

Géologie Générale I.

(Cours magistral)

Cadre cosmologique de la terre et caractéristiques générales

(Année Universitaire 17/18)

Première Partie :

Chapitre 1 : La naissance de l'Univers

Introduction :

Unités:

Pour exprimer les distances des étoiles, on utilise :

L'année de lumière ou année lumière (al) : distance parcourue par la lumière dans le vide en un an : $1 \text{ al} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ Km}$ (soit près de 10 000 milliards de kilomètres).

Le parsec (pc) : abréviation de parallaxe-seconde, distance d'où l'on voit le rayon de l'orbite terrestre sous un angle (parallaxe) de $1''$: $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ al}$

1) Big bang :

L'univers primordial aurait commencé son existence par une énorme explosion, le Big Bang, qui se serait produite il y a 15 milliards d'années. Cette explosion aurait marqué le début d'une expansion qui continue aujourd'hui. Cependant l'image de l'explosion n'est pas très appropriée pour décrire le "Big bang". Contrairement à une explosion qui part d'un lieu bien défini vers un milieu pré-existant, l'explosion du Big bang est en tous point de l'espace, n'ayant ni centre ni bord mais créant l'espace et le temps. Juste après le Big bang, dans un milieu hyperdense (1 millième de cm de diamètre) et hyperchaud (10 suivie de 32 zéro °C) c'est le noir absolu. En effet la lumière et la matière sont intimement liées, empêchant les photons de la lumière de s'échapper.

2) Puis la lumière fût...

300 000 ans après le Big bang, profitant d'une baisse de la température ($10\,000^{\circ}\text{C}$), la lumière et la matière se dissocient. Les premiers photons de la lumière s'échappent dans l'espace à la vitesse de 300 000 Km/s. C'est la toute première lumière de l'univers, appelée aussi rayonnement fossile, qui nous parvient aujourd'hui refroidi à 3K (-271°C) après un voyage de 15 milliards d'années.

3) Un univers en expansion continue...

Depuis le Big bang, l'univers est en expansion, c'est à dire que l'espace dans son ensemble "gonfle", éloignant du même coup les galaxies les unes des autres. L'univers ne grandit pas en "créant de l'espace" mais plutôt en le dilatant. Pour savoir de quelle manière l'univers évolue et évoluera, il faut connaître un paramètre important: la densité de l'univers, c'est à dire la quantité de matière contenue dans l'univers (c'est la matière qui provoque l'expansion). Suivant ce facteur, l'univers peut avoir 3 visages différents:

- l'univers fermé: une masse totale trop importante donne la part belle à la gravité et conduit à un ralentissement de l'expansion, puis à une contraction, suivie d'un effondrement en un point: le Big crunch
- l'univers ouvert: A l'inverse une masse trop faible entraîne une accélération continue et éternelle de l'expansion. Cet univers est le plus abstrait des 3 car personne ne sait trop comment décrire un espace-temps hyperbolique
- l'univers euclidien (plat): Si par contre la masse total de l'univers est égale à la densité critique alors l'expansion ralentit sans cesse, mais sans jamais s'arrêter. Il est lui aussi éternel. C'est le plus simple à imaginer puisqu'il suffit de projeter à l'infini les 3 dimensions de l'espace :la hauteur, la largeur et la profondeur.

4) Un univers plat...

C'est en analysant les infimes fluctuations du rayonnement fossile (la 1ère lumière de l'univers) en l'an 2000 que les scientifiques, dans leur majorité sont maintenant convaincus que nous vivons dans un univers "plat". Cela ne veut pas dire qu'il ressemble à une crêpe, mais que son volume sur une grande échelle (à l'échelle de l'univers) n'est pas courbé. De

plus sans ces légères “rides”, qui correspondent à des variations de densité de matière à cette époque lointaine, les atomes seraient restés uniformément répartis dans l’espace en expansion. Ils ne se seraient jamais condensés sous l’effet de la gravitation pour former des nuages de gaz puis donner naissance aux galaxies, aux planètes

5) Le vide ce n’est pas rien!

Si l’on se tient au scénario classique d’un univers euclidien (plat), l’expansion devrait donc se ralentir lentement sans jamais s’arrêter. Mais ce n’est pas aussi simple car il pourrait exister une énergie plus inattendue qui contrebalancerait la gravitation. Il est possible que le vide de l’espace à lui tout seul corresponde à 70 % de la densité de l’univers. Il ne faut pas confondre le vide et le néant. Le vide c’est de l’espace où le temps existe et c’est déjà beaucoup, le néant, par définition, n’existe pas car quelque chose sans espace ni temps ne peut exister. L’énergie du vide serait le résultat d’interactions entre des particules virtuelles. C’est à dire inobservables, car disparaissant aussi vite qu’elles étaient venues mais possédant cependant une masse. Dès lors, le vide “parfait” n’existe pas : il est le siège d’un bouillonnement de ces mêmes particules virtuelles qui lui confèrent une certaine énergie. Ainsi grâce à cette nouvelle donnée on peut alors dire que si l’on considère que l’univers à 15 milliards d’années, pendant les 9 premiers milliards d’années la gravité a dominé et l’expansion s’est ralentie puis à mesure que le vide grandissait, la force répulsive a pris le dessus et la décélération a laissé place à une accélération qui se poursuit maintenant depuis 6 milliards d’années.

