

**Zeitschrift:** Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft  
**Herausgeber:** Schweizerische Astronomische Gesellschaft  
**Band:** 57 (1999)  
**Heft:** 292

**Artikel:** L'univers, dis-moi ce que c'est? : Épisode 18 : les galaxies, troisième partie  
**Autor:** Barblan, Fabio  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-898249>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# L'Univers, dis-moi ce que c'est?

## Episode 18: Les galaxies, troisième partie

FABIO BARBLAN

### 5. La courbe de rotation d'une galaxie

La rotation des galaxies spirales fut découverte vers 1920, sur les deux objets M81 et M104, et cela avant même que ces nébuleuses aient été reconnues comme des galaxies à part entière. La courbe de rotation d'une galaxie est une courbe qui donne l'évolution de la vitesse de rotation de la matière constituant le système, en fonction de la distance au centre de rotation (figure 1). La technique qui permet la détermination de ces vitesses de rotation est celle du déplacement des raies d'absorption ou d'émission par effet Doppler. La matière qui se

déplace vers l'observateur produit des raies qui sont légèrement déplacées vers le bleu, par contre celle qui fuit l'observateur produit des raies déplacées vers le rouge (figure 2). La mesure de ce déplacement permet de déterminer la vitesse avec laquelle cette matière approche ou fuit l'observateur. La matière constituant une galaxie se trouve avant tout sous forme d'étoiles, de nuages de gaz et de poussière. Il a été déterminé que la vitesse de rotation des étoiles et du gaz, dans le disque d'une galaxie spirale, sont du même ordre de grandeur. Par contre, dans le bulbe, les gaz semblent tourner deux fois plus vite. Ce fait facilite grandement le travail puisqu'on

peut concentrer les mesures de vitesse sur les nuages de gaz qui sont équitablement distribués sur toute l'étendue du disque.

Avant 1970, la détermination des vitesses de rotation se faisait avant tout dans le domaine optique par spectrométrie à longue-fente sur les régions H II. Cette méthode ne permet d'étudier que les galaxies qui sont vues depuis la Terre, à un degré plus ou moins prononcé, de «face». A partir des années 70, la radioastronomie a épaulé avec efficacité

Fig. 3. Les courbes blanches continues sont les courbes d'isovitesses de la galaxie M81, obtenues par interférométrie avec l'instrument de Westerbork, sur des nuages de gaz d'hydrogène neutre (H I). Les courbes sont placées en superposition sur une cartographie de la densité des nuages H I. Les lignes constituées par des symboles sont des lignes d'isovitesses calculées à l'aide de modèles théoriques (source [1]).

