

# La structure de l'Univers

*PHYS-F-105*

Université Libre de Bruxelles  
Cours de-BAC-1



**Titulaire : Alain JORISSEN**

Institut d'Astronomie et d'Astrophysique  
Bâtiment NO, N4.108A  
ajorisse@astro.ulb.ac.be

**Co-titulaire : Rodrigo ALVAREZ**

Observatoire royal de Belgique  
Planétarium de Bruxelles  
rodrigo.alvarez@oma.be

# La structure de l'Univers



Hubble Deep Field

**L'Univers:** objet d'étude de l'astronomie

**Astronomie:** Science de l'observation des astres

# Science / Observation / Astres



*Le Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*

Galilée, 1632

**Science:** expliquer de manière rationnelle le monde en s'appuyant sur la **méthode scientifique**

➤ élaboration d'hypothèses, déduction de prédictions, conception d'expériences ou d'observations, confrontation aux résultats, validation des modèles, formulation théorique



*Le Very Large  
Telescope*

ESO, Chili

**Observation:** contrairement aux autres domaines de la physique, l'astronomie repose essentiellement sur des **données observées** (télescopes, etc)

➤ pas (ou peu) d'expérience possible

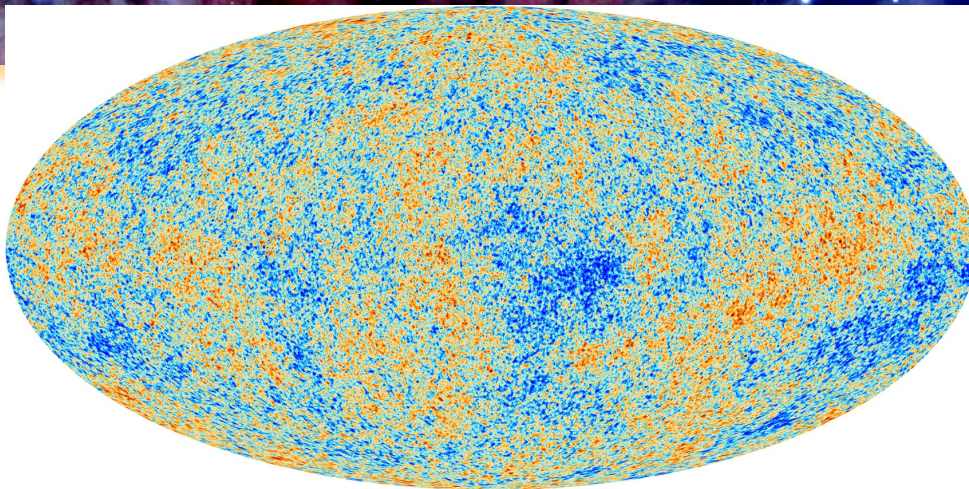


*Projet  
The World at  
Night*

**Astres:** objets célestes tels que planètes, astéroïdes, comètes, étoiles, galaxies

➤ notion de **visibilité** (à l'œil nu ou avec un instrument d'observation)

# Astronomie & Physique



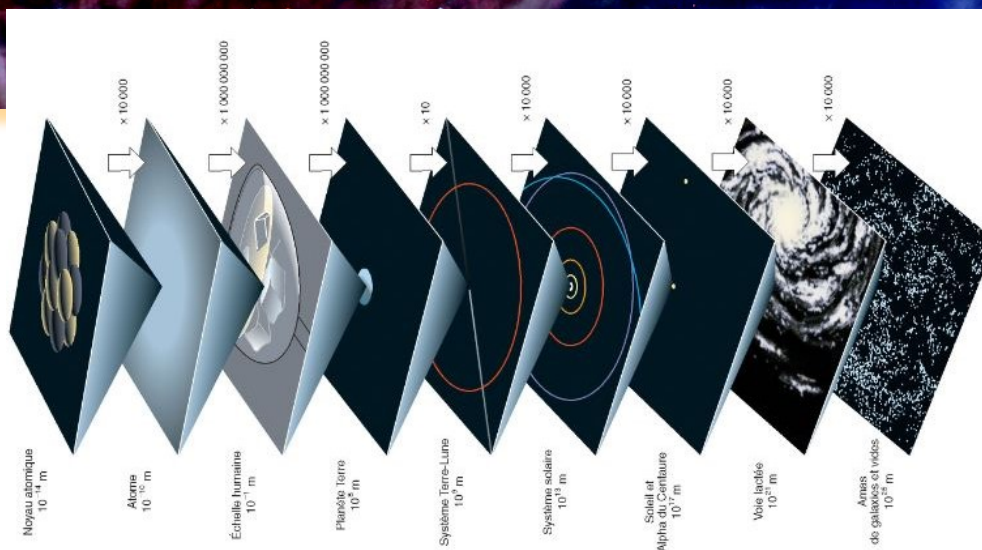
Le fond diffus cosmologique

satellite Planck (ESA)

**Objets astronomiques:** mais l'Univers est aussi composé d'objets moins visibles : gaz, poussières, rayonnement hors du domaine optique, trou noir, matière sombre...

➤ résultats de processus physiques: **astrophysique**

# La structure de l'Univers



**Structure:** les objets de l'Univers sont structurés :

planètes < étoiles < galaxies < amas < super amas

➤ résultat des processus physiques ayant donné naissance aux objets célestes et ayant façonné l'Univers

## Cours d'astronomie descriptive

- ✓ Quels sont les différents objets qui peuplent l'Univers?
- ✓ Quelle est la structure hiérarchisée de l'Univers?

## Plan du cours

### Notre place dans l'univers hiérarchisé

- les puissances de dix
- petit historique

### Les apparences sont trompeuses

- apparente rotation de la voûte céleste
- système planétaire géo- ou héliocentrique?

### Les systèmes planétaires

- le système solaire
- les exo-planètes
- sommes-nous seuls?

# Plan du cours

## Le monde des étoiles

- le Soleil
- formation et évolution des étoiles

## Le monde des galaxies

- notre Galaxie
- galaxies, amas et super amas
- structure filamentaire à grande échelle

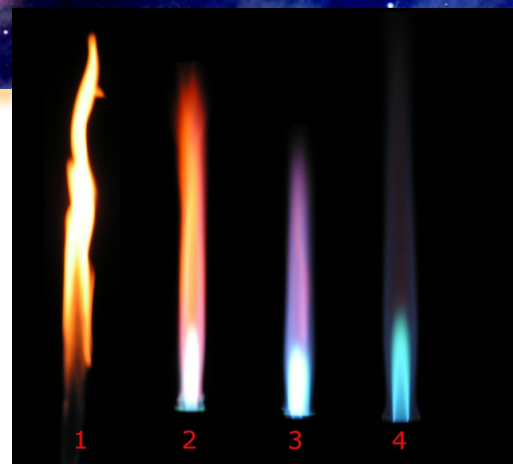
## Rudiments de cosmologie

- expansion de l'Univers (loi de Hubble)
- paradoxe d'Olbers

# Sur la Terre comme au ciel



Couleur des étoiles de la constellation d'Orion



Couleur de la flamme d'un bec Bunsen selon la température

**Universalité des lois de la physique:** autant que faire se peut, relier les observations astronomiques aux observations physiques de la vie courante

# Recommandations

## Cours basé sur l'ouvrage « Astronomie & Astrophysique »

Seguin et Villeneuve, éditions De Boeck Université  
disponible aux PUB (environ 75€)  
quelques exemplaires à la B.S.T

## Publication des diapositives aux P.U.B.

ne remplace pas un texte documenté comme  
disponible dans le livre

# Recommandations

## Diapositives disponibles sur le site du cours

<http://www.astro.ulb.ac.be/pmwiki/Teaching/PHYS-F-105>

Mot de passe requis (pour des questions de droits d'auteur):

- ✓ user name: students
- ✓ password: phys-f-105

## Images et table des matières

Un album photo de l'univers:

<http://www.ulb.ac.be/sciences/astro/cd/>

Table des matières détaillée:

<http://www.astro.ulb.ac.be/pmwiki/Teaching/PHYS-F-105/Synopsis>

# Exercices et visite

## Exercices

Donnés au fur et à mesure de l'avancement du cours.

Cotation comptant dans la note finale (typiquement 4 exercices à 0.5 points chaque et examen final sur 18 points)

## Visite du Planétarium

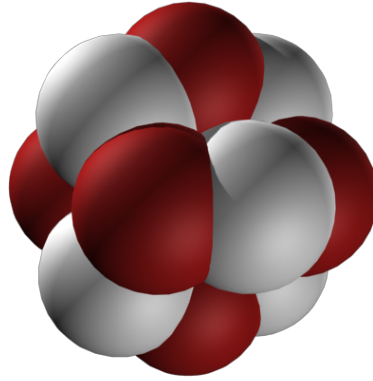
Mouvements diurne et annuel, écliptique, précession, etc

Le **mardi 20 décembre**, 10h-12h30



## Les puissances de 10

### Le noyau atomique



$10^{-15}$  m

## Notre place dans l'Univers hiérarchisé

### Le noyau atomique

Constitué de Z protons et N neutrons

**Proton:** charge électrique +1 ; Z définit l'élément chimique

H: 1 / He: 2 / Li: 3 / Be: 4 / B: 5 / C: 6 / N: 7 / O: 8 / Ne: 9

**Neutron:** charge électrique 0

Z protons + N neutrons = A **nucléons**

A: **nombre de masse;** définit l'isotope de l'élément chimique

Ex:  $^{12}\text{C}$  (carbone 12) : A=12, Z=6

Ex:  $^{14}\text{C}$  (carbone 14) : Z=6, N=8

Domaine des interactions forte et faible

**Interaction forte:** cohésion du noyau (charges électriques positives)

**Interaction faible:** désintégration, radioactivité

# Notre place dans l'Univers hiérarchisé

## Le noyau atomique

Décrit par la théorie quantique des champs

**Physique quantique:** « particules » non localisées, interprétation en terme de probabilité de détection

**Théorie de relativité d'Einstein:** existence d'une vitesse limite, invariance de l'intervalle d'espace-temps

Masse caractéristique

**Unité de masse atomique** =  $1/12$  masse atome de  $^{12}\text{C}$  =  $1.66054 \cdot 10^{-27}$  kg  
 $12 \text{ g de } ^{12}\text{C} = N_{\text{AV}} \text{ atomes de } ^{12}\text{C} \Rightarrow 1 \text{ uma} = (1/N_{\text{AV}}) \text{ g}$

Noyau atomique comportant A nucléons: **masse  $\sim A$  uma**

# Notre place dans l'Univers hiérarchisé

## Le noyau atomique

Taille et densité caractéristiques

Rayon caractéristique :  $R_0 = 10^{-15} \text{ m}$  (pour  $A=1$ )

Densité caractéristique:  $r = (A \text{ uma})/R_0^3 = 1.66 \cdot 10^{18} \text{ kg.m}^{-3} = 1.66 \cdot 10^{15} \text{ g.cm}^{-3}$

Etoile de même densité?

