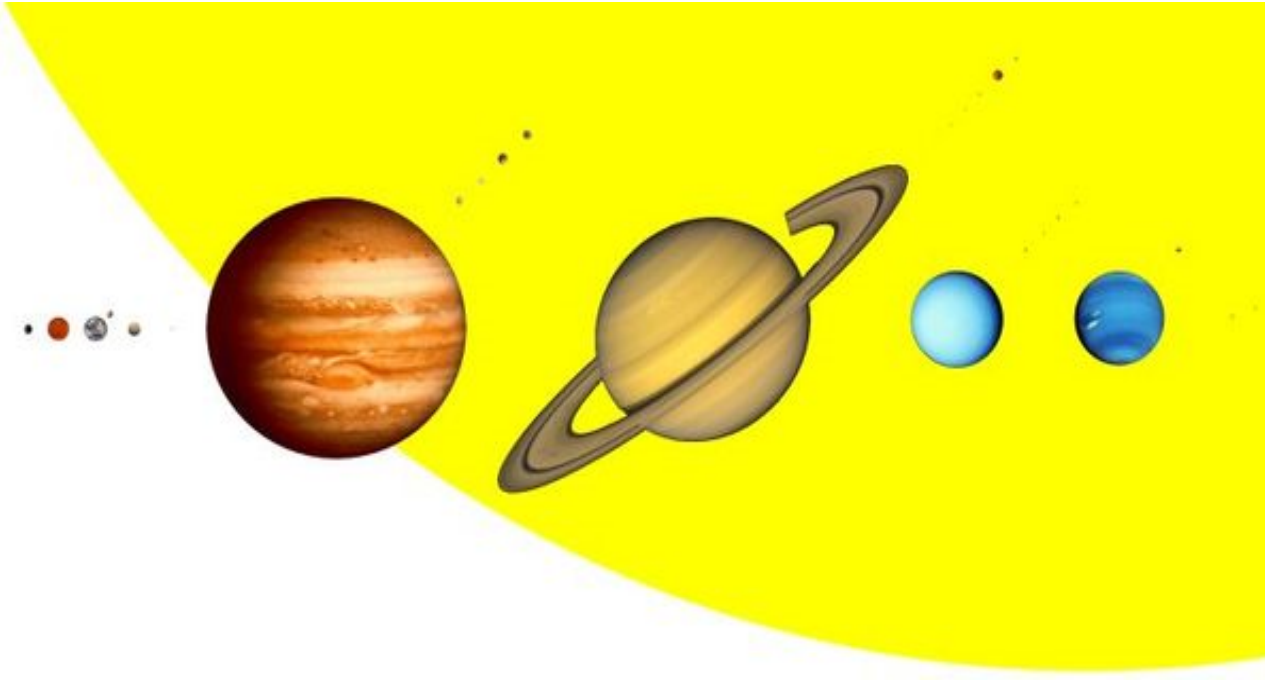


COSMOLOGIE : LA TERRE DANS L'UNIVERS

- 1- L'UNIVERS : (architecture, dimensions, âge et formation)
- 2- SYSTÈME SOLAIRE : (composantes, caractéristiques, modèle de formation)



I- L'UNIVERS

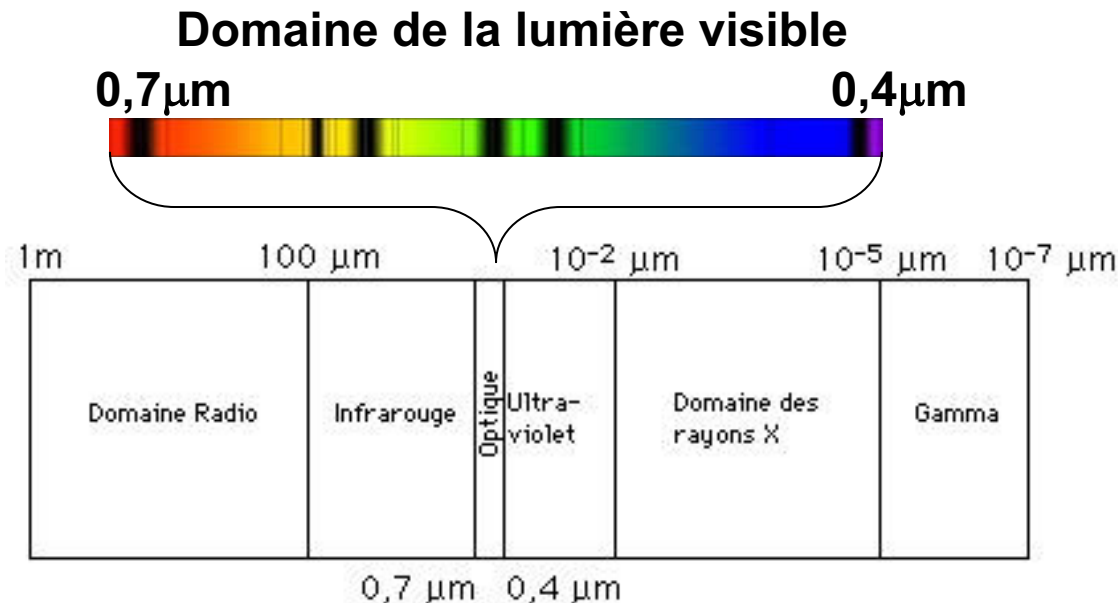
1 - GÉNÉRALITÉS

Univers = ensemble de tout ce qui existe.

Cosmologie est l'étude de la structure, de l'origine et de l'évolution de l'Univers.

Il existe des formes multiples de la manifestation de la matière dans l'espace: étoiles, Planètes, satellites, astéroïdes, poussières, gaz, molécule, atome, etc... = (corps célestes)

Comment arrive-t-on à les observer? → La lumière



Plus on voit loin dans l'espace plus on voit loin dans le passé (le temps)

•Comment mesure-t-on les distances en astronomie ?

- ❖ **Unité astronomique (UA)** : distance entre la terre et le soleil
1UA= 149 597 870,7 km soit environ **150 000 000 km**
- ❖ **Année lumière (a.l.)** : distance parcouru par la lumière en une année , **1al = 9,467 10¹² km** soit environ **10¹³ km**
- ❖ **Un parsec (pc)**: distance à laquelle il faut se trouver pour qu'une unité astronomique, la distance de la Terre au Soleil, apparaisse sous un angle apparent de 1 seconde d'arc.

Unité	symbole	m	UA	al	pc
mètre	m	1			
Unité astronomique	UA	1,5 10 ¹¹	1		
année de lumière	al	9,5 10 ¹⁵	63 000	1	
Parsec	pc	3,1 10 ¹⁶	206 000	3.26	1

NB. Vitesse de la lumière v = 300 000 km/s

Voici quelques exemples de ces distances:

- ❖ Distance Terre - lune ~ 1 s.l

La lumière met à peu près une seconde pour parvenir de la lune à la terre

- ❖ Distance Terre-soleil (**unité astronomique**) $\sim 8,32$ mn.l

La lumière met à peu près 8 minutes pour parvenir du soleil à la terre

- ❖ Distance Soleil-Proxima du centaure (l'étoile la plus proche du soleil) = $3,99 \times 10^{13}$ km = 4,21 al.

c.a.d en se déplaçant à la vitesse de la lumière, il faudrait 4,21 ans pour atteindre l'étoile la plus proche du Soleil.

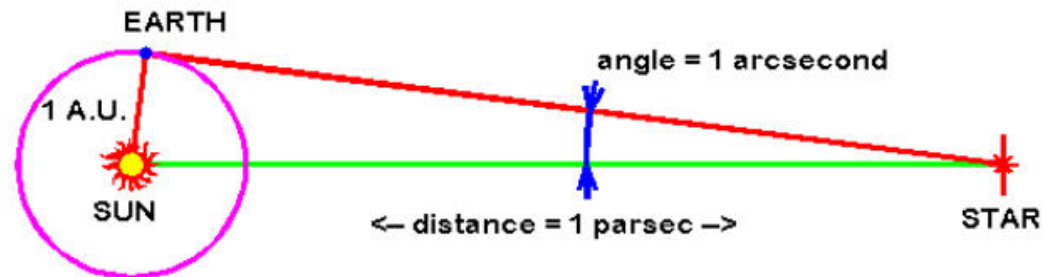
- ❖ Diamètre du soleil = 4,6 s-lumière = 1 392 684 km

Les objets les plus éloignés observés actuellement sont à 12 milliards d'années-lumière ($10^{12} \times 10^{13}$ km)

c) - **Le parsec**, noté **pc**, correspond à la distance d'un astre (depuis le Soleil) dont *la parallaxe annuelle* correspond à 1 seconde (explication en **fig.**).

