

Chapitre 1

STRUCTURE DU COSMOS

I - INTRODUCTION

1. – Quelques définitions

~ L'Univers est l'ensemble de tout ce qui existe. On l'appelle également le Cosmos ou l'Espace lorsqu'on parle du milieu extraterrestre.

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

~ L'Astronomie est la science des corps célestes. (céleste est un mot qui est relatif au ciel).

~ L'Astrophysique est l'étude des propriétés physiques des corps célestes.

2. - L'échelle des distances pour mesurer l'Univers

En astronomie on utilise généralement deux sortes d'échelles :

a) - **L'année lumière** : c'est la distance parcourue en un an par la lumière. Elle est notée **al** et elle vaut $9,46 \cdot 10^{15}$ m. (on rappelle que la vitesse de la lumière est d'environ 300.000 km/s).

Ex : la lumière du soleil met 8 minutes pour nous parvenir. Quelle est la distance entre la Terre et Soleil ?

b) - **L'unité astronomique**, notée **UA**, est la distance entre la Terre et le Soleil : 1 UA = 150.000.000 km environ.

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**).

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

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

3.- La hiérarchie de l'Univers (fig.2).

Une **galaxie** est une entité de base de l'Univers ; elle est constituée de milliards d'étoiles.

Une **amas** est constitué de milliards de galaxies de *galaxies*

Un **superamas** est constitué de quelques à plusieurs milliers d'*amas*

Notre *Galaxie*, appelée *la Voie Lactée*, n'est qu'une parmi les milliards de galaxies ; elle est constituée de quelques dix milliards d'étoiles. Le Soleil est l'une de ces d'étoiles.

II – NOTRE GALAXIE, LA VOIE LACTEE

La Galaxie (on écrit Galaxie en g majuscule pour faire signifier la Voie Lactée) est une sorte de galette aplatie, en rotation (250km/s), qui présente des bras spiraux (**fig.3**). Son diamètre est d'environ 100.000 al et son épaisseur maximale est de l'ordre de 6.000 al. Elle est formée de 10^{19} étoiles. Le Soleil est l'une de ces étoiles qui forme, avec des planètes qui gravitent autour d'elle, *le système solaire*. Ce dernier est situé à environ de 30.000 al du centre de la Galaxie; il fait le tour (dans le sens des aiguilles d'une montre vue de dessus) en 240 millions d'années. (240 Ma = 1 unité galactique).

Le centre de la Galaxie se présente sous forme de bulbe stellaire peu aplati où se condense beaucoup de vieilles étoiles. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne de ce centre les étoiles sont jeunes et elles sont très éloignées les unes des autres (3 al).

Au centre de ce bulbe, existe un **trou noir**, constitué de matière très dense. Les étoiles trop proches y laissent de la matière, qui s'y engouffre en tournoyant (voir TD).

III – LES GALAXIES

1. – Les différents types de galaxies

Les photographies réalisées aux télescopes terrestres et spatiaux ont permis de mettre en évidence l'existence d'innombrables galaxies semblables à la Voie Lactée. Toutes ces galaxies se situent à des distances supérieures à 2 millions d'années-lumière. Elles sont donc très pâles et occupent un champ de quelques dizaines de secondes d'arc seulement sur la voûte céleste. Les plus faibles d'entre elles se distinguent à peine parmi les étoiles de la Voie Lactée situées au premier plan.

Selon leur morphologie, les galaxies ont été classées par Edwin Hubble (fig.5) en quatre catégories :

a) - *Les galaxies elliptiques* ont la forme d'ellipsoïdes plus ou moins aplatis, avec une répartition d'étoiles augmentant vers le centre, mais ne montre aucune structure fine. Elles présentent une symétrie de rotation complète. Suivant leur ellipticité, on les qualifie de E0 (les plus sphériques), E1, E2, ..., ou E7 (les plus aplaties).

b) - *Les galaxies spirales* ont une forme aplatie, la plupart des étoiles brillantes étant concentrées dans un disque peu épais, et suivant des bras que dessinent des spirales à partir de la région centrale. Au niveau du bulbe des galaxies spirales se trouve une grande concentration d'étoiles.

Les galaxies spirales se divisent elles-mêmes en deux branches :

- *- les spirales normales (S), dans lesquelles les bras partent directement du bulbe, et
- *- les spirales barrées (SB), dont les bras se détachent à l'extrémité d'une « barre » traversant le bulbe.

Les galaxies spirales, normales ou barrées, se différencient entre elles par l'importance relative de leur bulbe et de leurs bras et par l'ouverture de ces bras. On distingue :

- ** - les Sa et SBa, au bulbe important et dont les bras s'enroulent de façon serrée autour du bulbe,
- ** - les Sc et SBc, au bulbe ténu et aux bras très ouverts,
- ** - les Sb et SBb, aux propriétés intermédiaires.

c) - *Les galaxies lenticulaires* (S0), a été introduite pour désigner certaines galaxies elliptiques très aplaties possédant un bulbe très lumineux et, parfois, de la matière interstellaire absorbante esquissant l'ébauche d'un disque.

d) - *Les galaxies irrégulières*, on ne peut mettre en évidence aucun axe de symétrie et elles sont riches en matière interstellaire et en étoiles jeunes.