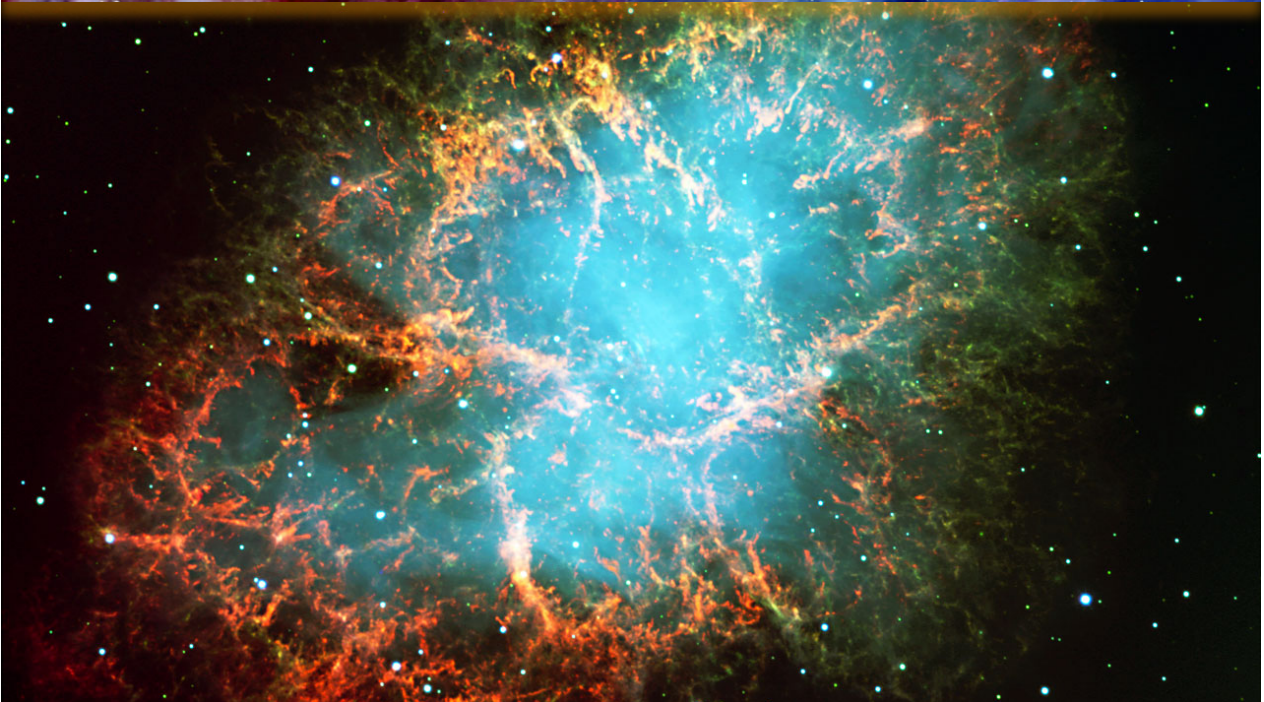
1 masse solaire ( $1 M_{\odot} = 1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ) avec densité  $r$  de noyau atomique

- $R_* = [1 M_{\odot} / (4/3 \pi r)]^{1/3} = 6.6 \text{ km}$
- densité  $r$ : nucléons (neutrons) empilés les uns sur les autres, sans vide
- astre de masse stellaire dans un rayon de quelques km

➤ **Etoile à neutrons (ou pulsar)**

## Nébuleuse du Crabe

*Résidu de la supernova de 1054 (dans le Taureau)  
Pulsar au centre*

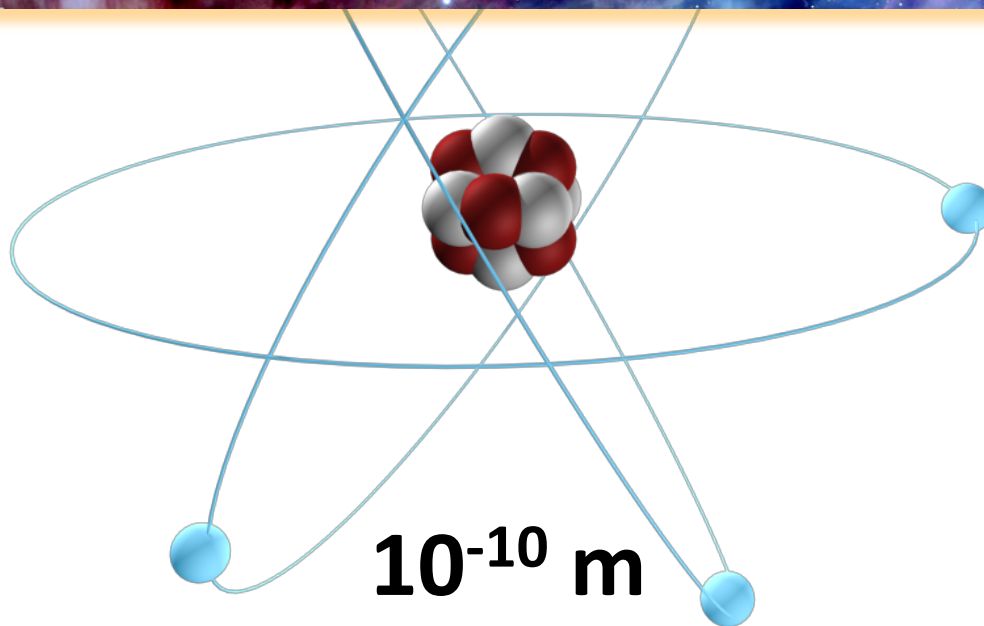


## Pulsar de Vela

*Résidu d'une supernova survenue dans la constellation  
des Voiles il y a 11 000 ans*



## Les puissances de 10 L'atome



## Notre place dans l'Univers hiérarchisé L'atome

Constitué d'un noyau (charge électrique  $+Z$ ) et de  $Z$  électrons (charge  $-Z$ )

**Ion:**  $Z$  protons et  $(Z-x)$  électrons

Ex: atome d'hélium une fois ionisé :  $\text{He}^+$

**Notation spectroscopique:** I si  $x=0$ , II si  $x=1$ , III si  $x=2$

Ex: He I = atome d'hélium neutre, He II =  $\text{He}^+$

Domaine de l'interaction électromagnétique

**Interaction coulombienne:**  $(Z-x)$  électrons dans un champ électrique statique créé par  $Z$  protons



### Décrit par la mécanique quantique

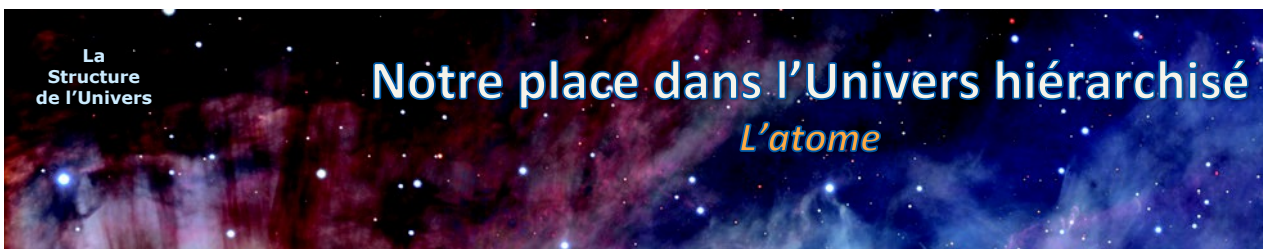
**Physique quantique:** « particules » non localisées, interprétation en terme de probabilité de détection

**Théorie de relativité de Galilée:** composition additive des vitesses, invariance des distances et des durées

### Masse caractéristique

**Masse de l'électron :** environ 1/1800 la masse du proton

Masse d'un atome en uma :  $Z + N + (Z-x)/1800$



### Taille et densité caractéristiques

Rayon caractéristique :  $r = 10^{-10} \text{ m}$

Densité caractéristique:  $r = (A \text{ uma})/r^3 = 1.66 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3} \sim 1 \text{ g.cm}^{-3}$

### Milieu entre étoiles

Dans un cube de 1 cm de côté, on trouve en moyenne **1 seul atome** dans l'espace interstellaire

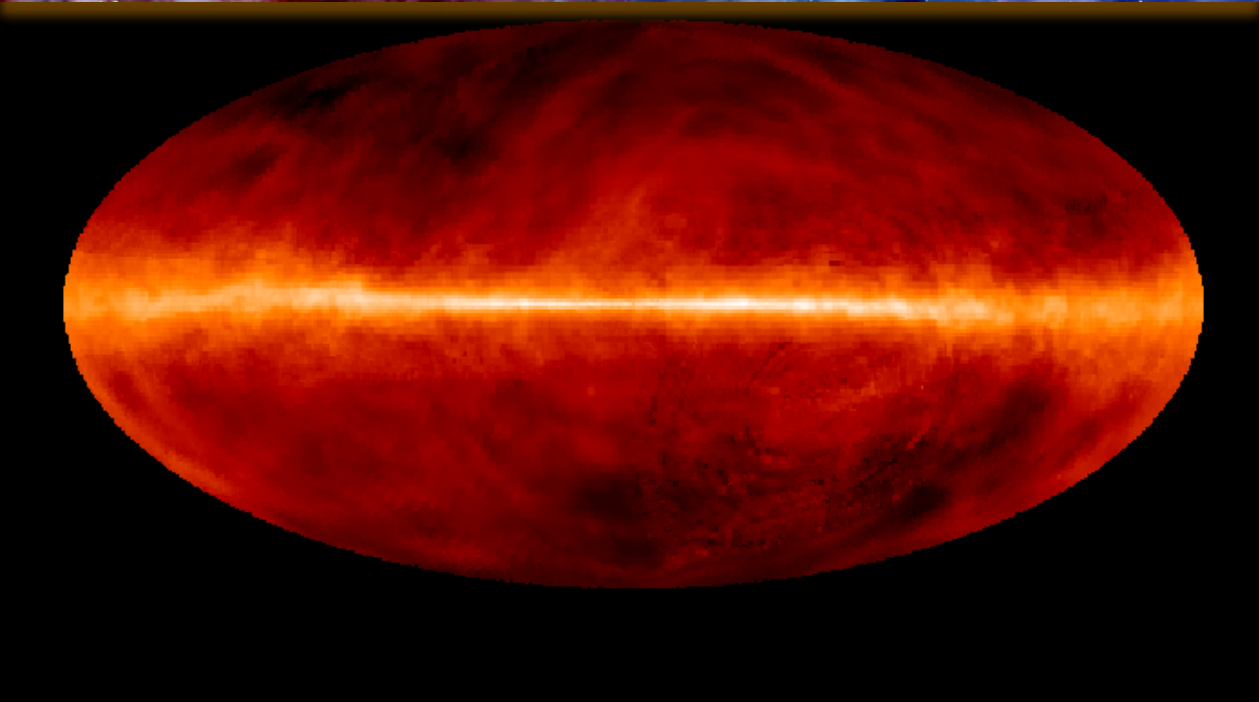
L'air que nous respirons sur Terre contient 100 milliards de milliards de molécules par  $\text{cm}^3$

Concentration d'atomes dans le milieu interstellaire: nuage d'hydrogène neutre d'une densité de **1-1000 atomes** par  $\text{cm}^3$