$1 \text{ parsec} = 206.265 \text{ UA} = 3,23 \text{ al} = 3100 \text{ milliards de km}$

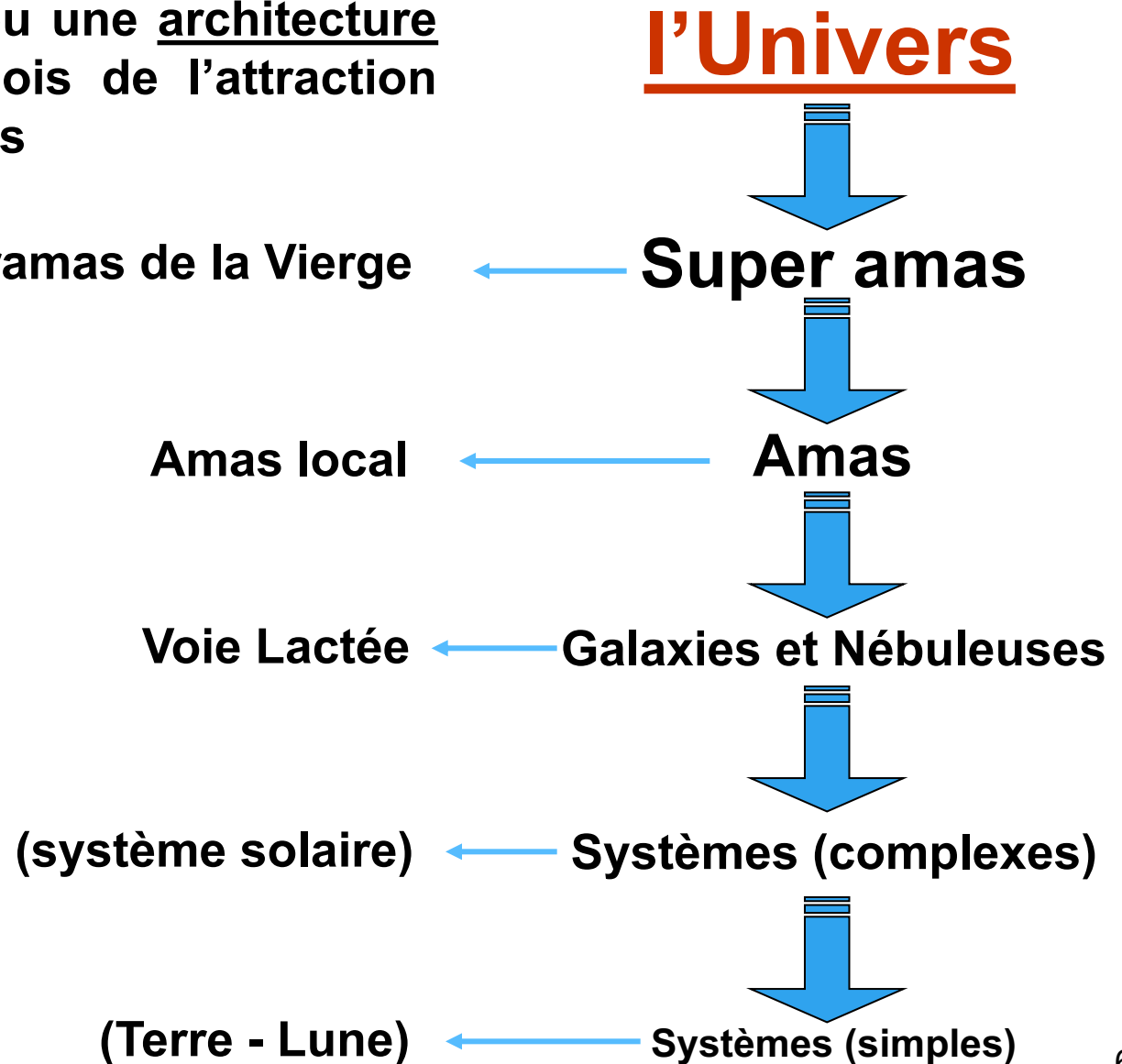
$1 \text{ Mpc} = 1 \text{ mégaparsec} = 1 \text{ million pc.}$



- **Quatre questions se posent pour l'univers:**
 - **Quelle est son architecture?**
 - **Quelle est sa taille ?**
 - **Quel est son âge ?**
 - **Comment s'est-il formé ??**

Tous ces corps célestes font partie d'une organisation ou une architecture gouvernée par les lois de l'attraction universelle = l'Univers

2-L'ARCHITECTURE

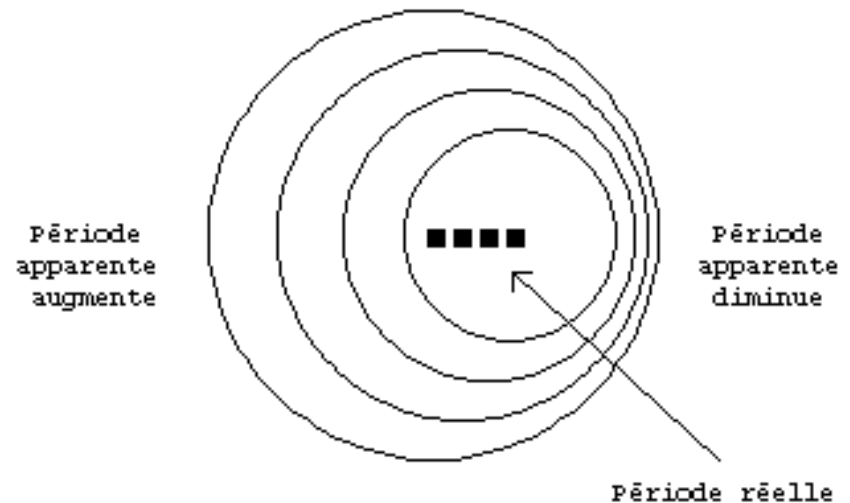
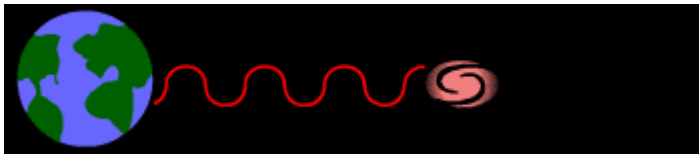


EN 1920 HUBBLE

❑ Calcule la distance des Céphéides (des étoiles avec une variation périodique de la luminosité) en calculant la luminosité absolue
Et introduit la notion des Univers-îles

❑ en 1929 effet Doppler et évolution spectral vers le rouge
Plus une étoile est loin plus son Redshift est grand $v=Hd$

→ **expansion de l'univers**



3 - Dimensions

Alexander Friedmann 1922-24 :

L'évolution de l'Univers est fonction de la densité (d) de la matière qui le compose. Elle est comparée à une densité dite critique (d°) (une sorte de point d'équilibre entre l'expansion et la gravité)

La valeur critique de la densité calculée est de l'ordre de 5.10^{-30} g /m³ de matière en moyenne, c'est à dire 3 atomes d'hydrogène par mètre cube.

Donc pour la structure spatio-temporelle de l'Univers.
on a 3 cas ou hypothèses:

Soit: $d < d^\circ$ ou $d = d^\circ$ ou $d > d^\circ$

- Si la densité de l'Univers est supérieure à une valeur critique, les forces de gravitation seront importantes, **L'Univers serait fini** et il s'effondrera sur lui-même en un Big Crunch, symétrique du big bang.
- Si la masse de l'Univers est inférieure à une valeur critique, les forces de gravitation seront faibles l'expansion se poursuivra éternellement en s'accroissant. **L'Univers serait spatialement infini**
- Si la masse est égale à cette valeur critique, **l'Univers est dit "plat" et son expansion ralentirait sans jamais s'arrêter.**

La valeur critique de la densité (point d'équilibre entre l'expansion et la gravité) calculée de l'ordre de $5 \cdot 10^{-30} \text{ g / m}^3$ de matière en moyenne, c'est à dire 3 atomes d'hydrogène par mètre cube.