6) Les limites de l'univers

La physique a certaines limites infranchissables comme la vitesse ou la température. Ainsi, il n’est pas possible d’atteindre des températures inférieures à $-273,13^{\circ}\text{C}$ ou de dépasser la vitesse de la lumière de 300 000 Km/s. La seule façon d’expliquer cela, c’est d’affirmer que ces bornes ne peuvent être dépassées car elles ne peuvent être atteintes! Ce sont en fait des limites qu’on peut indéfiniment s’en approcher sans jamais les atteindre. Le temps compté à rebours se voit aussi imposer une limite: le Big bang. On peut remonter le temps indéfiniment à quelques millièmes de secondes après le Big bang mais on ne saura jamais ce qui s’est passé au temps 0 de l’univers. On peut dire que d’une certaine manière, l’univers a toujours existé et ce qui a occasionné l’expansion n’a jamais eu lieu car le temps n’existait pas encore.

7) Voir loin dans l'univers, c'est voir loin dans le passé

L'expansion de l'univers et la vitesse finie de la lumière (300 000 Km/s) entraînent quelques effets assez surprenants. Lorsque l'on regarde le soleil, nous le voyons tel qu'il était il y a 8 minutes, le temps que les rayons lumineux atteignent la terre. La galaxie la plus proche, Andromède, se trouve à 2 millions d'années-lumière, nous la voyons donc telle qu'elle était il y a 2 millions d'années. Lorsque l'on regarde encore plus loin dans le cosmos, on est confronté à un problème: la lumière a mis tellement de temps à nous parvenir que l'astre émetteur a depuis bien changé et qu'il ne se trouve plus à l'endroit que l'on voit dans le ciel. Ainsi prenons le cas d'une lumière d'une galaxie qui a mis 14 milliards d'années à nous rejoindre, on ne peut pas en conclure qu'elle se trouve aujourd'hui à 14 milliards d'années-lumière de nous. La lumière qui a été émise 1 milliard d'année après le big bang, se trouvait à 4,5 années-lumière de l'endroit où allait se former le soleil. Mais emportée par l'expansion de l'univers, 14 milliards d'années plus tard, c'est à dire aujourd'hui elle se situe à 26 milliards d'années-lumière de nous. Enfin si elle existe encore!

8) Quel avenir pour l'univers?

Même si l'univers est en expansion accélérée, les dix prochains milliards d'années seront l'ère des rencontres galactiques: les galaxies proches "tomberont" les unes sur les autres. De nos jours, quand deux galaxies fusionnent, il ne se passe pas grand chose du côté des étoiles, tant elles sont espacées pour entrer en collision. Par contre, la rencontre des nuages de gaz de chacune des galaxies génère de nouvelles étoiles. Au bout d'un certain temps le taux de formation stellaire ne cessera de baisser parce qu'il y aura de moins en moins de matière disponible pour former de nouvelles étoiles.

Dans dix milliards d'années, les galaxies s'évaporeront à leur tour puis disparaîtront. Il ne restera alors que des restes d'étoiles errant dans les ténèbres accompagnées par-ci par là de gigantesques trous noirs. D'ici 10^{30} années, quand la température de l'univers aura chuté suffisamment pour que les trous noirs soient plus chauds que lui, un faible rayonnement émanera d'eux et les videra peu à peu de leur substance. Le processus sera extrêmement long puisqu'il pourra prendre jusqu'à 10^{70} années. Il ne restera plus alors que les photons produits au cours de l'histoire de l'univers ainsi que les neutrinos, les électrons et leurs anti-particules dilués dans l'espace. Si l'expansion n'est pas trop importante, la charge positive des positrons

et celle négative des électrons ne cesseront jamais de s'attirer quelle que soit la distance les séparant. Ainsi après 10^{116} années, chaque positron aura rencontré son électron. Des retrouvailles qui scelleront leur destruction mutuelle par annihilation matière-antimatière. Il ne restera alors plus rien dans l'univers à part l'espace et le temps? Pas sur, la connaissance de la physique dans des conditions extrêmes a ses limites et l'univers peut réserver quelques surprises

Chapitre 2 : La Terre dans l'univers

Introduction :

Le Système solaire est né il y a 4,55 milliards d'années dans une nébuleuse solaire. Toutes les particules de cette nébuleuse, restent d'une supernova, se sont mises tranquillement à tourner et à s'attirer les unes les autres. A force de tourner, ce nuage s'est échauffé et au centre, la matière s'est contractée sur elle-même, ce qui a donné naissance à une étoile, notre [Soleil](#).

