

Les galaxies et leur évolution

2^{ème} partie

9. Les galaxies proches - Le groupe local

Question : Que trouve-t-on au-delà de notre disque galactique et de son essaim d'amas globulaires associés ?

Réponse donnée au début du XX^{ème} siècle : L'immensité de l'espace renferme tout un tas de petites taches de lumière diffuses (appelées autrefois faussement nébuleuses) que sont d'autres galaxies. Certaines sont similaires à la nôtre.

D'un seul coup, les estimations de la taille de notre Univers ont été revues à la hausse par un facteur ~100.
Jusqu'à cette époque, on pensait que notre Galaxie occupait le centre de l'Univers et qu'elle était unique.

Avant Nicolaus Copernicus (1473-1543) : Terre au centre
du cosmos

↓ Révolution copernicienne

Modèle centré sur le Soleil

Epoque de J.C. Kapteyn (avant 1918) : Soleil au centre
de la Galaxie

↓ Travaux de Harlow Shapley (1918)

Le centre galactique ne coïncide pas avec le Soleil.

Vers 1920, H. Shapley était persuadé que les taches laiteuses décrites ci-avant (« nébuleuses ») appartenaient toutes à notre Galaxie.

↓ Travaux de E. Hubble

En 1923 : contradiction du modèle de Shapley. Conclusion dramatique de Hubble : notre Galaxie n'est pas la seule ! Il y en a beaucoup d'autres, séparées par de très grandes distances.

Quelques détails :

- L'hypothèse locale supposait qu'il s'agissait de nuages ou spirales de gaz condensant et conduisant à la formation d'étoiles. Cette idée était cohérente avec les travaux théoriques de l'astronome et mathématicien français Pierre Laplace (1749-1827). Il expliquait, entre autres, la formation du système solaire qui était due à la condensation d'une spirale de gaz. D'autre part, l'amateur londonien William Huggins montra que le spectre des nébuleuses planétaires et de la plupart des nébuleuses (non résolues, comme Orion) était celui d'un gaz et non pas d'étoiles non résolues. D'autres travaux théoriques penchaient également pour l'hypothèse locale. Par exemple, Sir James Jeans démontrait que le collapse d'un nuage de gaz présentait la forme d'un disque spiral muni de bras. Finalement, il a aussi été observé que ces nébuleuses spirales étaient distribuées plus fortement près des pôles galactiques que près de l'équateur. Ceci permettait de croire que ces nébuleuses spirales étaient propres à notre Galaxie.

- Autre hypothèse : Ces nébuleuses sont des systèmes stellaires fortement éloignés. Tout d'abord, la spectroscopie de M31 montre que le spectre est un mixage de spectres stellaires et non pas uniquement le spectre d'une nébuleuse. Peu après,

les travaux de Henrietta Leavitt sont survenus, donnant la relation période-luminosité des Céphéides.

En 1920, la « guerre » faisait rage : Harlow Shapley et Heber Curtis étaient en total désaccord, concernant l'échelle de l'Univers. H. Shapley prônait l'hypothèse locale. Il fit des mesures de la taille de la Galaxie, et, il obtint un résultat beaucoup trop grand, car il ne savait pas qu'il y avait principalement deux types de Céphéides. En 1923, E. Hubble résolvait M31 en étoiles grâce au télescope de 2.5 m du Mt. Wilson. Il en estima sa distance à 300 kpc \gg diam. de notre Galaxie. Le débat était alors clos.

9.1. Distances intergalactiques

La mesure de la distance entre notre Galaxie et une galaxie qui fera l'objet d'une étude est absolument fondamentale. Sans cette distance, il serait totalement impossible d'étudier la galaxie en question. Par exemple :

- dimensions
- masse
- luminosité

seraient parfaitement inconnues.

Le diagramme de Hertzsprung-Russel nous indique que des étoiles de même brillance apparente peuvent différer dans leur distance de plus d'un facteur 1000.

Donc, pour permettre une meilleure évaluation de la distance, il faut trouver des objets de magnitude absolue connue. Ces objets sont baptisés « chandelles standards ».

Si M et m sont connues, on en déduit la distance par la loi de Pogson.

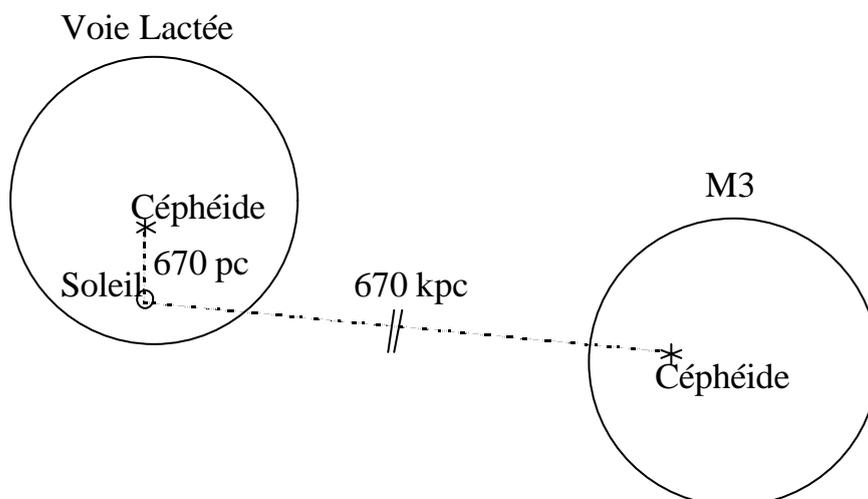
Hypothèse cruciale pour la mesure des distances intergalactiques :

On suppose que les lois de la physique restent toujours valables. → Hypothèse de l'uniformité de la nature.

(Rappelons que les lois de la nature n'ont été vérifiées que dans les laboratoires terrestres et, dans une moindre mesure, sur la Lune et lors de missions spatiales en étudiant les particules interstellaires.)

Hubble mit le doigt sur ce problème. Par l'étude des Céphéides, il conclut : « Le principe d'uniformité de la nature semble toujours valable dans ces régions très éloignées. »

Lors de la première mesure de la distance Voie Lactée - M31, E. Hubble fit une erreur de calibration des étoiles Céphéides. Distance admise aujourd'hui : 670 kpc.