On ne sait pas actuellement la masse exacte de l'Univers. La valeur **observée** actuellement est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-32} \text{ g / m}^3$; c'est-à-dire 1/100 de la valeur critique. L'Univers serait ouvert. Cependant on ne connaît pas la masse de matière des trous noirs ni la masse de la matière dite sombre (**invisible**) (l'Univers sera donc fermé).

4 - Age de l'Univers

trois manière pour calculer l'âge de l'univers:

- ☐ mouvement des galaxies :entre 15 et 20 milliards d'années
- ☐ l'âge des plus vieilles étoiles d'amas : entre 14 et 16 milliards d'années
- ☐ la radiochronologie : le rapport $U238 / U235$, actuellement de 137,8 était de 110 au début du Tertiaire, de 3 à la naissance de la Terre si on l'extrapole à 1 cela donnerait un âge de 15 milliards d'années.

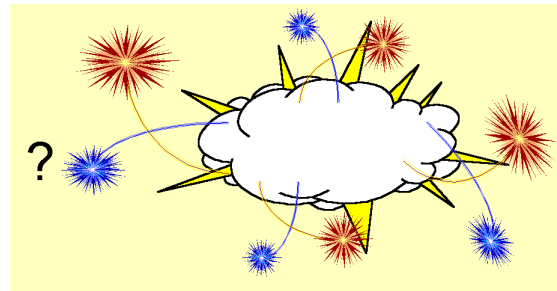
5- le modèle

Le fait que l'univers est en expansion fait penser à un point de départ où toute la matière était condensée en un point singulier instable avec :

- ❖ densité et température très élevée
- ❖ Matière différente de ce qu'on connaît actuellement (quarks)

L'ensemble étant instable c'est :

Le BIG-BANG
Ou
la naissance de l'univers



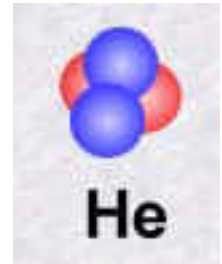
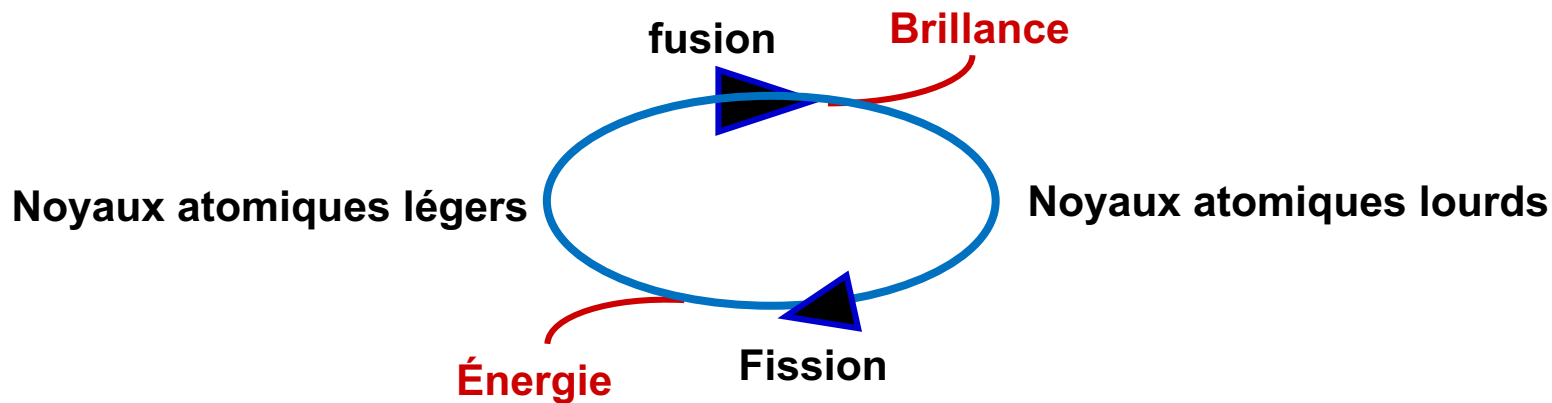
La quantité abondante des éléments légers H, He, Li ne peut être formée qu'au moment du big-bang

APRÈS LE BIG BANG

L'élément le plus simple se forme,
1 proton avec 1 électron : H₂,



La température et la densité de la matière étaient suffisantes pour qu' il y ait début des fusions thermonucléaires de l'hydrogène (1/10^{ème} seulement) en deutérium, tritium et hélium (He) : C'EST LA NUCLÉOSYNTÈSE PRIMORDIALE



Sous l'influence de la force gravitationnelle la matière se rassemble de place en place. Une hiérarchisation va se créer entre étoiles, galaxies, amas de galaxies ..., C'est **le processus d'Accrétion**

6 - L'accrétion

✓ Les étoiles:

Les étoiles constituent l'unité de base et la fraction importante de la masse de l'Univers.

Elles naissent à partir des nuages interstellaires denses (nébuleuse) grâce à la gravitation qui compresse la matière du cosmos. A un moment donné le nuage interstellaire atteint l'effondrement; c'est-à-dire une accrétion

Selon la masse du nuage accrété le devenir des objets sera différent :

- Masse faible → objet petit, température faible → planètes.
- Masse importante → objet de grande taille, température élevée, densité très élevée (déclenchement des réactions thermonucléaires) → naissance d'étoiles.

Les étoiles vont évoluer selon leur masse :

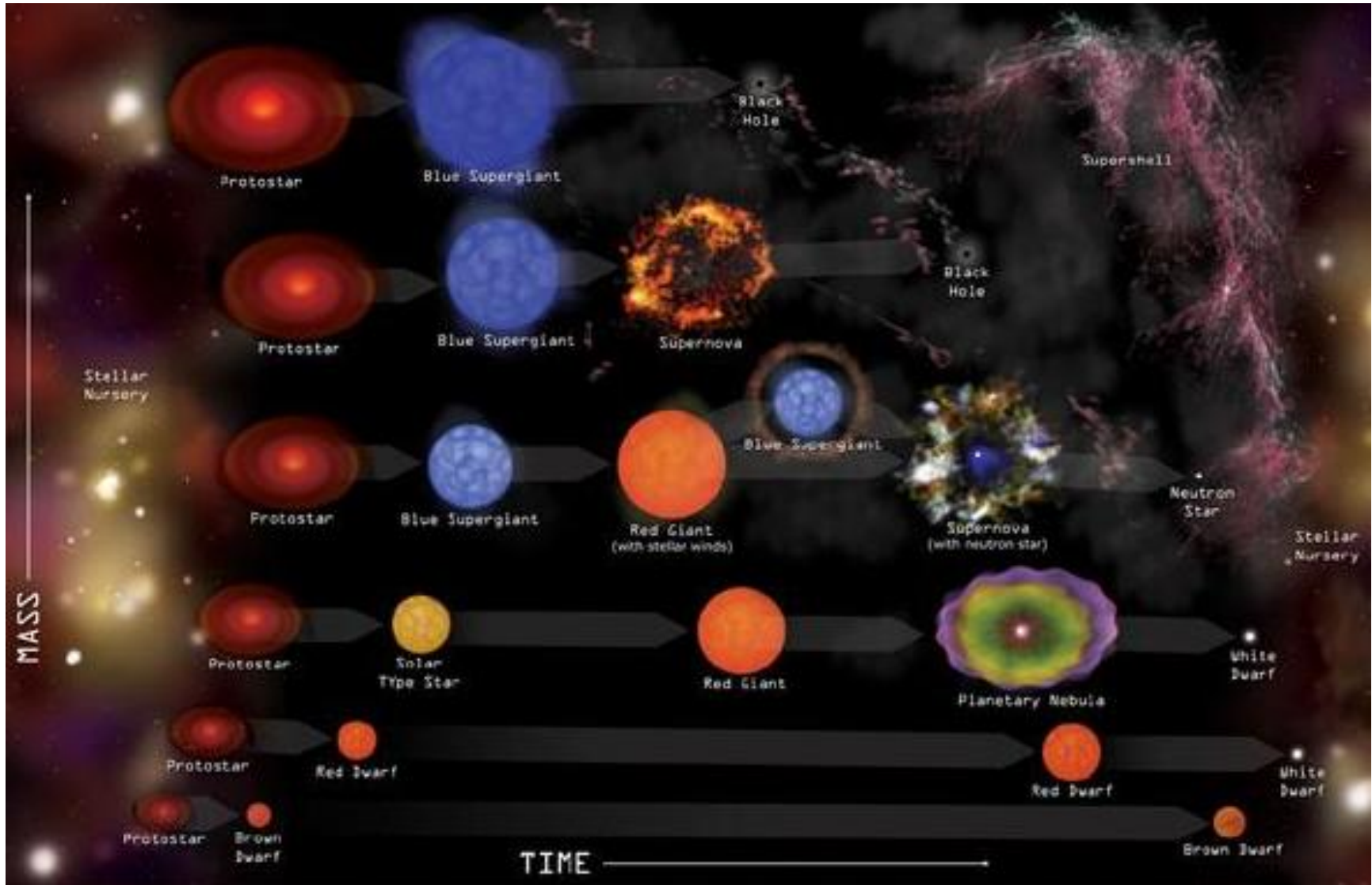
❖ Masse inférieure à 1,2 masse solaire → **naine blanche** une explosion couches supérieures → **géante rouge**. Au coeur, la naine blanche se refroidit progressivement → **une naine rouge** → **naine noire**,