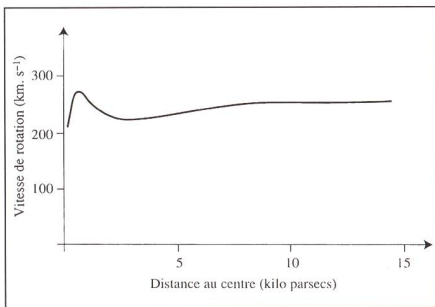
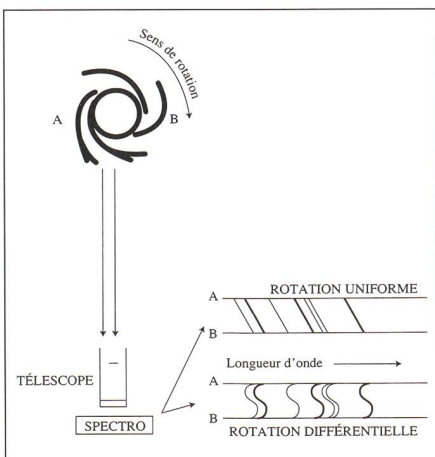
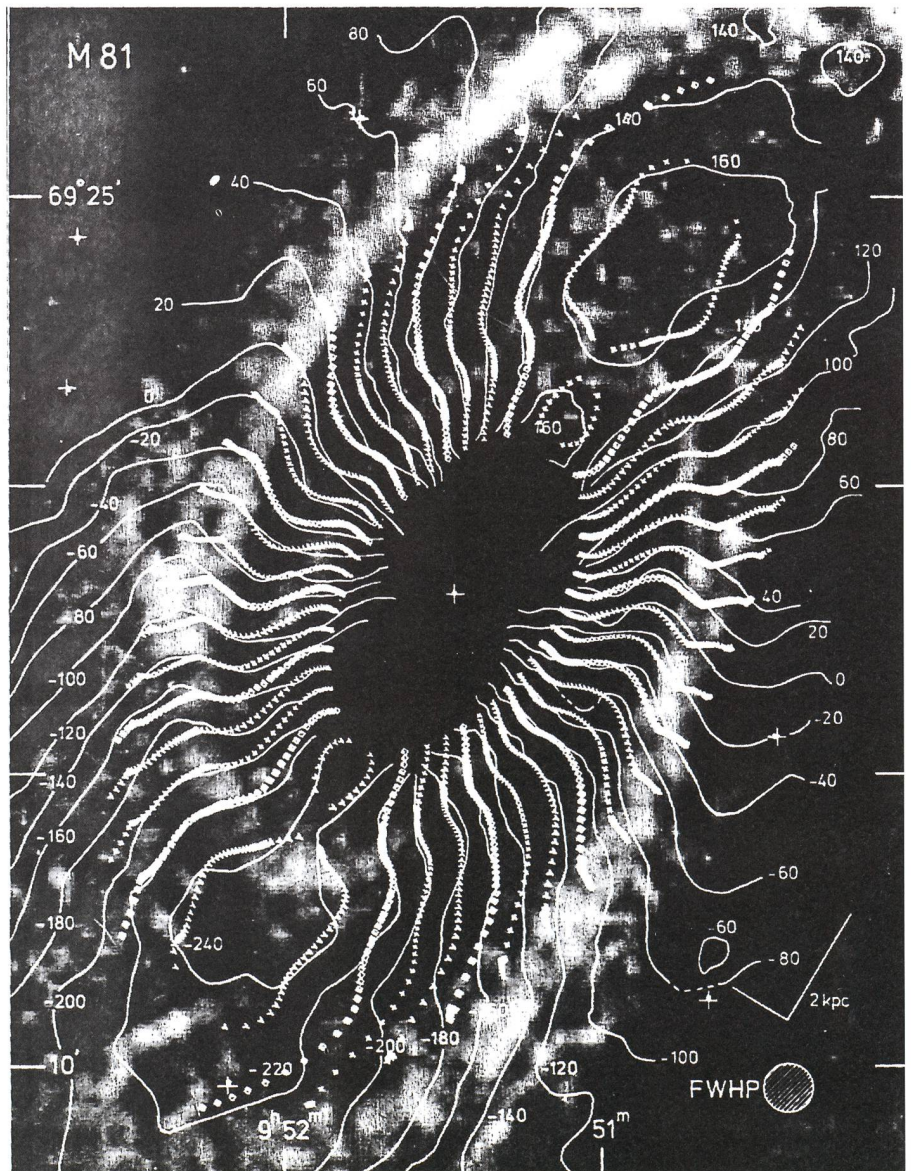


Fig. 1. Courbe de rotation de la Galaxie (source [2])

Fig. 2. Ce schéma illustre le principe du déplacement des raies spectrales par effet Doppler. La rotation uniforme est valable pour les galaxies elliptiques, par contre la rotation différentielle s'applique aux galaxies spirales (source [2]).