9.2. Mesure de distances à l'int. et à l'ext. de la Voie Lactée

Récapitulation des systèmes de mesure de distances :

Technique	Exemple	Validité
Radar	Terre-Lune	Dist. planétaires
Parallaxe ⁽¹⁾	Etoiles proches	< 100 pc
H-R	Amas Hyades, Pléiades	< 30 kpc
RR Lyrae, Céphéides,... ⁽²⁾	Distances intergalactiques	< 10 Mpc
Novae, Supernovae	idem	< 1 Gpc
Red-Shift	idem	?

Remarque : L'erreur relative augmente en descendant dans le tableau.

⁽¹⁾ Technique qui a donné le nom à l'unité de distance utilisée en astronomie.

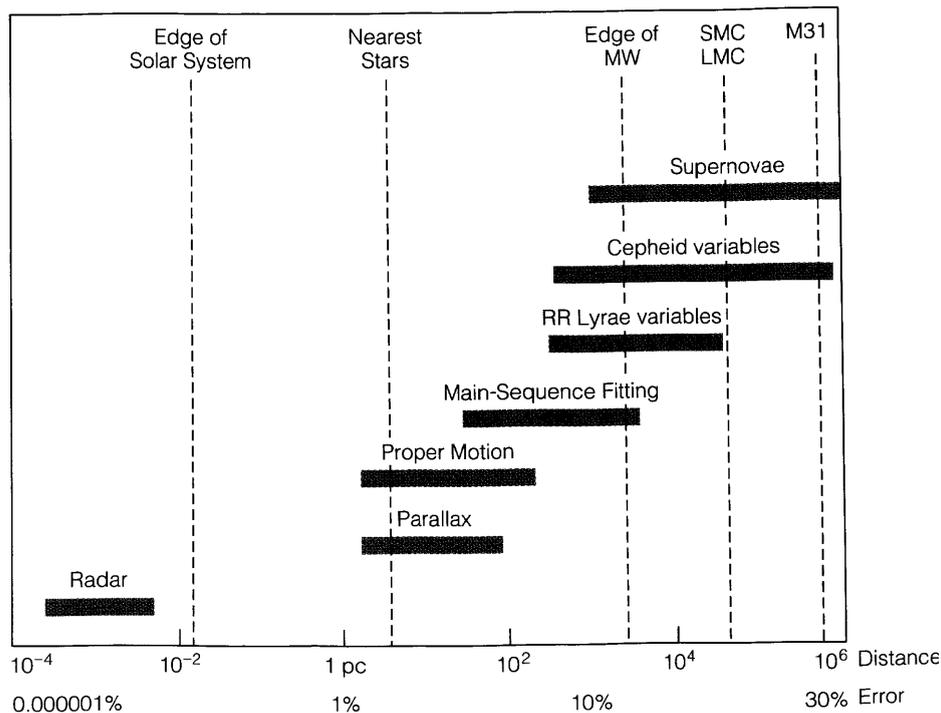
⁽²⁾ En général, les Céphéides ne sont pas détectables au-delà de 10 Mpc. La brillance des Céphéides ne dépasse pas 20000 fois celle du Soleil.

$$M = -2.5 \operatorname{Log} \left(\frac{L}{L_{\text{Soleil}}} \right) + 5 \cong -5.75$$

$$M = m + 5 \left(1 - \operatorname{Log}(d_{pc}) \right)$$

Limite : $m = 25$

$$\Rightarrow d_{pc} \approx 10^7 pc$$



9.3. Les galaxies proches

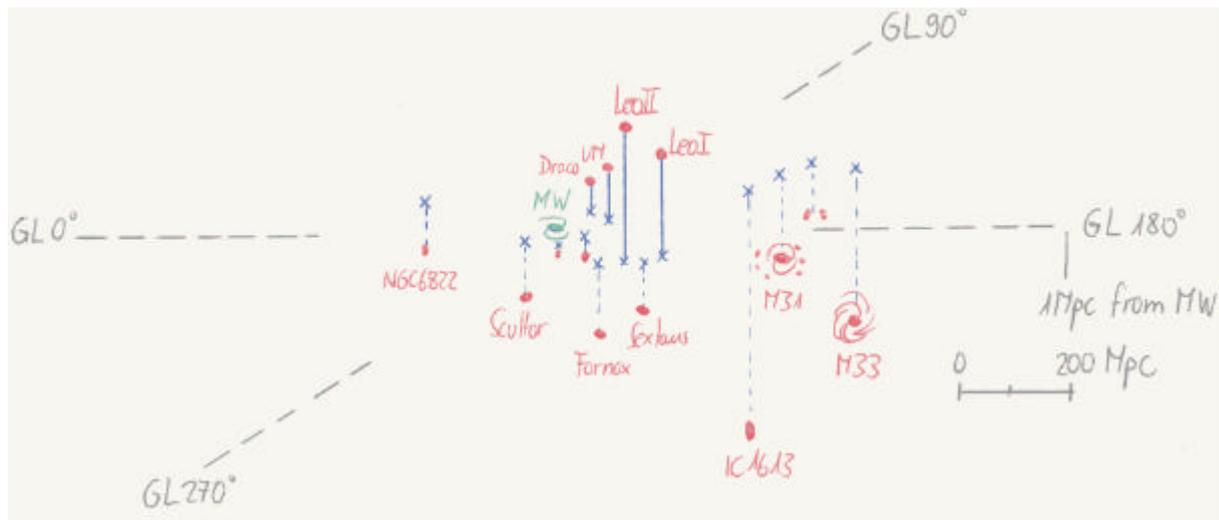
Les 2 galaxies les plus proches de la nôtre sont le Grand Nuage de Magellan et le Petit Nuage de Magellan, toutes deux proches du pôle sud céleste. Ce sont deux compagnons de la Voie Lactée qui sont supposés être des satellites. Leur distance est d'env. 50 kpc, ce qui est comparable à celle des amas globulaires les plus éloignés.

En outre, il y a au moins 8 autres compagnons nains distribués autour de notre Galaxie. (Distances comprises entre 50 et 250 kpc.)

Bien plus loin, il y a M31 (670 kpc). M31 a aussi des compagnons nains (7 connus).

Encore plus loin : M33 (770 kpc).

Dans une sphère de 1 Mpc de rayon, il y a environ 26 galaxies (naines comprises). Ceci forme ce qu'on appelle le groupe local.