➤ Région HI

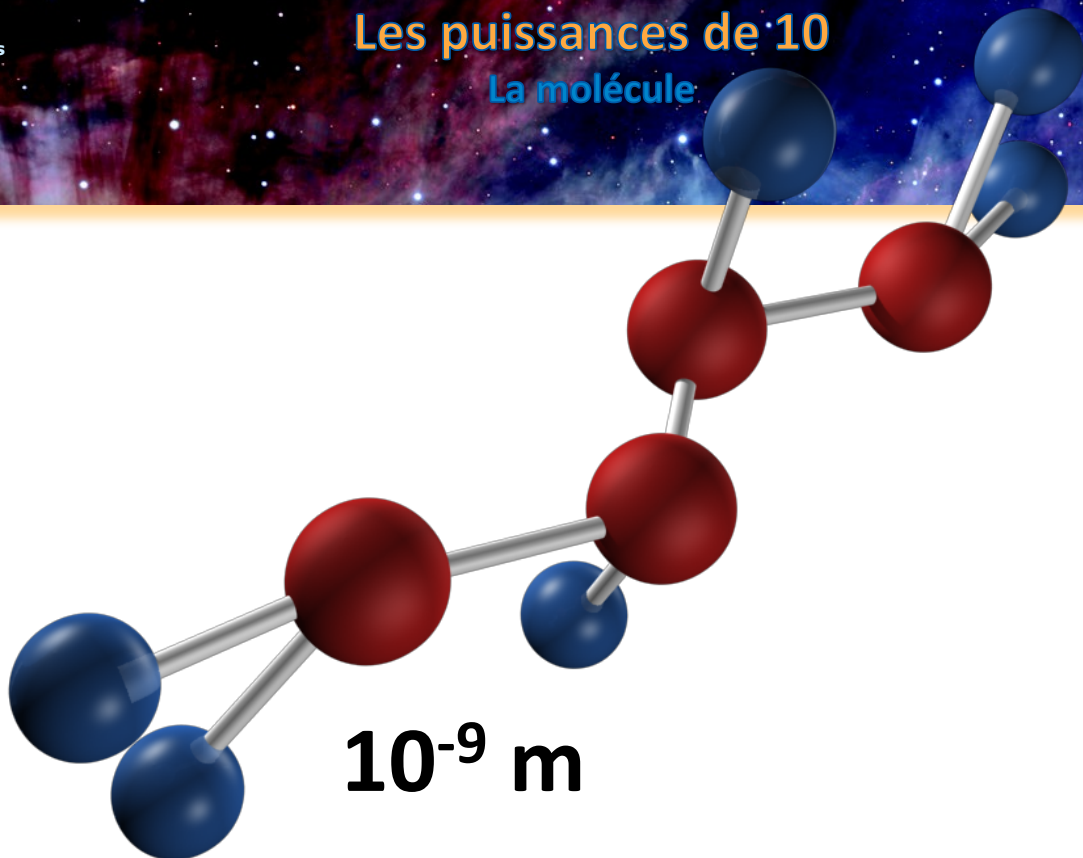
# Cartographie de l'hydrogène atomique

Rayonnement à 21 cm (1420 MHz)



## Les puissances de 10

La molécule



### Nuage interstellaire dense

La densité des nuages interstellaires peut atteindre **1000 à 100 000 particules** par  $\text{cm}^3$ : formation d'hydrogène moléculaire ( $\text{H}_2$ )

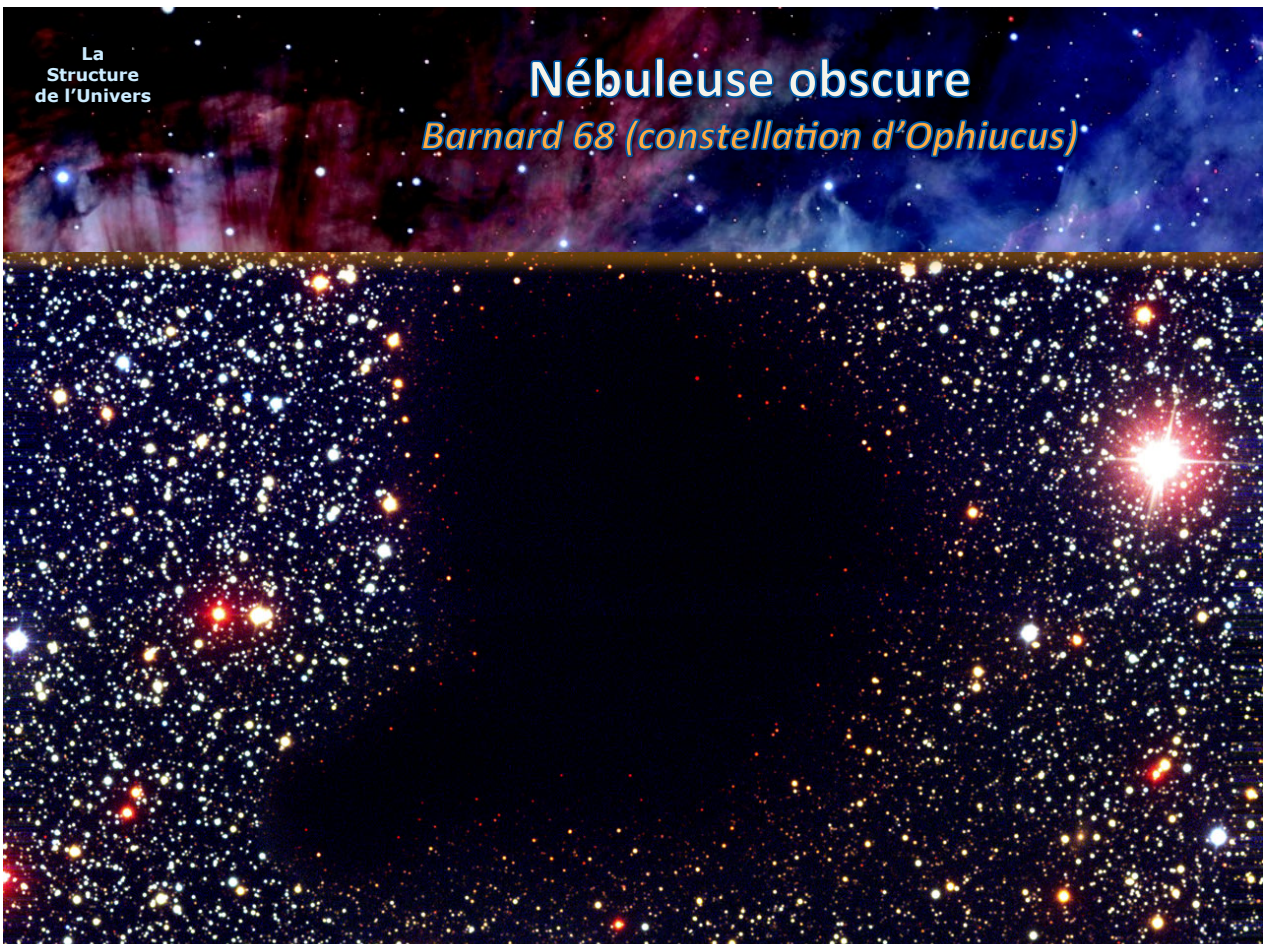
Densité équivalent à 1/10 du **vide extrême** obtenu en laboratoire

#### ➤ Nuage moléculaire

### Nuage moléculaire géant

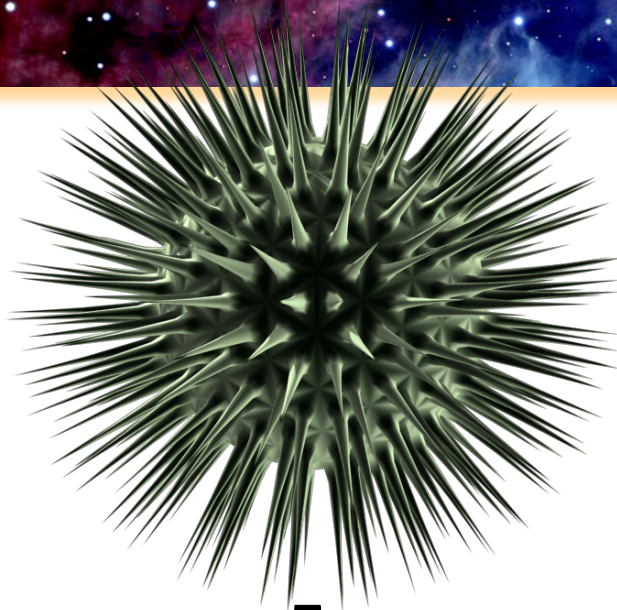
Nuage représentant **mille à 10 millions** de fois la masse du Soleil, composé de gaz et de grains de poussière qui peuvent bloquer la lumière

#### ➤ Nébuleuse sombre



## Les puissances de 10

### Le virus



$10^{-7}$  m

## Notre place dans l'Univers hiérarchisé

### Le virus

Echelle caractéristique: quelques milliards d'atomes

Virus = 0.1  $\mu$ m  $\sim$  taille de la **poussière cosmique**

La poussière interstellaire représente **1% de la matière interstellaire** mais se concentre de manière inhomogène

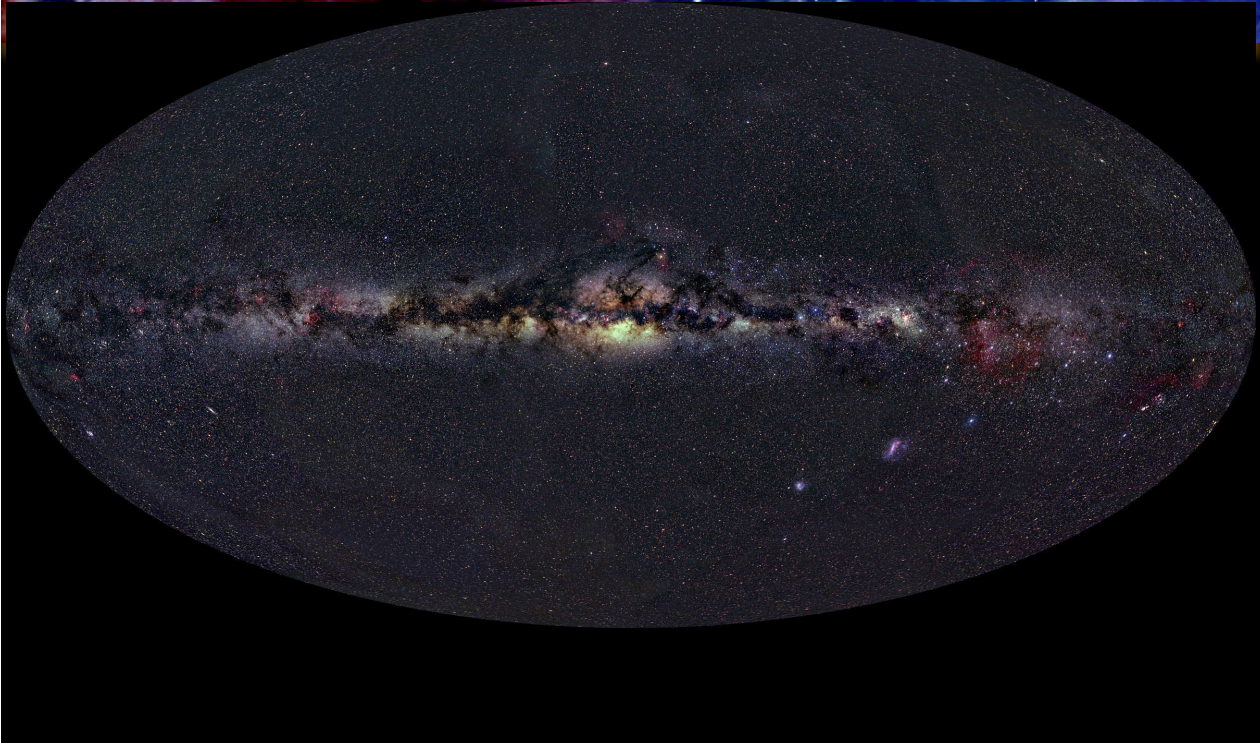
Les nuages de poussière **rougissent et atténuent** la lumière visible

