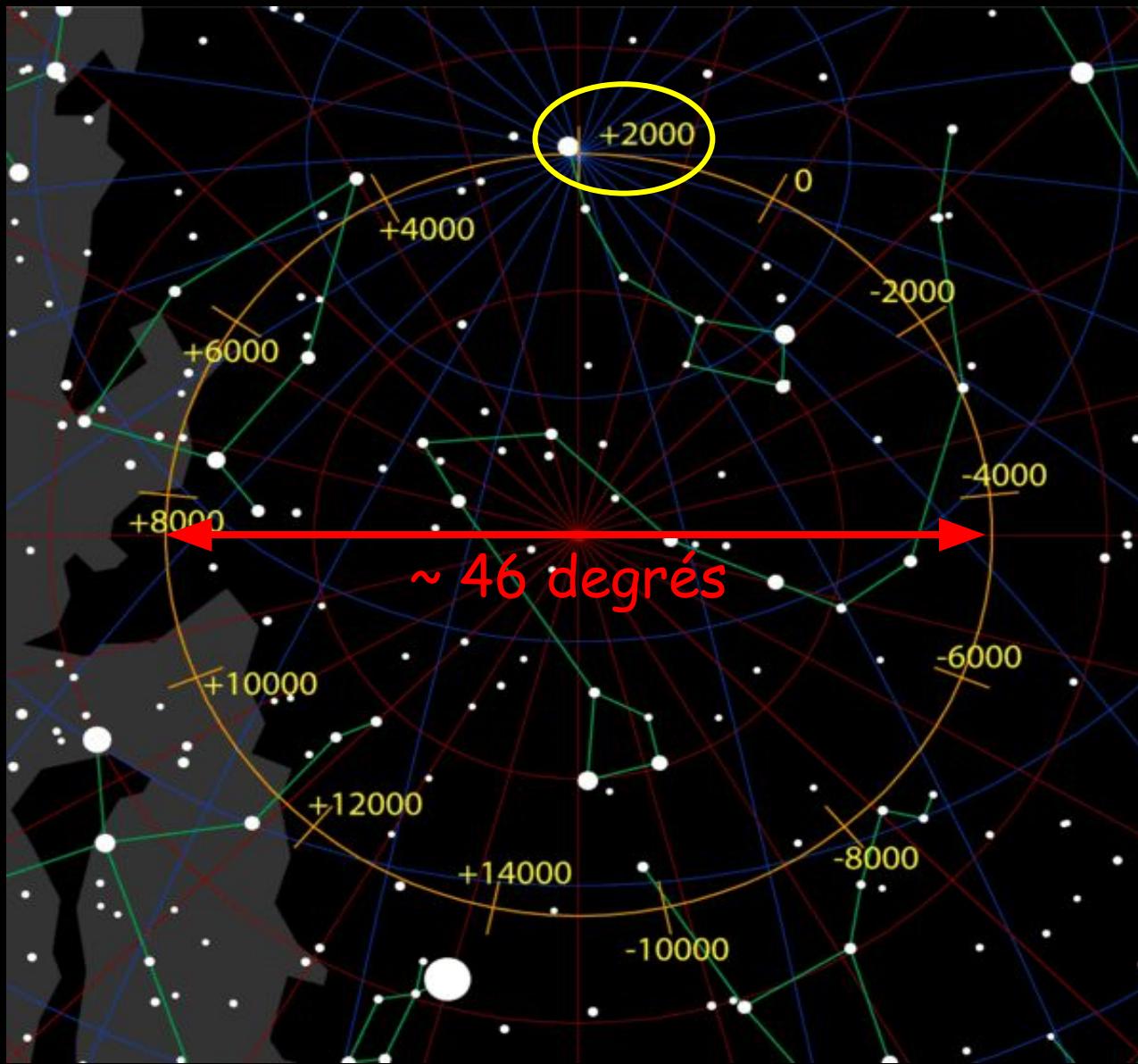
vers Vega



en l'an 14'000

Précession des équinoxes

Pôle nord

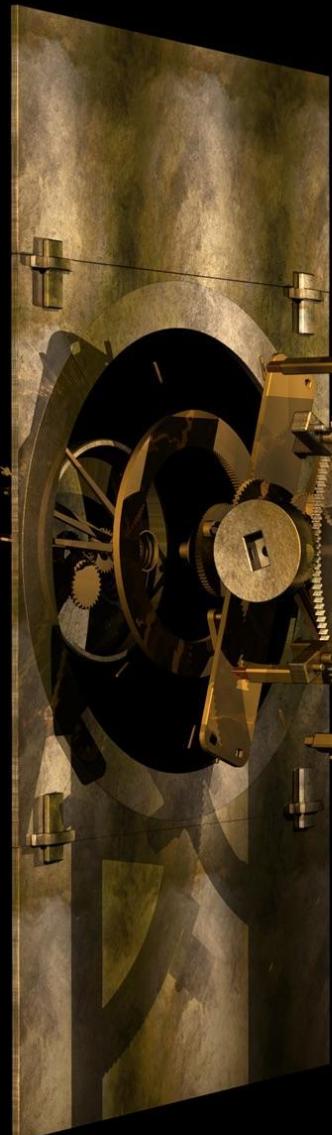


Rayon et distance de la Lune

- Aristarque né vers 310 av. J.-C., et mort vers 230 av. J.-C.
- Aristarque met en oeuvre deux méthodes différentes, toutes deux ingénieuses et sophistiquées, et parvient à estimer la **distance Terre - Lune** : il place en effet cette distance dans une « fourchette » allant de 62 à 77 rayons terrestres alors que la valeur réelle est de 60,2 rayons terrestres.
- ☐ Voir exercice 3 de la série #1 (Rayon et distance à la lune par Aristarque)
- A l'inverse, sa distance Terre - Soleil est considérablement sous-estimée, bien que sa méthode soit assez correcte. Ces calculs supposent inévitablement des connaissances trigonométriques relativement fines.
- Voir exercice 2 de la série #1 (Distance Terre-Soleil calculée par Aristarque)

Fragment principal du mécanisme d'Anticythère (87 av. J.-C.)
le premier calculateur analogique antique permettant de calculer
des positions astronomiques



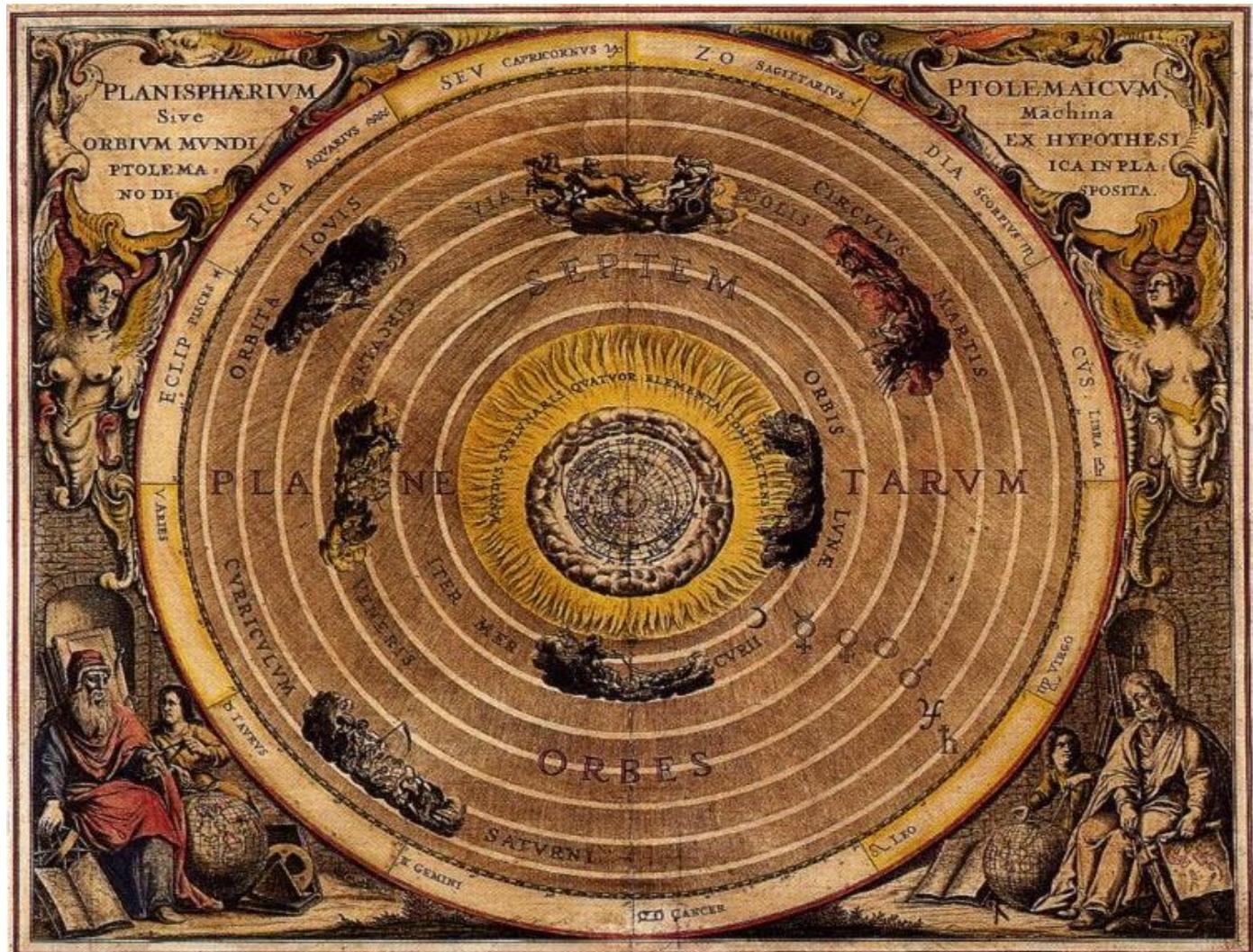


Courtesy Tony Freeth, 2013

Objets similaires dans la littérature antique

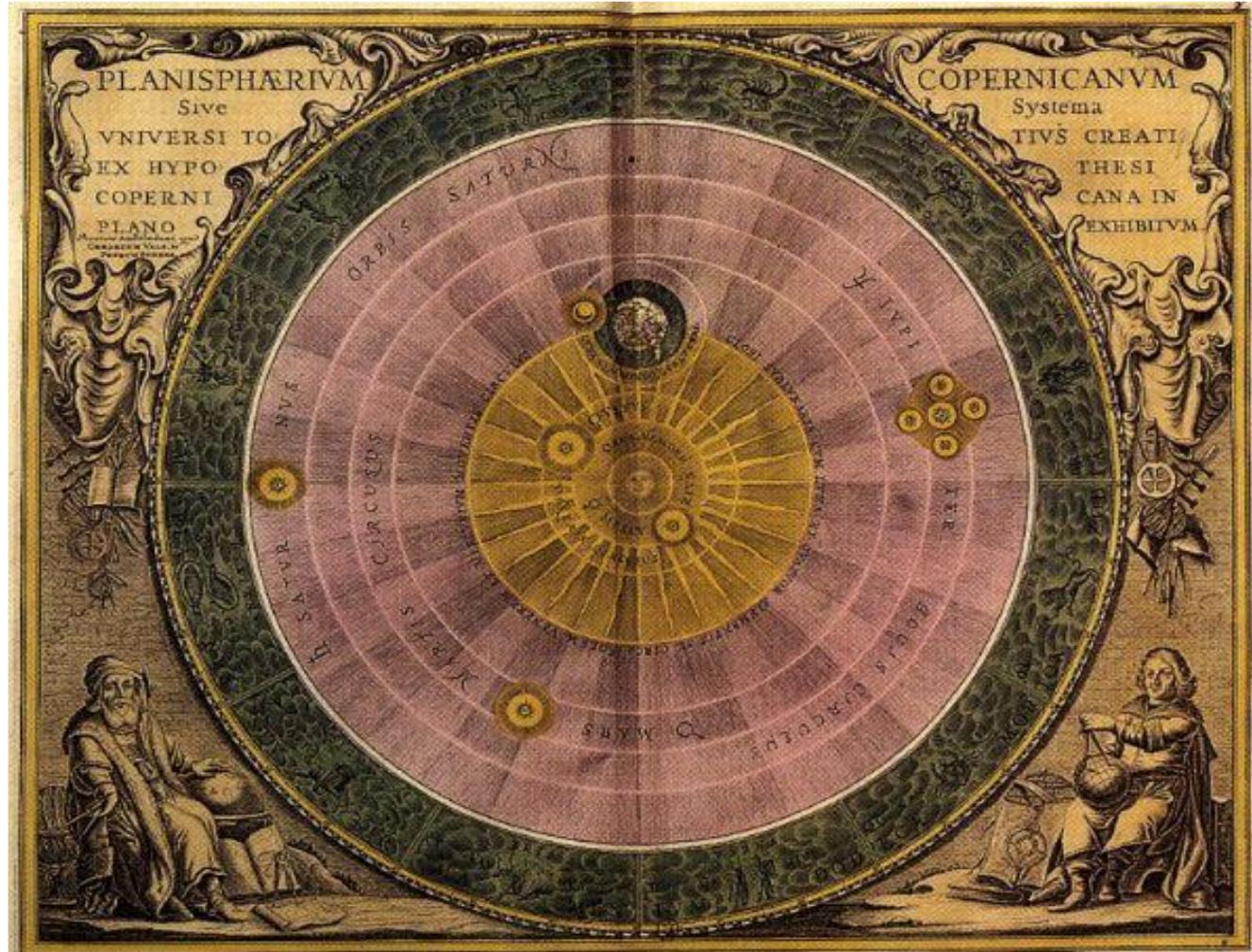
- Cicéron évoque deux machines semblables. Cela voudrait dire que cette technologie existait dès le III^e siècle avant J.-C.
- La première, construite par Archimède, se retrouva à Rome grâce au général Marcus Claudius Marcellus. Le militaire romain la ramena après le siège de Syracuse en 212 avant J.-C., où le savant grec trouva la mort. Marcellus éprouvait un grand respect pour Archimède (peut-être dû aux machines défensives utilisées pour la défense de Syracuse) et ne ramena que cet objet du siège. Sa famille conserva le mécanisme après sa mort et Cicéron l'examina 150 ans plus tard. Il le décrit comme capable de reproduire les mouvements du Soleil, de la Lune et de cinq planètes *Cicero, De Re Publica I, 14 (22)*.
- Cicéron mentionne un objet analogue construit par son ami Posidonios *Cicero, De Natura Deorum II, 34 (88)*.
- Les deux mécanismes évoqués se trouvaient à Rome, cinquante ans après la date du naufrage de l'épave d'Anticythère. On sait donc qu'il existait au moins trois engins de ce type.

Ptolémée (c. 90 - c. 168 après J.-C.)