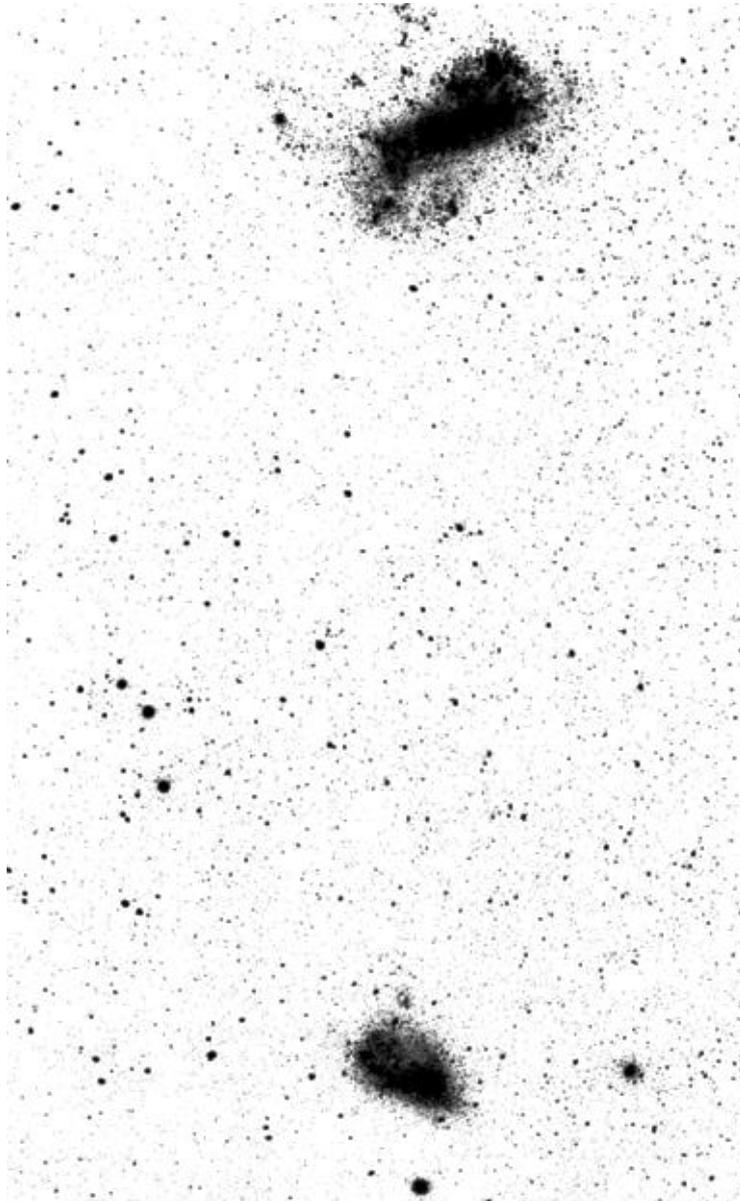
Local Group Galaxies out to 1 Mpc :

Name	Catalog Number	Type	Distance (kpc)	Diameter (kpc)	Luminosity (L_{Sun})
Milky Way		Sb	0	30	2×10^{11}
Large Mag. Cloud		Irr	50	19	3×10^9
Small Mag. Cloud		Irr	63	8	4×10^8
Draco	DDO208	Dwarf E2	90	1.8	3×10^5
Ursa Minor	DDO199	Dwarf E4	90	1.4	2×10^5
Sculptor		Dwarf E3	100	1	3×10^6
Carina		Dwarf E3	100	2	2×10^4
Sextans		Dwarf E	100	2	3×10^5
Fornax		Dwarf E3	150	0.5	4×10^6
Leo I	DDO74	Dwarf E4	180	1	1×10^6
Leo II	DDO93	Dwarf E1	180	2	7×10^5
	NGC6822	Irr	500	3.5	2×10^8
WLM	DDO221	Irr	610	0.5	-
	IC5152	Irr	610	7.3	2×10^9
Andromeda	M31 (NGC224)	Sb	670	32	3×10^{10}
	M32 (NGC221)	Dwarf E2	670	2.5	2×10^8
	NGC205	Dwarf E5	670	3.6	3×10^8
	NGC147	Dwarf E	670	3.7	1×10^8
	NGC185	Dwarf E	670	3.9	1×10^8
Andromeda I		Dwarf E	670	0.7	3×10^6
Andromeda II		Dwarf E	670	0.7	3×10^6
Andromeda III		Dwarf E	670	0.9	3×10^6
Triangulum	M33 (NGC598)	Sc	770	11	3×10^9
	IC1613	Irr	770	3.8	8×10^7
Aquarius	DDO210	Irr	920	0.4	-
Pisces	LG53		920		1×10^6

Dans le groupe local, on a 2 sous-groupes :

- Voie Lactée
- Andromède

9.3.1. Les deux Nuages de Magellan



Ils tirent leur nom de la mention qui en est faite dans les rapports de voyage du navigateur Magellan (durée : 1518-1520). Cependant, Magellan ne fut pas le premier à les décrire. Ils sont décrits déjà dans les mythologies des aborigènes australiens bien avant !

(Les deux nuages sont distants angulairement de 25° . Juste au-dessous au petit nuage, on aperçoit l'amas globulaire 47 Tucanae (NGC104) qui appartient à notre Galaxie.)

Le Grand nuage de Magellan est l'objet le plus étendu (apparemment) dans tout le ciel (plus de 50° carrés). Ces 2 galaxies « satellite » sont plus petites que la nôtre et sont de forme irrégulière. Cependant, elles montrent tout de même une structure barrée.