➤ **Bandes sombres dans la Voie Lactée**



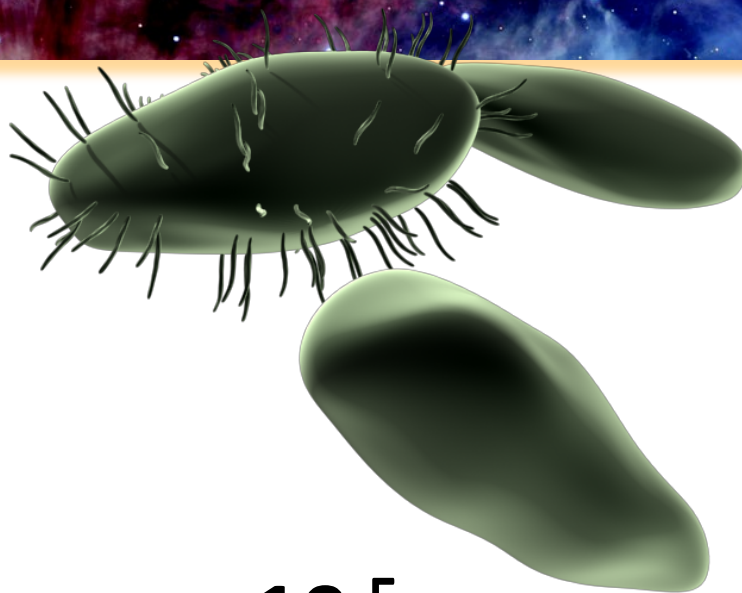
# La Voie Lactée en lumière visible

*Mosaïque de 3000 images CCD du ciel*



# Les puissances de 10

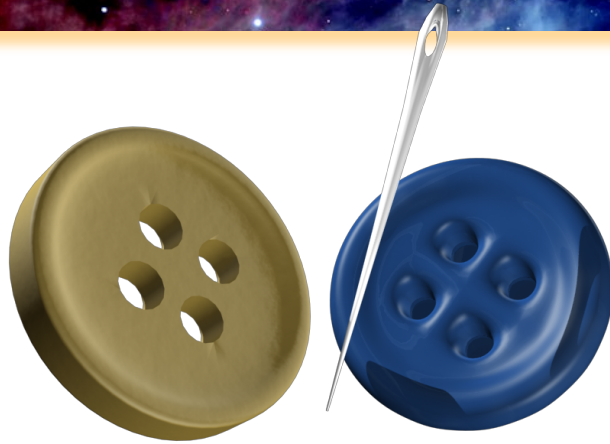
La bactérie



**$10^{-5}$  m**

## Les puissances de 10

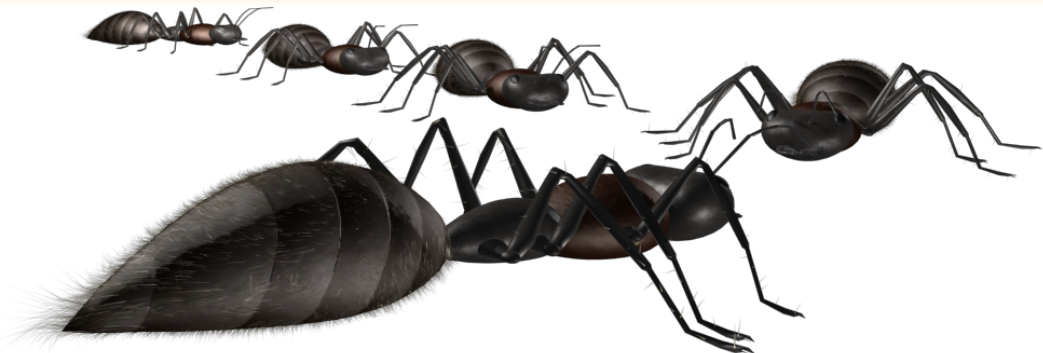
Hors du monde microscopique



$10^{-4}$  m

## Les puissances de 10

Monde macroscopique: du petit...



$10^{-2}$  m

## Etoiles filantes

Taille: grain de poussière / petit pois



## Les puissances de 10

Monde macroscopique: ... à l'échelle humaine ...



$10^0$  m

# Notre place dans l'Univers hiérarchisé

*L'échelle humaine*

Domaine régi par l'interaction coulombienne et l'interaction gravitationnelle

**Interaction coulombienne:** électrons et ions dans un champ électrostatique

**Interaction gravitationnelle:** masses dans un champ de gravité

Décrit par la mécanique classique

**Physique classique:** corps massifs localisés, évolution temporelle interprétée en terme non-probabiliste

**Théorie de relativité de Galilée:** composition additive des vitesses, invariance des distances et des durées

# Météore de Tcheliabinsk

*Taille: ~16 mètres*



15 février 2013  
Oural

# Météore de Tcheliabinsk

*Chute d'une météorite dans l'Oural en 2013*

## Les puissances de 10

Monde macroscopique: ... au grand



**$10^2$  m**

# Astéroïde 2015HM10

Taille: 50-100 mètres



7 juillet 2015: 440.000 km de la Terre (1.14 distance Terre-Lune)  
(vue d'artiste)

## Les puissances de 10

Les astéroïdes

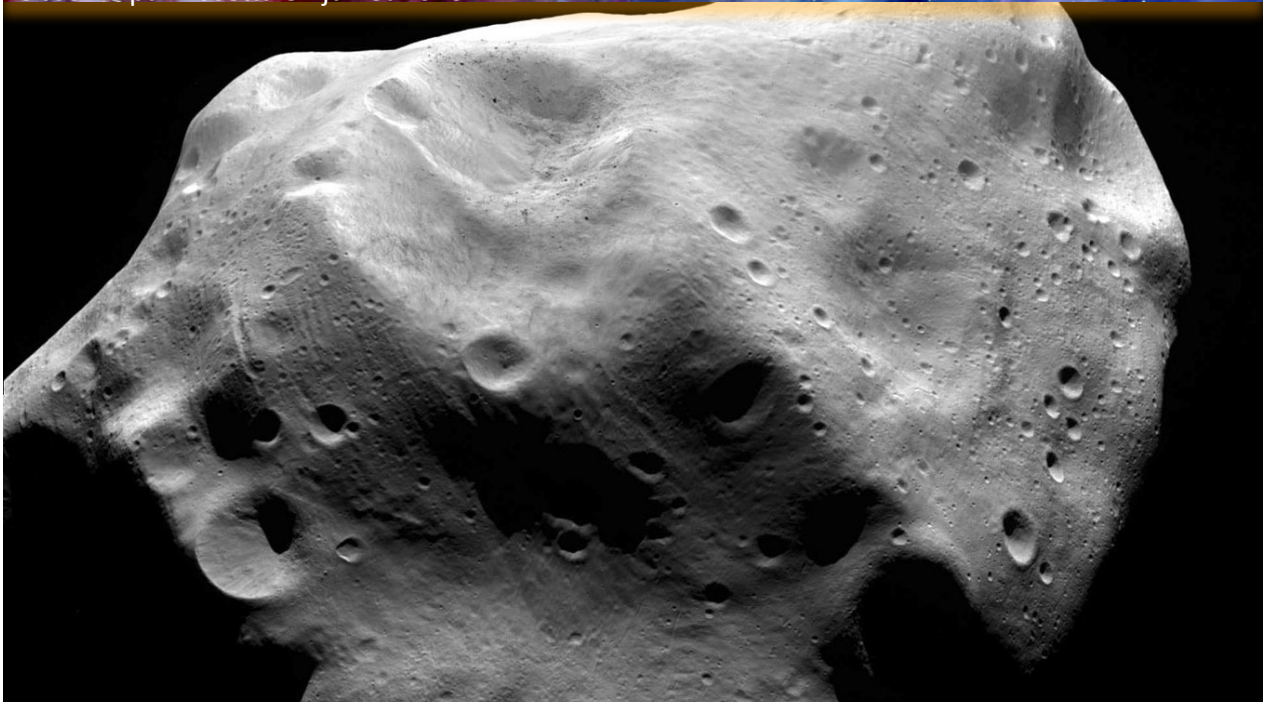


$10^5$  m

## Astéroïde Lutétia

Taille: 100 kilomètres

Observé par Rosetta en juillet 2010



## Les puissances de 10

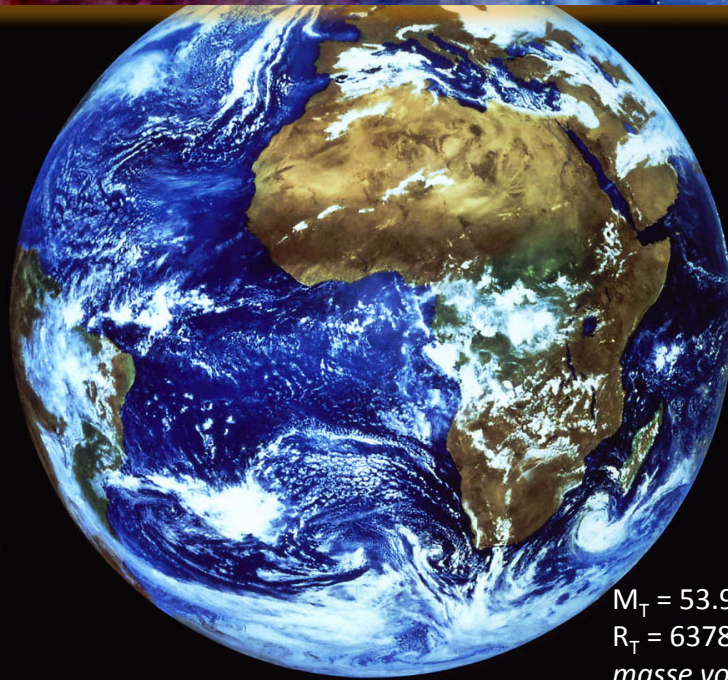
Les planètes telluriques



$10^7$  m

# La Terre

Observée par METEOSAT (ESA)



$M_T = 53.98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$   
 $R_T = 6378.140 \text{ km}$   
masse volumique =  $5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

# Planètes telluriques



Mercure

Vénus

Terre

Mars

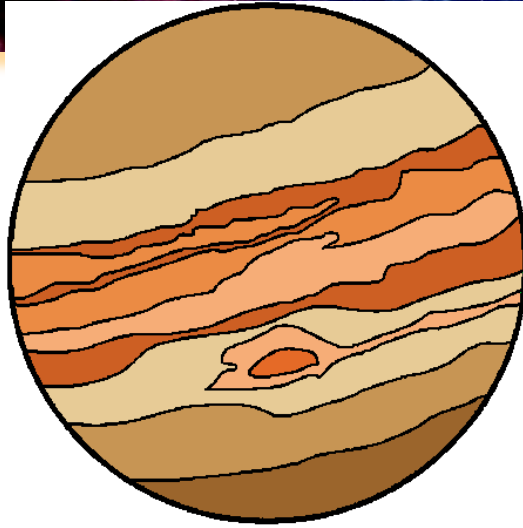
Planète « solide »: composée de roches et de métaux