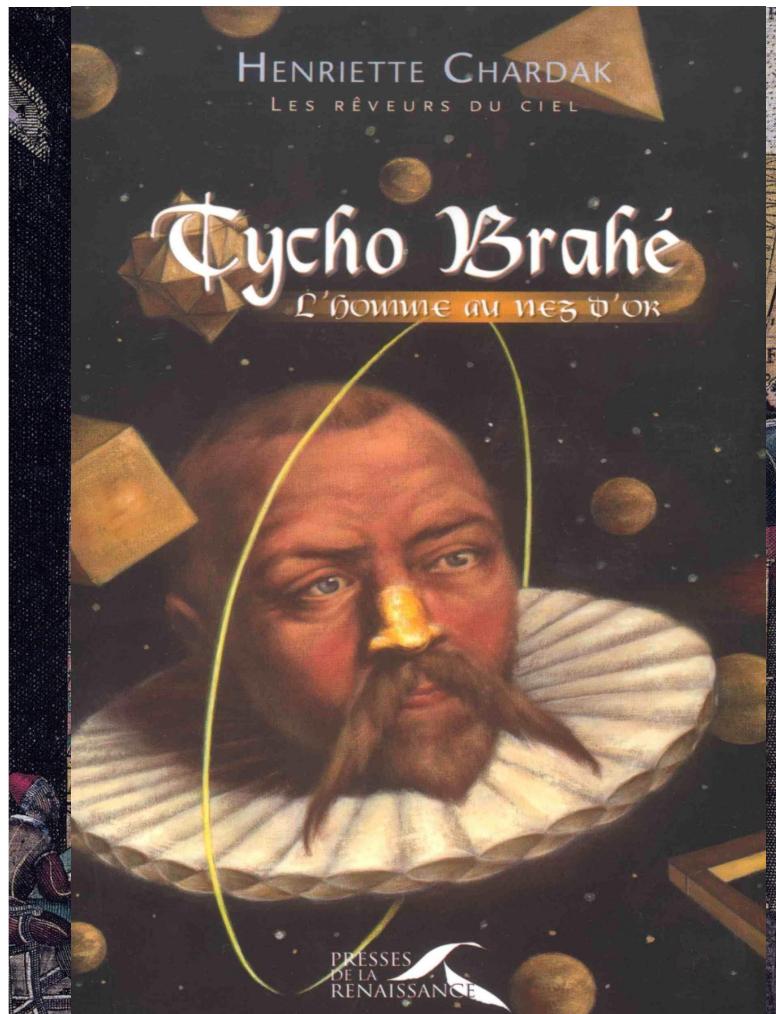
La Terre est fixe au centre du monde. Les planètes jusqu'à Saturne sont connues. Ptolémée utilise les **épicycles**, jeux de cercles complexes destinés à reproduire les mouvements des planètes en gardant un système géocentrique (gravure de 1708).

Copernic et son système héliocentrique (1543)

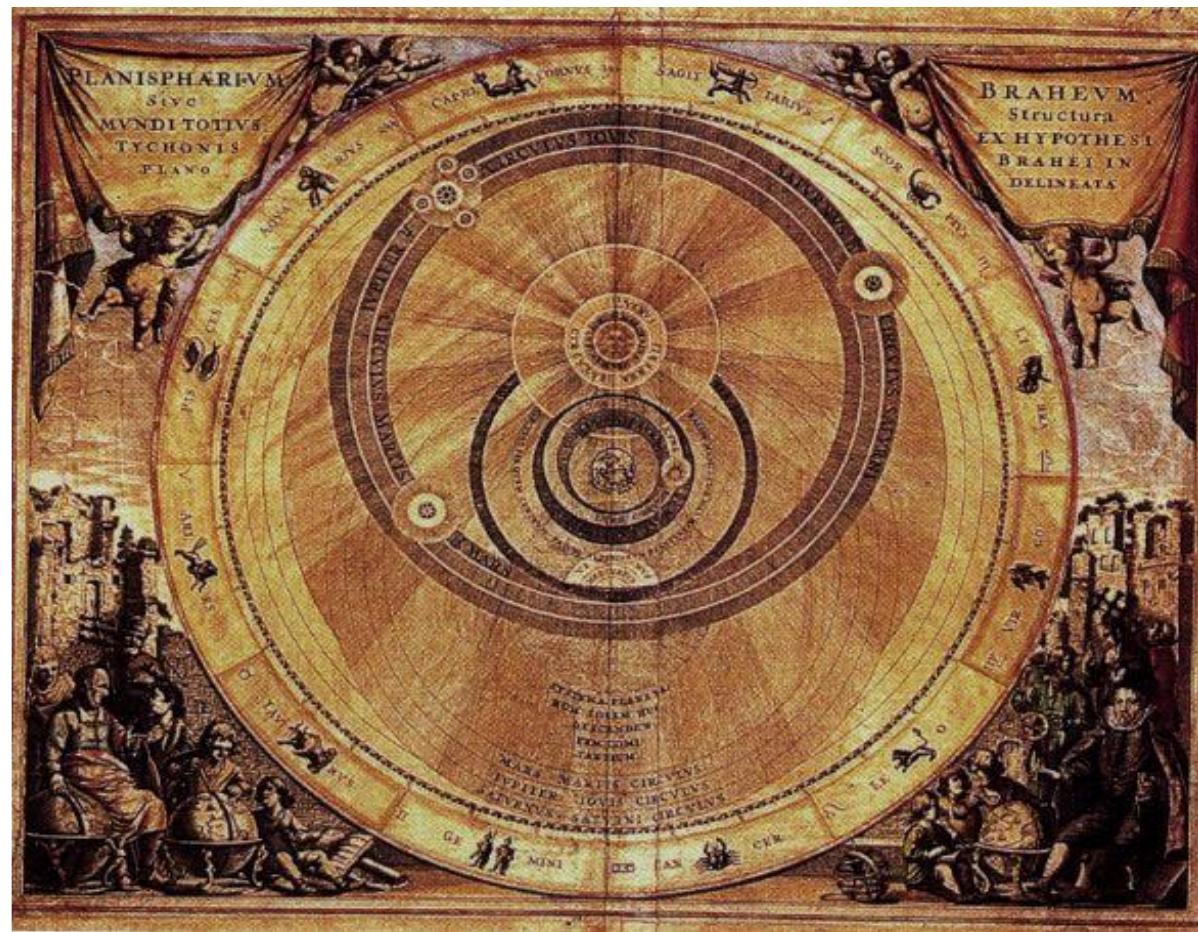


En 1543, le chanoine Copernic propose un système **héliocentrique**, dans un monde clos et sphérique (gravure de 1708)

Tycho Brahe (1588) et Kepler (1601)

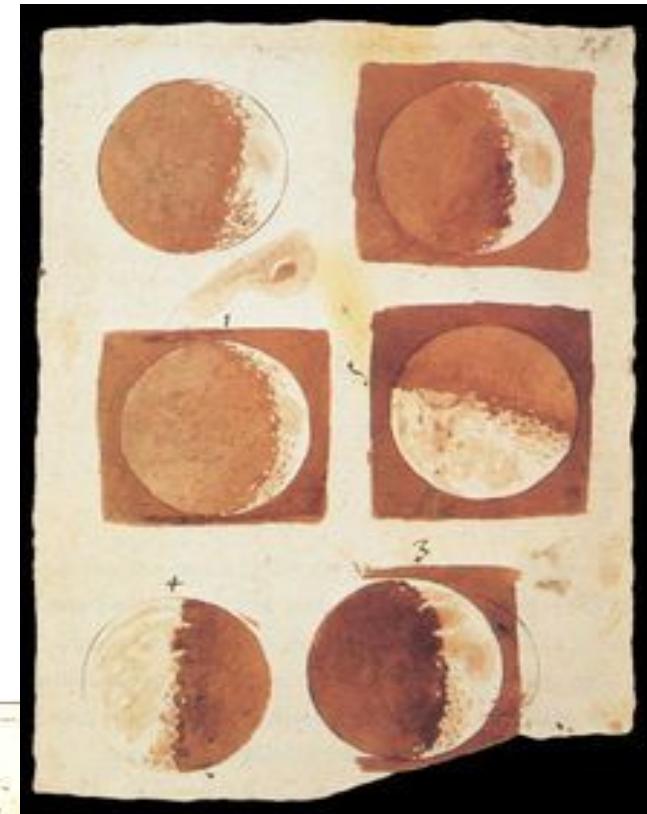


Observatoire de Tycho Brahe
en 1576.

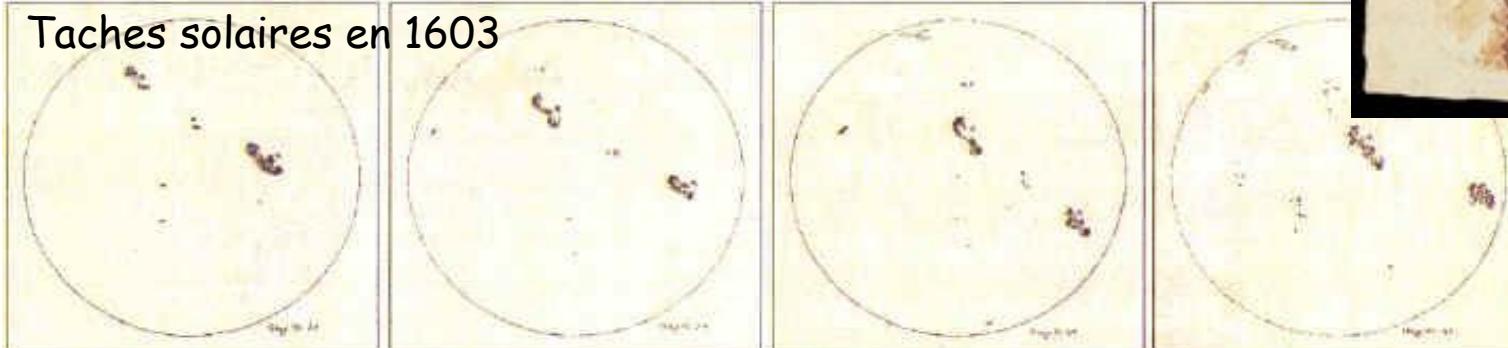


Système de Tycho Brahe proposé en 1588.
La Terre est toujours au centre du monde. Mars,
Jupiter et Saturne sont situées après le Soleil.

Galilée (1564 - 1642)



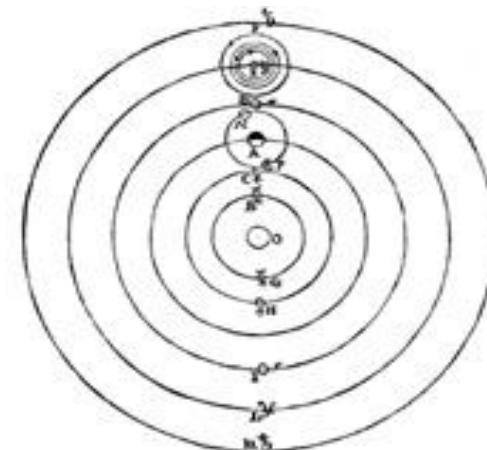
Taches solaires en 1603



Avec sa petite lunette Galilée découvre la rotation du Soleil en 26 jours, les cratères lunaires, les satellites de Jupiter, les anneaux de Saturne, les phases de Vénus.

Galilée (1564 - 1642)

	Ori.	*	*	○	*	Occ.
7 janvier 1610						
8 janvier 1610				○	* * *	
10 janvier 1610		*	*	○		
11 janvier 1610		*	*	○		
12 janvier 1610				* = ○	*	
13 janvier 1610				* ○	* *	
15 janvier 1610				○	* * *	*
15 janvier 1610				○	* * *	
16 janvier 1610				* ○	*	



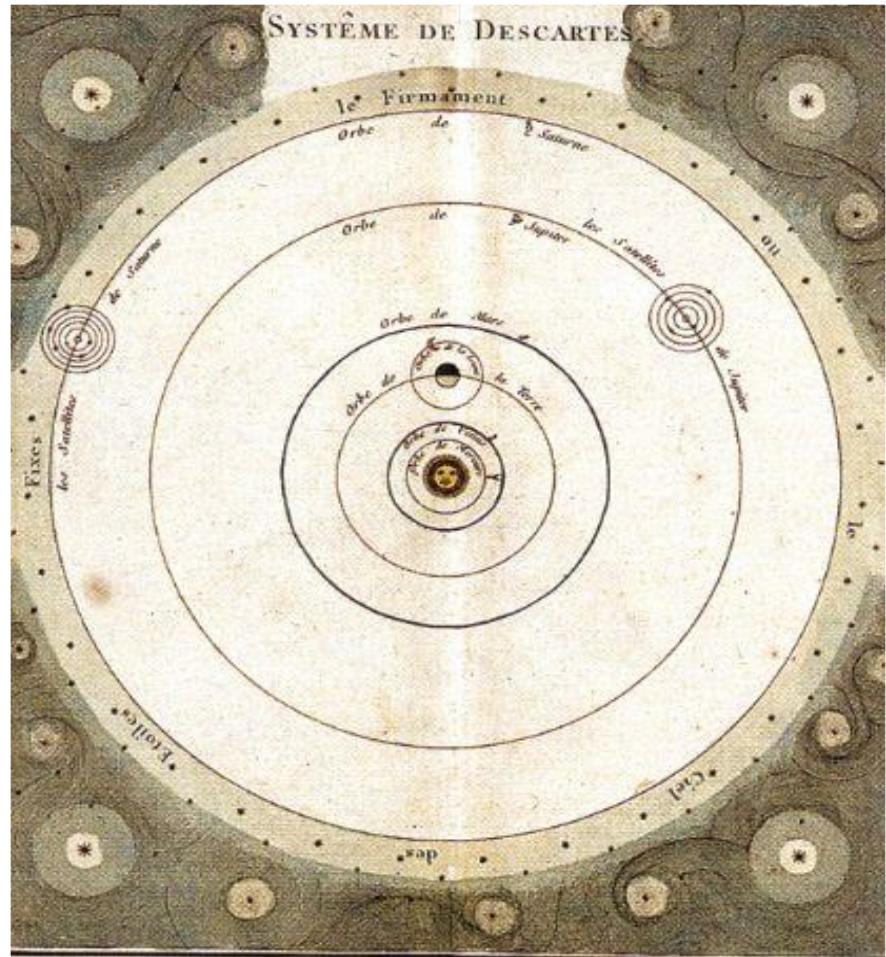
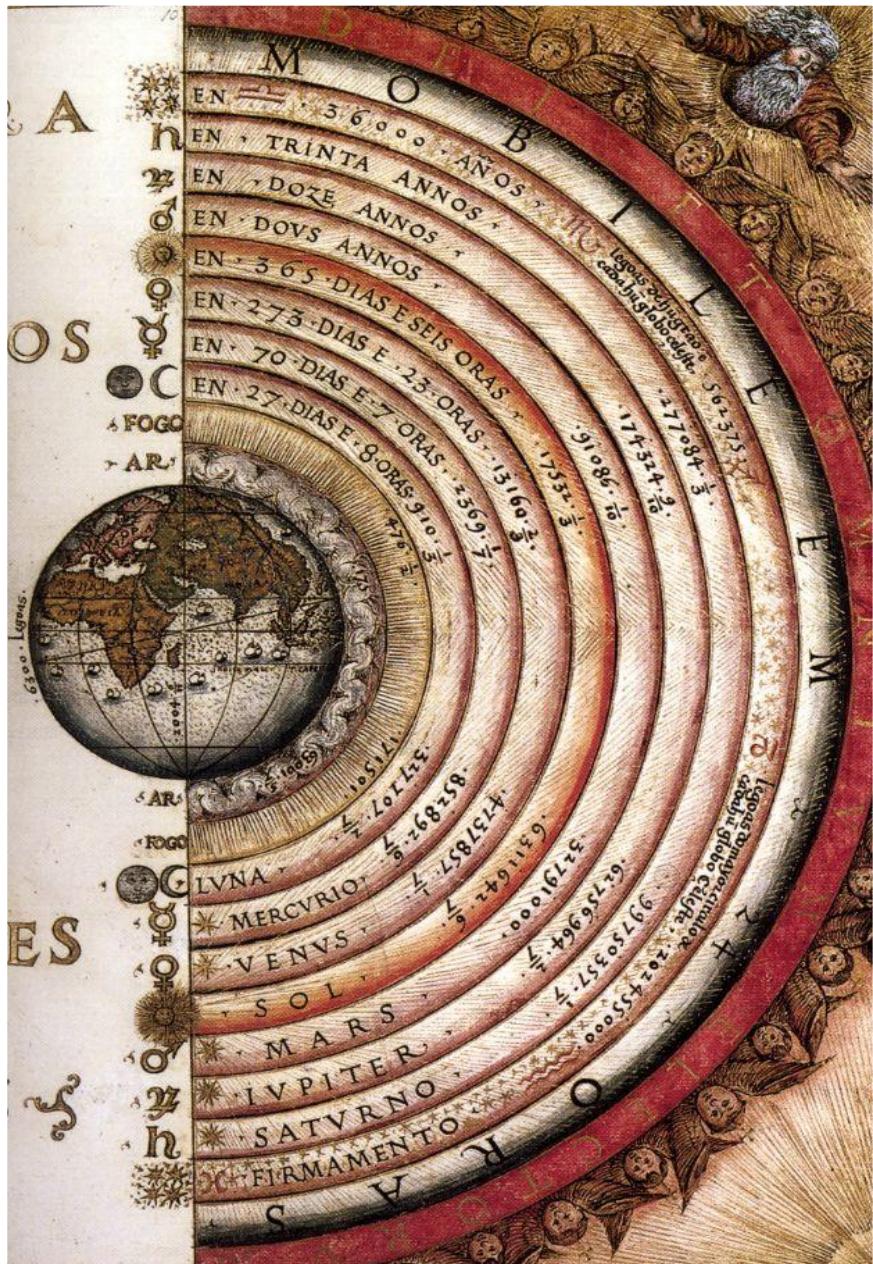
Avec sa petite lunette Galilée découvre la rotation du Soleil en 26 jours, les cratères lunaires, les satellites de Jupiter, les anneaux de Saturne, les phases de Vénus.