Les abords de l'étoile étaient à des températures élevées mais les régions lointaines du disque étaient dans un froid glacial. Donc près du Soleil seul les silicates ont pu exister à l'état solide et bien plus loin avec le froid tout a gelé, les grains de poussière été enrobés de glace. La frontière entre les températures élevées et le froid glacial devait être la ceinture d'astéroïdes.

I) Le système solaire :

Le Système solaire est situé à l'avant-bras de notre galaxie, la Voie lactée, qui mesure 100 000 années-lumière et compte un nombre inimaginable d'étoiles. Tout comme les autres étoiles, le Soleil tourne autour du cœur de la Voie lactée.

Il est formé d'une étoile, le soleil, et de l'ensemble des astres, en particulier des planètes, qui gravitent autour.

Les planètes se concentrent autour du soleil dans un disque d'environ 6 milliards de km de rayon, une distance que la lumière parcourt en moins de 6 heures, mais l'on présume qu'il existe une vaste concentration de comètes à des distances de l'ordre de 1 à 1,5 année de lumière. L'étoile la plus proche du système solaire, Proxima du Centaure, se trouve à une distance de 4,22 années de lumière.

- **Composition du système solaire :**

Le Soleil renferme **99,85%** de toute la matière du système solaire. Les planètes, qui se sont formées à partir du même disque de matériel que le Soleil, contiennent seulement **0,135%** de la masse du système solaire. Jupiter contient

plus de deux fois plus de matière que l'ensemble de toutes les autres planètes. Les satellites des planètes, les comètes, les astéroïdes, les météorites et le milieu interplanétaire ne constituent que les 0,015% qui restent. Le tableau suivant résume la répartition des masses 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 %

1) Constituants :

En dehors du soleil lui même, le système solaire comprend **huit** (non pas neuf) planètes principales, des milliers d'astéroïdes, des comètes, des météorites et des poussières interplanétaires. Les huit planètes principales sont de la plus proche au soleil à la plus éloignée : **Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, et Neptune** (Pluton n'est plus une planète depuis le 24/08/06 après que l'assemblée générale de l'Union astronomique internationale (UAI) a décidé à Prague de déchoir Pluton de son statut de planète).

Elles se répartissent en deux familles :

a) *Les planètes telluriques :*

Elles sont près du soleil. Elles sont petites mais denses, dotées d'une croûte solide et qui ont profondément évolué depuis leur formation. Il s'agit de Mercure, Venus, La Terre et Mars.

b) *Les planètes géantes :*

Elles sont nettement plus massives et plus volumineuses, mais peu denses, et dont l'atmosphère, à base d'hydrogène et d'hélium, a gardé une composition très proche de celle de la nébuleuse dont elles sont issues. Il s'agit de Jupiter, Saturne, Uranus, et Neptune.

Pluton, encore mal connu, paraît s'apparenter aux planètes telluriques par ses dimensions et aux planètes géantes par sa densité.

c) Loi de Titius-Bode :

Jusqu'à Uranus, les distances moyennes D des planètes au soleil sont données approximativement (en unités astronomiques) par la relation :

$$D = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$$

$D = -\infty$ pour mercure

$D = 0$ pour vénus

$D = 1$ pour la terre

$D = 2$ Mars.... Etc.

Cette relation empirique, appelée loi de Titius-Bode, a été découverte en 1741 par l'Allemand Wolf, mais popularisée et publiée en 1772.

2) Le soleil en chiffres :

Le rayon du soleil est de 996 000 km environ et sa masse est évaluée à $2 \cdot 10^{30}$ Kg, soit quelque 333 000 fois celle de la Terre. Sa masse volumique moyenne est voisine de 1400 Kg/m³.

3) Structure du soleil :

- * Noyau : région centrale du soleil la plus chaude (environ 15 millions de degrés). Il est le siège de réactions thermonucléaires qui alimentent le soleil en énergie.

- * Zone radiative : couche profonde, enveloppant le noyau, où l'énergie est transportée en rayonnement.

- * Zone de convection : Couche turbulente, située sous la photosphère où l'énergie est transportée par convection ; elle serait épaisse de 200 000 km.

- * Photosphère : Région de l'atmosphère solaire d'où provient la quasi-totalité de la lumière visible. Elle ne dépasse pas 200 km. (taches solaires).

- * Chromosphère : couche rose vif, épaisse d'environ 10 000 km qui enveloppe la photosphère, et d'où s'échappent des protubérances.

4) Evolution du système solaire :

a) Le système solaire est vraisemblablement issu d'un fragment d'un vaste nuage de gaz et de poussière interstellaires.