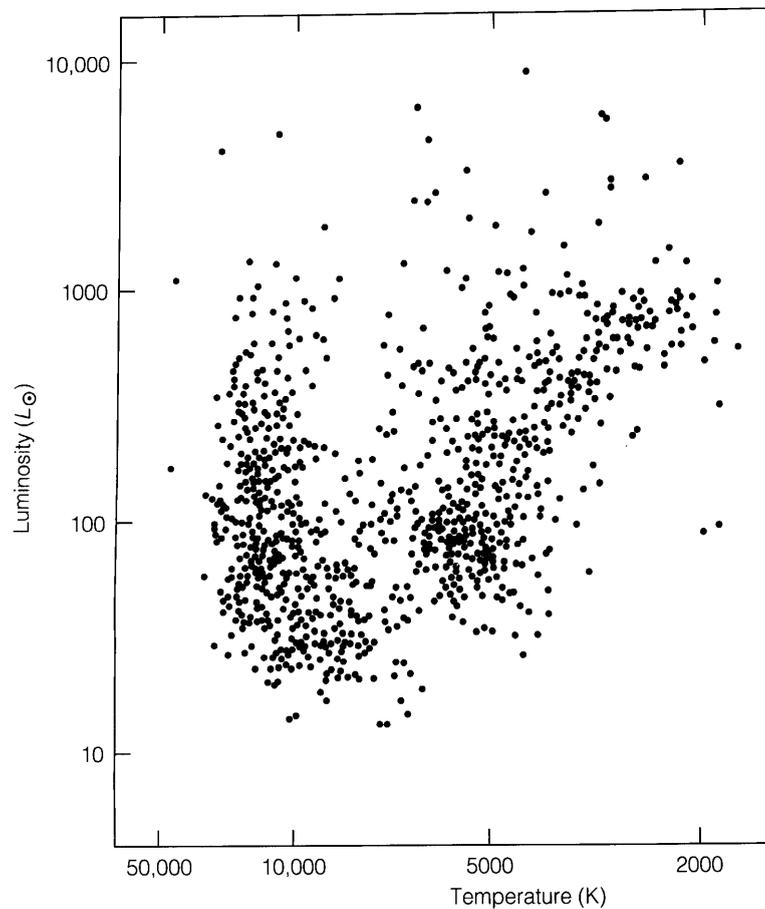
Fait impressionnant pour les amateurs de nébuleuses : Le GNM renferme, dans sa barre, une nébuleuse énorme : La nébuleuse de la Tarentule qui est visible à l'oeil nu !!!

Le GNM possède de grandes régions HII et passablement d'étoiles bleues très lumineuses (signature de la population I). Fait surprenant, aussi bien le PNM que le GNM possèdent des amas globulaires bleus ! (Les amas globulaires de notre Galaxies sont dominés par les géantes rouges.) Par conséquent, ces amas globulaires sont jeunes ($< 10^9$ années) et encore en formation.

Attention : « La spectaculaire population I représente souvent que le glaçage d'un superbe cake ! » a dit Bart Bok en 1966.

La photométrie photographique poussée a montré qu'il y avait aussi des géantes rouges et des étoiles de la séquence

principale. On le voit sur le diagramme H-R de la barre brillante du GNM :



Le gros de la formation des étoiles a débuté il y a 1 à 3 milliards d'années, mais la formation continue toujours. Il y a peu de poussière dans ces 2 galaxies, excepté dans les nébuleuses jeunes. Les étoiles de ces 2 galaxies sont en moyenne plus jeunes et plus pauvres en éléments lourds que les étoiles voisines du Soleil.

En 1983, les astronomes ont annoncé que le PNM pourrait être en fait 2 galaxies l'une derrière l'autre, séparées par 9 kpc. Ceci a été trouvé en étudiant la vitesse des étoiles qui se distribuait en 2 groupes.

Les 2 nuages de Magellan sont connectés par un « pont » HI, appelé « Magellanic Stream ». Ce « pont » a été mis en évidence par les radio-astronomes australiens, et, il pourrait être une conséquence de la rencontre des 2 nuages de Magellan avec notre Galaxie, il y a deçà 0.5 milliard d'années. (Hypothèse émise par Mathewson en 1985; il supposait également que les 2 nuages étaient des satellites de notre Galaxie !)

Fait intéressant : Une gigantesque explosion de supernova (SN1987a) a eu lieu, dans le GNM, le 23 février 1987 à 7h35 TU. (Masse du coeur $\approx 20 M_{\text{soleil}}$.)

9.3.2. Les galaxies naines

On peut constater qu'il y en a relativement beaucoup dans l'inventaire des galaxies du groupe local.

Elles sont presque toutes de type elliptique. Quelques unes sont irrégulières. Elles ressemblent quelquefois à des amas globulaires.

Les naines elliptiques sont dominées par les étoiles de la population II et elles ont peu de gaz et de poussières. Cependant, elles paraissent tout de même plus actives que les amas globulaires où l'âge des étoiles atteint 12 à 15 milliards d'années. Le diagramme HR de ces galaxies montre que la grande part des étoiles a un âge de 3 à 9 milliards d'années.

Les naines elliptiques sont les galaxies les plus courantes. En raison de leur relativement faible luminosité, elles sont assez difficilement détectables.

Diamètre moyen : 0.5 à 2 kpc

(5 à 30 fois plus faibles que M31 ou la Voie Lactée)

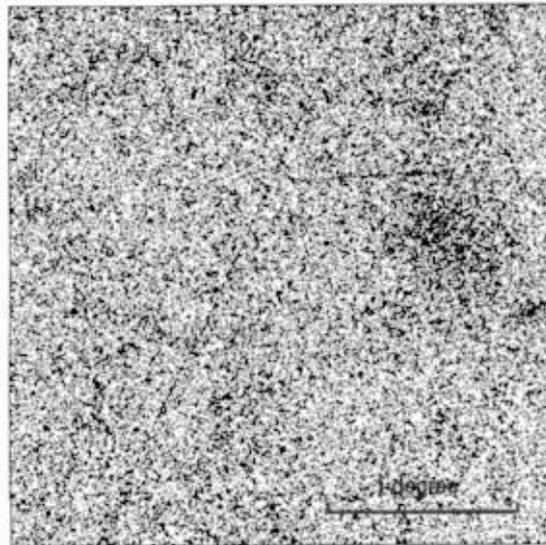
Magnitude absolue : -8 à -12

(1000 à 100000 fois moins lumineuses que M31 ou la V. L.)