Appareil photo standard « d'aujourd'hui »



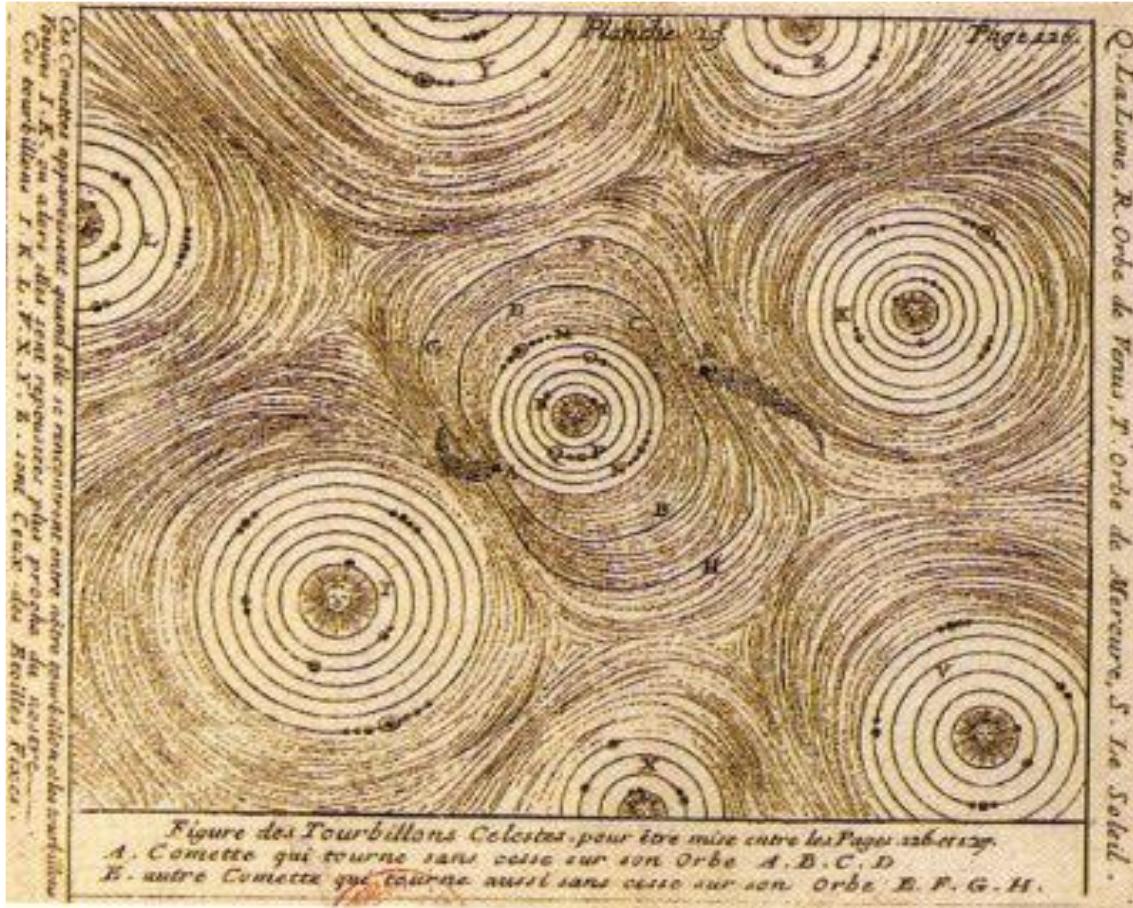
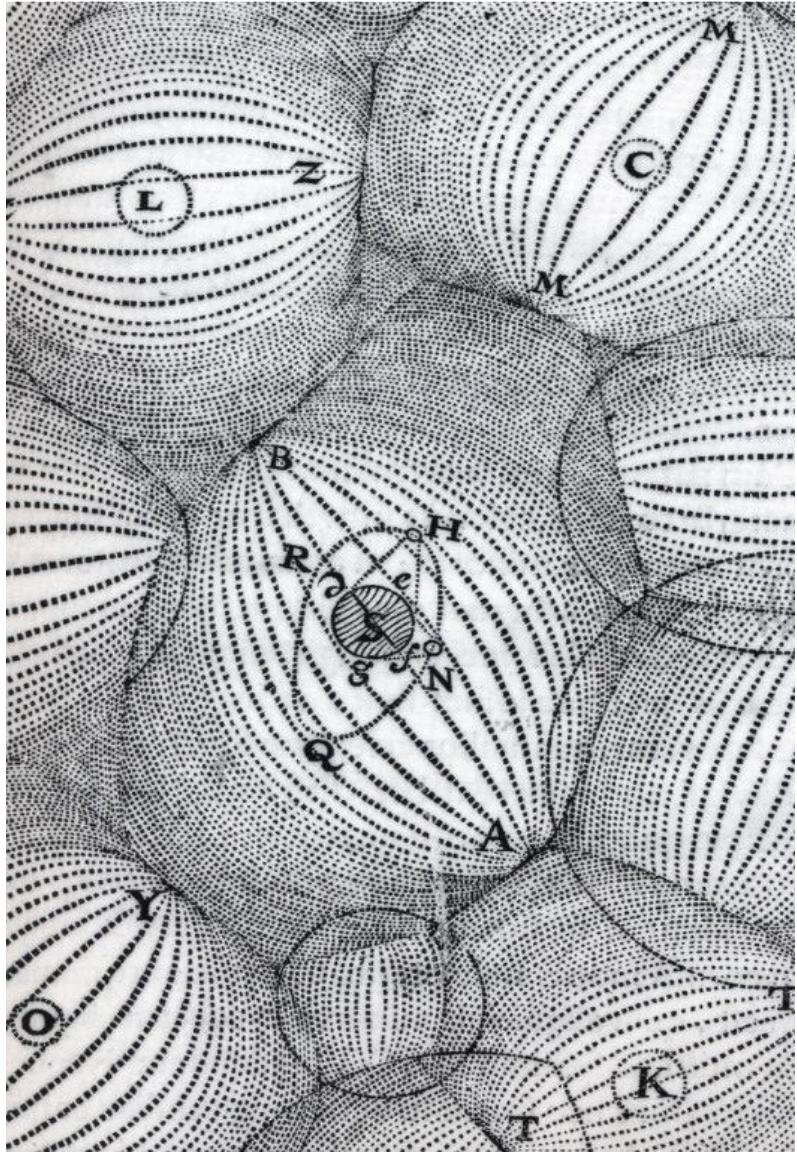
Jupiter et 3 de ses satellites

Persistante du modèle géocentrique



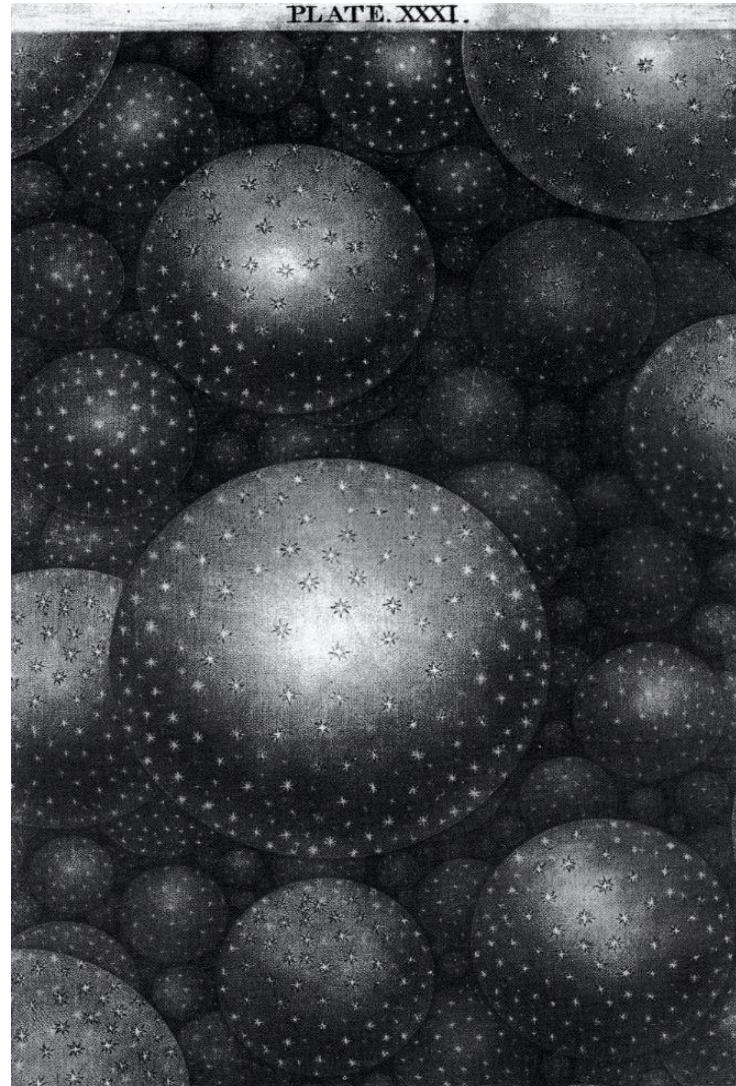
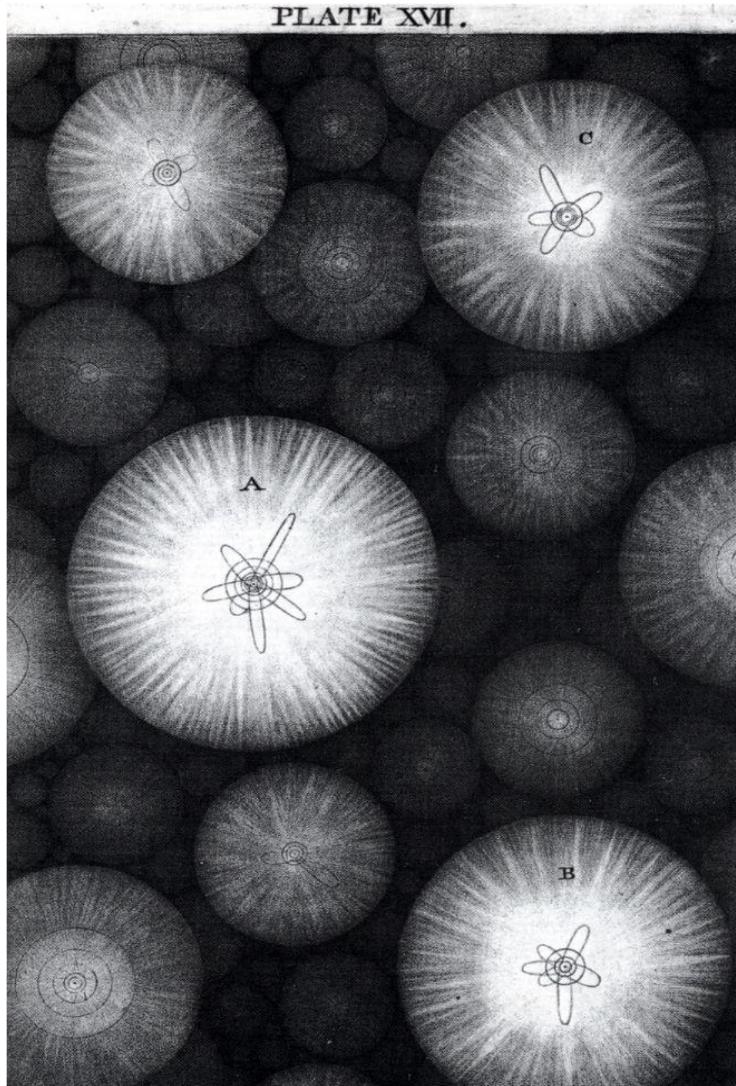
A gauche: on trouve encore à la renaissance (ici en 1568) des réticences à admettre le système héliocentrique.
A droite, système **héliocentrique** de Descartes, en 1644 (gravure de 1761).

Descartes et ses tourbillons, en 1644



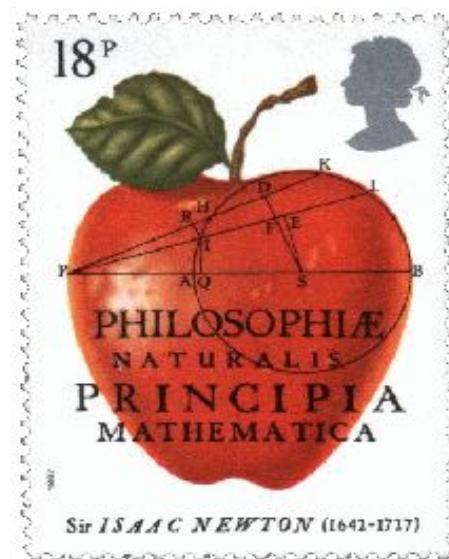
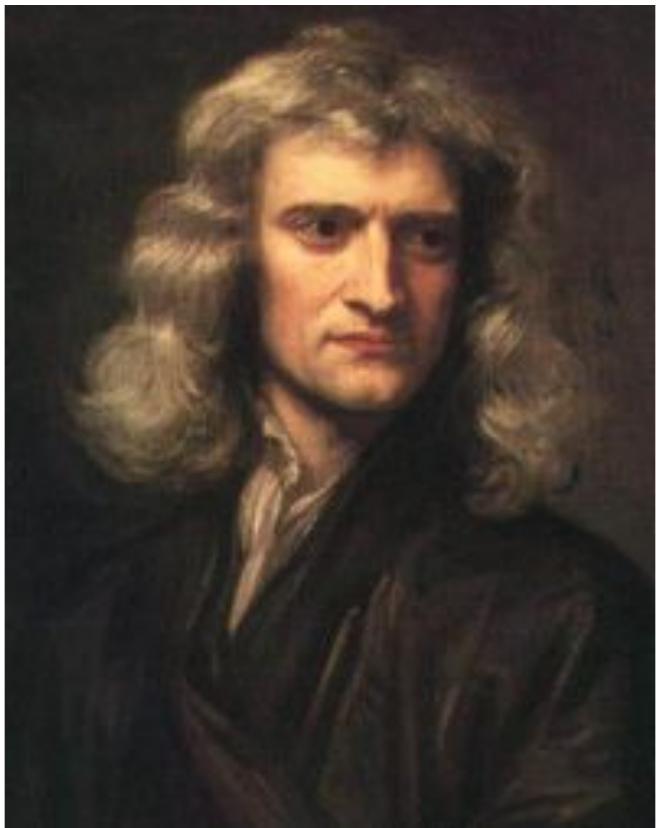
A gauche, le Système Solaire est dominé par le Soleil (S). Les autres étoiles sont chacune au centre d'un tourbillon, mieux illustré par la figure de droite, datant de 1710.

Vision hiérarchique du monde



La vision hiérarchique du monde se retrouve aussi chez les anglais, ici chez Thomas Wright, en 1750. Les sphères planétaires s'imbriquent dans les sphères stellaires.