Quatre planètes telluriques dans le système solaire



# Les puissances de 10

## Les planètes géantes



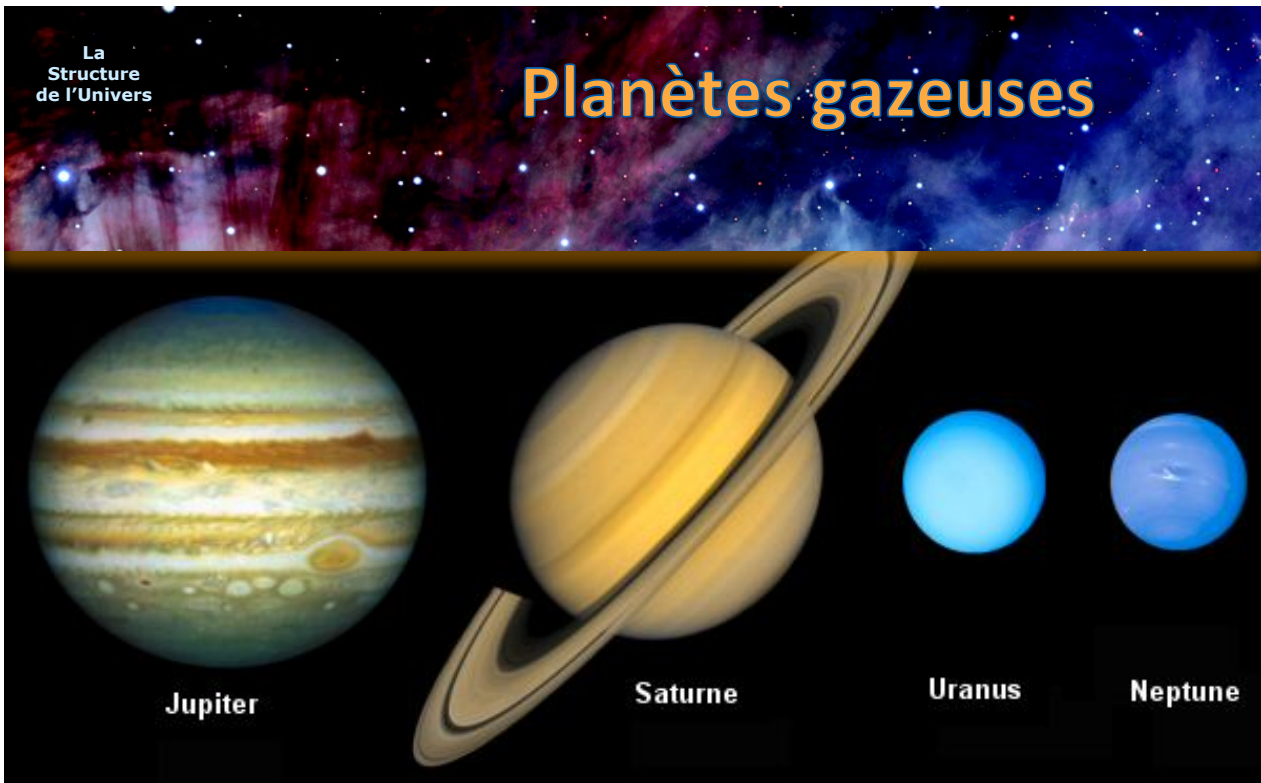
$10^8$  m

# Jupiter

## Planète géante gazeuse

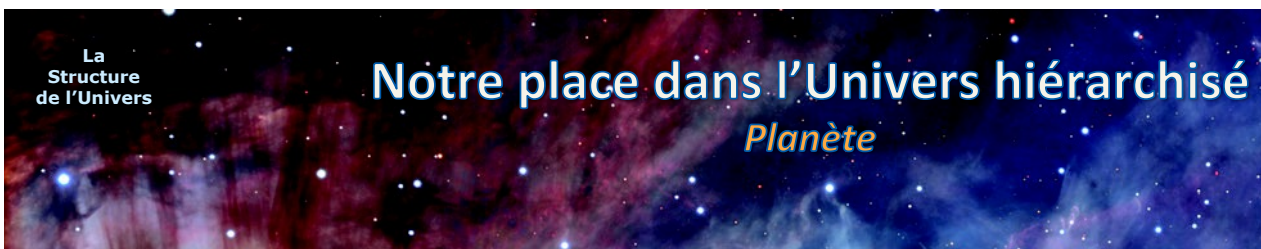


$M_J = 1.90 \cdot 10^{27}$  kg  
 $R_J = 71\,492$  km  
masse volumique =  $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$



Planète massive/peu dense: géante gazeuse et géante de glace

Quatre planètes géantes dans le système solaire



Objets planétaires (par opposition aux objets stellaires)

**Corps céleste intrinsèquement non lumineux:** n'émet pas de lumière propre (dans le visible)

**Corps céleste orbitant:** autour d'une étoile (Soleil)

Remarque: si orbite autour d'une planète => **satellite naturel** (Lune)

Domaine régi par l'interaction gravitationnelle

**Corps céleste sphérique:** les « grands » objets (de la taille d'une planète - pas les astéroïdes) prennent la forme d'une sphère (*équilibre hydrostatique*)

**Planètes et planètes naines:** la gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide (*forme sphérique*) + orbite autour du Soleil (*pas une lune*)

## Les puissances de 10

### Système planète-satellite



**$10^9$  m**

## Système Terre-Lune

*Distance moyenne : 384 000 km*

$R_T = 6378$  km

$R_L = 1750$  km

Distance Terre-Lune parcourue ...

- en 1.3 par la lumière ( $c = 299\,795.458$  km/s)
- en 4.4 jours par une fusée ( $v = 1$  km/s)
- en 5.3 mois par une « voiture » ( $v = 100$  km/h)



# La Lune

*Limite de l'extension de la présence humaine*

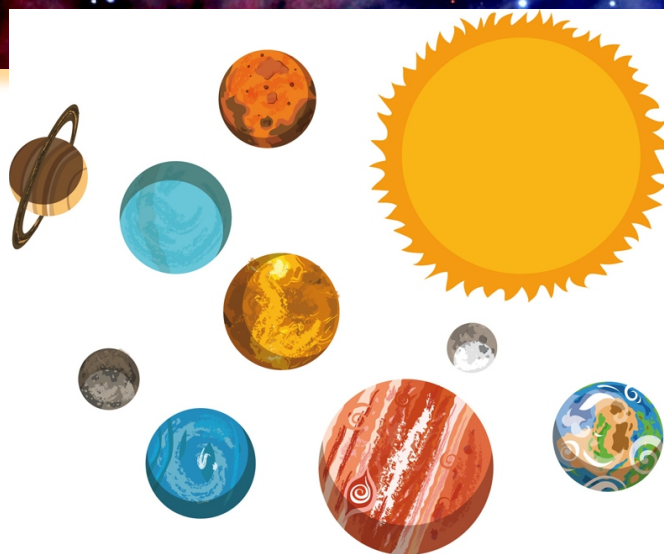
1<sup>er</sup> pas de l'Homme sur la Lune: Neil Armstrong le 21 juillet 1969



altitude ISS = 400 km...



# Les puissances de 10 Système solaire



**$10^{13}$  m**

# Notre place dans l'Univers hiérarchisé

## *Système solaire*

Soleil + 8 planètes + 2 ceintures de petits corps

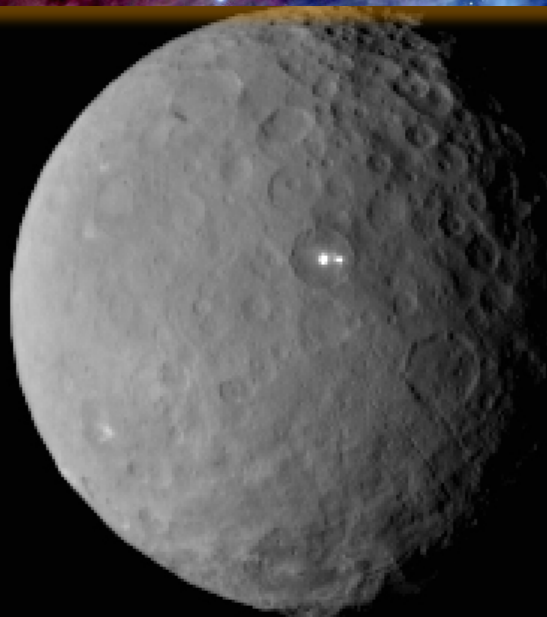
**Ceinture principale d'astéroïdes:** située entre les orbites de Mars et de Jupiter

Plusieurs centaines de milliers (plusieurs millions?) de corps: 1 planète naine (Cérès, 470 km de rayon) et ~200 000 petits corps recensés

## Cérès

*Plus gros objet de la ceinture d'astéroïde*

950 km de diamètre  
découverte en 1801



# Notre place dans l'Univers hiérarchisé

## Système solaire

Soleil + 8 planètes + 2 ceintures de petits corps

**Ceinture principale d'astéroïdes:** située entre les orbites de Mars et de Jupiter

Plusieurs centaines de milliers (plusieurs millions?) de corps: 1 planète naine (Cérès, 470 km de rayon) et ~200 000 petits corps recensés

**Ceinture de Kuiper:** située au-delà de l'orbite de Neptune (principaux représentant des *objets transneptuniens*)

Présence (d'au moins) trois planètes naines: Pluton, Makémaké et Hauméa

## Pluton

*Plus gros objet de la ceinture de Kuiper*



2370 km de diamètre  
découverte en 1930 (9<sup>ème</sup> planète)  
planète naine en 2006

# Notre place dans l'Univers hiérarchisé

## Système solaire

Soleil + 8 planètes + 2 ceintures de petits corps

**Ceinture principale d'astéroïdes:** située entre les orbites de Mars et de Jupiter

Plusieurs centaines de milliers (plusieurs millions?) de corps: 1 planète naine (Cérès, 470 km de rayon) et ~200 000 petits corps recensés

**Ceinture de Kuiper:** située au-delà de l'orbite de Neptune (principaux représentant des *objets transneptuniens*)

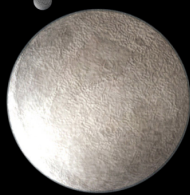
Présence (d'au moins) trois planètes naines: Pluton, Makémaké et Hauméa

Aux confins du système solaire

**Objets épars et nuage de Oort:** objets transneptuniens au-delà de la ceinture de Kuiper – Eris (planète naine), Sedna, nuage sphérique de noyaux cométaires

## Les plus grands objets transneptuniens connus

Dysnomie

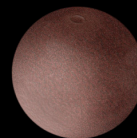


Éris

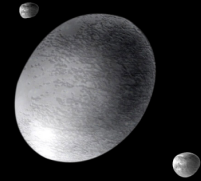


Pluton

Charon



Makemake



Haumea



Sedna



Orcus



Quaoar



Varuna



# Comète Lovejoy

Observée à Paranal (ESO) en 2011



## Les puissances de 10

Etoiles proches



$10^{17}$  m



# Notre place dans l'Univers hiérarchisé

## Etoiles proches

### Le système Alpha Centauri: les étoiles les plus proches

Système de trois étoiles dont **Proxima du Centaure**, située à 4.2 années-lumière

$4.2 \times 299\,792.458 \text{ km/s} \times 365.25 \text{ j} \times 24 \text{ h} \times 3600 \text{ s} = 4 \times 10^{13} \text{ km} = 265\,740 \text{ rayons}$   
orbite terrestre (UA, *unité astronomique*): parcourue en **46 millions d'années**  
par une « voiture » se déplaçant à la vitesse de 100 km/h!