En nombre, les 2/3 des galaxies de l'Univers ont une forme spirale, 10% sont elliptiques et 25% lenticulaires. Parmi les galaxies spirales, les 2/3 d'entre elles sont barrées.

Notons enfin que la plupart des galaxies présentent un trou noir au centre du bulbe qui serait constitué de la matière car il émet des ondes radios

Une projection audio-visuelle de ces types de galaxies sera donnée lors des séances des travaux dirigés.

2. - Organisation du groupe local et du superamas local

Le **groupe local** (ou amas local) est un petit amas d'une vingtaine de galaxies groupées sur 1 Mpc auquel appartient la Galaxie (fig.6). Sa taille est d'environ un million al, dix fois le diamètre de la Voie Lactée.

Il comprend :

- deux galaxies satellites, le Grand et le Petit Nuage de Magellan,
- deux autres grandes galaxies spirales : Andromède (M 31, de type Sb), avec ses deux satellites M 32 et NGC205, et la galaxie du Triangle (M33, de type Sc).
- quelques galaxies irrégulières (NGC 6 822, dans le Sagittaire, et IC 1 613, dans la Baleine)
- des galaxies de petites dimensions, peu riches en étoiles (quelques dizaines de millions) et dépourvues de gaz et de poussière interstellaires.

Toutes ces galaxies se déplacent autour d'un centre commun situé entre notre Galaxie et la Nébuleuse d'Andromède.

Le **superamas local**

Le groupe local fait partie d'un énorme complexe de 10000 galaxies assemblées dans des amas s'étendant sur quelques 200 millions d'années lumières, appelé Superamas local ou Superamas de la Vierge (fig.8).

Le Superamas de la Vierge et la Superamas de l'Hydre et du centaure semblent, ent eux-mêmes, converger vers une autre grande agglomération d'amas (superamas) que l'on appelle le *Grand Attracteur*.

3. – L'éloignement des galaxies : l'expansion de l'Univers

Une fois décomposé, le rayonnement émis par une galaxie montre l'ensemble des raies, en absorption et en émission, des étoiles et du gaz qui composent cette galaxie. En se référant à l'effet Doppler-Fizeau, la mesure du déplacement de ces raies par rapport à celles d'une source au repos permet de déterminer la vitesse radiale dont est animée la galaxie.

Ces mesures montrent que la quasi-totalité était des vitesses d'éloignement. Plus une galaxie est lointaine, et plus sa vitesse d'éloignement est grande. Cela se traduit par la *loi de Hubble*, qui peut s'écrire $V = Hd$:

V = la vitesse radiale (exprimée en kilomètres par seconde) et

d = la distance exprimée en mégaparsecs (10^6 parsecs) et

H une constante nommée **constante de Hubble** (réajustée un certain nombre de fois : la valeur admise actuellement est 15km/s/ al).

La loi de Hubble conduit à l'image simple d'un **Univers en expansion** depuis son origine, *le big bang*, il y a environ 15 milliards d'années. La distance et la vitesse d'éloignement des galaxies sont proportionnelles.

4. - Les quasars

Les *quasars* sont des galaxies impossibles à distinguer des étoiles sur les clichés du ciel, d'où leur nom de quasars (abréviation de *quasi stellar radio sources*). Dans le domaine des ondes radio, elles se caractérisent par une émission très intense provenant d'une région très localisée au centre de la galaxie. Dans le domaine visible, elles sont en moyenne cent fois plus lumineuses que les galaxies normales. Elles sont également de puissants émetteurs de rayonnements γ , X et ultraviolets. Cette énergie est d'origine gravitationnelle provenant d'un trou noir massif siège d'une accréation de la matière située dans son environnement.

Certains quasars sont entourés d'une enveloppe géante d'hydrogène ionisé qui peut s'étendre jusqu'à quelques centaines de kpc du centre (alors que le disque stellaire conventionnel s'étend jusqu'à 10 kpc, et le gaz jusqu'à 20 ou 30 kpc, dans une galaxie spirale standard). Grâce à l'énorme quantité d'énergie rayonnée par le noyau actif, la matière interstellaire peut-être chauffée et ionisée jusqu'à des distances très grandes, nous révélant ainsi l'existence d'une composante gazeuse aussi éloignée.

IV - LES ETOILES

1 – Evolution des étoiles

Les étoiles constituent une fraction importante de la masse de l'Univers (la Galaxie en contient une centaine de milliards). 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 accréation qui peut avoir lieu lorsque la pression interne devient insuffisante pour contrebalancer les forces d'autogravitation. La température augmente dans la partie centrale et il peut y avoir des réactions nucléaires (voir chapitre 2) qui donnent naissance à une étoile. Cette dernière se gonflera après quelques milliards d'années et elle peut évoluer de deux façons :

- Si sa masse est faible, elle évoluera en *géante rouge* semblable au soleil. La plupart des étoiles visibles sont dans le même stade d'évolution que le Soleil, c'est-à-dire qu'elles rayonnent l'énergie libérée par la combustion de l'hydrogène en hélium dans leur région centrale. Cette dernière subit une contraction; elle est beaucoup plus denses et plus chaudes (10^8 K). Par contre l'enveloppe se dilate et refroidie. La phase géante rouge des étoiles a une durée d'environ 10 % la phase précédente. La matière finit par se condenser dans la partie centrale grâce à des fusions nucléaires et la géante rouge évolue en *naine blanche*.