Sir Isaac Newton (1643 - 1727)



Théorie de la
gravitation

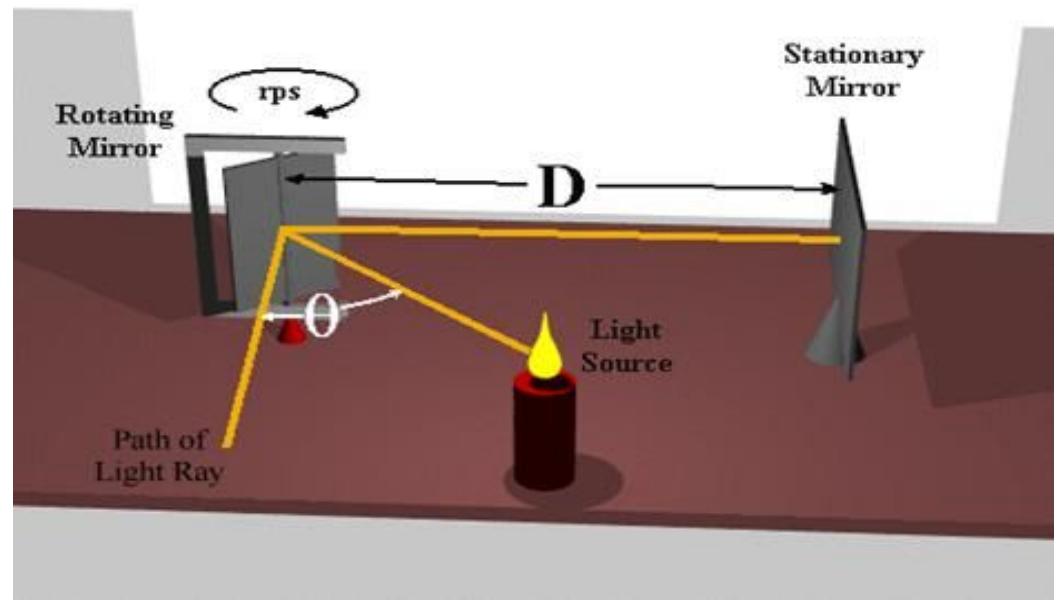
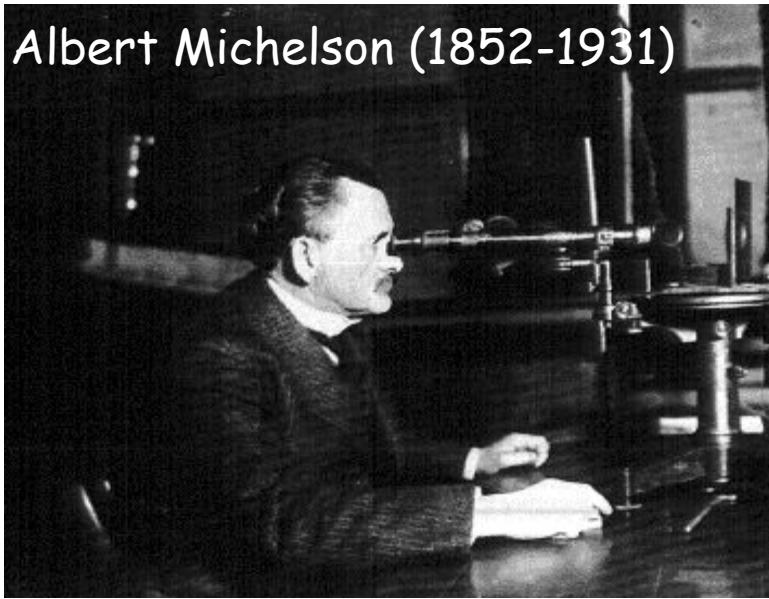


Premier télescope à
miroir.

Kepler trouve la forme des orbites planétaires grâce aux observations de Tycho Brahe.

Newton introduit la théorie de la Gravitation pour expliquer les lois de Kepler.

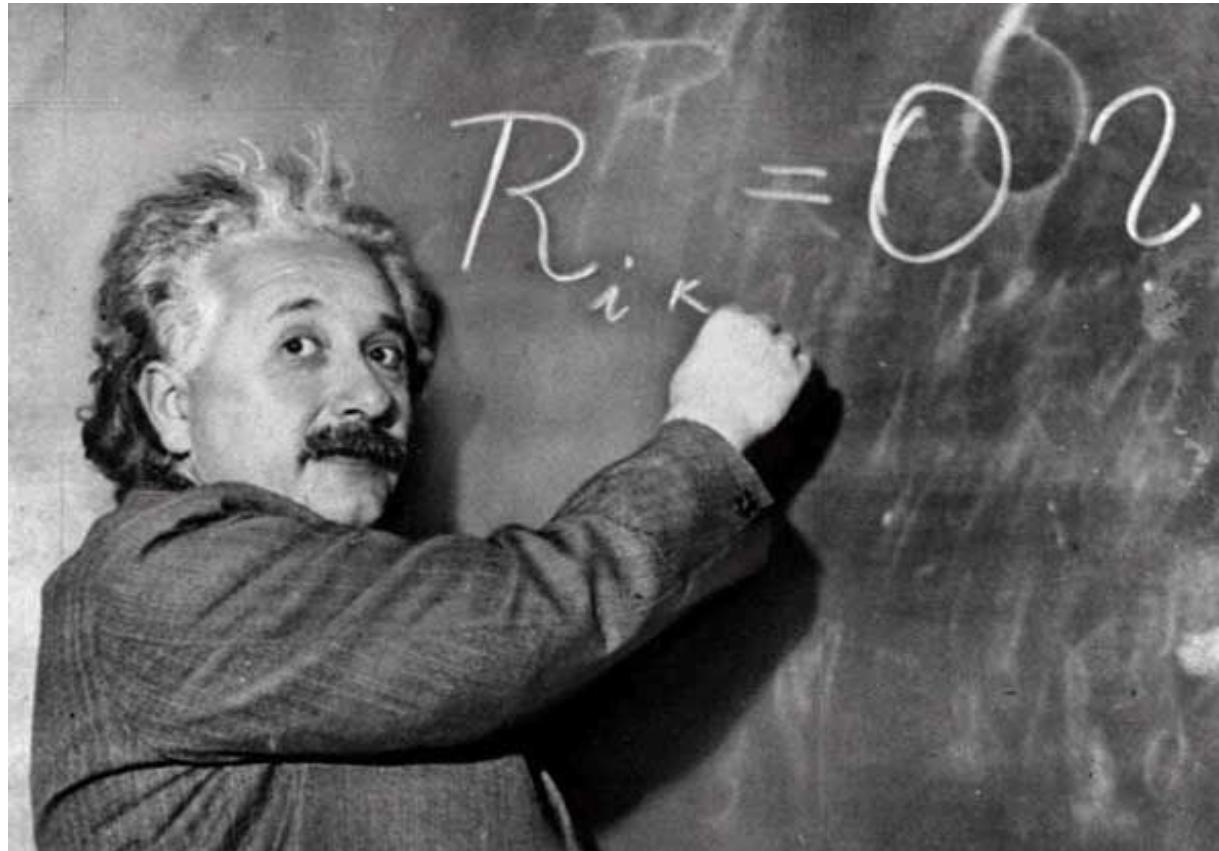
Pourtant, la théorie de la gravitation de Newton n'explique pas tout



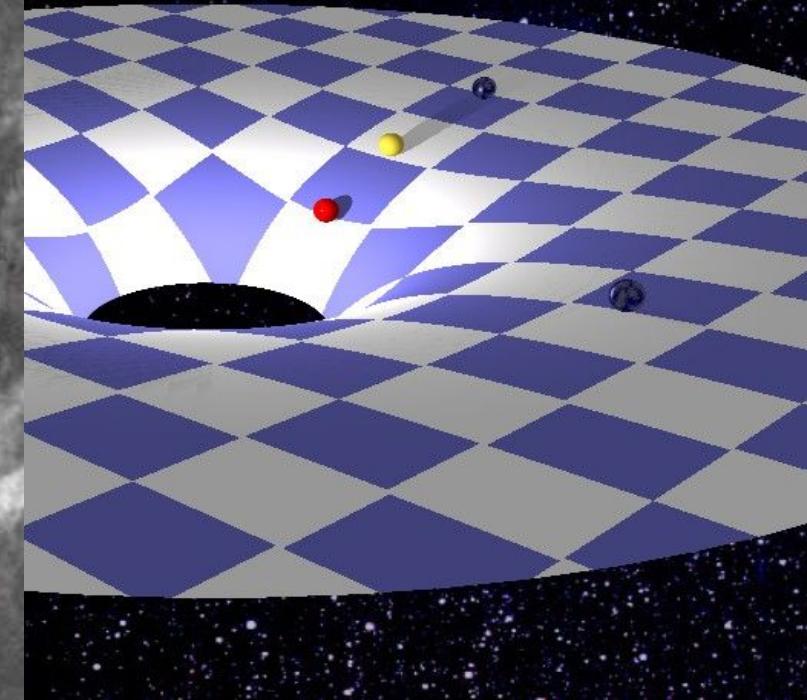
- En 1887, Morley et Michelson constatent que la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions, ce qui est contraire au principe de combinaison des vitesses.
- Depuis 1840, on constate que la planète Mercure ne suit pas exactement le mouvement décrit par la gravitation de Newton



Albert Einstein (1879 - 1955)



Une géométrie donnée par la distribution de la matière



Nouvelle théorie de la gravitation où la vitesse constante de la lumière est un **postulat**, et non une prédition.

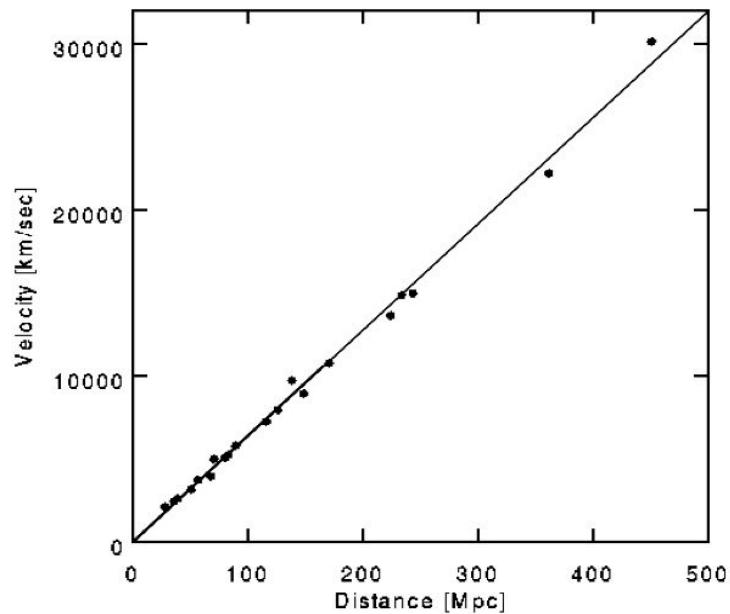
Les astres suivent des lignes « droites » (**géodésiques**) dans un espace courbe

Un Univers en expansion

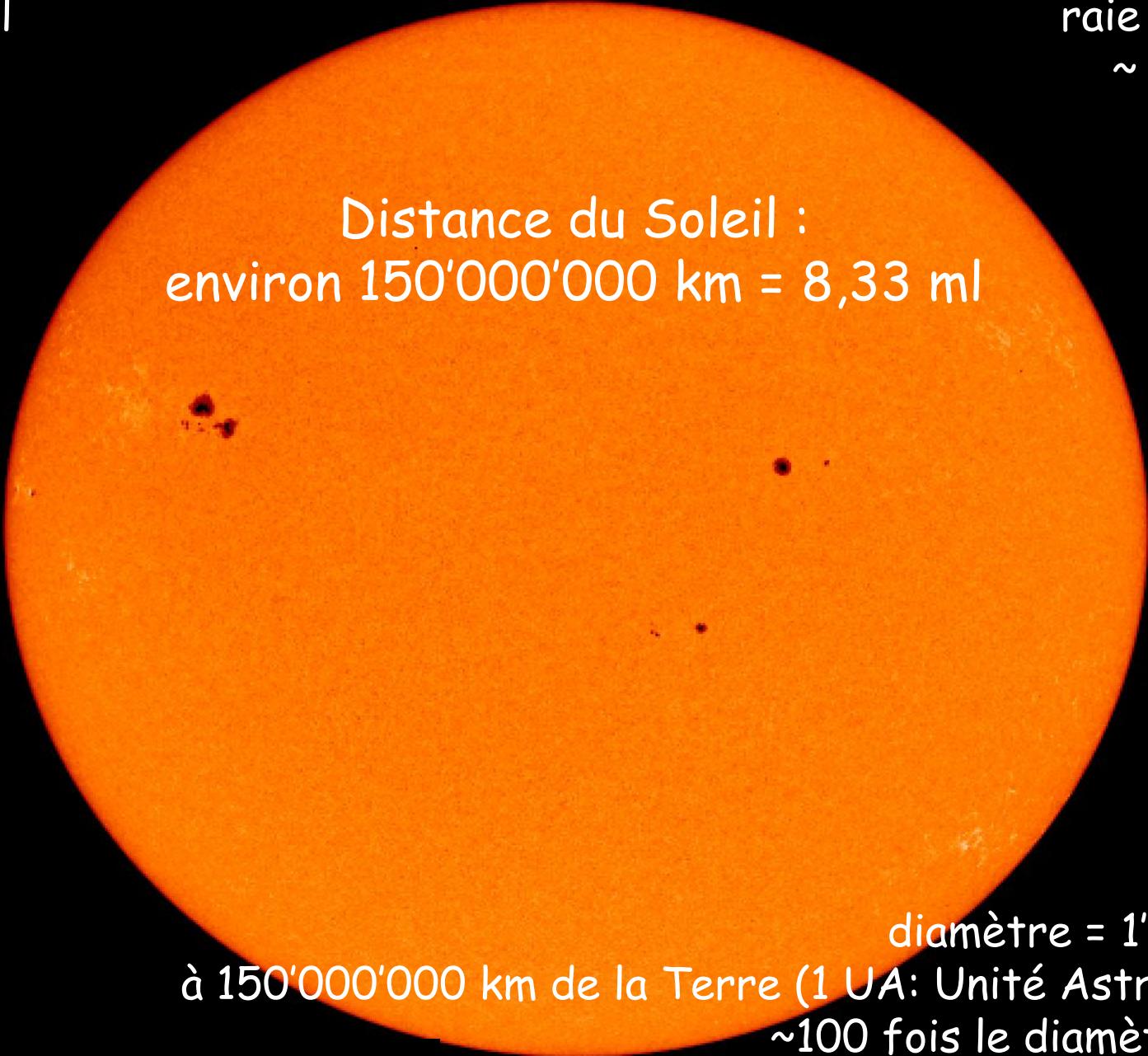


Découverte de la Loi de Hubble dans les années 1930 avec le télescope de 2,5 m du Mont Wilson (Californie)

$$V = H_0 \times D$$



Un tour de l'Univers



Distance du Soleil :
environ 150'000'000 km = 8,33 ml

diamètre = 1'400'000 km
à 150'000'000 km de la Terre (1 UA: Unité Astronomique) -
 ~ 100 fois le diamètre du soleil



Unités de mesure

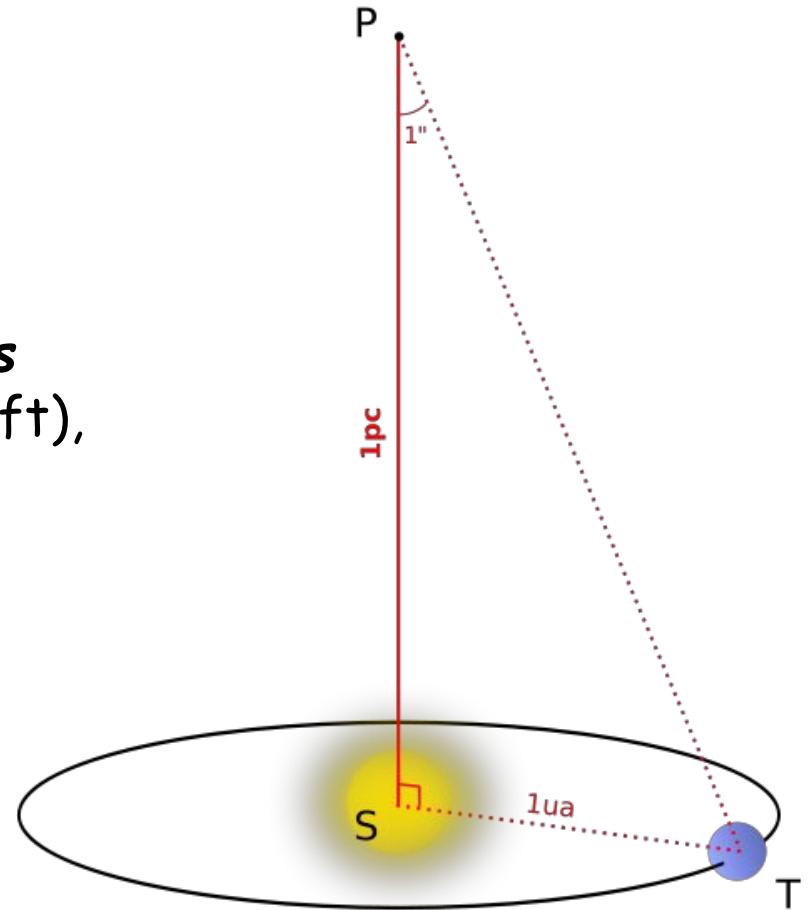
Distances:

- 1 UA, unité astronomique = $1,496 \times 10^{11}$ m
- 1 al, année lumière = $0,946 \times 10^{16}$ m
- 1 pc, parsec = 3,26 al

On mesure aussi les distances *cosmologiques* en termes de décalage vers le rouge (redshift), noté z.