- b)** Pour des raisons encore mal comprises, cette nébuleuse a commencé à s'effondrer sous son propre poids.
- c)** Sous l'effet de sa contraction gravitationnelle, la nébuleuse a pris progressivement la forme d'un disque aplati en rotation, où la pression, la température et la densité augmentaient du bord vers le centre.
- d)** Il y a 4,6 milliards d'années, le soleil s'est condensé dans la partie centrale de la nébuleuse, la plus chaude et la plus dense.
- e)** Après « l'allumage » des réactions nucléaires au cœur du soleil, sa luminosité diminua et le disque de matière qui l'entourait se refroidit. Son environnement gazeux se solidifia en petits grains constitués près de soleil, d'éléments réfractaires et plus loin de glaces diverses.
- f)** Par accréation progressive de matière, sous l'effet de leurs collisions mutuelles, les grains engendrèrent de petits planétoïdes de dimensions kilométriques.
- g)** La poursuite de processus d'accréation collisionnelle aboutit à la formation d'embryons planétaires d'environ 1000 km de diamètre.
- h)** Les embryons planétaires, par leurs interactions gravitationnelles mutuelles, ont achevé leur croissance et donné naissance aux planètes. L'ensemble du processus de formation des planètes s'est déroulé sur quelque 100 millions d'années.
- i)** Dans 5 milliards d'années environ, le soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène et changera de structure. Tout en se contractant au centre, il deviendra beaucoup plus volumineux avec une température de surface plus basse.
- j)** Lorsque sa température centrale dépassera 100 millions de degrés, le soleil commencera à brûler son hélium. Ce sera alors une géante rouge, au rayon 50 fois plus grand qu'aujourd'hui, et la terre sera une fournaise.
- k)** Quand ces régions centrales seront principalement composées des produits de fusion de l'hélium, le carbone et l'oxygène, le soleil connaîtra une nouvelle période d'instabilité et son diamètre oscillera.
- l)** Lorsqu'il aura épuisé tout son combustible nucléaire, le soleil éjectera brutalement son enveloppe, et cette coquille de gaz en expansion engendrera une nébuleuse planétaire.
- m)** Le noyau résiduel du soleil s'effondrera pour former une naine blanche, petite étoile très dense de la taille de la terre.
- n)** Le rayonnement de la naine blanche déclinera peu à peu et celle-ci se transformera finalement en une naine noire, très froide et inobservable.

III.2. L'accrétion

Evolution du disque protoplanétaire

(1) Disque de poussières
Condensation de métaux réfractaires entre -4,56 et -4,55 Ga
Condensation des grains de roche silicatés entre -4,5 et -4,0 Ga
Limite de condensation de H₂O au delà de Mars

Forte interaction avec le vent solaire

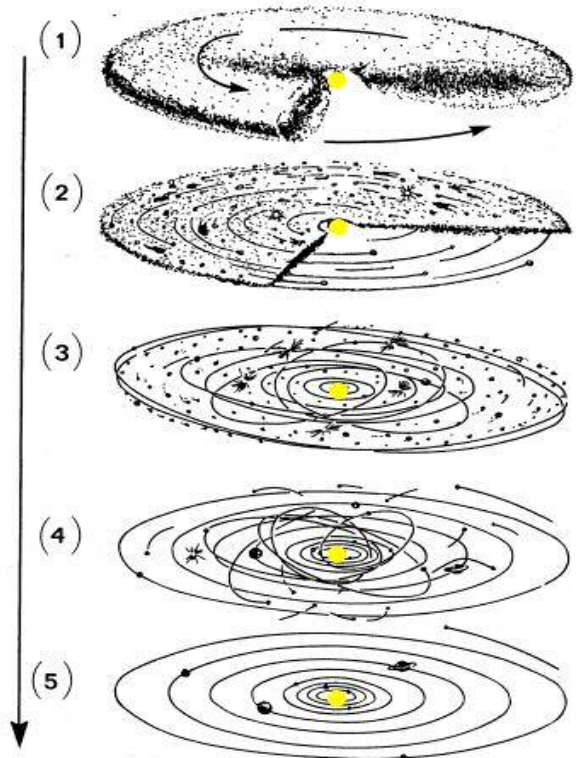
(2) Accrétion et formation des planétésimales

(3) Apparition des perturbations gravitationnelles et formation des protoplanètes (2 + 3 = 10 Ma)

(4) Balayage violent par le vent solaire, et bombardement de queue d'accrétion (900 Ma)

(5) Début de la différenciation interne des planètes

Atteint il y a 3,6 Ga



II) Les planètes:

Les planètes sont des corps non lumineux qui gravitent autour du Soleil.

Parmi les planètes principales du système solaire, les cinq les plus proches de la terre (Mercure, vénus, mars, Jupiter, Saturne) ont visibles à l'œil nu et observées depuis l'antiquité. Les trois plus lointaines ont été découvertes au télescope : Uranus en 1781, Neptune en 184 (suite aux calculs) et pluton en 1930.

i. Mercure :

Un petit monde dont la surface, soumise à de grands écarts thermiques et bombardée par les météorites, s'apparente à celle de la lune, mais qui recèle vraisemblablement un volumineux noyau de fer.

ii. Vénus

La sœur jumelle de la Terre, devenue un enfer par suite de sa plus grande proximité du soleil et de sont épaisse atmosphère de gaz carbonique.

iii. Terre

La planète bleue, qui abrite la vie. Elle se distingue des autres planètes par son atmosphère, constituée essentiellement d'azote et d'oxygène.