❖ 1,2 à 2 masses solaires, la compression est tellement forte que la matière se trouve broyée (on a une densité critique (10 km pour le soleil), une explosion se produit → **supernovae = pulsars** (émission d'ondes radio),

❖ Masse supérieure à 2 masses solaires, la théorie prédit que la densité deviendrait infinie en leur centre (état de collapsus gravitationnel), aucune matière et même la lumière ne peut échapper d'une telle étoile qui absorbe tout ce qui passe à côté → **trou noir**.

protoétoile - Super géante bleue - Trou noir
Protoétoile - Super géante bleue - Supernovae et trou noir
Protoétoile - Super géante bleue - Super géante rouge - Supernova et étoile à neutrons
Protoétoile - Étoile de type solaire - Géante rouge - Nébuleuse planétaire - Naine blanche
Protoétoile - Naine rouge - Naine blanche
Protoétoile - Naine brune

Evolution stellaire



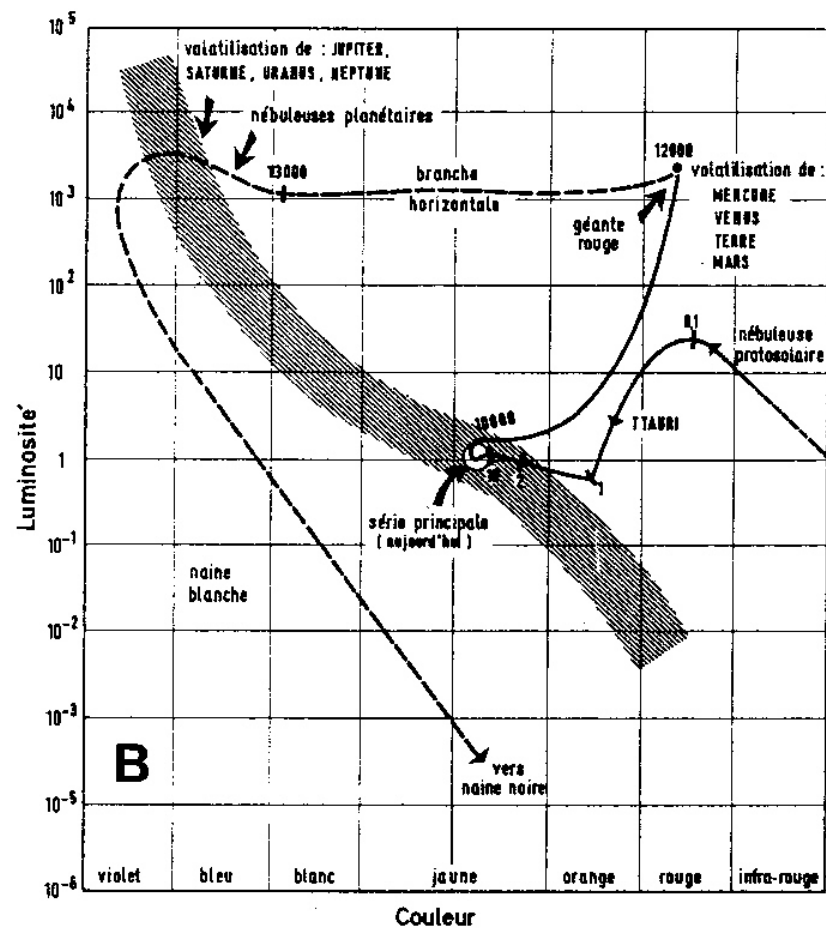
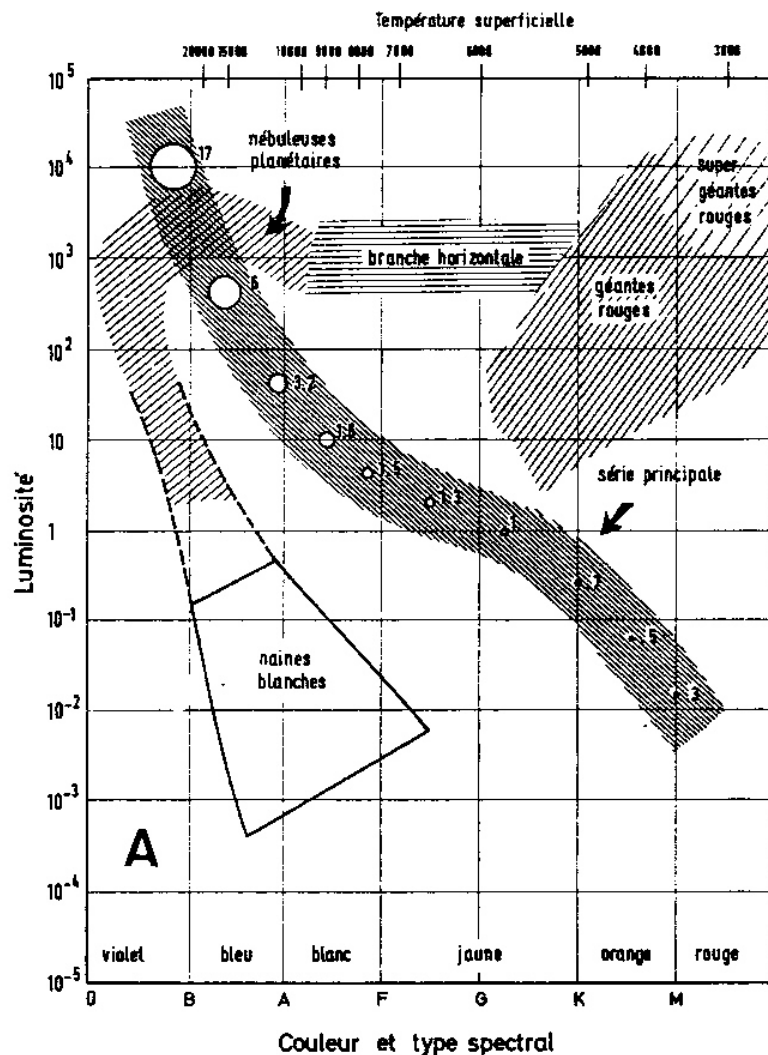
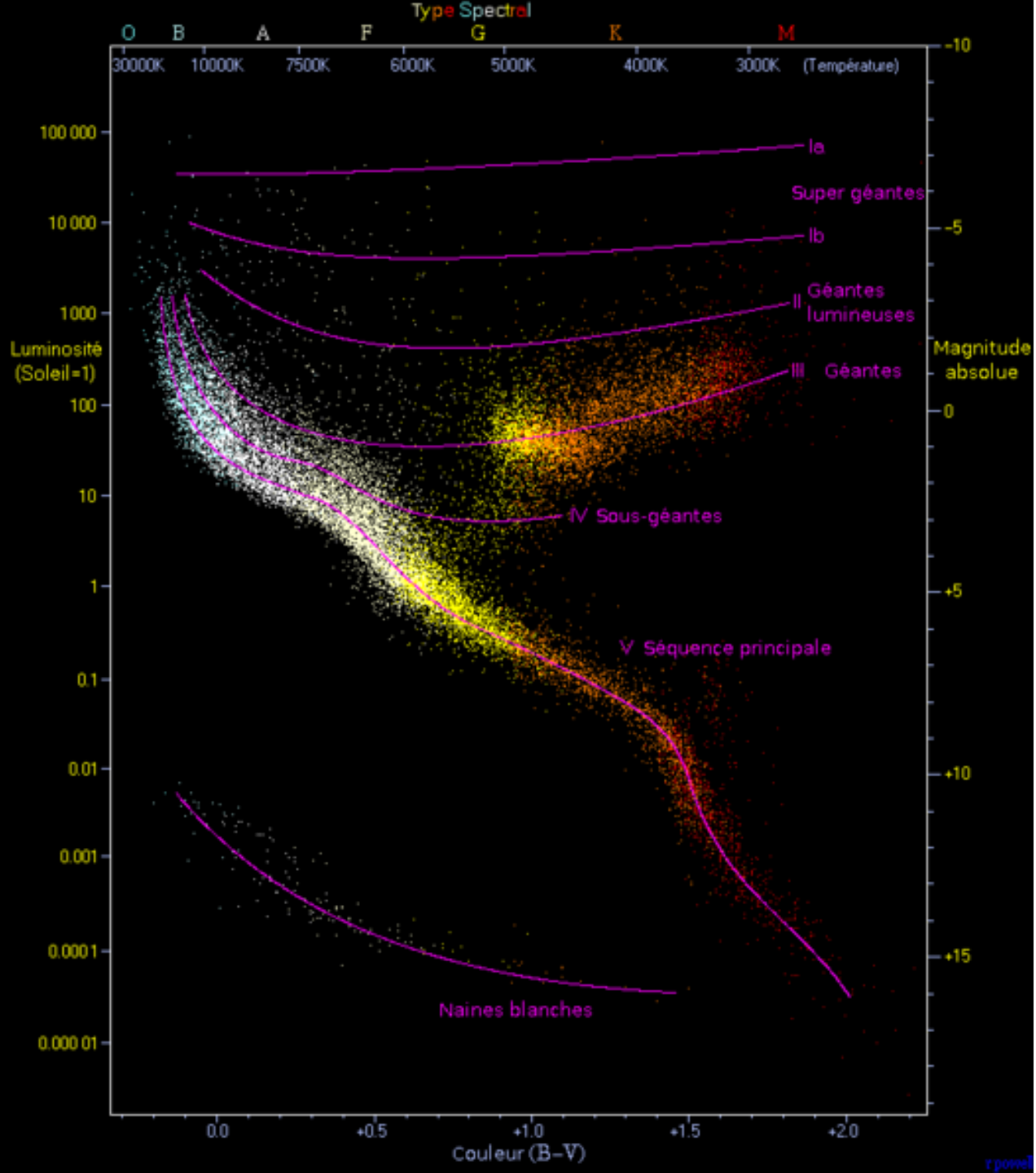