Masses:

- 1 M_{soleil} = $1,98 \times 10^{30}$ kg
- 1 M_{\oplus} = $5,97 \times 10^{24}$ kg

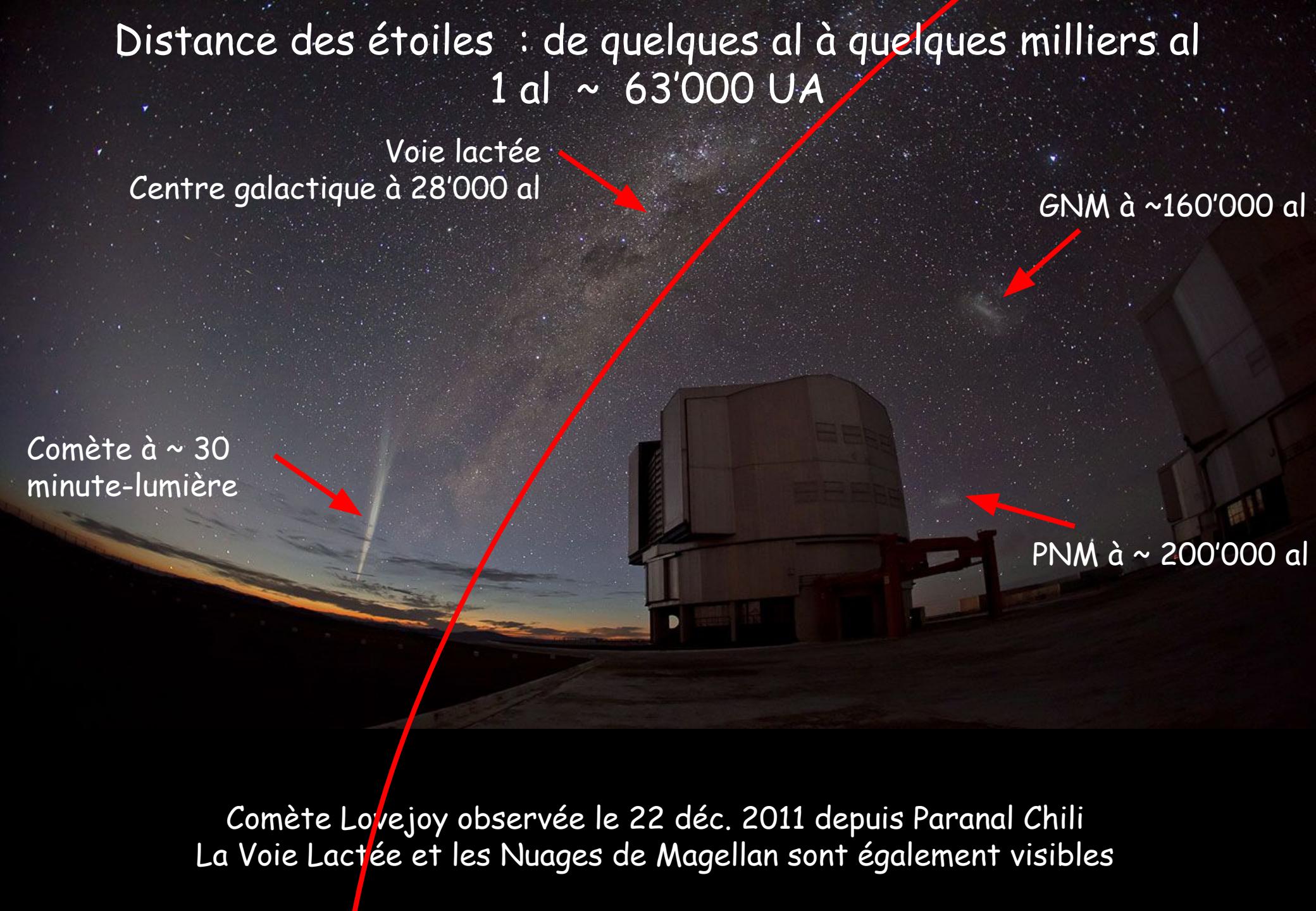


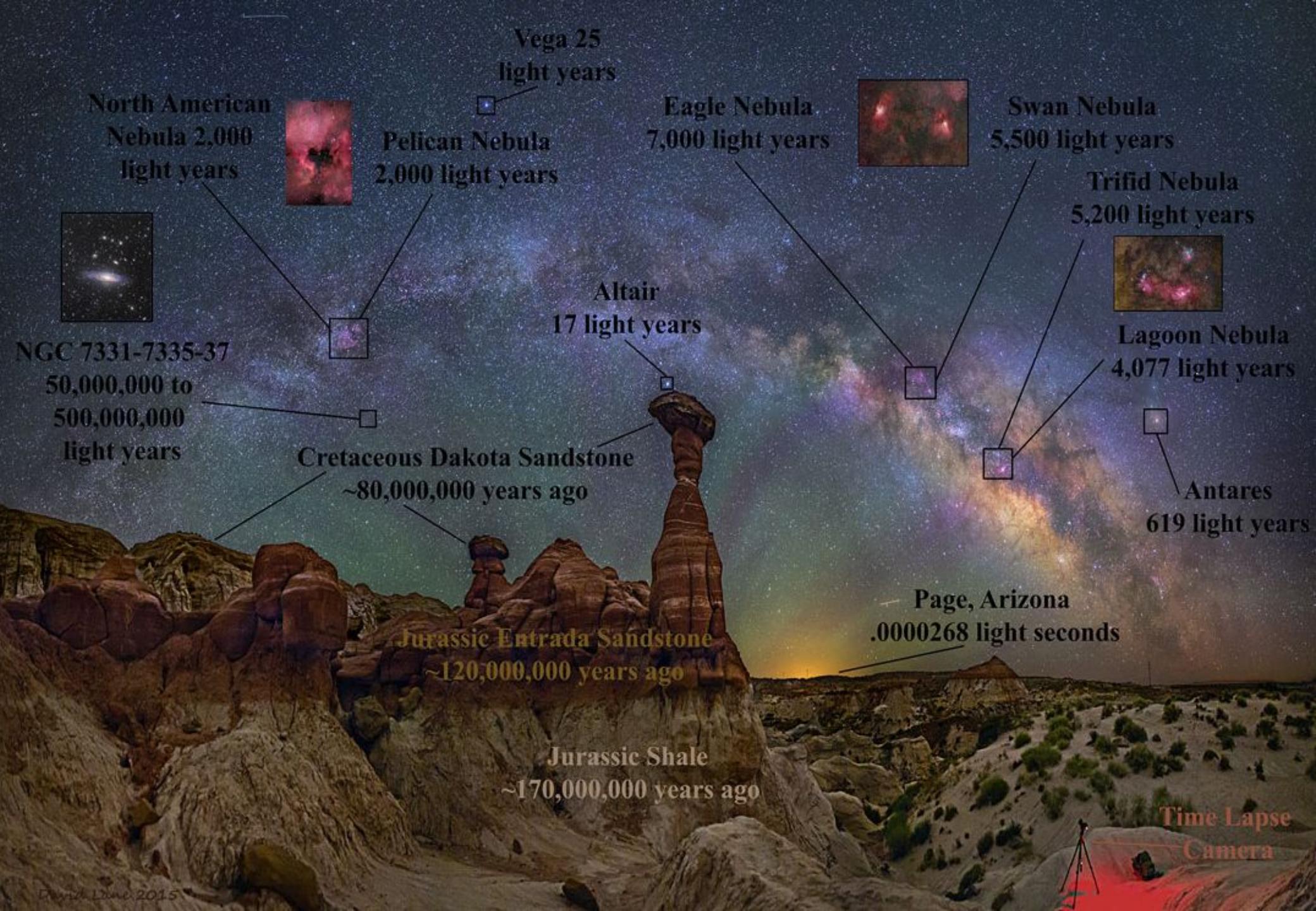
Distance des planètes : d'une fraction à plusieurs dizaines d'UA
1 UA = 150'000'000 km



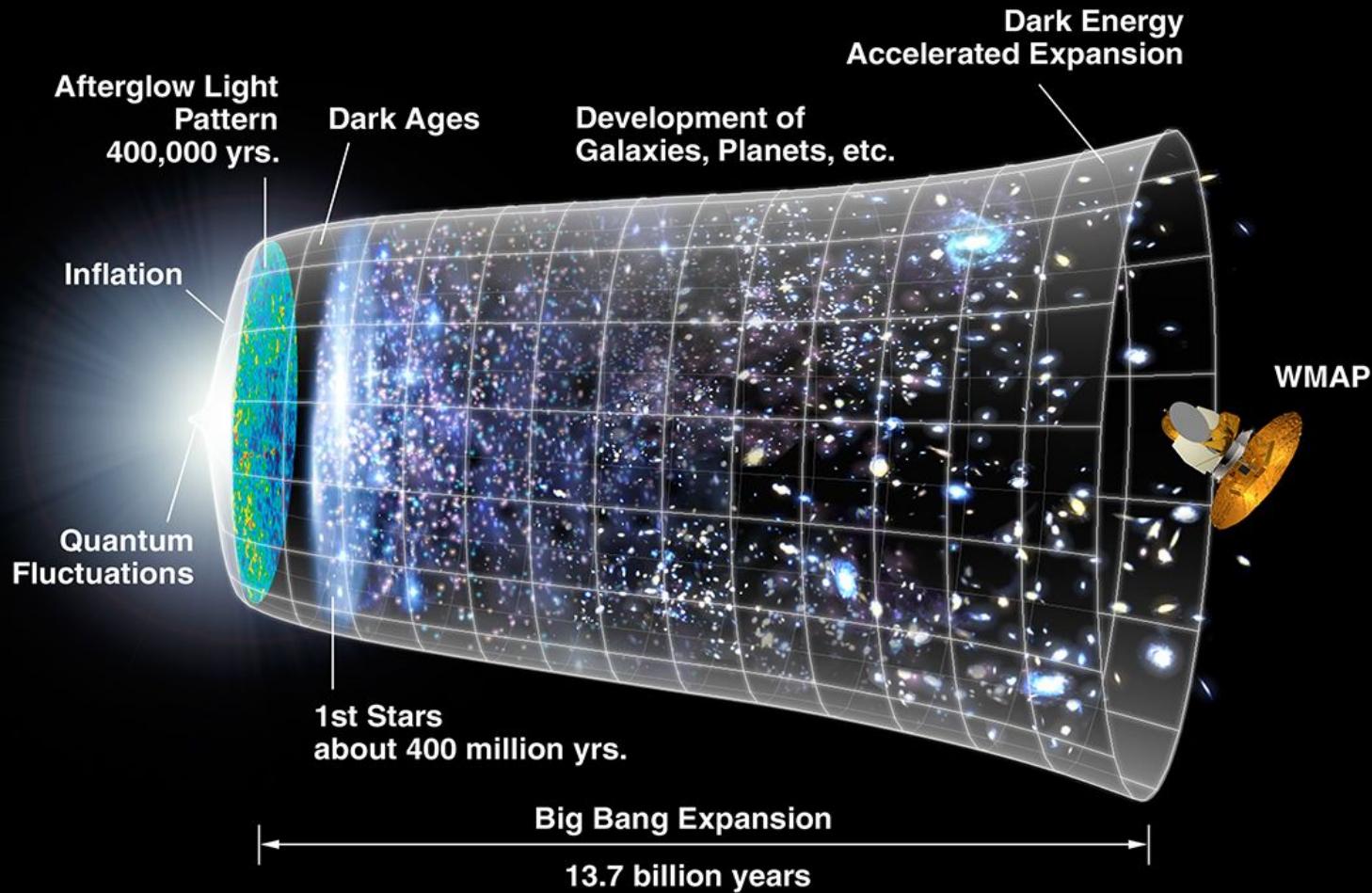
Vénus, Jupiter et la Lune observés depuis Paranal Chili en décembre 2009