### Voisinage solaire

Environ **70 étoiles** comprises dans une sphère de 16.3 années-lumière (5 parsecs) autour du Soleil

Desquelles seulement **8 visibles à l'œil nu**

## Alpha du centaure

*à Cent A + a Cent B + planète (vue d'artiste, ESO)*

Alpha Centauri B

Alpha Centauri A



## Les puissances de 10 La Voie Lactée



$10^{21}$  m

## Notre place dans l'Univers hiérarchisé La Voie Lactée

### Notre Galaxie

Constituée d'une **centaine de milliards** ( $10^{11}$ ) d'étoiles, dont seulement 9100 visibles à l'œil nu (contenus dans une sphère de 500 années-lumière de rayon)

**Galaxie spirale barrée**, de 50 000 années-lumière de rayon  
=  $50\,000 \times 9.46 \cdot 10^{15} \text{ m} = 4.7 \cdot 10^{20} \text{ m}$

### Domaine régi par la force gravitationnelle

Pour réconcilier la vitesse de rotation de la Galaxie avec la distribution observée d'étoiles en son sein, 2 possibilités:

- postuler l'existence de >80% de matière non lumineuse
- réviser la force d'attraction gravitationnelle aux faibles accélérations ? (MOND = Modified Newtonian Dynamics+ généralisation relativiste)

# Zoom sur la Voie Lactée

Projet ESO GigaGalaxy Zoom



## Les puissances de 10

Les grandes structures



$10^{25}$  m

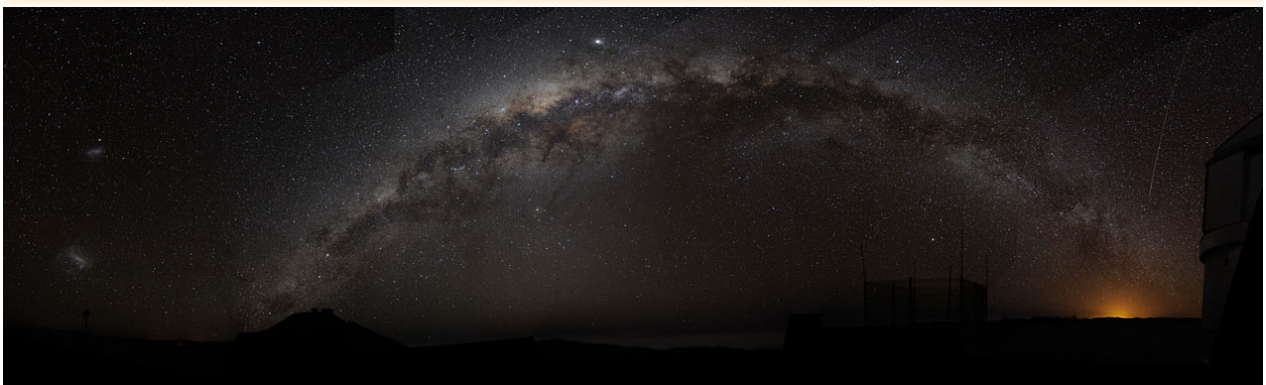


## Amas local

Regroupement d'environ **30 galaxies**: Voie Lactée, Nuages de Magellan, galaxie d'Andromède et galaxies satellites...

Distance **galaxie d'Andromède**:  $2.5 \cdot 10^6$  années-lumière, soit à peine 25 fois la taille de la Galaxie

**Taille amas local**:  $4 \cdot 10^6$  années-lumière



**Panorama vu depuis Paranal (ESO)**: Nuages de Magellan + Voie Lactée + Jupiter + trace avion

# La galaxy d'Andromède

*Objet n°31 du Catalogue Messier : M31*



Copyright

# L'amas du Fourneau

*Constitué de 58 galaxies*



# Notre place dans l'Univers hiérarchisé

## *Les grandes structures*

### Superamas

Regroupement de **plusieurs amas de galaxies**: amas local + amas de la Vierge (2000 galaxies) + amas du Sculpteur + ...

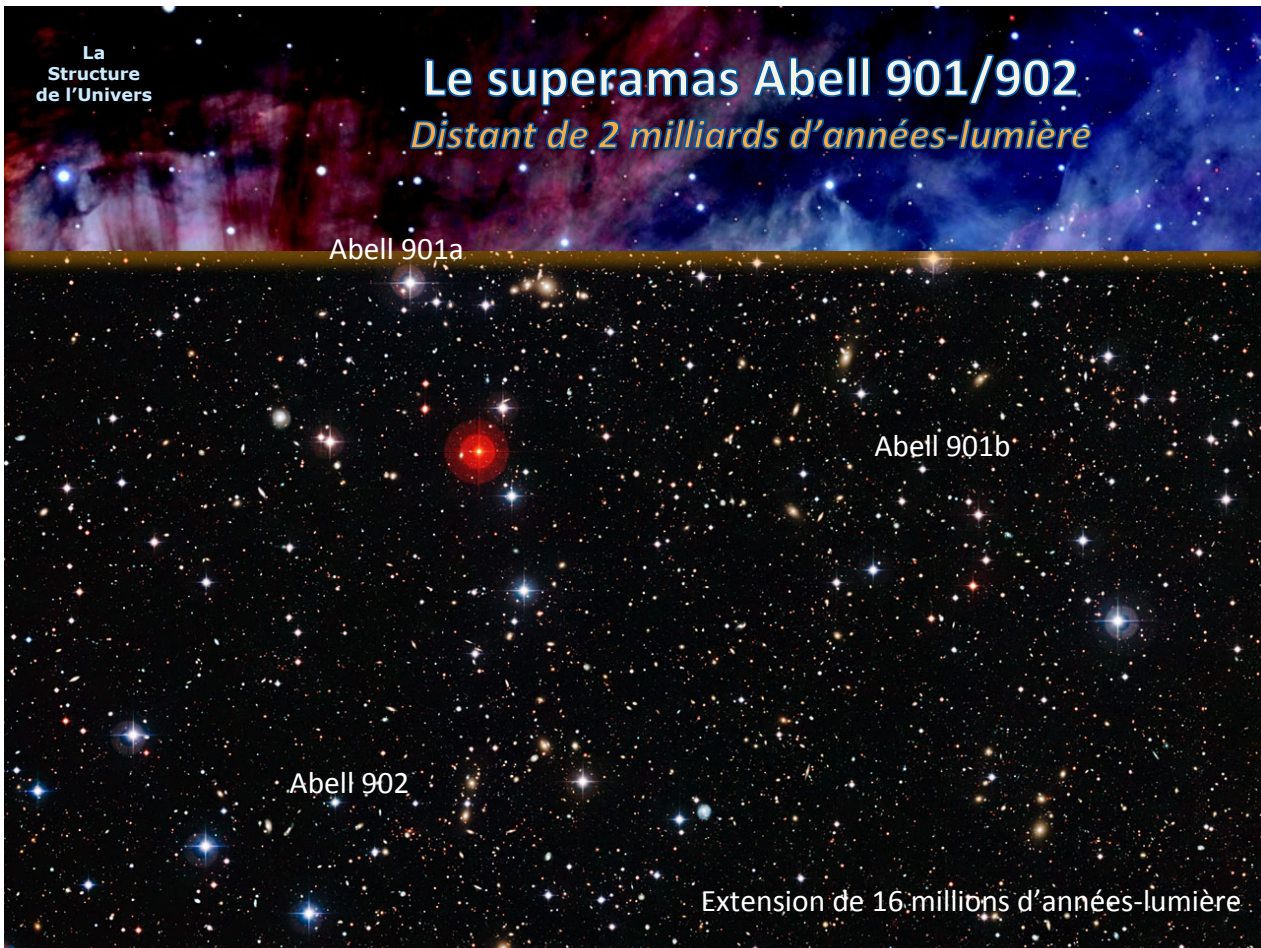
**Taille superamas**:  $\sim 100 \cdot 10^6$  années-lumière

A cette échelle, c'est **l'expansion cosmologique** qui domine...

## L'amas de la Vierge

*Distant de  $60 \cdot 10^6$  années-lumière*





Structure filamentaire de galaxies et bulles vides

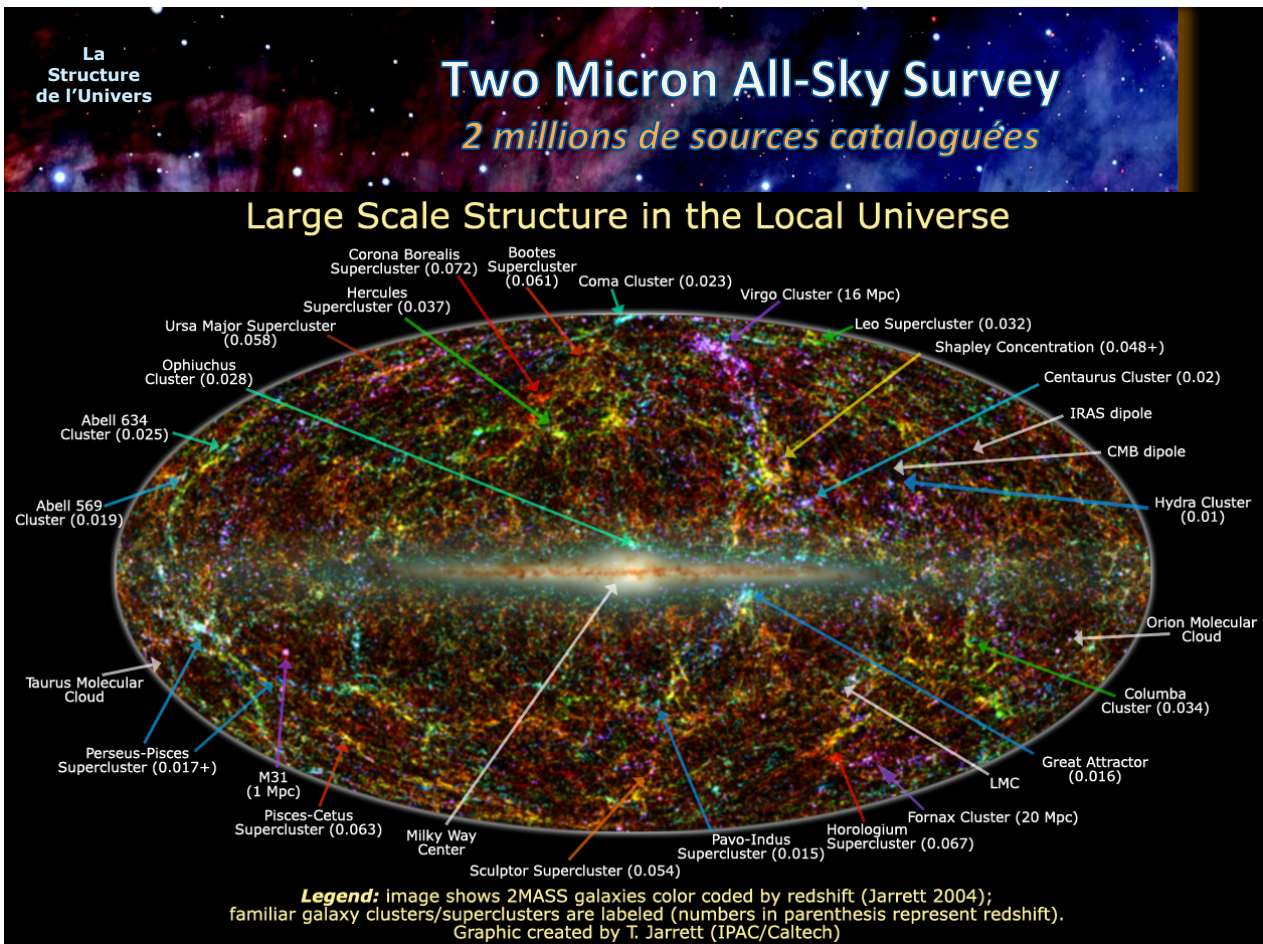
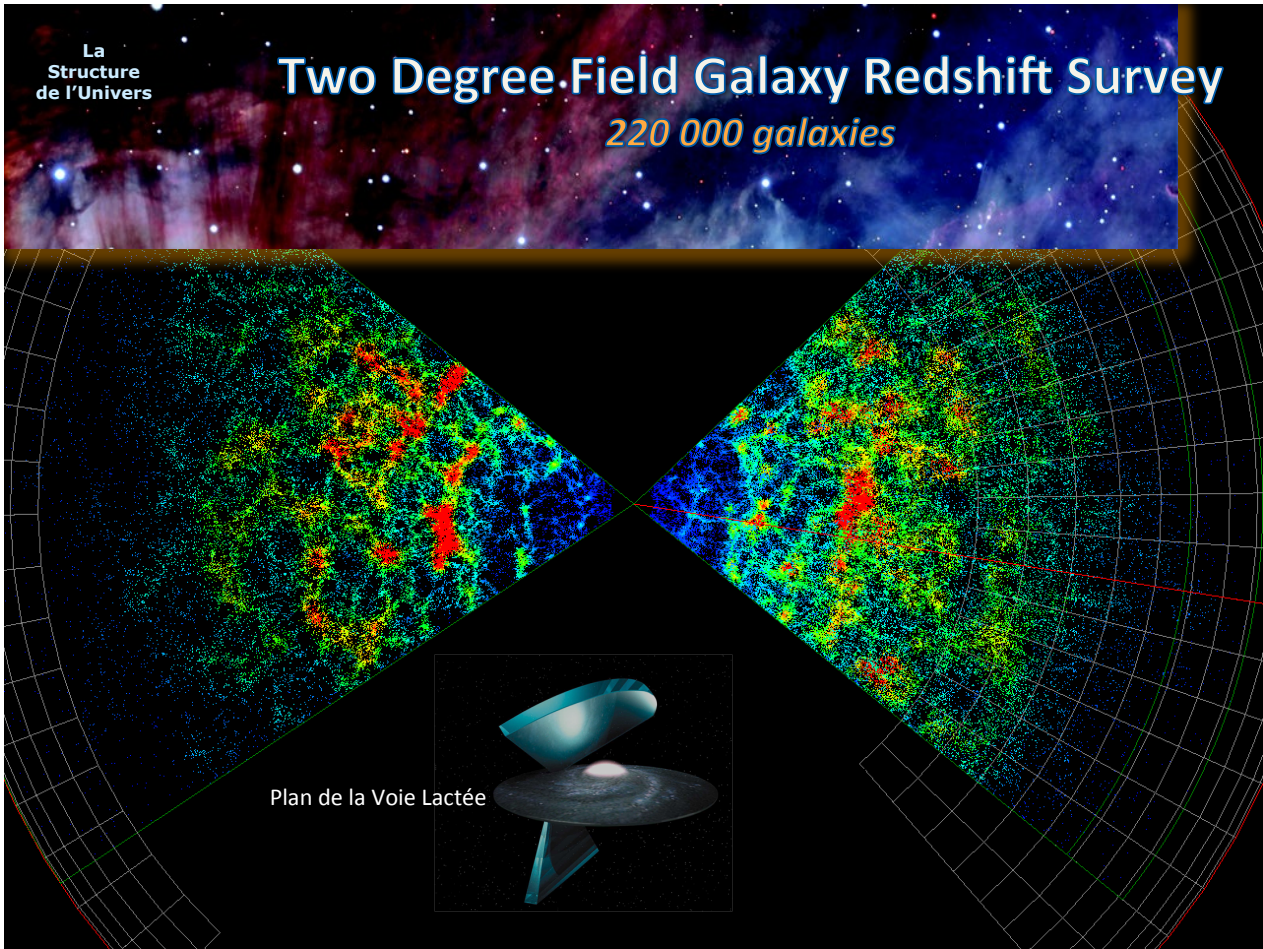
**Filaments galactiques** de 150-250 millions d'années-lumière de long délimitant de grand vides