FIGURE 1.4. – Diagramme de Hertzsprung-Russell (d'après Reeves, 1981).

A) L'axe des ordonnées est gradué en luminosité stellaire absolue (exprimée par rapport à celle du Soleil prise comme unité), celui des abscisses représente les couleurs « stellaires » auxquelles on peut associer une température de surface. La masse des étoiles de la série principale est exprimée par rapport à la masse du Soleil prise comme



✓ Les galaxies:

L'univers est constitué de galaxies de 100 000 a.L. De diamètre environ qui sont espacées de 1 000 000 a.L. Environ

Ces galaxies sont de quatre types principaux :

- **Les galaxies elliptiques** : ou sphériques (2/3 des galaxies).

Elles sont appauvries en gaz, et les étoiles les composant sont très âgées (10 000 ma). L'agitation interne des étoiles empêche l'effondrement de la galaxie.

- **Les galaxies spirales** : (1/4 des galaxies) en forme de disque aplati avec 2 bras spiraux riches en gaz et donnent naissance à des étoiles au niveau des bras → étoiles de tous les âges.

- **Les galaxies lenticulaires** : entre spirales et elliptiques, celles-ci possèdent un noyau volumineux et un disque, mais elles sont démunies de bras spiraux et possèdent un milieu interstellaire relativement pauvre.

- **Les galaxies irrégulières** : (-1/10 des galaxies)



Giant Elliptical Galaxy NGC 1316 in Fornax Cluster (VLT/ANTU + FORS1)

ESO PR Photo 18a/00 (28 July 2000)