iv. **Mars**

La planète rouge, jadis siège d'un volcanisme intense et sur laquelle de l'eau paraît avoir coulé. L'homme ira l'explorer.

v. **Jupiter**

Un monde géant d'hydrogène d'hélium, en rotation rapide. Sa masse représente 300 fois celle de la Terre.

vi. **Saturne**

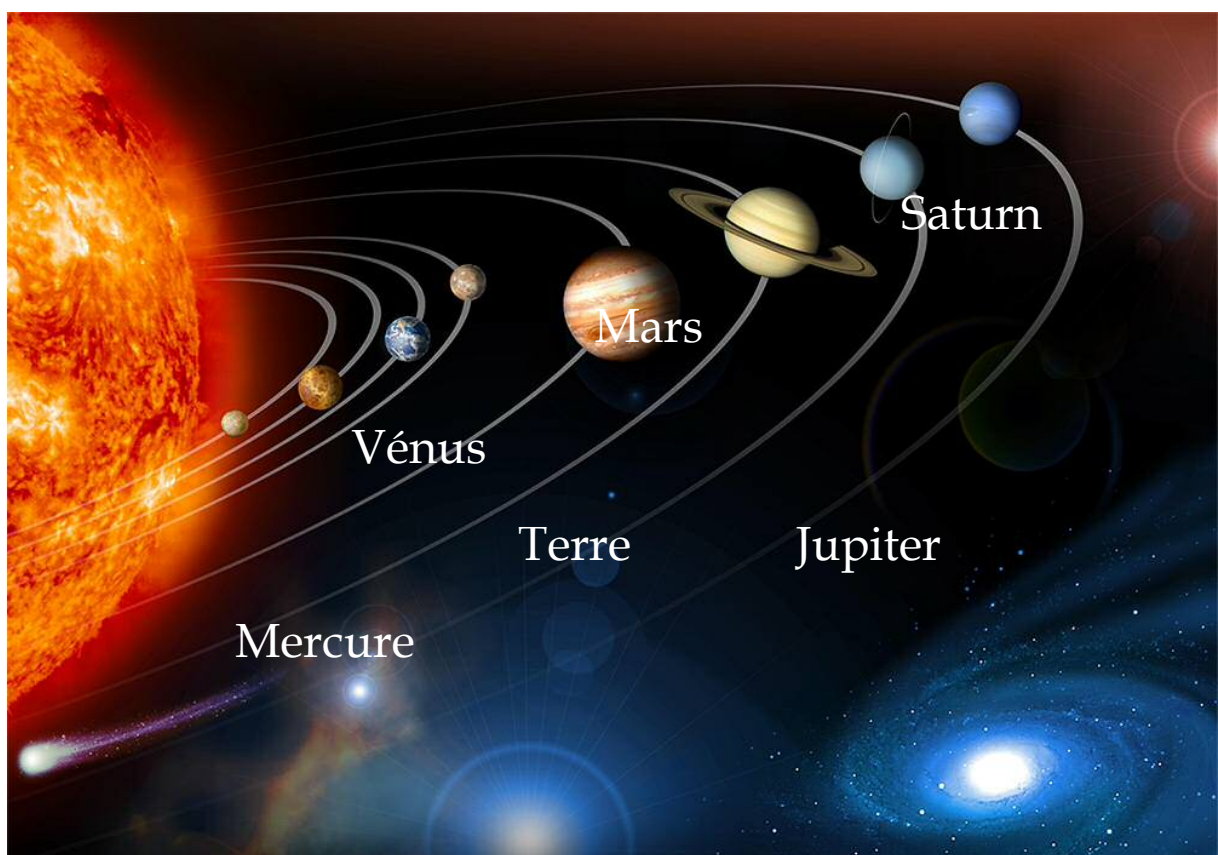
Un autre géant entouré d'une nappe de **débris glacés** structurés en un impressionnant système d'anneaux.

vii. **Uranus**

Un monde de glace, enveloppé d'hydrogène, d'hélium, de méthane et de fins anneaux de matière carbonée.

viii. **Neptune**

La plus lointaine des planètes géantes, découverte par le calcul en 1846 et survolée en 1989 par une sonde spatiale.



solaire. Le vent solaire a un effet sur la queue des comètes. Il a aussi un effet mesurable sur le mouvement des engins spatiaux. La vitesse du vent solaire est d'environ 400 km/s près de l'orbite de la terre. La surface où le vent solaire rencontre le milieu interstellaire est appelé **héliopause**. L'héliopause est, en théorie, une limite à peu près circulaire à environ 100 UA du Soleil.

Le champ magnétique solaire peut être mesuré sur Terre. Il domine dans le Système Solaire, excepté dans l'environnement immédiat des planètes qui ont leur propre champ magnétique.

III) La galaxie et les étoiles:

1) Rappel sur les unités:

Pour exprimer les distances des étoiles, on utilise :

L'année de lumière ou année lumière (al) : distance parcourue par la lumière dans le vide en un an : $1 \text{ al} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ Km}$ (soit près de 10 000 milliards de kilomètres).