<sup>1</sup> La fente du spectromètre coïncide avec l'étendue longitudinale du disque de la galaxie.





les investigations optiques, dans un premier temps, en pratiquant de l'interférométrie sur la raie de 21 cm de l'hydrogène neutre avec l'instrument de Westerbork (figure 3) et plus tard, dans les années 80, avec l'utilisation du VLA (Very Large Array). Le nombre de galaxies mesurées a considérablement augmenté en quelques années, permettant ainsi de constater que les courbes de rotation suivaient uniformément et invariablement le même schéma quelle que soit la galaxie concernée:

- une montée rapide des vitesses de rotation, jusqu'à une valeur maximale, à l'intérieur d'un intervalle de distances allant de 0 à environ 5 kpc,
- à partir de la vitesse maximale, un plateau avec une «horizontalité» plus ou moins agitée jusqu'aux limites des

mesures possibles, c'est-à-dire lorsque la luminosité de surface devient plus petite que 25 magnitudes par seconde au carré (figure 4).

La radioastronomie par les mesures sur la raie de 21 cm de l'hydrogène neutre H I a montré que ce plateau se prolonge loin au-delà des limites visibles d'une galaxie.

On a remarqué que la vitesse maximale de rotation est fonction de la luminosité de la galaxie. Cette dépendance est exprimée dans la relation de Tully - Fischer qui affirme que la luminosité  $L$  d'une galaxie est proportionnelle à la quatrième puissance de la vitesse maximale. On a aussi mis en évidence une dépendance du type de galaxie, puisque, à luminosité égale, la vitesse maximale décroît en passant d'une galaxie de type Sa à une galaxie de type Sc (figure 5).

La découverte de l'existence de ce plateau, qui s'étend aussi loin que l'on peut mesurer, a provoqué un terrible choc dans la communauté astronomique et a posé ce qui reste encore maintenant une des grandes énigmes de l'astrophysique. En effet l'attente était toute autre (figure 6). Si la totalité de la masse d'une galaxie correspond à ce que l'on voit et si, en fonction de la répartition de la luminosité, on peut raisonnablement faire l'hypothèse que la majorité de la masse est concentrée dans la partie centrale, alors on pouvait s'attendre qu'à partir d'une certaine limite la courbe de rotation décroisse comme l'inverse de la racine de la distance. Cette situation est par exemple parfaitement respectée dans le système solaire (figure 7).

Il a fallu se rendre à l'évidence, il y a dans une galaxie beaucoup plus de matière que celle qui est «optiquement» visible. Depuis, la matière noire ou invisible représente une des préoccupations majeures des astronomes. En effet, des estimations permettent d'affirmer qu'elle représente les neuf dixièmes de la masse totale de l'univers.

Fig. 4. Quelques exemples de courbes de rotation. Elles montrent les deux caractéristiques principales de ces courbes: une montée rapide des vitesses de rotation jusqu'à une valeur maximale ensuite un «plateau» plus ou moins horizontal, indiquant la persistance d'une vitesse de rotation constante (source [1]).