© European Southern Observatory



Ngc1097_ESO



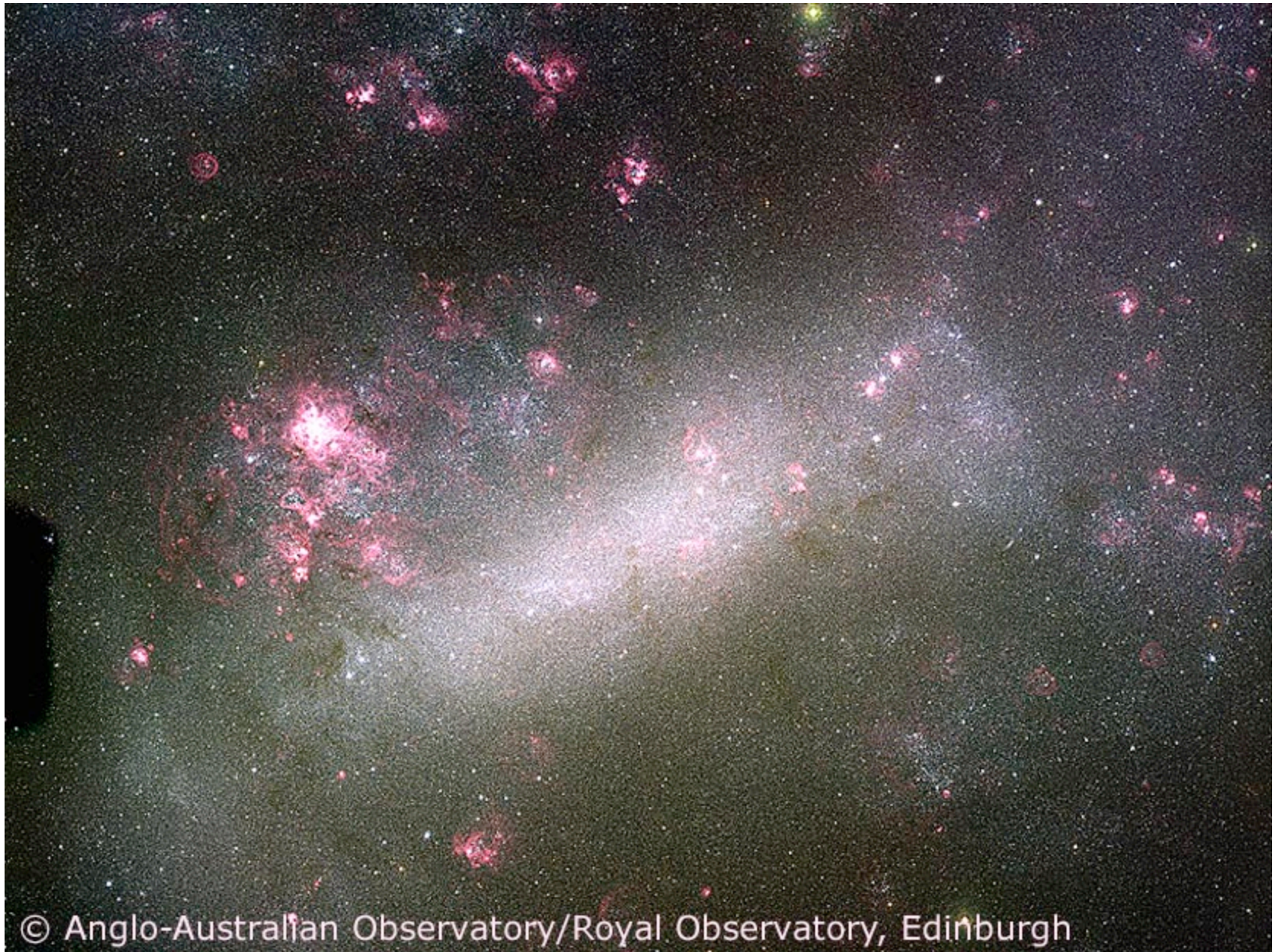
ngc1232



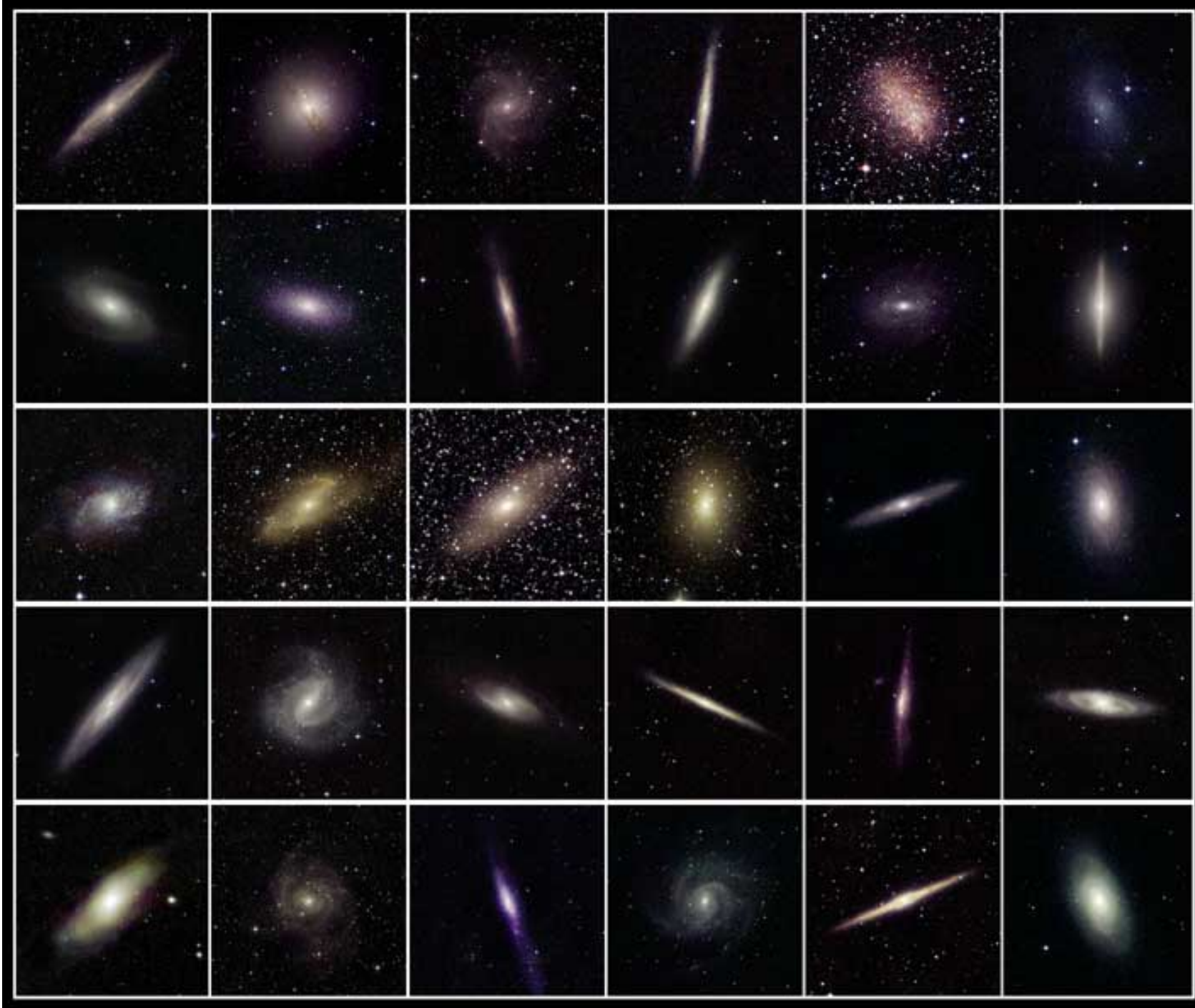


spirale barrée
NGC1530_NOAO_02334

Galaxie irrégulière LMC_AAO_uks0



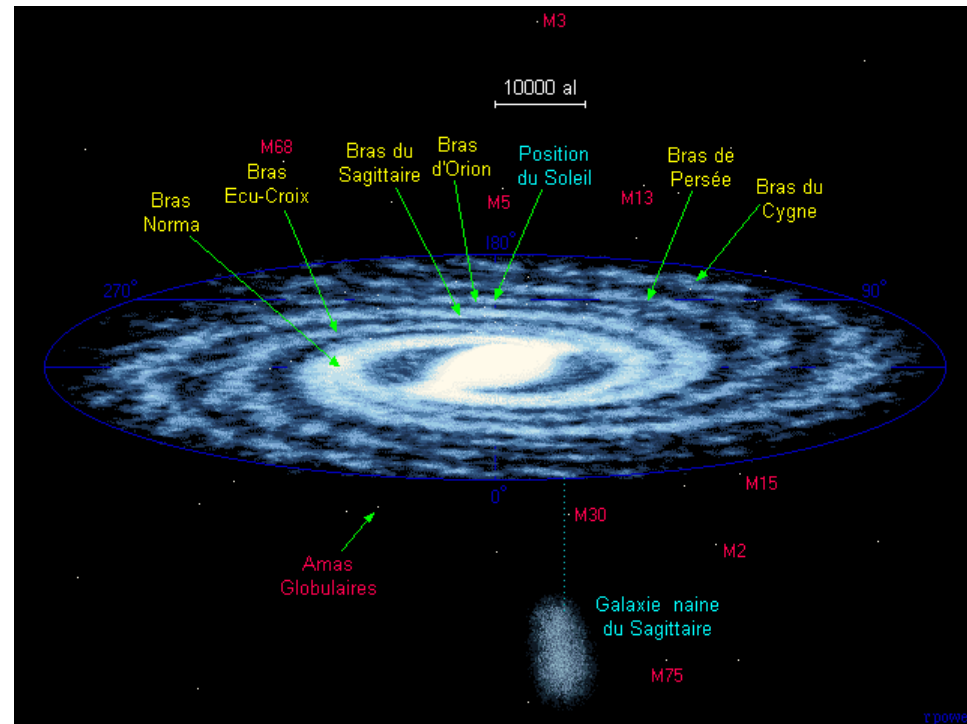
© Anglo-Australian Observatory/Royal Observatory, Edinburgh



NOTRE GALAXIE: LA VOIE LACTÉE

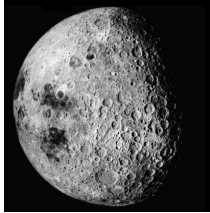
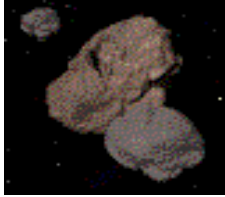
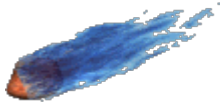
QUELQUES ORDRES DE GRANDEURS:

- FORME SPIRALE
- DIAMÈTRE : 100 000 A.L
- ÉPAISSEUR : 6 000 A.L
- SOLEIL EST À 30 000 A.L DU CENTRE DE LA GALAXIE
- VITESSE DE ROTATION DE LA VOIE LACTÉE : 250 KM/S
- LE SOLEIL FAIT LE TOUR COMPLET EN 240 M.A = ANNÉE GALACTIQUE
- MASSE DE LA VOIE LACTÉE : 100 MILLIARDS DE MASSE SOLAIRE (MASSE SOLAIRE = $2.10^{33}G$)
- ELLE COMPREND 220 MILLIARDS D'ÉTOILES



II - le système solaire

Notre système solaire comporte

- Le soleil (l'étoile) 
- Neuf planètes,  
- Au moins 60 satellites ou lunes appartenant à sept planètes,
- Plus de 4000 astéroïdes, 
- Un nombre important de comètes. 
- En plus, l'espace interplanétaire contient des quantités importantes de poussières, de gaz, et des particules d'énergie qui viennent du soleil (les **vents solaires**).