**Vide du Bouvier:** 250 millions d'années-lumière de diamètre

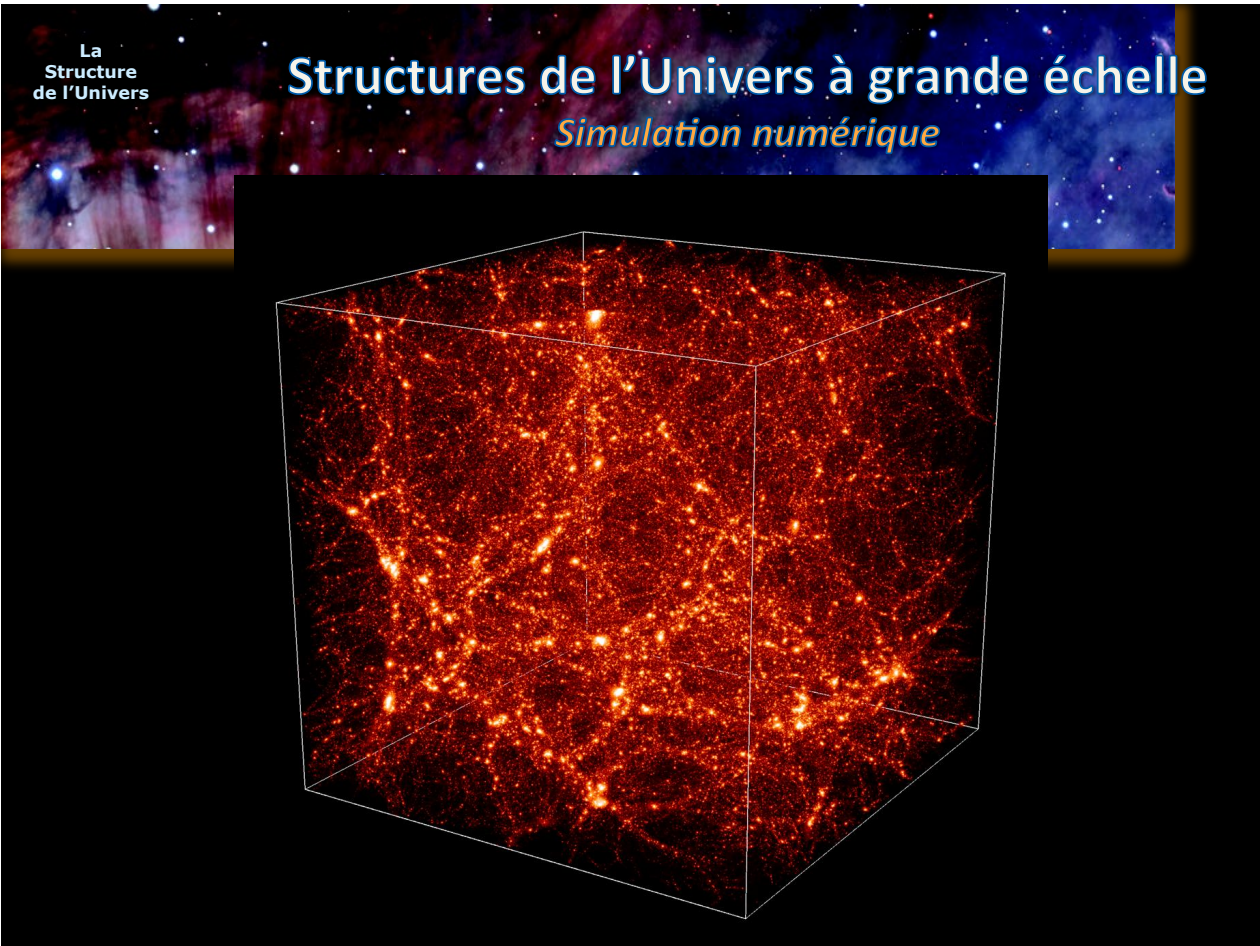
Univers observable

Extension de l'Univers observable: **45 10<sup>9</sup> années-lumière**

Calcul de l'**horizon cosmologique**: âge de l'Univers (13.8 milliards d'années) + expansion cosmologique (modèle d'Univers)

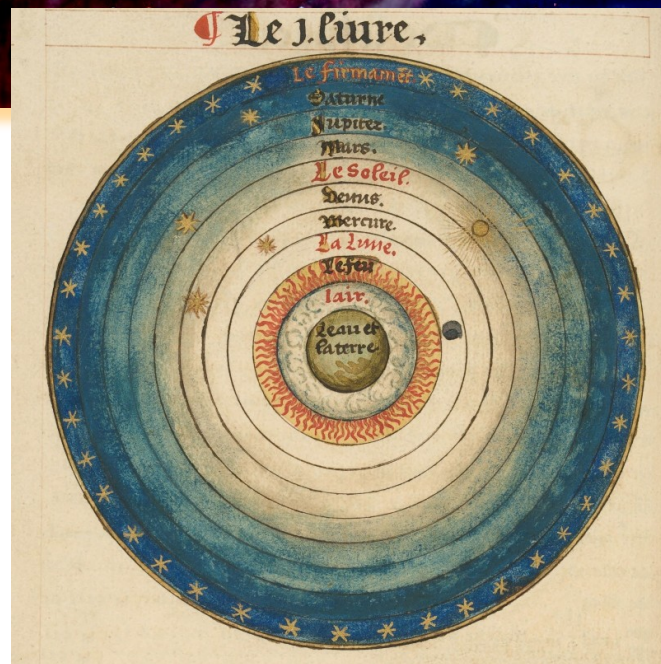






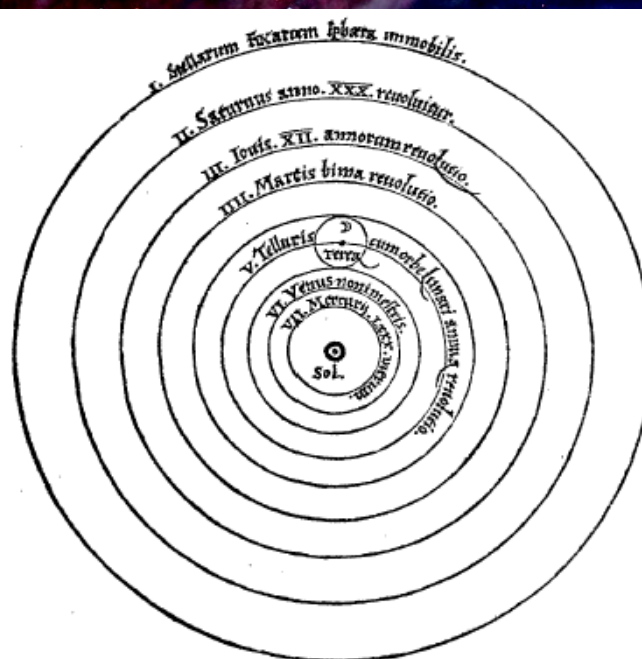
	Distance à partir de la Terre
Lune	1.3 seconde-lumière
Soleil	8 minutes-lumière
Pluton	6.7 heures-lumière
Alpha du Centaure	4.2 années-lumière
Centre de la Voie Lactée	26 000 a-l
Galaxie d'Andromède	2,5 millions d'années-lumière

# Notre place dans l'univers: petit historique



-350 **Aristote**: la Terre est le centre de l'Univers (géocentrisme)