Distance des étoiles : de quelques al à quelques milliers al
1 al ~ 63'000 UA

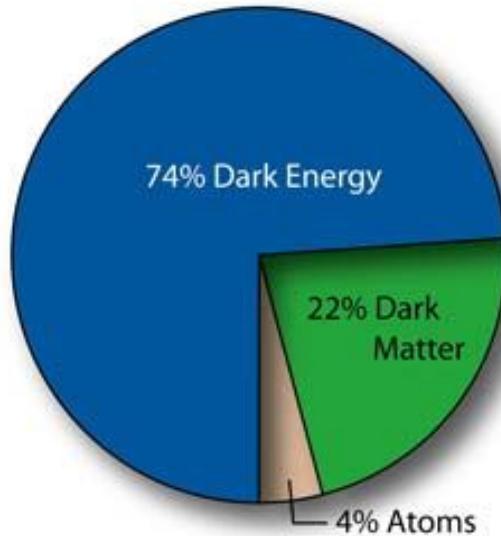




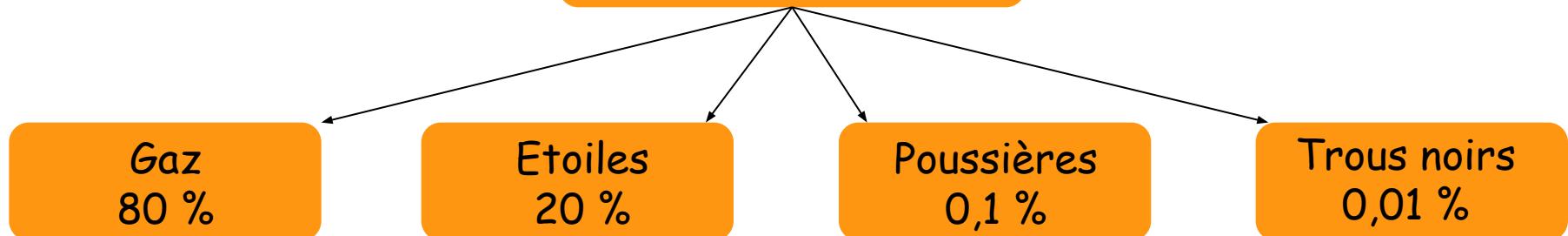
L'univers en un coup d'oeil



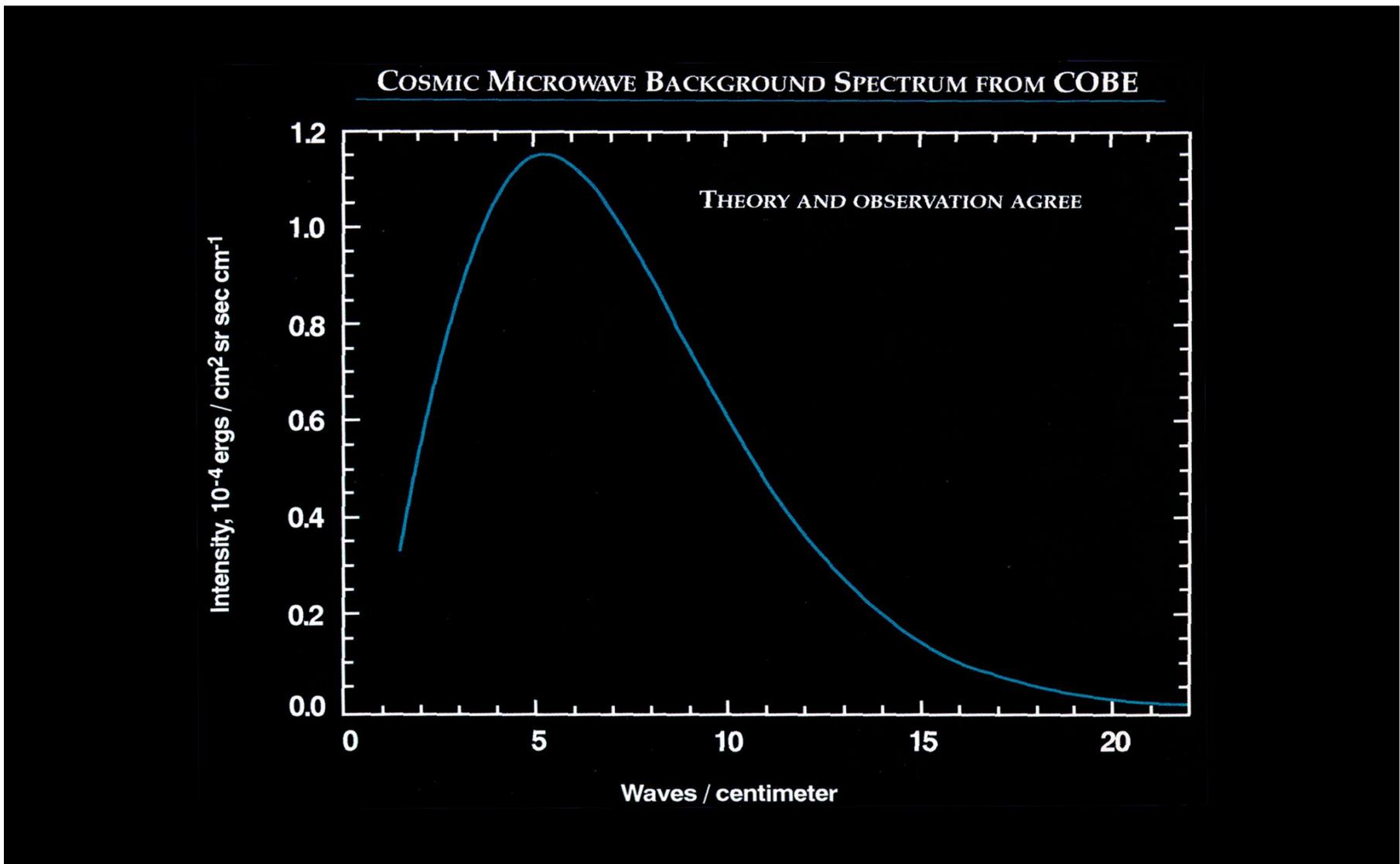
Composition de l'Univers



Matière « normale »
4%

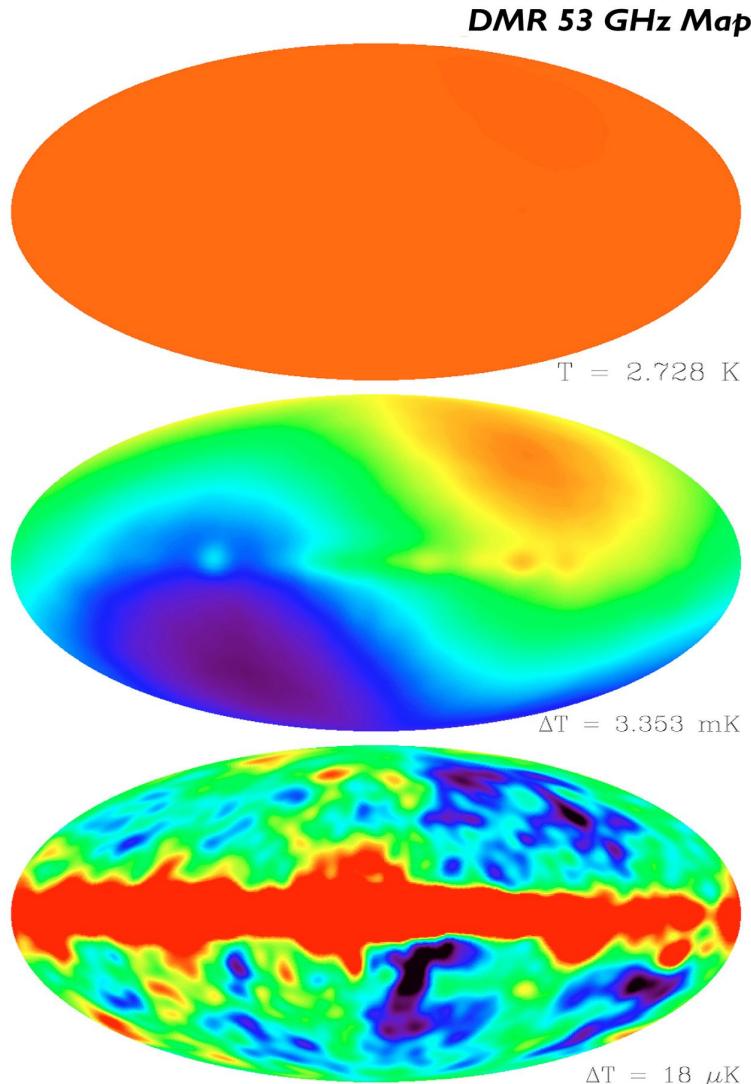


Fond cosmologique à $T \sim 2.725$ K: preuve du Big-Bang



Découverte : Penzias et Wilson, 1965 Mesure précise du spectre : Mather et al. 1990

Fluctuations du fond cosmologique



Fond moyen:
 $\langle T \rangle = 2,728 \text{ K}$

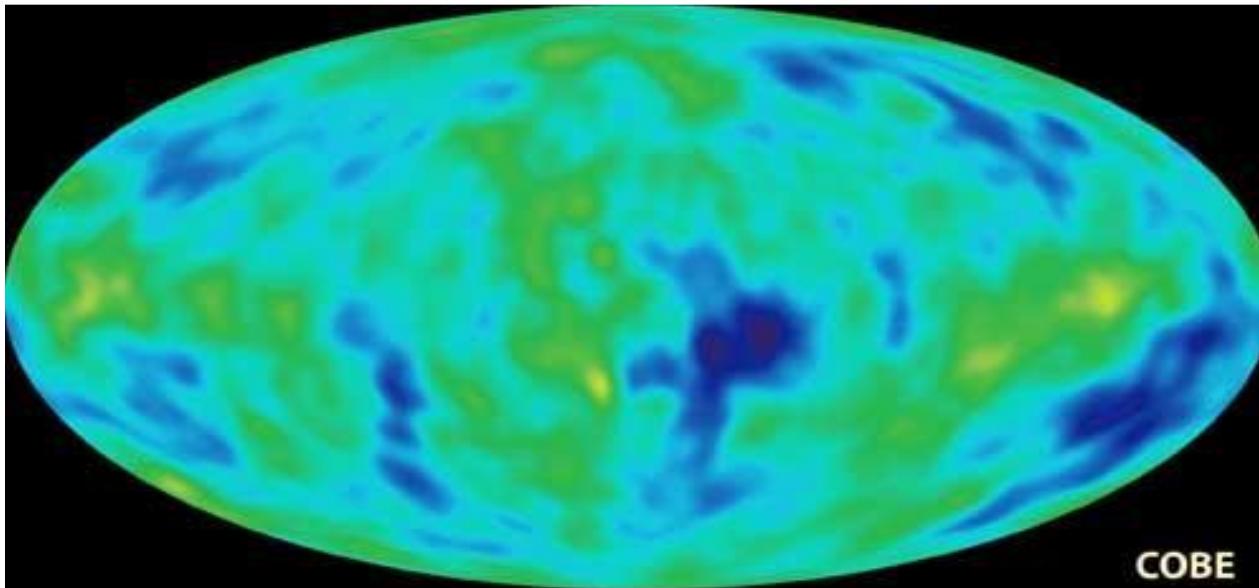
« Dipôle » cosmologique:
 $\Delta T = 3,353 \text{ mK}$

Micro-fluctuations:
 $\Delta T \sim 1,8 \times 10^{-5} \text{ K}$

Smoot et al. 1992, satellite COBE (COsmic Background Explorer)

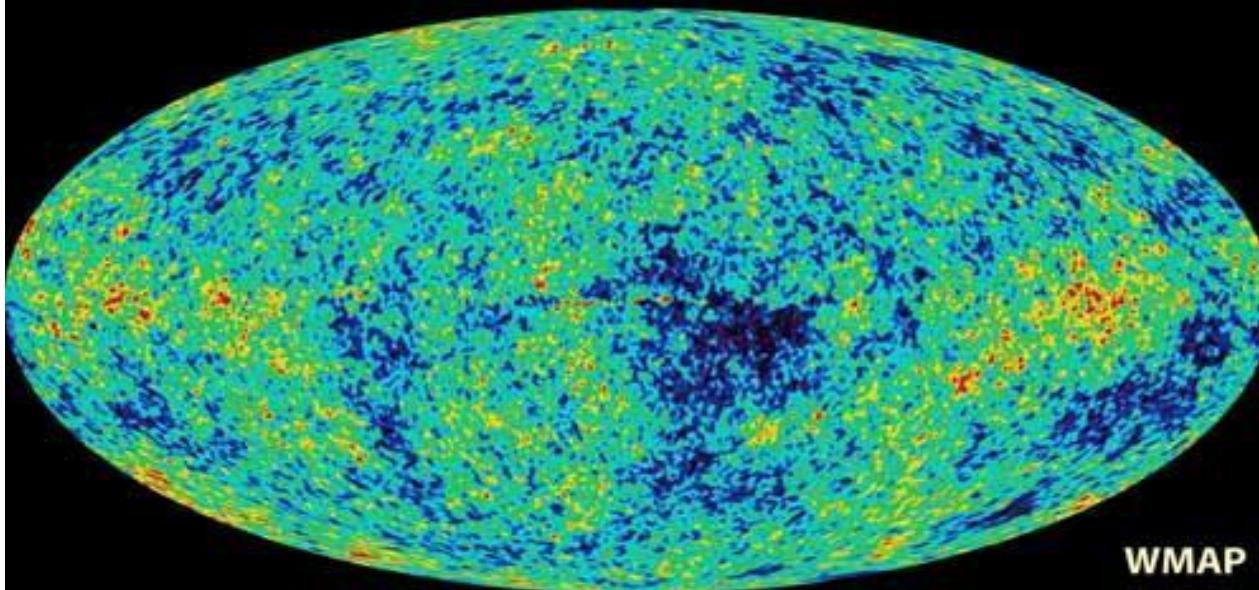


Fluctuations (de température) du fond cosmologique



COBE

COBE, 1992

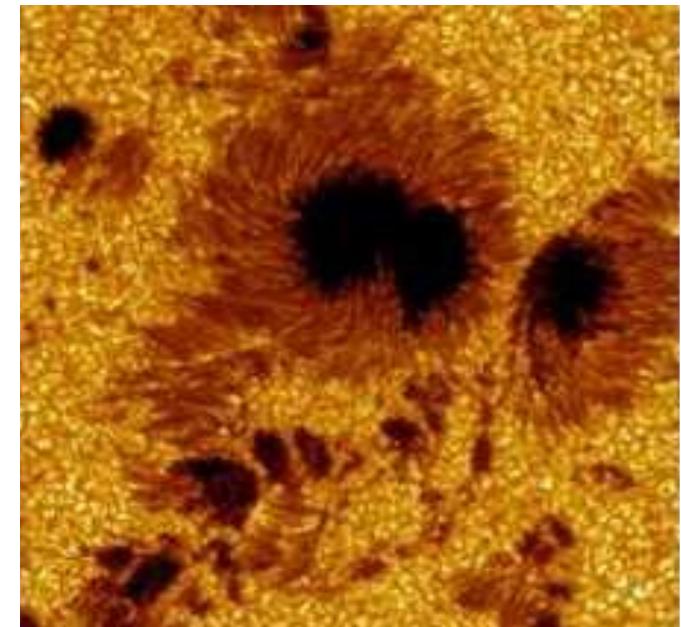
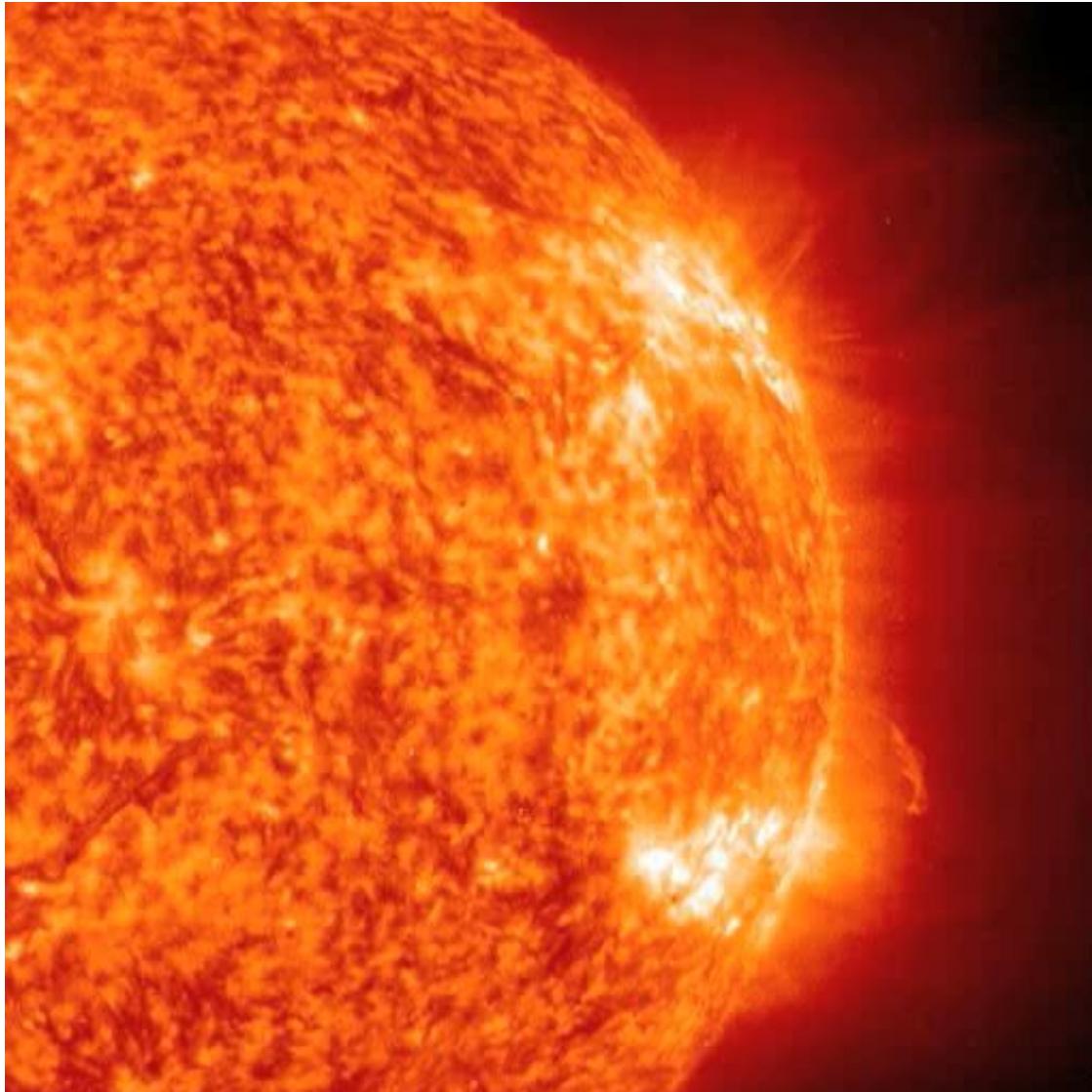