Le soleil:

- Est une étoile qui représente 99,99% de la matière de notre système solaire (de la nébuleuse primitive),
- Entièrement gazeux,
- Il consomme 5×10^9 kg d'hydrogène par seconde
- Il est 2,3 fois plus petit qu'une étoile moyenne de notre galaxie
- Le diamètre du soleil (environ 1,4 millions de km) est 109 fois celui de la terre
- La pression interne pourrait atteindre 10 milliards de mpa, et la température interne est de 15 millions de °C

Répartition de la masse à l'intérieur du système solaire

- Soleil : 99,85%
- Planètes : 0,135%
- Comètes : 0,01%
- Satellites : 0,00005%
- Planètes Mineures : 0,0000002%
- Météoroïdes : 0,0000001%
- Milieu Interplanétaire : 0,0000001%

Mnémonique pour le système solaire :

Le Mercure est Venus sur Terre au mois de Mars. Une jeune fille ayant une Ceinture à sa Jupe vit Saturnin Urbain Naître Plutôt que prévu

Les planètes

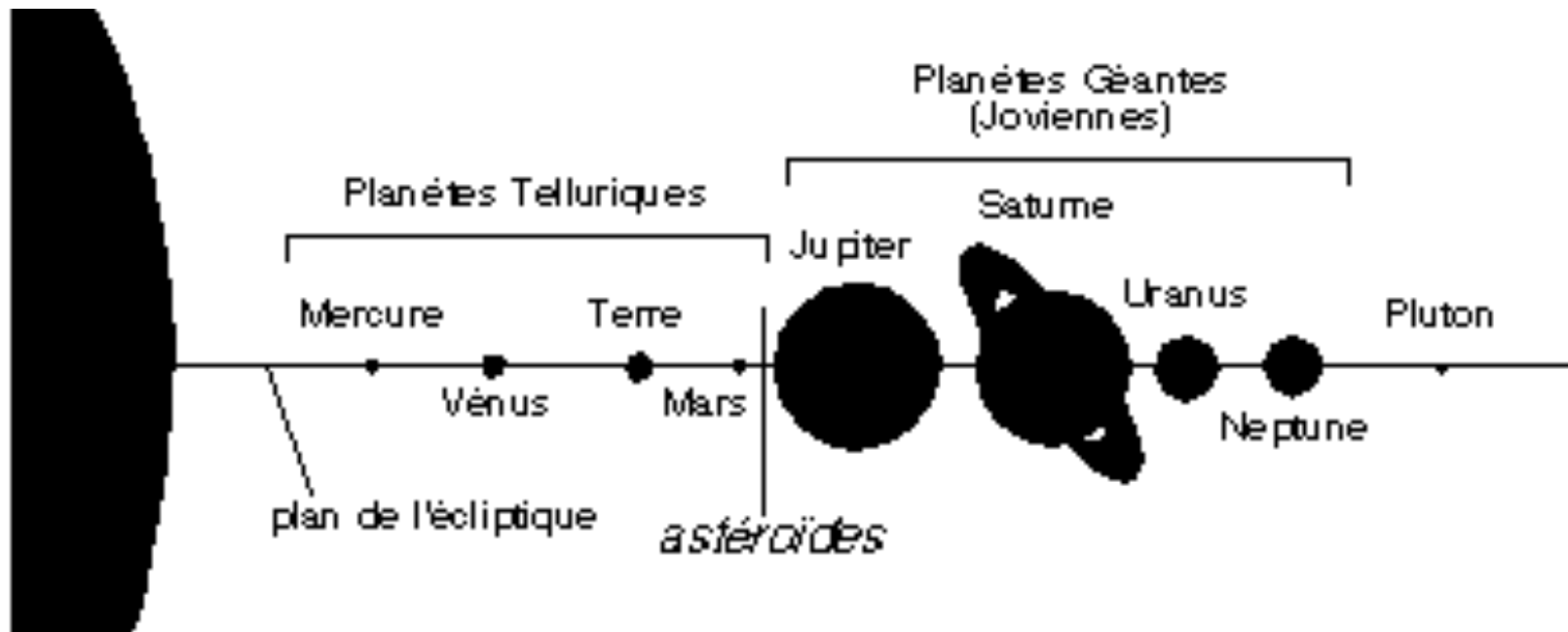
elles sont réparties en deux groupes selon leurs tailles et séparés par la ceinture des astéroïdes:

- Les planètes internes ou telluriques

petites riches en fe, atmosphère réduite à absente et une densité élevée (3,5 à 5,5),

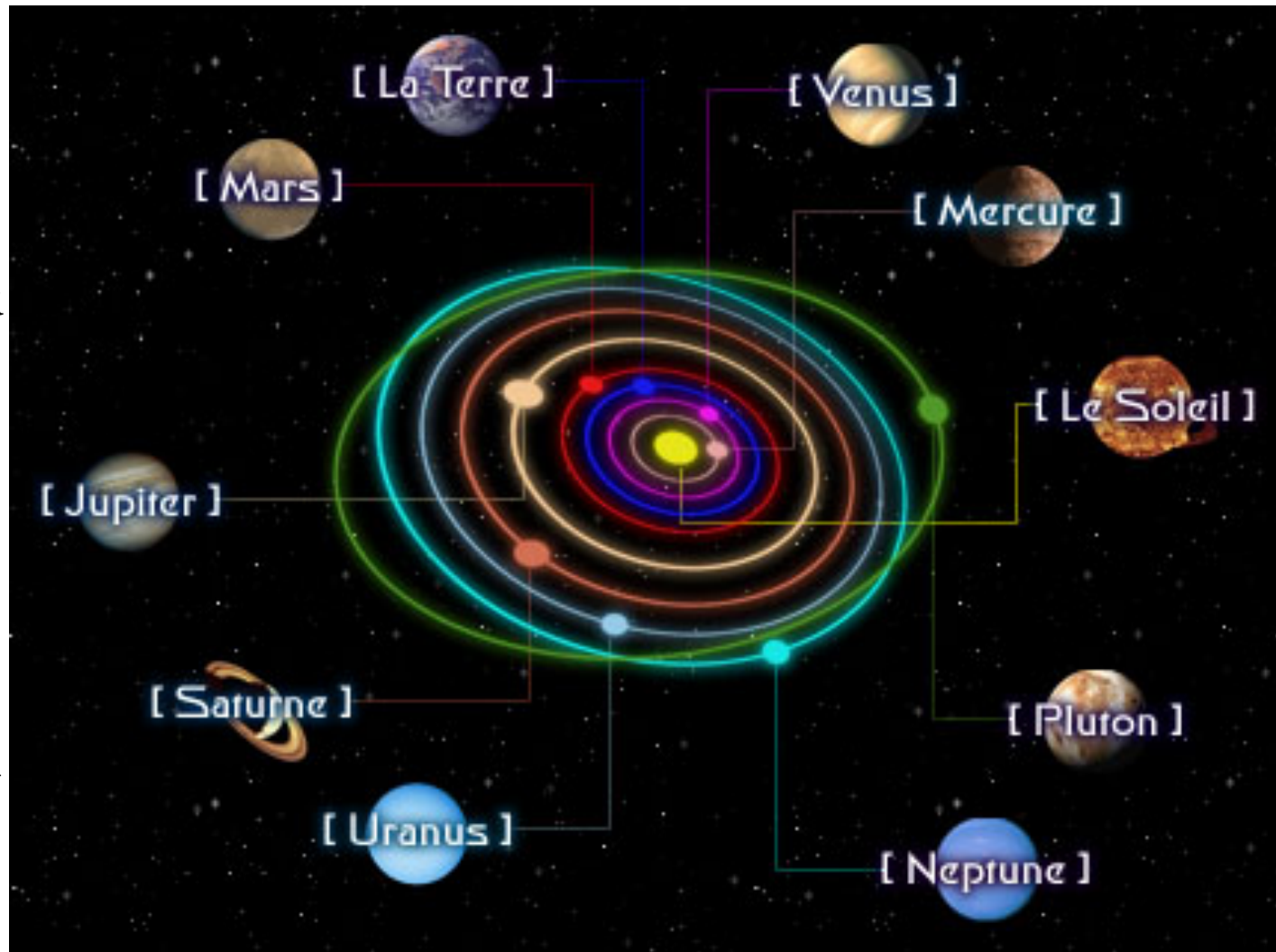
- Les planètes externes, géantes ou gazeuses

Atmosphère importante à H et he avec un petit noyau de fe, silicates, glace. Densité faible (0,7 à 1,7). La masse combinée des planètes géantes vaut 200 fois celle des planètes telluriques.