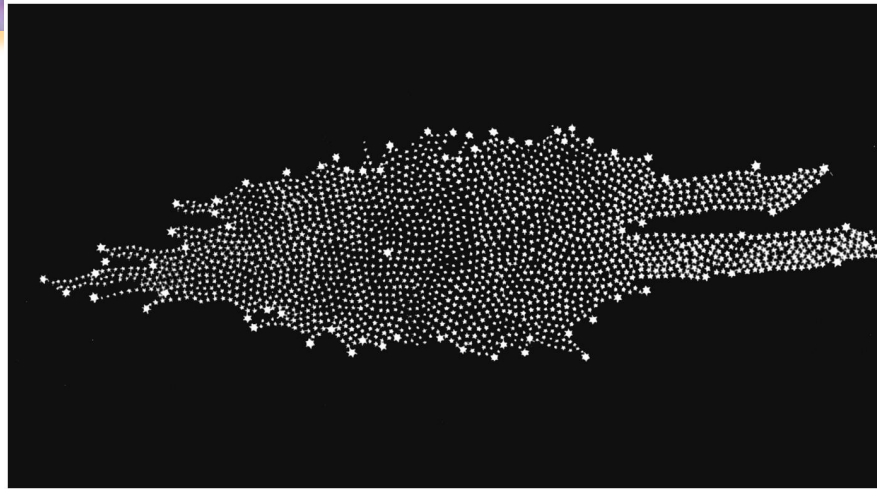
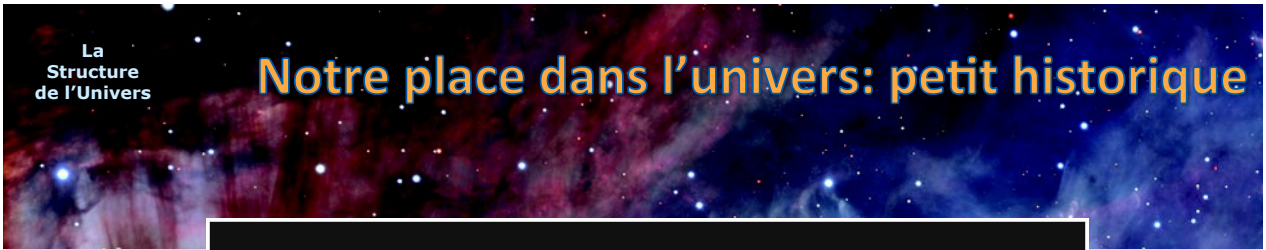
# Notre place dans l'univers: petit historique



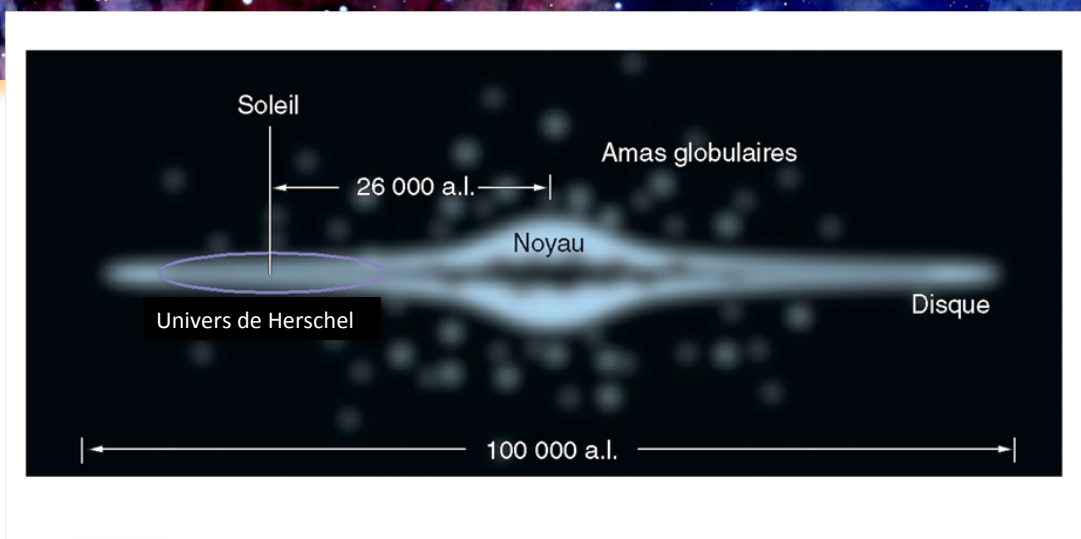
*De revolutionibus orbium coelestium*

Copernic

1543 **Copernic**: le Soleil est le centre de l'Univers (héliocentrisme)



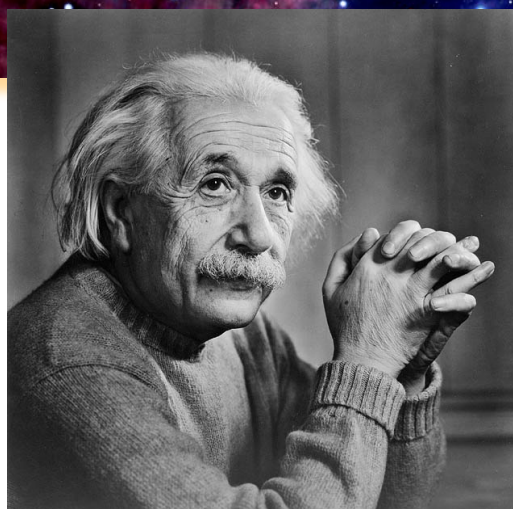
**1780 Herschel:** cartographie de la Voie Lactée (comptage d'étoiles)



**1917 Shapley:** le Soleil clairement détrôné de sa position centrale dans la Galaxie

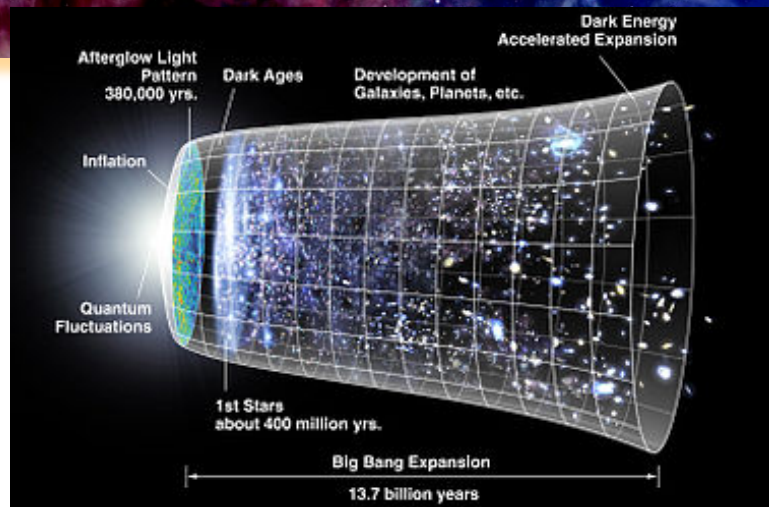


**1925 Hubble:** réalise que la « nébuleuse d'Andromède » est une galaxie comme la nôtre (« univers-île »), située à plusieurs millions d'années-lumière, et contenant des centaines de milliards d'étoiles



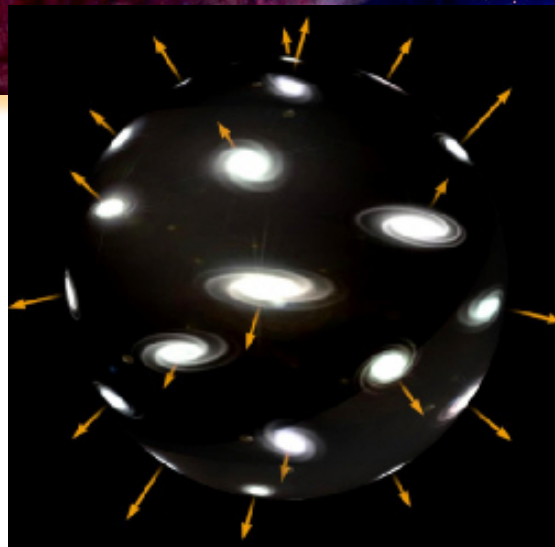
**1917 Einstein:** l'univers est homogène et isotrope (principe cosmologique)

## Notre place dans l'univers: petit historique

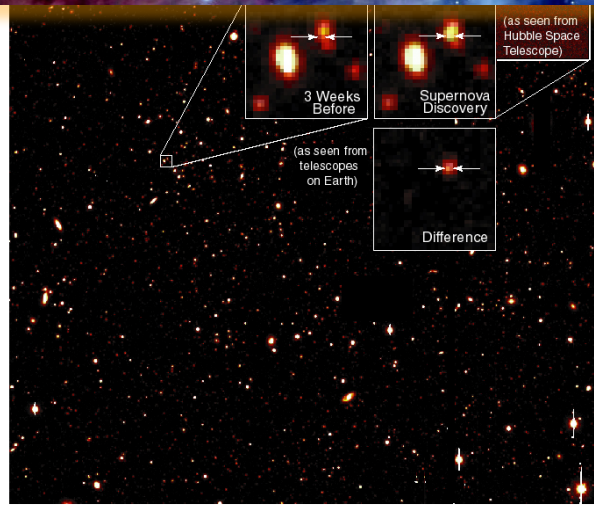


**1922 Friedmann**: l'univers est en expansion (solution des équations de la relativité générale)

## Notre place dans l'univers: petit historique



**1929 Hubble**: découvre la fuite des galaxies. Sommes-nous au centre du système de galaxies?

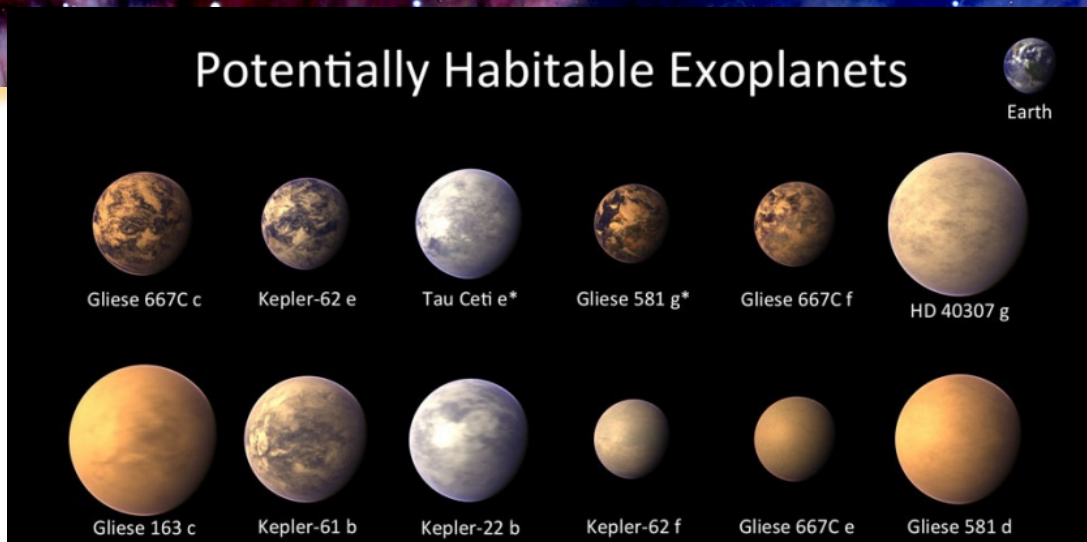


**1997-1998 High-z supernova project et Supernova Cosmology Project** : l'expansion de l'univers semble accélérer; la principale composante de l'univers est l'énergie du vide (ou constante cosmologique)



Espace euclidien chiffonné

**2003 Luminet**: L'espace-temps qui forme la trame de l'univers pourrait ne pas être « simplement connexe » (univers chiffonné)  
➤ mirages topologique



**2020? Exoplanètes abritant la vie:** découverte de manifestations de vie ailleurs dans l'univers ?

➤ Nous ne sommes plus le centre de l'univers « habité » ?!