Le parsec (pc) : abréviation de parallaxe-seconde, distance d'où l'on voit le rayon de l'orbite terrestre sous un angle (parallaxe) de $1''$: $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ al}$.



2) Structure :

Le soleil est l'une des 100 milliards d'étoiles rassemblées dans une immense agglomération d'étoiles et de matière interstellaires, la Galaxie, dont la cohésion est assurée par la gravitation.

En première approximation, on peut considérer la galaxie comme constituée par un disque très aplati dont le diamètre est voisin de 30 000 parsecs (100 000 al) et dont la grosse boursoufflure vers le centre (5 000 pc), appelée *bulbe*. Le centre est situé pour nous vers la constellation du Sagittaire. Le soleil se situe à 28 000 années de lumière du centre et légèrement au N. du plan moyen, l'épaisseur du disque au niveau du Soleil étant d'environ 1 000 pc. La concentration diminue quand on se rapproche des bords du disque. Autour du disque se répartissent des amas globulaires dans un système sphéroïdal appelé *halo*.

Le disque comprend environ 70% de la masse totale de la galaxie; il contient des étoiles d'âges et de masses variés et toute la matière interstellaire. Cette dernière et les étoiles les plus jeunes sont réparties le long de bras spiraux dans un disque d'épaisseur très faible, de l'ordre de 200 al. Les étoiles plus vieilles et les nébuleuses planétaires sont moins concentrées dans le disque galactique avec une épaisseur moyenne de l'ordre de 700 à 1 000 al.

Le bulbe contient une très faible proportion de gaz; il est pour l'essentiel constitué d'étoiles vieilles riches en métaux et d'étoiles de population II. La répartition du gaz interstellaire révélée par les observations radioastronomiques de l'hydrogène neutre à 21 cm de longueur d'onde et du monoxyde de carbone indique une structure complexe et d'importants mouvements d'expansion du gaz à partir du centre galactique, avec en particulier une concentration en anneau à environ 10 000 al du centre. La région centrale, la plus dense, est appelée *noyau*. Le centre même de la galaxie coïncide avec une radiosource compacte, Sagittarius A, d'un diamètre inférieur à 20 fois la distance Terre-Soleil. C'est aussi une source de rayon X et d'infrarouge.

Le Halo est essentiellement peuplé d'étoiles âgées. Il est réparti dans les amas globulaires.

3) Les mouvements :

La matière du disque galactique est animée d'un mouvement de rotation autour du centre suivant un axe perpendiculaire au disque.

Dans les régions centrales, à au moins 2000 al du centre, cette vitesse reste proportionnelle à la distance au centre, ce qui traduit une rotation semblable à celle d'un corps solide. Plus loin du centre, la vitesse augmente, passe par un maximum (voisin de 250 km /seconde) puis diminue constamment. Il Faut au soleil et au système solaire 240 millions d'années pour effectuer un tour complet. Depuis sa naissance le soleil a dû effectuer une vingtaine de tours.

4) Matière interstellaire :

Constituée de gaz diffus et de poussières, la matière interstellaire est répartie en nuages plus au moins denses entre les étoiles. Outre de l'Hydrogène, qui est le principal constituant (90 %), les nuages de gaz interstellaire contiennent des atomes neutres (calcium, potassium, sodium), des ions (Ca^{2+} , Fe^{2+} , Titane) et quelques molécules (CN, CH^+ , CH, H_2 , CO, **OH**, **C₂**).

5) Evolution des étoiles :

Les étoiles naissent de la contraction de vastes nuages de matière interstellaire (nébuleuse). Lorsque leur température devient suffisante, des réactions thermo-nucléaires s'amorcent dans leurs régions centrales et leur permettent de rayonner. La matière qui les constitue subit ainsi un échauffement de plus en plus intense qui autorise le déclenchement de réactions thermo-nucléaires entre éléments de plus en plus lourds. Pendant la majeure partie de leur vie, elles tirent leur énergie de la transformation d'hydrogène en hélium (cas du soleil actuel). Lorsque leur combustible nucléaire s'épuise, elles connaissent une phase explosive puis subissent une phase ultime d'effondrement gravitationnel qui engendre, selon leur masse une naine blanche, une étoile à neutron ou un trou noir.

6) Trous noirs :

Le stade ultime de l'évolution des étoiles massives (≥ 4 fois la masse du soleil) doit être un trou noir, résultant de la contraction gravitationnelle indéfinie de la masse stellaire. De tels objets doivent leur nom au fait que leur champ de gravitation est si intense que rien, pas même la lumière, n'en peut sortir.

IV) L'univers extragalactique :

1) Classification des galaxies:

Dans la classification morphologique dérivée de celle de E. Hubble (1926). On distingue 4 catégories de galaxies selon leur forme : Les spirales (60%), les elliptiques (15%), les lenticulaires (20%) et les irrégulières (3%). Seulement 2% de galaxies dites « particulières » échappent à cette classification.