M = -21 pour M31

M = -23 pour la Voie Lactée

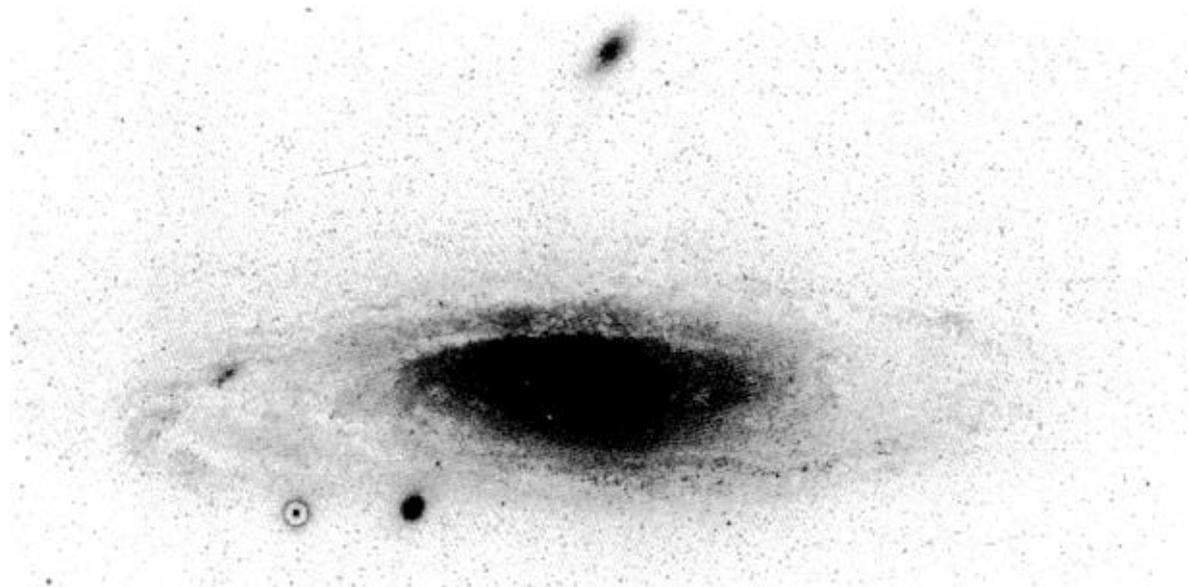
La galaxie du Sextant est virtuellement invisible sur une photographie standard, car elle est très diffuse. Il est nécessaire de digitaliser l'image et d'introduire certains algorithmes de traitement d'image :



On comprend pourquoi ce type de galaxie est difficilement détectable.

9.3.3. La galaxie d'Andromède M31

C'est une galaxie spirale comparable à la nôtre.



Cette galaxie a été cataloguée pour la première fois en 964 par l'astronome arabe Al-Sufe. Elle est légèrement plus grande que la Voie Lactée, mais légèrement moins lumineuse. Elle contient approximativement le même nombre d'étoiles.

Son diamètre est donné à 32 kpc. Sur des photographies habituelles, son diamètre est évalué entre 20 et 30 kpc. Par contre, en considérant la longueur d'onde de 21 cm de l'hydrogène, on voit que le nuage HI a un diamètre d'au moins 100 kpc.

M31 a joué un rôle primordial pour les travaux de E. Hubble. Elle a permis la découverte des 2 populations d'étoiles I et II.

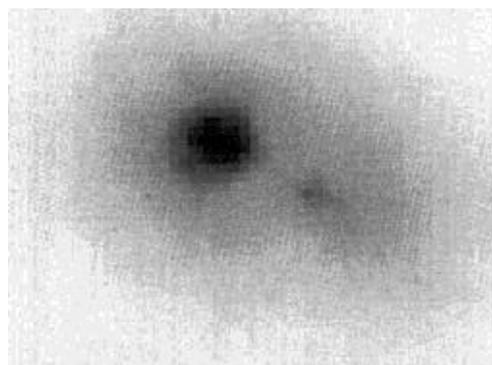
- Hubble a photographié des étoiles individuelles dans les bras, mais aucune dans le bulbe central. Ses plaques photographiques étaient particulièrement sensibles au bleu.

- Walter Baade voulait photographier le bulbe avec des plaques sensibles au rouge. Le problème est leur basse sensibilité (plus de 9h de pose nécessaires). Il n'y parvint que de 1942 à 1943, durant la 2^{ème} guerre mondiale, car le halo de lumière de Los Angeles n'était pas présent !!! Les cieux n'étaient jamais si sombres que durant cette période au Mt. Wilson, disait-il. Il vit que bulbe contenait des dizaines de milliers de géantes rouges !

Ces différentes expériences prouvaient la similarité avec notre Galaxie.

La galaxie d'Andromède nous donne une chance de pouvoir observer le noyau d'une galaxie semblable à la nôtre. Le nôtre étant invisible !

Récemment, les images de M31 prises par la caméra « Wide field and Planetary » du HST se sont révélées fort étonnantes. M31 a deux noyaux. Le noyau qu'on croyait être le noyau n'est, en fait, pas le vrai noyau !



L'explication n'est pas connue à ce jour.

10. Surveillance et classification des galaxies

Après avoir publié ses travaux, en particulier au sujet de M31, E. Hubble ne s'est pas endormi sur ses lauriers. Il a photographié une multitude de galaxies grâce au réflecteur de 2.5 m du Mt. Wilson. Il les a classées selon leur morphologie.

10.1. Système de classification de Hubble

10.1.1. Les spirales

Les différents composants d'une galaxie spirale sont : le disque, le bulbe et le halo (certaines ont un noyau ou une barre). Le disque contient des bras avec généralement tout un lot de nébuleuses à forte émission, ainsi que des poussières. La poussière forme une bande obscure lorsque la galaxie est vue par la tranche. Lorsque la galaxie est vue de face, la structure en bras est bien visible avec les étoiles bleues très lumineuses.

Approximativement 1/3 des spirales sont des spirales barrées. Les bras spiraux (généralement 2) prennent naissance aux extrémités de la barre.

Sous-classe des spirales : Sa, Sb, Sc, Sd

exemples : Sa (M104), Sb (M31, NGC4565, M51?)
 Sc (M51?, NGC253)

Sous-classe des spirales barrées : SBa, SBb, SBc, SBd

exemples : SBa (NGC4650), SBc (NGC6744)

Remarque banale :

Toutes les galaxies spirales (barrées ou non) « tournent » dans le sens contraire de l'hélicité des bras.

Autre type :

Elles ressemblent aux spirales. Mais, le bulbe central est dominant et les bras spiraux sont inexistantes ou quasi inexistantes. Elles sont classées S0. On les appelle galaxies lenticulaires en raison de leur forme.

Il est relativement facile de classer une galaxie lorsqu'elle est vue de face. Par contre, plus on la voit par la tranche, plus ça se complique. Exemple : M104 est classée Sa ou S0 ?

10.1.2. Les elliptiques

On trouve des galaxies elliptiques de toutes tailles (des galaxies naines [Fornax, diam. 0.5 kpc, type Dwarf E3] aux galaxies elliptiques géantes [M87, diam. 20 kpc, type E1]).

En général, ces galaxies ne montrent aucun bras spiral.