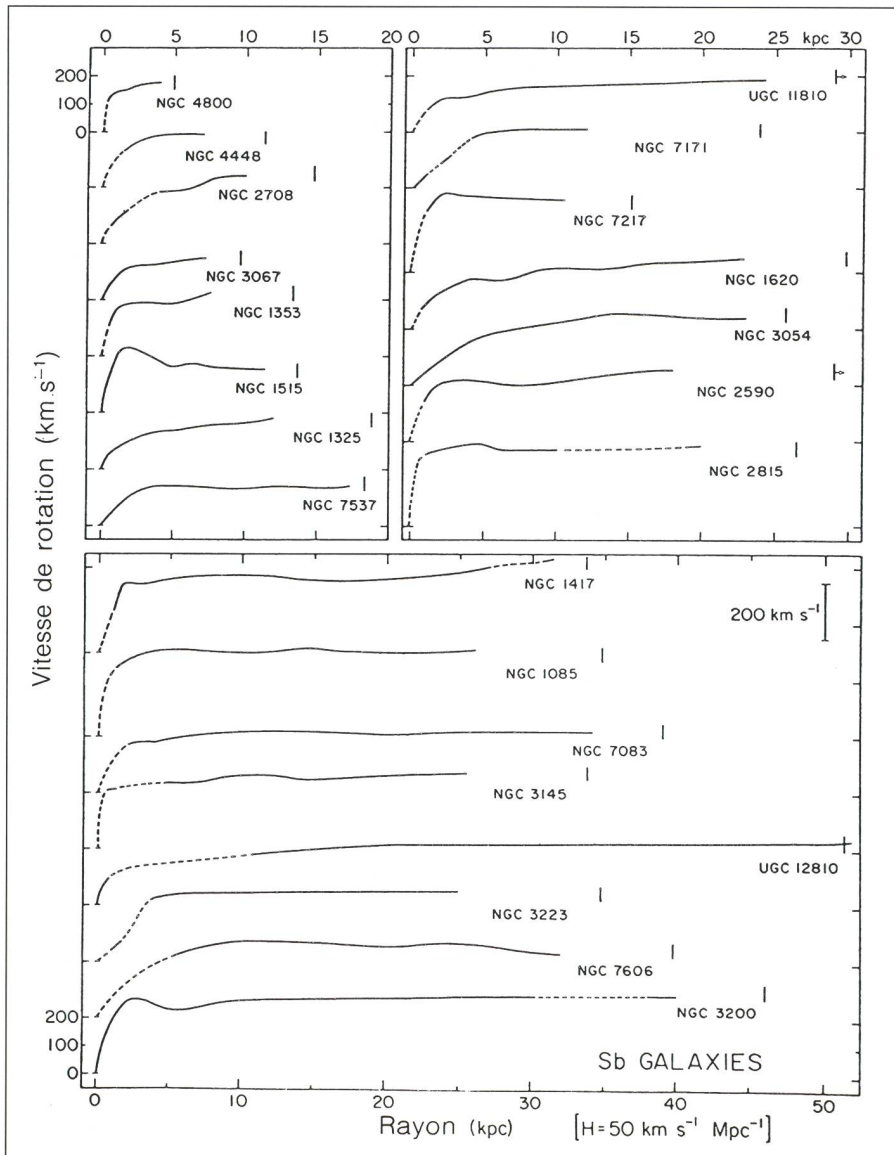
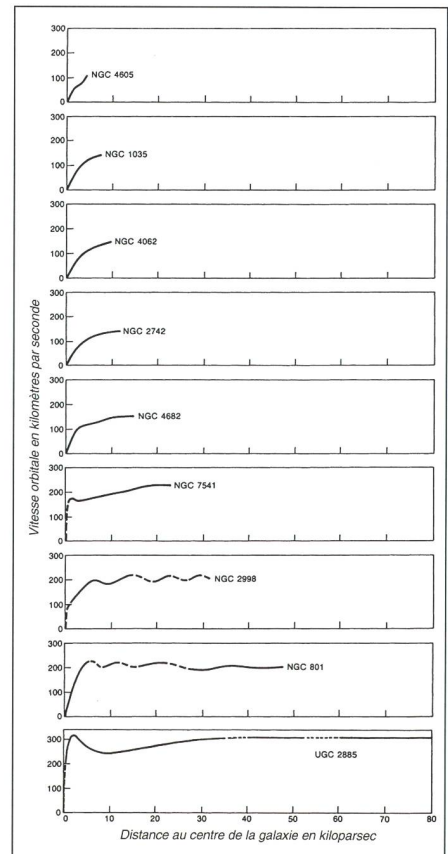


Fig. 5. Courbes de rotations pour différentes galaxies de type Sc de luminosité croissante de haut en bas (source [3]).