WMAP

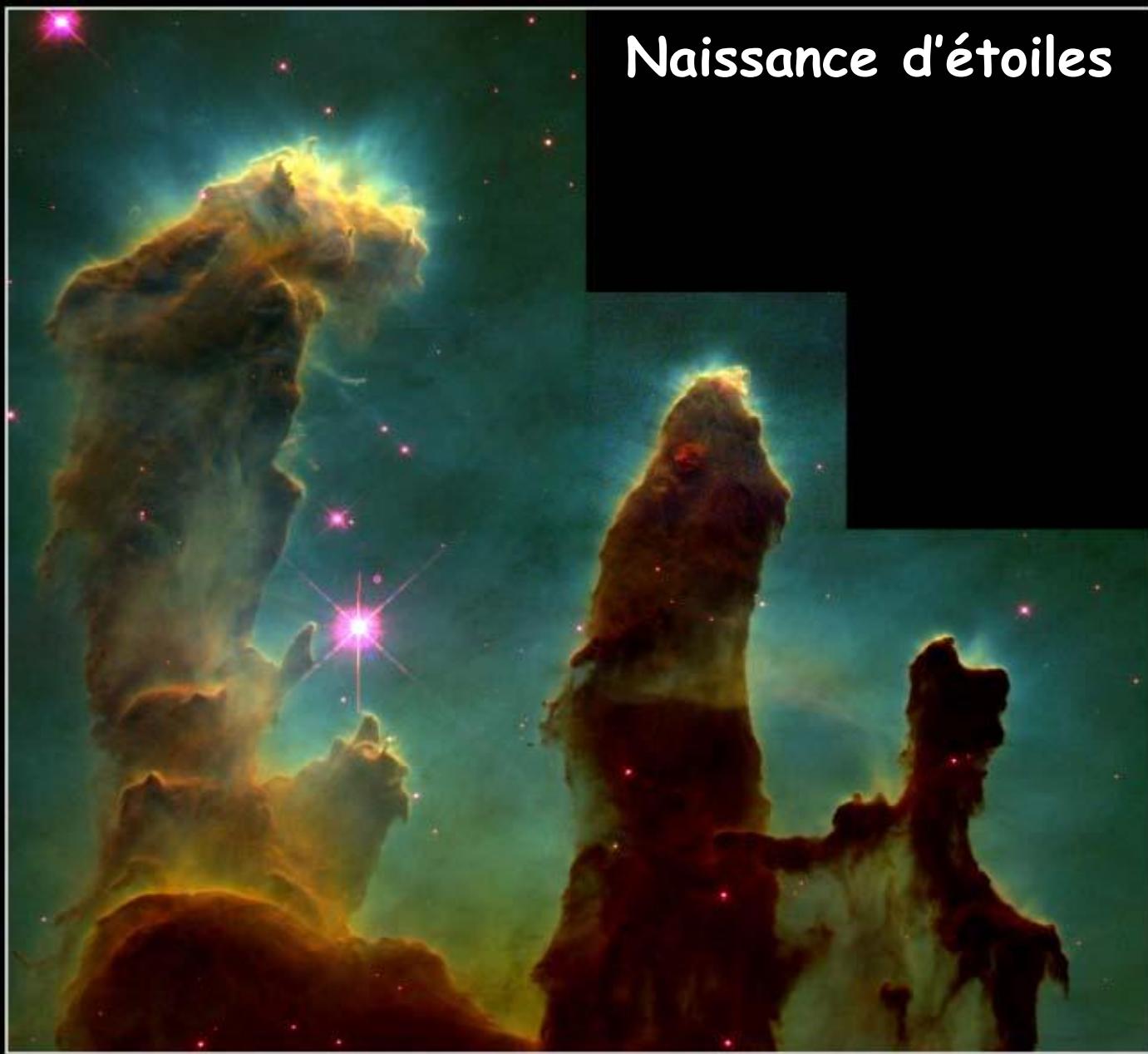
Wilkinson Microwave
Anisotropy Probe,
Spergel et al. 2006

Les étoiles

(dont seul le Soleil montre un diamètre apparent)



Naissance d'étoiles



Gaseous Pillars • M16

HST • WFPC2

PRC95-44a • ST Scl OPO • November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

La nébuleuse d'Orion vue par le Hubble Space Telescope.



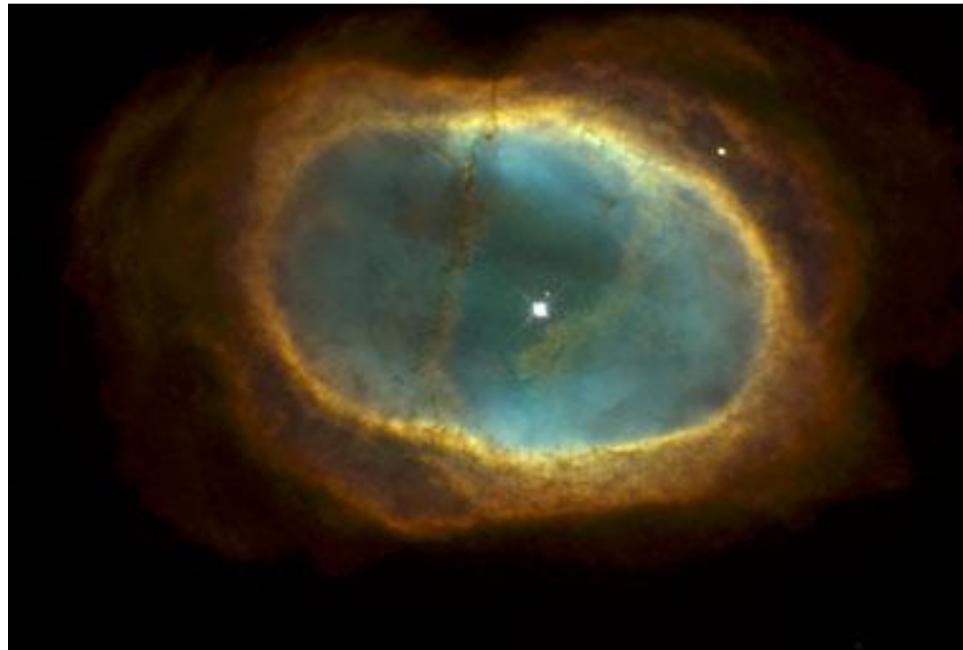
Mort d'étoiles: scénario « tranquille »

Nébuleuses « planétaires »

Diamètre 2-3 pc

Distance (dans les galaxies)

Masse $\sim 1-30 M_{\odot}$



Présence d'une étoile « naine blanche » centrale.

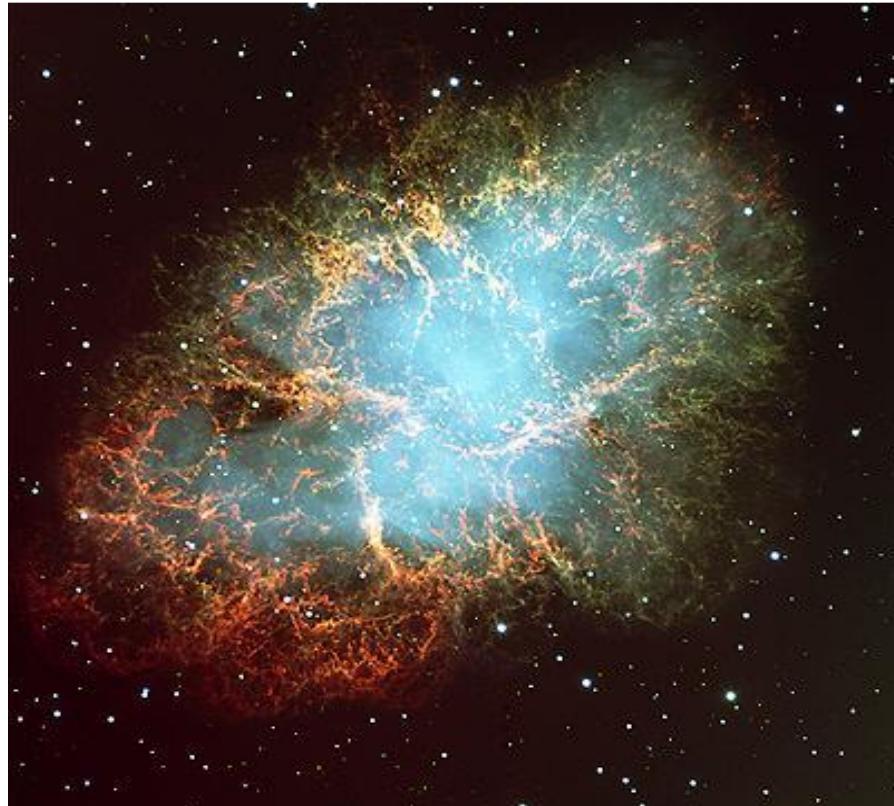
Mort d'étoiles: scénario « violent »

Supernovae (rémanents)

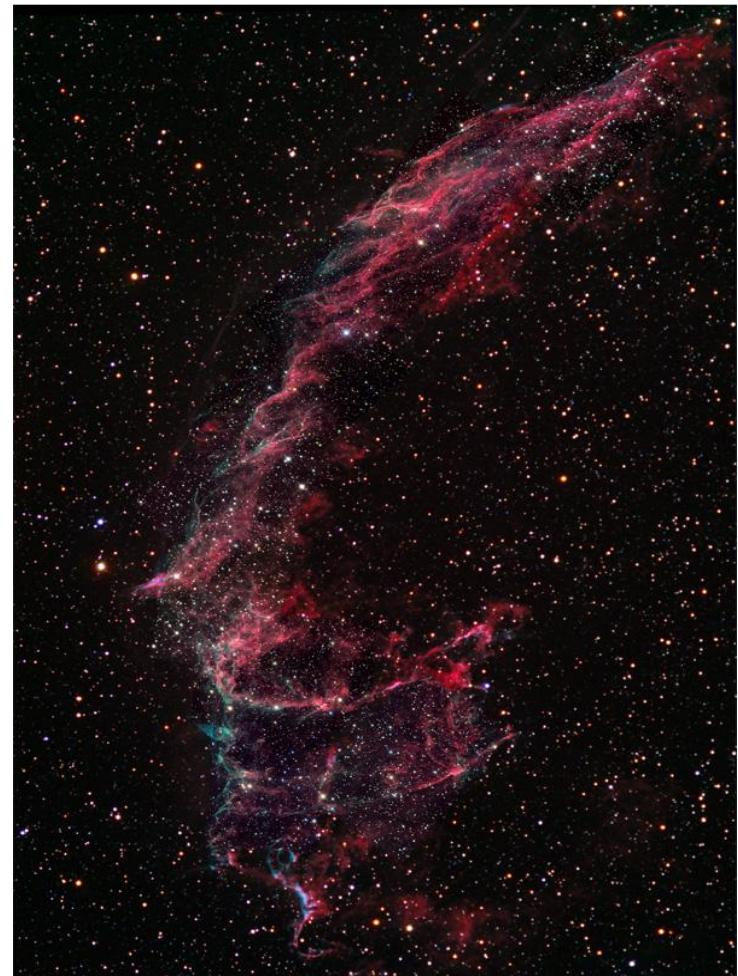
Diamètre 2-3 pc

Distance (dans les galaxies)

Masse $\sim 3\text{-}30 M_{\odot}$



Présence d'une « étoile à neutrons » centrale.



Amas stellaires jeunes

NGC 290 (dans le petit nuage de Magellan)

1000 étoiles

Age: 7×10^8 ans

Diamètre 10 pc

Distance 6×10^4 pc



M45, « les Pleiades »

500 étoiles

Age: 4×10^7 ans

Diamètre 7 pc

Distance 120 pc

Etoiles jeunes et chaudes

Amas stellaires vieux: amas globulaires



47 Tucanae

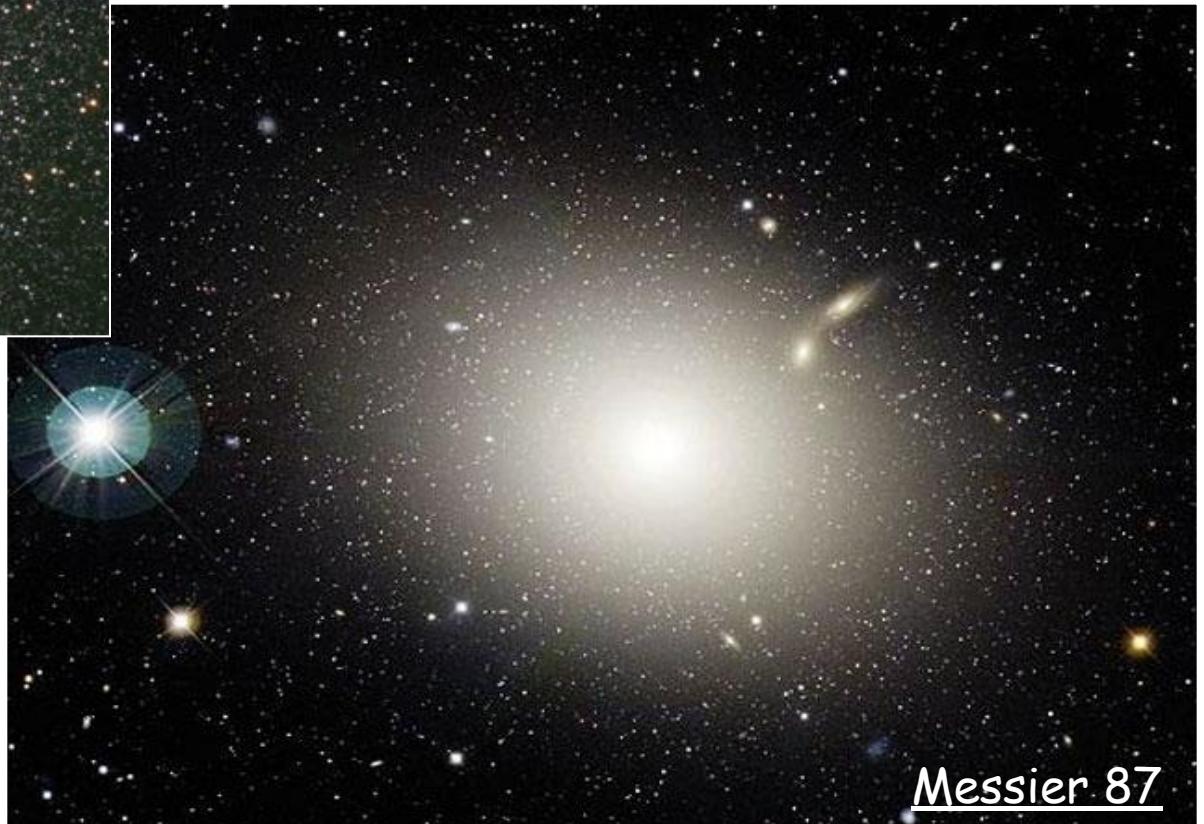
Diamètre 40 pc

Distance 400 pc

Masse $\sim 10^6 M_{\odot}$

Age $\sim 13 \times 10^9$ ans

-> comparable à l'âge de l'Univers





Un amas globulaire tel que ω Centauri
contient quelques millions d'étoiles

Télescope ESO de 2.2m de diamètre

Les galaxies elliptiques (géantes)