Classification : E0 (apparence circulaire) à
E7 (ellipse fortement allongée)

Le nombre suivant E se calcule ainsi : $n = 10 \left(1 - \frac{b}{a} \right)$

où a, respectivement b, sont le grand axe, respectivement le petit axe de l'ellipse.

10.1.3. Les galaxies irrégulières

Elles ont des formes très diverses. Certaines montrent des bras spiraux, sans toutefois présenter une symétrie. On les désigne

par Irr type I. Ces galaxies ont des régions où la formation d'étoiles y est intense. Il y a des régions très denses en étoiles de type O et B, le tout mêlé avec une forte densité en HII.

Exemples : les nuages de Magellan

Les galaxies Irr type II présentent une morphologie très chaotique, sans aucune symétrie. La plupart de ces galaxies subissent ou ont subi une collision, une fusion,...

Remarque importante : Certaines galaxies ont des formes très étranges et ne sont pas classables dans le diagramme de Hubble. Ces galaxies présentent des boucles, des queues,... On les classera cependant dans Irr type II.

10.2. Tableau des galaxies lumineuses jusqu'à 15 Mpc

Catalog Number	Type	Distance (kpc)	Diameter (kpc)	Abs. Mag (M _v)	Masse (M _{sun})
NGC55	Sc	2300	12	-20	3 x 10 ¹⁰
NGC253	Sc	2400	13	-20	1 x 10 ¹¹
M82 (NGC3034)	Irr	3000	7	-20	3 x 10 ¹⁰
M81 (NGC3031)	Sb	3200	16	-21	2 x 10 ¹¹
M83 (NGC5236)	SBc	3200	12	-21	1 x 10 ¹¹
NGC5128	E0	4400	15	-20	2 x 10 ¹¹
M101 (NGC5457)	Sc	7200	40	-21	2 x 10 ¹¹
M51 (NGC5194)	Sc	7600	9	-20	8 x 10 ¹⁰
M104 (NGC4594)	Sa	12000	24	-22	5 x 10 ¹¹
M87 (NGC4486)	E1	13000	20	-22	4 x 10 ¹²

11. Propriétés des galaxies

La distance d'une galaxie est sa propriété essentielle. Lorsque sa distance est connue, ses dimensions et sa luminosité sont directement calculables à partir de la magnitude apparente et du diamètre apparent. Cependant, le problème est que l'erreur relative sur la distance n'est pas meilleure que 30 à 50 % en

général. La couleur et la luminosité spectrale se détermine à l'aide de filtres.

Le plus intéressant et le plus difficile est l'évaluation de la masse d'une galaxie, car elle n'est pas mesurable directement.

Caractéristiques générales d'une galaxie :

	Spirals	Ellipticals	Irregulars
Mass (M_{Sun})	10^9 - 10^{12}	10^8 - 10^{13}	10^8 - 10^{11}
Luminosity (L_{Sun})	10^8 - 10^{11}	10^6 - 10^{11}	10^8 - 10^{11}
Mass-to-light ratio	2-10	5-30	1-3
Diameter (kpc)	5-50	1-200	1-10
Stellar pop.	Old halo and bulge (II) Young disk (I)	Old (II)	Young and intermediate ages (I and II)
Composite spectr. type	A(Sc) to K(Sa)	G to K	A to F
Interstellar material	Gas and dust in the disk	Small amounts of gas and dust	Copious amounts of gas, some dust
Large-scale environm.	Small groups, low-density regions	Rich clusters	Low-density regions

11.1 Taille

Apparemment, cela peut paraître extrêmement simple de trouver la taille d'une galaxie si son diamètre apparent et sa distance sont connus :

$$\text{taille [kpc]} = \text{diam. app. [rad]} \times \text{distance [kpc]}$$

Le problème est que les galaxies n'ont pas des bords bien nets et bien définis.

Méthode :

Photographie de la galaxie avec un télescope à très grande ouverture. Ainsi, la tache sur la plaque photographique sera approximativement indépendante de l'ouverture et du temps de pose si celui-ci est suffisamment long. On définit le diamètre de la galaxie correspondant aux 90 % du diamètre de la tache.

Quelques tailles :	Naines elliptiques	: qqes kpc
	Irrégulières	: qqes kpc
	Spirales	: 10 à 50 kpc
	Elliptiques géantes	: → 200 kpc

11.2. Luminosité

La luminosité est dérivée directement de la distance et de l'éclat apparent. Les problèmes sont les mêmes que pour la mesure de la taille, car la luminosité chute progressivement vers le bord !

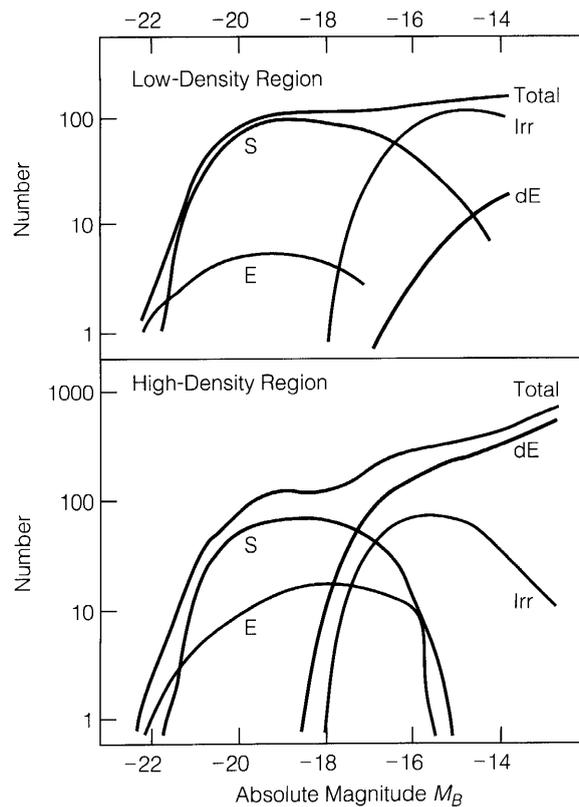
Deux méthodes :

- Télescope à large ouverture et faible focale
→ mesure du flux lumineux global
- Mesure de la luminosité de la partie centrale de la galaxie, puis introduction d'un modèle de répartition de l'éclat pour en déduire la luminosité globale

Quelques luminosités :	Naines elliptiques	: $10^6 L_{\text{soleil}}$
	Elliptiques géantes	: $10^{11} L_{\text{soleil}}$

11.3. Fonction de luminosité

Un très grand nombre de galaxies a été catalogué à ce jour. Une corrélation intéressante entre luminosité et classement de Hubble a pu être établie.