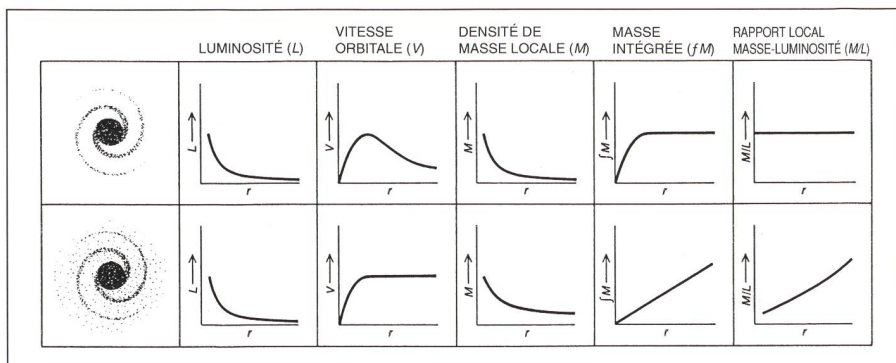


Fig. 6. Dans ce schéma la première ligne correspond aux données que l'on obtiendrait si une galaxie était effectivement limitée à ce que l'on voit optiquement. La deuxième ligne indique ce que l'on observe réellement. Il n'y a que la décroissance de la luminosité qui est la même dans les deux cas (source [3]).

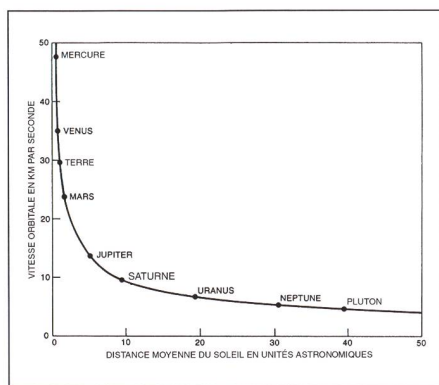


Fig. 7. La décroissance des vitesses de rotation comme l'inverse de la racine de la distance est parfaitement valable pour notre système planétaire. Cette situation découle du fait que la majorité de la masse du système est concentrée dans le Soleil (source [3]).

### 6. La masse noire ou invisible

Dès le début, cette matière invisible (dont l'existence a été confirmée entre autre par la dynamique des amas galactiques) a soulevé de multiples hypothèses quant à sa nature. Beaucoup de prétendants ont été proposés pour jouer ce rôle mais pour le moment tout reste ouvert. Il faut être conscient que cette matière noire échappe, actuellement, à toute détection; le problème est donc double: avoir une idée précise de sa nature et ensuite élaborer le moyen de la détecter. Il y a en fait deux tendances diamétralement opposées concernant les prétendants possibles pour cette matière «manquante». Certains astrophysiciens pensent qu'il faut chercher du côté des particules subatomiques comme les neutrinos, les axions ou les WIMP's (WIMP: weakly interacting massive particles); par contre d'autres pensent qu'il s'agit plutôt de corps massifs comme les naines brunes, les naines rouges, les corps de type planétaire, les pulsars, les trous noirs ou les nuages moléculaires.

En ce qui concerne le neutrino (particule étrange «inventée» par W. Pauli en 1930 pour résoudre un problème lié à la radioactivité) le problème majeur, qui intéresse tout autant physiciens et astrophysiciens, consiste à obtenir une preuve expérimentale qu'il possède effectivement une masse. Il semble qu'actuellement, selon les dernières expériences, on puisse lui attribuer une faible masse, mais cette valeur reste insuffisante pour qu'elle puisse contribuer largement à la masse noire. On est donc sur le chemin de perdre un prétendant possible dans lequel on avait pendant longtemps placé beaucoup d'espoir. Quant aux axions et particules massives à interaction faible (WIMP) cela reste pour le moment des objets «théoriques» n'ayant aucune réalité expérimentale.