Plusieurs points font l'unité du système solaire

❖ Les planètes et la plupart des astéroïdes tournent autour du Soleil sur des orbites elliptiques presque circulaires situés dans le même plan «écliptique» perpendiculaire à l'axe de rotation du soleil



❖ La période de révolution des planètes dépend de leur distance par rapport au soleil, les plus éloignées tournent le plus lentement, et ces révolutions se font toutes dans le même sens que la rotation du soleil

PLANETE	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	Pluton
distance moyenne au Soleil (millions de km)	58	108	150	228	778	1427	2870	4500	5950
	0,39 UA	0,72 UA	1 UA	1,52 UA	5,2 UA	9,56 UA	19,22 UA	30,11 UA	---
Durée d'une révolution (années)	0,24	0,61	1	1,88	11,86	29,45	84	164	247,7

La période ("année") au carré est proportionnelle au cube de la distance moyenne au Soleil (3^{ème} loi de Kepler (Loi harmonique))

$$P^2 = D^3$$

Avec UA= distance Terre Soleil = 150 000 000 km₃₁

❖ Leur distance par rapport au soleil obéit à une loi simple (loi de bode découverte en 1772) : chaque planète est presque deux fois plus éloignée du soleil que sa voisine intérieure

Pour estimer la distance soleil - planète on prend la série numérique :

0 3 6 12 24 48 96 192 384 768

on ajoute un 4 à chacun des termes et on divise par 10 ce qui donne

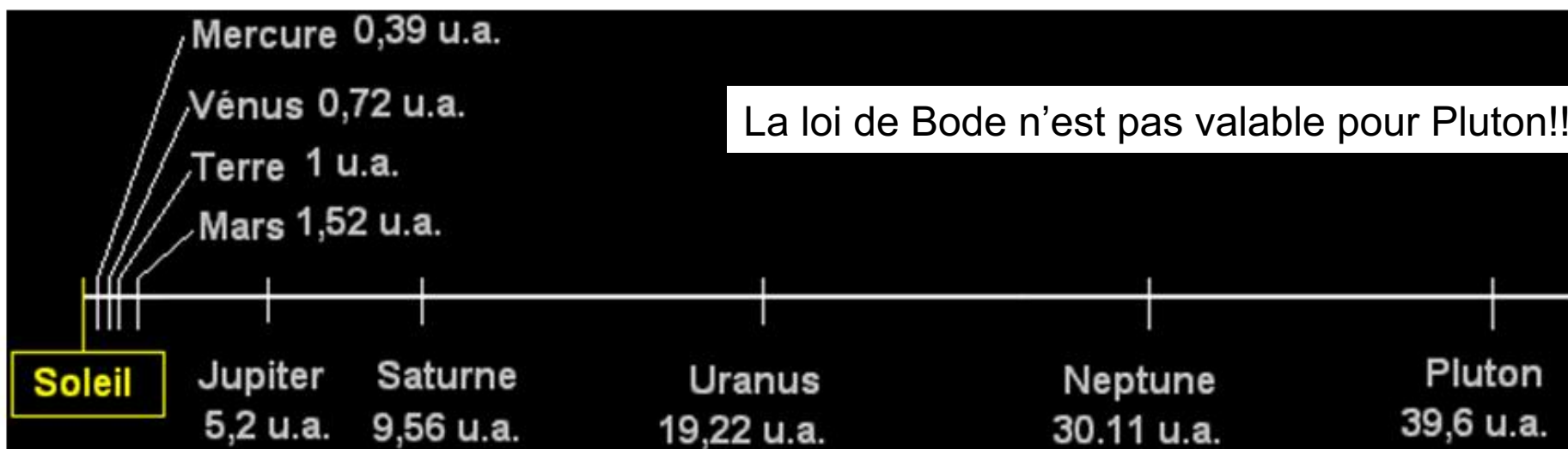
0,4 0,7 1,0 1,6 2,8 5,2 10 19,6 38,8 77,2 UA

M V T M ast J S U N P

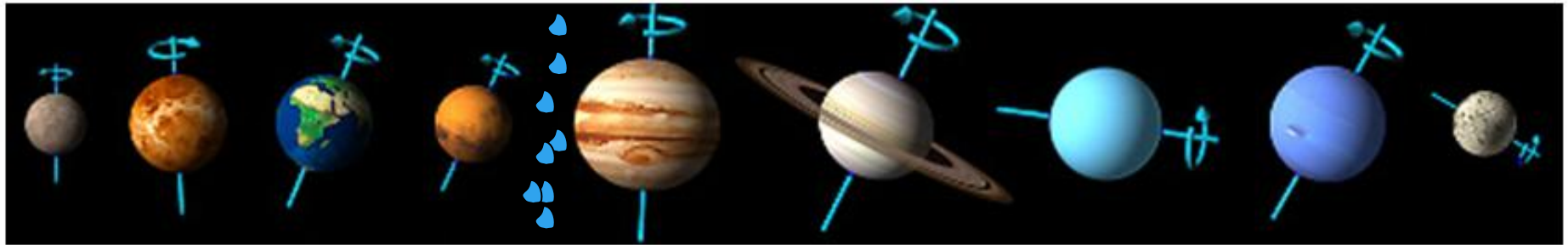
Ou bien selon la loi de Bode

$$D = (0,4 + 0,3 \times 2^n) \text{UA.}$$

n = - infini pour Mercure, 0 pour Venus, 1 pour Terre, M pour mars etc....



❖ La rotation des planètes sur elles même se fait selon un axe sub-perpendiculaire au plan de l'écliptique et dans le même sens que leur révolution (sauf pour vénus et uranus qui tournent en sens inverse)



M V T M AS J S U N P

M V T M J S U N P

	M	V	T	M	J	S	U	N	P
Durée de la rotation	59 j	243 j	23h 56mn	24h 37mn	9h 50mn	10h 39mn	17h 14mn	16h 3mn	153h 17mn

Modèle de formation

Depuis toujours les astronomes ont cherché à savoir quelle pourrait être l'origine d'un système aussi régulier.

Les différents scénarios devraient répondre à 2 types de questions :

- ☐ le soleil et les planètes sont-ils cogéniques

- ☐ le cortège planétaire s'est-il formé à partir de matière interstellaire (c a d de composition universelle) ou de matière stellaire (c a d modifiée par le passage à l'intérieur d'une étoile).

➤ **Premier modèle** : le soleil et les planètes sont nés en même temps à partir du même nuage interstellaire. → système cogénique
Cette théorie avait déjà été imaginée par Kant et développée par Laplace. L'objet céleste initial est appelé «nébuleuse protosolaire». C'est une masse de poussière en rotation rapide en forme de disque aplati. Les éléments non volatils vont se condenser pour donner naissance aux planètes sur la périphérie tandis que le centre se contracte et donne le soleil

➤ **Second modèle** : le cortège planétaire provient de la transformation d'un nuage interstellaire qui a été capturé par le soleil (gravité ou magnétisme) après sa formation. → Planètes et soleil non cogéniques

➤ **Troisième modèle** : à sa naissance le soleil fait partie d'un système binaire, mais l'étoile compagne s'est désintégrée et sa matière s'est répandue dans l'espace, une partie a été capturée par le soleil en donnant naissance à une nébuleuse.

➤ **Quatrième modèle** : une étoile serait passée à côté du soleil qui lui aurait arraché de la matière qui s'est mise en orbite autour de lui.

Le premier modèle (théorie de l'accrétion progressive) serait le plus attrayant pour plusieurs raisons :

- les orbites de toutes les planètes dans le même plan ainsi que le sens de rotation et de révolution qui sont les mêmes (excepté Vénus et Uranus)**
- les mêmes rapports de D/H, Li/Si et Fe/Si dans les planètes que dans la matière interstellaire**