Le graphique ci-avant montre le nombre relatif de galaxies avec des luminosités et des types de Hubble différents.

Caractéristiques importantes :

- 1) *La forme de la fonction de luminosité pour les galaxies naines et les galaxies « normales » sont différentes.*
- 2) *Les spirales et les elliptiques représentent une large part de la distribution, avec une coupure de part et d'autre.*

3) Plus on regarde les galaxies faibles, plus on en trouve !

4) Les galaxies super-géantes ($10^{12} L_{\text{soleil}}$) sont extrêmement rares.

5) Les régions riches en galaxies ont relativement plus de galaxies pauvres en gaz (elliptiques et naines elliptiques) que les régions de basse densité.

11.4. La couleur

la couleur d'une galaxie donne une bonne indication sur le type d'étoiles dominant.

Rappel :

- Etoiles de la population I : jeunes, bleues, riches en éléments lourds, se trouvent dans le disque spiral.
- Etoiles de la population II : vieilles, rouges, dominées par H et He, se trouvent dans les galaxies elliptiques, dans les bulbes et halos des spirales...

Exemples :

- M83 (NGC5236), SBc, diam. 12 kpc, distance 3 Mpc
La photographie montre une dominante bleue très nette.
- M87 (NGC4486), E1, diam. 20 kpc, distance 13 Mpc
La photographie montre une dominante jaune-rouge.

11.5. Rotation

Une information supplémentaire est donnée par la mesure de la rotation d'une galaxie. Vu que la résolution en étoiles individuelles n'est possible que pour les galaxies extrêmement proches, on étudie généralement des morceaux de galaxie entiers. Les disques des galaxies spirales et S0 tournent, et, cette rotation est mesurable par effet Doppler sur les raies d'absorption des étoiles ou sur la raie à 21 cm de l'hydrogène neutre. Notons que cette mesure n'est pas possible pour une galaxie vue de face.

Il y a quelques années, on suspectait que les galaxies elliptiques devenaient spirales après un certain temps, par l'effet de la rotation. Or, il n'en est rien !

On a mesuré :

- Pour les galaxies sphériques : mouvement aléatoire isotrope des étoiles
- Pour les galaxies elliptiques : mouvement aléatoire anisotrope des étoiles
- Pour les galaxies spirales : mouvement non-aléatoire en moyenne

Commentaire :

- Pour les galaxies E0 - E7, le moment cinétique est relativement petit.
- Les galaxies spirales ont un moment cinétique ($L_{\text{Disque}} \gg L_{\text{Bulbe}} \gg L_{\text{Halo}}$) bien plus grand que les moments cinétiques des autres galaxies.

⇒ Le passage d'un type E à un type S ou SB n'est pas possible sans influence externe.

11.6. Masse

La masse est la propriété la plus difficilement mesurable pour une galaxie. Le diagramme H-R nous indique que pour une étoile de la branche principale de masse connue, sa luminosité est déterminée sans équivoque.

Caractéristique pour une galaxie : L/M .

Si une galaxie est composée uniquement d'étoiles semblables au Soleil, alors : $L/M = L_{\text{Soleil}}/M_{\text{Soleil}}$.

Mais, une galaxie est composée de plusieurs millions d'étoiles, d'âges et de masses différents. Donc, L/M dépendra de la proportion des différents types d'étoiles.

- Etoiles jeunes et chaudes de la séquence principale :

$$10 - 20 M_{\text{Soleil}}$$

$$\frac{L}{M} = 100 - 5000 \frac{L_{\text{Soleil}}}{M_{\text{Soleil}}}$$

- Etoiles vieilles de la séquence principale et naines blanches :

$$0.2 - 1 M_{\text{Soleil}}$$

$$\frac{L}{M} = 0.003 - 0.05 \frac{L_{\text{Soleil}}}{M_{\text{Soleil}}}$$

12. Détection de la matière sombre

Différentes méthodes, utilisant le mouvement des étoiles ou des gaz, permettent de déterminer la masse d'une galaxie. → Méthodes dynamiques.

Fait étonnant : 90 % de la masse est sombre.

Engendre des forces de gravitation
N'engendre pas ou peu de lumière

Ce qu'on voit ne représente qu'une faible part de la masse de l'Univers. → Problème de la masse cachée.

Exemples et méthodes de mesure de masse :

- Rapport M/L (résultat déjà 10 fois trop faible !)
- Mouvements dans la galaxie
 - profil de vitesse mesuré par effet Doppler
 - traitement par les lois de la gravitation
- Mouvements externes
 - mesure du mouvement de galaxies naines
 - traitement : idem
- Visualisation directe par la techn. de lentille gravitationnelle

Origines de la matière cachée ? Planètes, naines brunes, particules spéciales ?

Trous noirs dans les noyaux des galaxies

La plupart de la matière sombre des galaxies est distribuée à des distances de 100 à 200 kpc sous une forme analogue au halo. Cependant, certaines études ont montré que certaines galaxies présentent des noyaux anormalement lourds et anormalement peu brillants ® candidat de trou noir.

Deux techniques :

- imagerie directe à haute résolution du coeur de galaxie (ex : M32 a vraisemblablement un trou noir de $3 \times 10^6 M_{\text{soleil}}$)*
- spectroscopie pour la mesure du profil de vitesse (ex : NGC3115 (type S0) a aussi vraisemblablement un trou noir)*

13. Formation et évolution des galaxies

Toute théorie de formation et d'évolution des galaxies doit expliquer la présence des deux très différentes composantes stellaires. En plus :

Masse des disques :	10^9 à $10^{11} M_{\text{soleil}}$	2 décades
Masse des bulbes et halos :	10^5 à $10^{12} M_{\text{soleil}}$	7 décades !!!