Messier 87

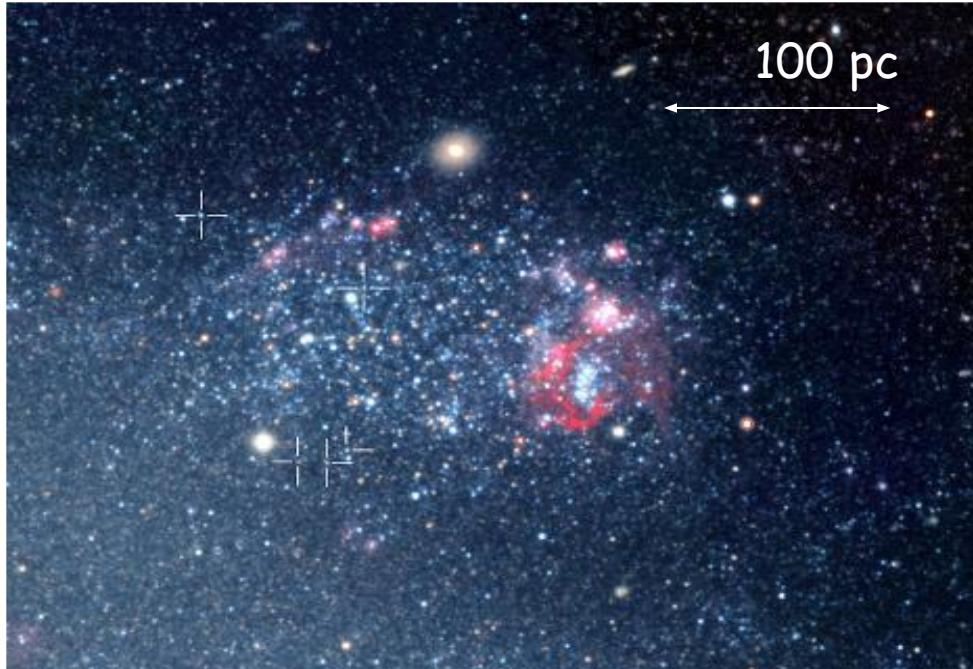
$M \sim 4 \times 10^{12} M_{\odot}$

Distance $\sim 1,6 \times 10^7$ pc

$z \sim 0$

Diamètre ~ 40 kpc

Galaxies spirales



NGC 300

$M \sim 10^{11} M_{\odot}$

Distance $\sim 6 \times 10^7$ pc

Diamètre ~ 40 kpc



Galaxie spirale (comme la Voie-Lactée)



NGC 4565
Vue de profil
Similaire à notre galaxie

Messier 81



Sombrero Galaxy • M104



Hubble
Heritage

Rencontres entre galaxies



Rencontres entre galaxies et formation d'étoiles



Galaxie « des antennes »

Les amas de galaxies



Abell 1689

$M \sim 2,5 \times 10^{15} M_{\odot}$

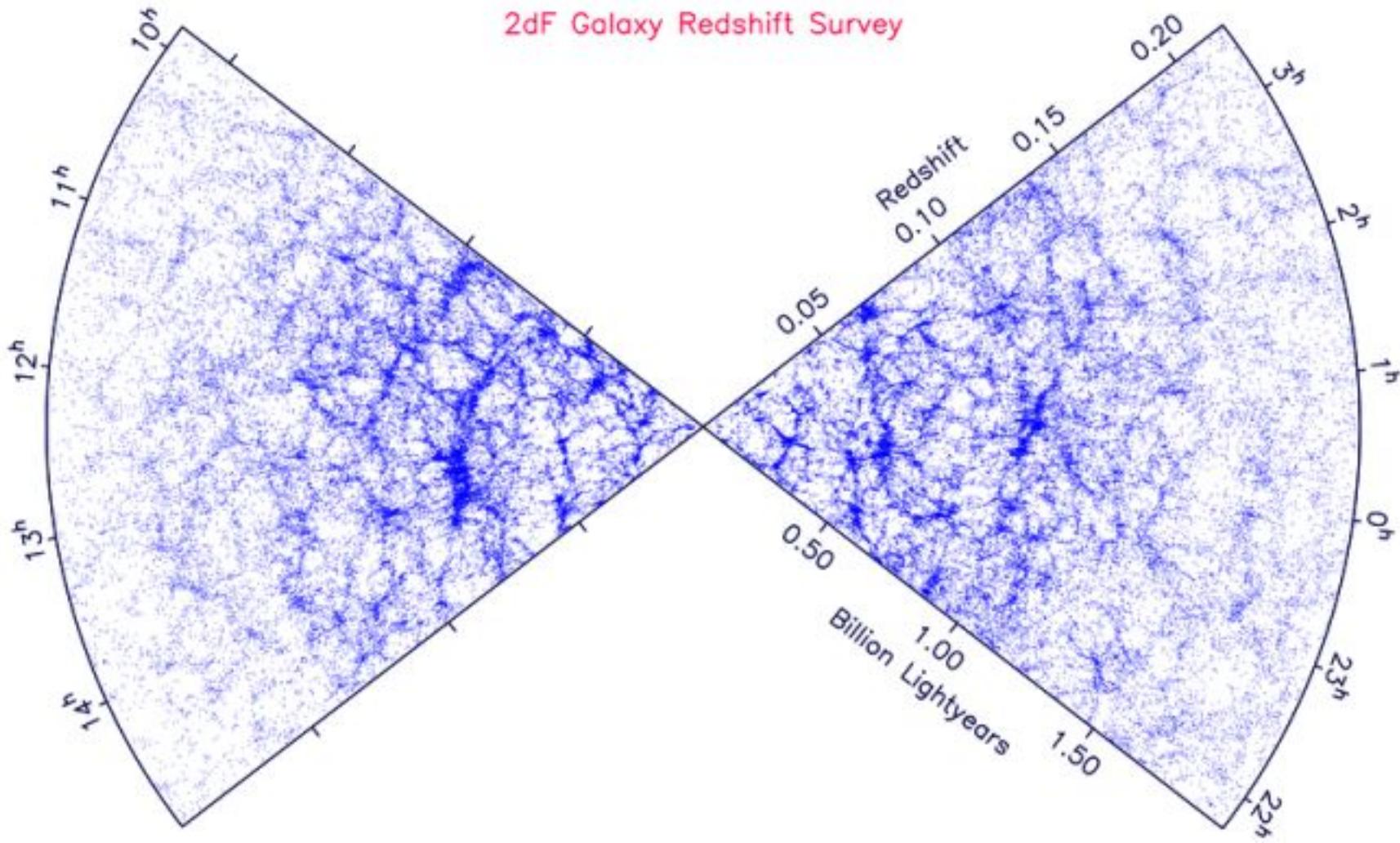
Distance $\sim 10^9$ pc

$z = 0,18$

Diamètre ~ 5 Mpc

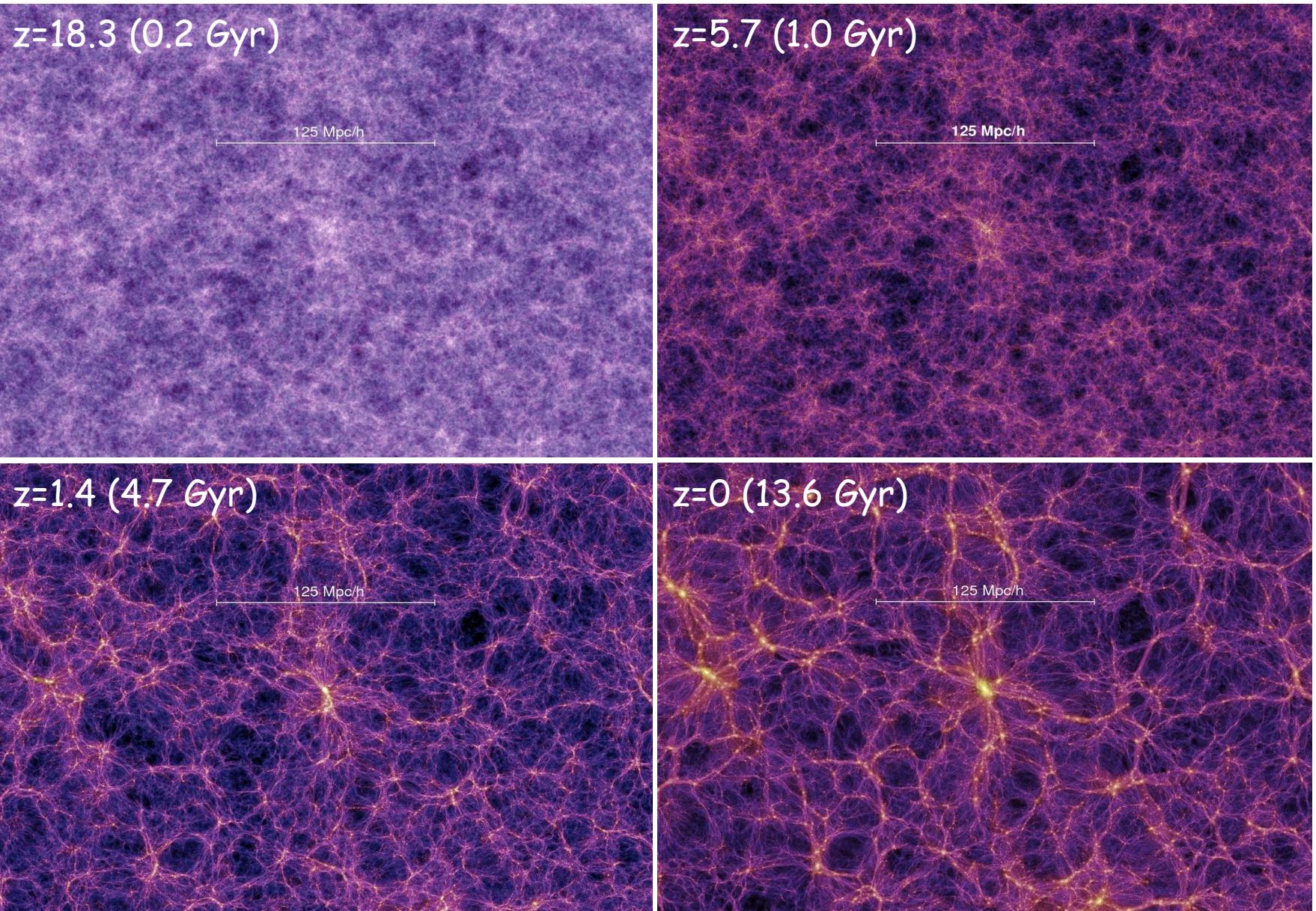


L'Univers observé

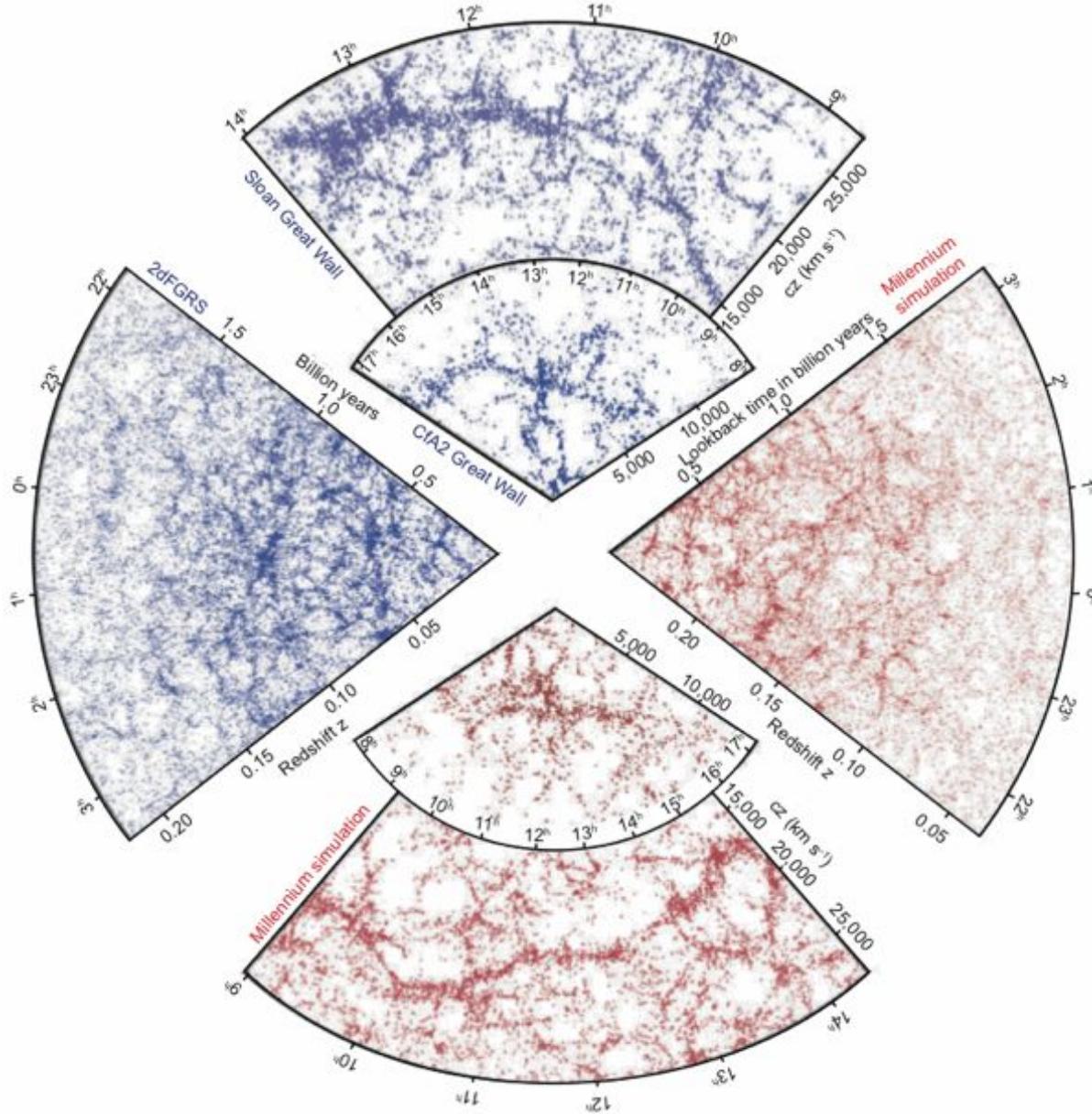




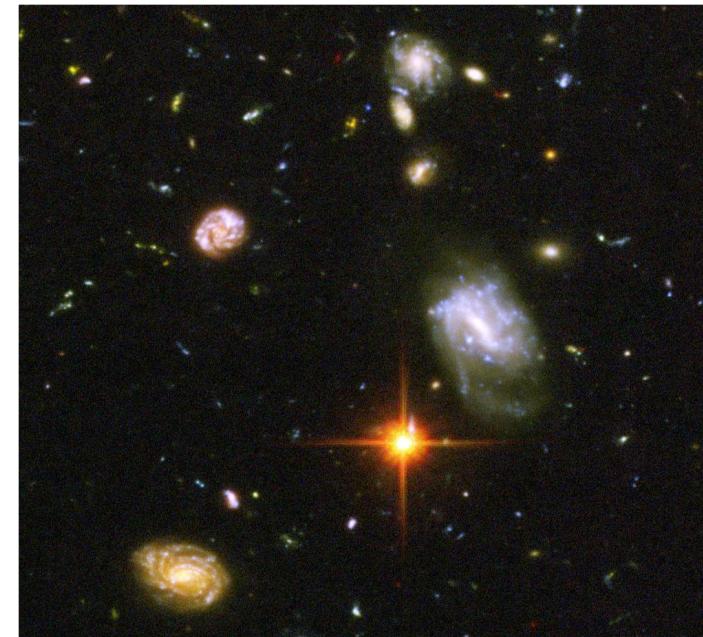
L'Univers théorique



L'Univers théorique et observé



L'Univers réel: Hubble Ultra Deep Field



Champ « cosmologique »

Plus de 10'000 galaxies
jusqu'à $z \sim 6$

Archeology of Light

An Immersive Journey Through Space and Time

<https://longread.epfl.ch/en/dossier/archaeology-of-light/>



La Terre vue depuis Saturne et Mercure le 19 juillet 2013



View from Mercury (MESSENGER)
61 million miles away

Ellipses de la Lune et du Soleil

(Figures pour les exercices)