(voir schéma)

a) Les galaxies elliptiques

Elles sont souvent petites et de faible luminosité, contenant quelques 10^9 ou 10^{10} étoiles; mais il en existe de -rares- super géantes, contenant jusqu'à 10^{13} étoiles.

Elles sont classées de $E0$ à $E7$, en fonction de l'aplatissement apparent de leur ellipsoïde; si les deux axes de l'ellipsoïde sont a et b , la galaxie est classée En avec :
L'aplatissement n'est pas dû à une rotation d'ensemble, mais à l'arrangement des orbites individuelles des étoiles; une galaxie elliptique peut être triaxiale (les trois axes de l'ellipsoïde sont différents).

Les quatre caractéristiques des galaxies elliptiques sont :

- L'absence de structure spirale.
- Une dispersion des vitesses élevée : les orbites sont "dans tous les sens", avec toutes les ellipticités.
- Très peu de poussière et de gaz entre les étoiles.
- En conséquence, pas de formation de nouvelles étoiles, pas d'étoiles jeunes, pas de supernovae. C'est pourquoi on dit souvent que les galaxies elliptiques sont peuplées de vieilles étoiles.

b) Les galaxies spirales

Elles sont classées en fonction des développements relatifs du *bulbe* central et du *disque* où se trouvent les bras spiraux. Une galaxie à très gros bulbe et bras enroulés très serrés, à peine visibles, sera une Sa ; une galaxie au bulbe minuscule et aux bras complexes, très déroulés, sera une Sd . On distingue aussi les *spirales normales*, où les

bras partent des régions les plus centrales, des *spiraales barrées*, où les bras partent des extrémités d'une *barre* lumineuse qui traverse le bulbe; ces dernières sont classées *SBa* à *SBd*.

Il est à noter que les spirales barrées, considérées au début comme des curiosités, apparaissent aujourd'hui comme des galaxies tout à fait ordinaires, la barre étant peut-être un phénomène transitoire par lequel passeraient plus ou moins brièvement la plupart des galaxies, éventuellement de façon récurrente. Cette structure semble être un moyen puissant de transférer de la masse vers les régions centrales, et, à ce titre, est peut-être liée aux phénomènes de noyau actif dont nous parlerons plus loin.

Beaucoup de spirales sont très lumineuses, contenant jusqu'à 10^{11} ou $2 \cdot 10^{11}$ étoiles. C'est le cas de notre galaxie, comme celui de la Galaxie d'Andromède. Il existe aussi des galaxies *S0* et *SB0*, qui présentent un bulbe, un disque, éventuellement une barre, mais pas de bras. On les appelle *galaxies lenticulaires*, et elles se situent, dans la séquence de Hubble, à la jonction elliptiques/spirales.

Les quatre caractéristiques des galaxies spirales sont les suivantes :

- Une structure spirale plus ou moins apparente.
- Une rotation d'ensemble qui domine nettement la dispersion des vitesses individuelles.
- Un peu ou beaucoup de poussière et de gaz entre les étoiles.
- En conséquence, formation de nouvelles étoiles. Population d'étoiles jeunes, chaudes ("bleues") et massives dans les bras spiraux; supernovae.

c) Les galaxies irrégulières

Elles ne présentent pas de structure particulière, les étoiles y sont groupés en paquets répartis aléatoirement. Elles sont ou non riches en poussières et en gaz, et présentent ou pas des sursauts de formation d'étoiles. Ce sont en général de petites galaxies, faiblement lumineuses, contenant de quelques 10^7 à quelques 10^9 étoiles. Elles ne sont donc détectées qu'à faible distance de nous, bien qu'elles constituent peut-être une population numériquement très importante de l'univers.

Notre Voie Lactée a parmi ses satellites deux galaxies irrégulières : les nuages de Magellan; notons que le Grand Nuage de Magellan est parfois classé comme une très petite SB...



II.1. Un exemple de galaxie: la Voie Lactée

Caractéristiques globales

- Galaxie spirale (type Sbc),
La 2^{nde} en importance dans notre groupe local, après la grande galaxie d'Andromède

Environ 10^{11} étoiles

- Composantes principales
 - disque fin, de masse $6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
 - disque épais, de masse $10^9 M_{\odot}$
 - bulbe, de masse $2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
 - halo, de masse $10^9 M_{\odot}$
 - des amas globulaires

d) Conclusions

Si l'évolution des étoiles "normales" commence à être bien cernée, celle des galaxies est encore pleine de zones d'ombre. On ne sait pas comment elles sont nées, et on ignore sous quelle forme. N'y avait-il, un milliard d'années après le Big Bang, que des spirales, que des collisions ont ensuite muées en elliptiques? Il nous manque beaucoup de données observationnelles, et de très grands télescopes sont indispensables pour étudier l'univers à l'époque où se formaient les galaxies. Les télescopes au sol de 50 et 100m, le NGST spatial de 8m, nous réservent de belles surprises...