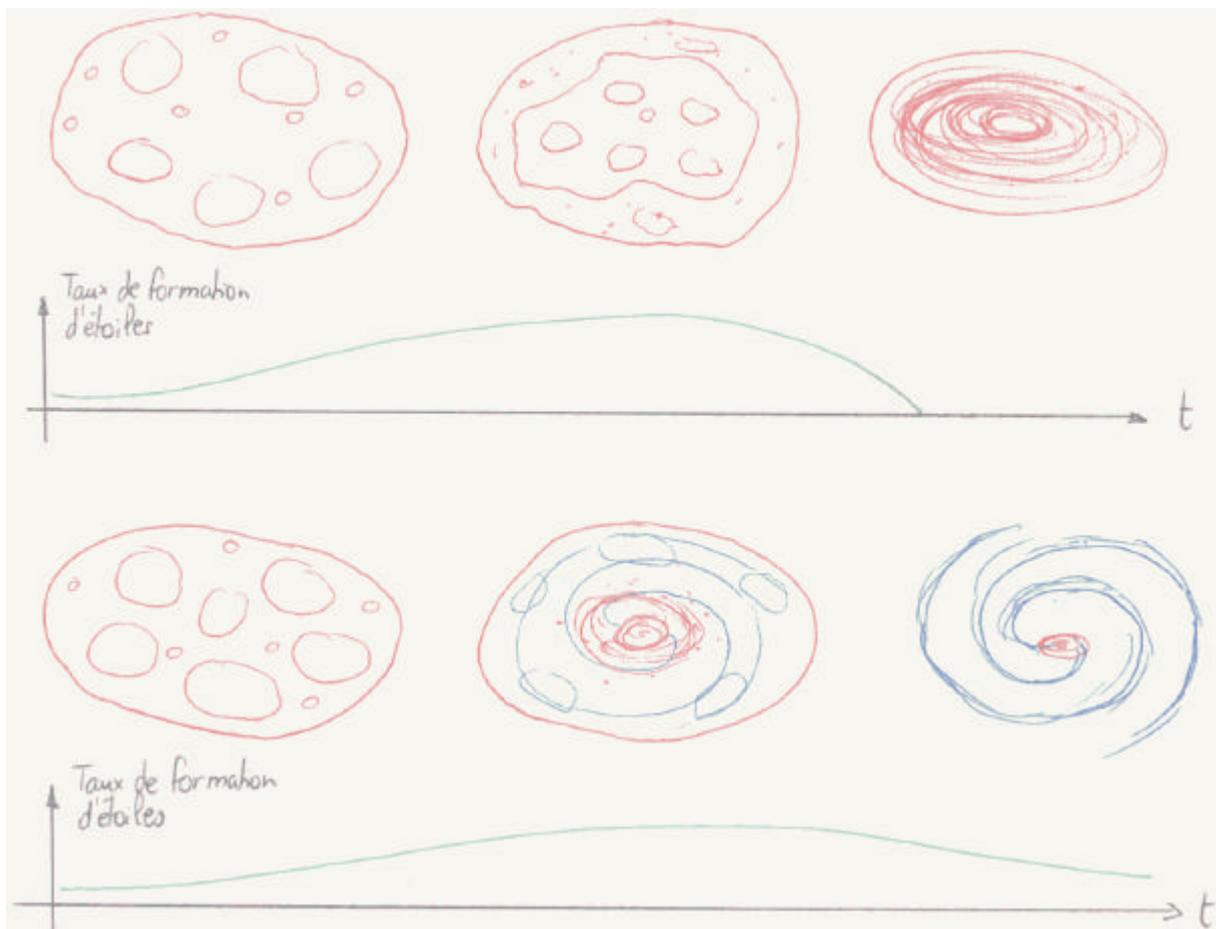
De plus, on doit expliquer aussi la matière sombre.

13.1. Formation

La formation des galaxies est « analogue » à celle des étoiles. Seule l'échelle est plus grande. Mais, on a toujours conversion de gaz en « étoiles ».

Cependant, on n'a pas de théorie complète permettant de tout expliquer.

Il y a plusieurs milliards d'années, un collapse gravitationnel d'un nuage de gaz primaire (protogalaxie) a commencé. Avant, on ne sait pas trop. La durée du collapse semble déterminante pour le type de galaxie.



Si la formation d'étoile intervient très rapidement, la galaxie va conserver sa forme plus ou moins sphérique, car les étoiles seront trop éloignées pour collisionner (galaxie elliptique).

Si le processus de collapse dure, le gaz perdra de l'énergie et formera un disque. Par conservation du moment cinétique, on

peut avoir des disques tournant apparemment assez rapidement.

La densité de la protogalaxie semble être prépondérante pour la vitesse du collapse.

14. Collisions

La Voie Lactée et M31 sont séparées par une distance de seulement 15 à 20 fois leur propre diamètre. Dans certains amas riches, la situation est encore pire.

Mouvement de galaxies dans l'espace \Rightarrow COLLISIONS

La collision des galaxies est très différente de celle des étoiles. Les étoiles dans les galaxies sont séparées par plusieurs millions de leur propre diamètre. En dépit de leurs mouvements, seule une infime part va entrer en collision.

Le premier astronome à avoir parlé de collision fut le Suédois Erik Holmberg.

Ces phénomènes sont assez rares. Jusqu'en 1980 environ, on les considérait comme de simples « bizarrerie amusantes du cosmos ». Mais, depuis 1980, les astronomes ont réalisé que ces collisions pouvaient être fondamentales dans l'évolution et la morphologie des galaxies.

Lors d'une collision :

- Peu de collisions entre étoiles

- Forte interaction au niveau des gaz (→ chaleur → excitation et ionisation) ⇒ forte émission HII et infrarouge

Lors d'une interaction :

- Effets de marée (peu conduire à la destruction de la galaxie et former d'énormes arcs)

Lors d'une fusion : (on distingue deux types)

- Galaxies de tailles similaires.

Les gaz et les poussières sont fortement comprimés, ce qui produit une forte émission IR. Forte natalité d'étoiles. Forme finale très perturbée.

- Tailles très différentes (cannibalisme galactique).

Les étoiles externes de la petite galaxie se font aspirer par la grande. Le noyau de la petite galaxie va décélérer, car l'énergie cinétique sera transmise aux étoiles de la grande galaxie. On parle de décélération dynamique. Le coeur de la petite galaxie ira s'écraser sur le noyau de la grande.

Statistique :

14 % des galaxies montrent des formes de distorsion dues soit à des collisions ou à des interactions.

70 % des galaxies émettant un fort rayonnement IR sont distordues.

Bibliographie

- Galaxies : structure and evolution, R. J. Tayler, Cambridge University Press
- Astronomy : The Cosmic Journey, Hartmann & Impey, Wadsworth ITP
- Galaxies, H. Shapley, Harvard University Press
- Galaxies and Cosmology, Combes, Boissé, Mazure et Blanchard, Springer
- Galaxien, T. Ferris, Birkhäuser