- Si la masse est plus grande, l'étoile continue son évolution en passant par la phase géante rouge qu'elle travers évidemment plus rapidement pour évoluer une *supergéante*. Cette dernière subit une importante explosion qui disperse la plus grande partie de sa masse dans le milieu interstellaire. L'étoile est alors une *supernova*. Les parties centrales des supernovae subsistent non sous forme de naines blanches mais d'étoiles à neutrons en rotation rapide qui émettent des ondes radio de façon très régulière et aussi très rapide appelées *pulsars*.. Les étoiles les plus massives peuvent devenir des *trous noirs*.

2. – Couleur et luminosité des étoiles

Les étoiles ne sont pas toutes de la même couleur. Si l'on regarde le ciel de plus près on se rend compte que certaines d'entre-elles sont rouges, d'autres sont bleues, d'autres sont jaunes, blanches... Cette différence de couleur provient essentiellement d'une différence de température superficielle des étoiles. Ces dernières ne montrent pas également la même luminosité.

Il existe une relation entre la luminosité, la couleur et la température qu'on peut résumer sur le diagramme de Hertzsprung-Russell (fig.7).

3. - Les constellations

Une constellation est un regroupement d'étoiles visibles à l'oeil nu qui sert pour se repérer dans le ciel. Les constellations portent des noms d'animaux, d'objets ou de personnages religieux et mythologiques. Le ciel compte 88 constellations (voir TD).

V. – LA COMPOSITION DU MILIEU INTERSTELLAIRE

C'est un milieu extrêmement dilué et également très hétérogène; on y trouve à la fois des régions ionisées, des molécules, de la poussière, des nuages relativement denses (10^3 particules par cm^3) et froids (100 K), entourés d'un milieu très dilué (de 0,01 à 10 particules par cm^3) et chaud (10^4 K).

Dans les zones relativement denses on distingue :

- Les nuages moléculaires, qui sont des nuages relativement denses (10^3 à 10^4 atomes par cm^3) ; leur température est seulement de quelques Kelvin. La grande densité de la matière empêche les photons d'y pénétrer. Le gaz s'y trouve sous forme moléculaire. C'est dans ces nuages que se forment les étoiles.
- Les régions H II sont des régions chaudes, composées d'hydrogène ionisé, chauffées par des étoiles jusqu'à une température de 1.000 °K.
- Les restes de supernovae qui sont des nuages de matières issues des couches externes de l'étoile, lorsqu'elle explose.

Parmi les régions diffuses, on trouve :

- Les régions H I, composées d'hydrogène neutre, de densité faible 1 atome par cm^3 et dont la température varie entre 50 et 150 °K. Ces nuages ne sont pas chauffés par des étoiles, l'hydrogène reste donc sous forme atomique.
- Les régions inter nuages, de densité très faible (0,05 à 0,2 atome par cm^3) et de température de 6 000 °K.

VI – LES DIMENSIONS DE L'UNIVERS

Si la masse de l'Univers (par mètre cube) est importante, supérieure à une valeur critique, les forces de gravitation seront importantes; ils tendent à faire rapprocher les objets massifs et l'expansion sera ralenti. L'Univers serait fini et il s'effondrerait sur lui-même en un Big Crunch, symétrique du big bang.

Si la masse de l'Univers est moins importante, inférieure à une valeur critique, les forces de gravitation seront faibles; et l'expansion se poursuivra éternellement en s'accroissant. L'Univers serait spatialement infini (fig. 8).

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 masse (une sorte de point d'équilibre entre l'expansion et la gravité) calculée de l'ordre de $5 \cdot 10^{-30}$ gramme de matière par mètre cube d'Univers en moyenne, c'est à dire 3 atomes d'hydrogène par mètre cube.

La difficulté pour trancher entre les trois hypothèses sus-citées c'est qu'on ne sait pas actuellement la masse exacte de l'Univers. La valeur observée actuellement est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-32}$ gramme de matière par mètre cube; c'est-à-dire 1/100 de la valeur critique. L'Univers serait ouvert. Cependant il est fort possible qu'une masse importante de matière pourrait se condenser dans les trous

noirs situés au centre de la plupart des galaxies. Dans ce cas la masse effective de l'Univers serait supérieur à la valeur critique (l'Univers sera donc fermé).

VII – AGE DE L'UNIVERS

L'âge de l'Univers a été estimé à 15 ± 5 *milliards d'années*. Il a été obtenu par trois méthodes indépendantes les unes des autres : le mouvement des galaxies, l'âge des plus vieilles étoiles (en examinant leurs spectres) et l'âge des plus vieux atomes (radiochronologie qui sera examinée en chapitre 5).