L'évolution des amas de galaxies s'étudie aussi au moyen de simulations informatiques. On bute là sur un problème de puissance brute, et de qualité des algorithmes; les progrès sont constants dans ces deux domaines, et la décennie à venir s'annonce fascinante.

Enfin, la formation des galaxies demande encore des avancées théoriques dans la physique de l'univers primordial...

V. Modèles cosmologiques :

Les modèles développés dans le cadre de la théorie de la relativité générale prévoient soit une expansion permanente de l'univers (univers ouvert), soit le ralentissement de son expansion suivi d'une phase de contraction (univers fermé). Les observations actuelles plaident en faveur d'une expansion permanente.

Si son expansion actuelle se poursuit indéfiniment, l'univers, à force de se dilater, deviendra progressivement de plus en plus vide, car toutes les galaxies continueront sans trêve à s'éloigner les unes des autres. Simultanément, l'espace deviendra de plus en plus froid. Avec le temps les étoiles finiront par s'éteindre et leurs cadavres s'accumulent dans le cosmos.

VI. Observations astronomiques

L'intérêt de l'astronomie voudrait que les observatoires fussent distribués de façon régulière à la surface du globe, au moins en latitude. En fait ils se concentrent surtout dans l'hémisphère nord, où se trouvent plus des deux tiers des terres émergées et en particulier dans les pays ayant une longue tradition scientifique.

Mauna kea (Hawaii), Yerkes, mont wilson (usa), la palma (I canaries) etc.

A RETENIR

- Notre galaxie, la Voie Lactée, n'est qu'une galaxie parmi des milliards de galaxies réparties dans tout l'univers. C'est une grande galaxie, contenant 100 à 200 milliards d'étoiles. Elle mesure environ 100000 années-lumière de diamètre, pour une épaisseur de 2000 années-lumière.
- Les galaxies se classent en spirales (barrées ou non), elliptiques et irrégulières.
- Les premières sont souvent de grande taille, les secondes plus modestes, quoiqu'il y ait des exceptions. Les troisièmes sont toujours petites.
- Les distances des objets célestes se mesurent surtout :
 - par la trigonométrie pour quelques étoiles proches
 - par des méthodes de chandelles standard pour étoiles et galaxies

- par des méthodes spectroscopiques indirectes qui lient certaines caractéristiques spectrales à l'éclat absolu des objets.
- Les masses des objets se mesurent:
 - pour les étoiles, grâce à la loi de Képler pour les étoiles doubles uniquement. Pour les étoiles isolées, on utilise des critères spectroscopiques indirects.
 - pour les galaxies, on utilise des critères spectroscopiques indirects comme la largeur des raies spectrales, liée à la masse de l'objet.
- La première génération d'étoiles est sans doute née un peu avant les premières galaxies, et était constituée purement d'hydrogène et d'hélium nés dans le Big Bang.
- Une étoile est stable en raison de l'équilibre actif entre gravitation et pression interne.
- L'existence d'une étoile est une succession de phases stables de fusion nucléaire (essentiellement des noyaux d'hydrogène) et de phases de contraction qui amènent le coeur à une température plus élevée à laquelle les produits de la précédente fusion deviennent à leur tour fusionnables. L'étoile fabrique ainsi tous les éléments chimiques, jusqu'au fer, au plus.
 - Si l'étoile est massive, il y a beaucoup de telles étapes, mais l'étoile y passe très peu de temps.
 - Si elle est de faible masse, il y a peu de phases, mais la phase H est très longue.
- En fin de vie, l'étoile passe souvent par une phase géante rouge, puis nébuleuse planétaire.
- Les étoiles très massives finissent leur vie dans une formidable explosion : une supernova. Cette explosion voit la synthèse des noyaux lourds au-delà du fer, leur dispersion dans l'espace, tandis que l'onde de choc peut déclencher dans les nuages moléculaires avoisinants une flambée de formation de nouvelles étoiles.
- La structure spirale des galaxies marque la position des ondes de densité du disque. Là naissent de nouvelles étoiles, dont des supergéantes bleues, futures supernovae, dont l'éclat souligne la position des bras.
- Les galaxies ont souvent (toujours?) un trou noir supermassif (10^8 masses solaires) en leur coeur. Tant qu'il y a de la matière au voisinage, un disque d'accrétion s'entretient autour du trou noir, produisant une violente émission de rayonnement, et parfois l'éjection de deux jets d'électrons relativistes. Tous ces phénomènes violents produisent l'activité caractéristique des noyaux actifs de galaxies : galaxies de Seyfert, radiogalaxies, quasars...

- Les galaxies se groupent en amas, eux-mêmes arrangés en superamas. La gravitation produit une répartition des superamas analogue à celle de la matière dans une structure de mousse.
- Dans les amas, les galaxies ne sont séparées en moyenne que de dix fois leur diamètre. Il y a beaucoup de rencontres, avec des effets divers : déformations dues aux forces de marée, expulsion des disques gazeux, flambées de formation d'étoile, cannibalisme galactiques.
- Enfin, on est loin de comprendre la formation et l'évolution des galaxies...