Les expériences MACHOS et EROS ont de leur côté, semble-t-il, apporté une réponse en rapport avec la recherche de corps massifs comme les naines rouges et brunes et les planètes. L'évaluation statistique du nombre d'objets dans ces différentes populations indique qu'ils ne peuvent représenter qu'une infime partie de la masse invisible. Mais, par contre, beaucoup des corps «invisibles» détectés par ces deux expériences ont une masse correspondant à environ la moitié de celle du Soleil, en fait exactement la masse attendue pour une naine blanche (voir ORION 282, Univers, épisode 11). Lorsqu'une naine blanche se constitue, comme dernière étape de l'évolution d'une étoile peu massive, elle devient un objet à l'intérieur duquel les réactions nucléaires ont cessé. Elle va donc progressivement se refroidir et rougir. La chasse aux vieilles naines blanches n'a permis de détecter que celles ayant au maximum un âge de 9 à 10 milliards d'années. Toute tentative pour trouver des étoiles plus anciennes a échoué. Un astrophysicien de l'université de Toronto, Brad Hansen, vient tout récemment, de donner l'explication pro-

bable de ce mystère. Lorsque la température de surface de la naine blanche atteint environ 3000°K elle change de couleur: elle passe du rouge au bleu. A cette température, les molécules d'hydrogène absorberaient en effet la grande majorité du rayonnement rouge. Et d'après Brad Hansen, l'étoile deviendrait, avec le temps, de plus en plus bleue et maintiendrait un éclat pratiquement constant. La chasse aux vieilles naines blanches se transforme donc en une chasse aux vieilles naines bleues. L'avenir nous dira si l'hypothèse de Hansen est fondée et si les naines bleues représentent effectivement la solution pour la masse invisible. Si cela était le cas, il faudrait en détecter plusieurs centaines de milliards seulement pour notre propre galaxie. Or, il ne sera possible de détecter que celles qui se trouvent dans l'immédiat voisinage du Soleil. Selon le nombre que l'on trouvera, l'extrapolation statistique donnera la réponse par rapport à la masse invisible.

Une autre piste, poursuivie entre autres par des chercheurs de l'Observatoire de Genève, est celle des nuages moléculaires. Avant 1970, bien peu de molécules avaient été détectées dans l'espace par des moyens optiques; c'était avant tout du CN, du CH et du CH<sup>+</sup>. Personne ne pouvait imaginer le déluge de découvertes faites pendant les années 70 à l'aide de l'astronomie millimétrique et de la radio-astronomie (figure 8). La découverte de nuages moléculaires géants pouvant atteindre le

Fig. 8. Types de molécules détectées dans l'espace interstellaire (source [4]).

<b>Oxydes, Sulfides et molécules associées:</b>			
H <sub>2</sub>	CO	NH <sub>3</sub>	CS
HCl	SiO	SiH <sub>4</sub>	SiS
	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	OCS
	SO <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> S
	CC		HNO
<b>Dérivés de l'acétylène et molécules associées:</b>			
HCN	HC≡C—CN	H <sub>2</sub> C=C=C—CN	H <sub>2</sub> C—CH <sub>2</sub> —CN
H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> N	H(C≡C) <sub>2</sub> —CN	H <sub>2</sub> C=C—CH	H <sub>2</sub> C—CH—CN
CCCO	H(C≡C) <sub>2</sub> —CN	H <sub>2</sub> C—(C≡C) <sub>2</sub> —H	HN=C
HC≡CH	H(C≡C) <sub>2</sub> —CN	H <sub>2</sub> C—(C≡C) <sub>2</sub> —CN	HN—C—O
H <sub>2</sub> C—CH <sub>2</sub>	H(C≡C) <sub>2</sub> —CN		HN—C—S
<b>Aldéhydes, alcools, éthers, etc.:</b>			
H <sub>2</sub> C—O	H <sub>2</sub> COH	HO—CH—O	H <sub>2</sub> CNH
H <sub>2</sub> C—S	H <sub>2</sub> CCH <sub>2</sub> OH	H <sub>2</sub> C—O—CH—O	H <sub>2</sub> CNH <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> C—CH—O	H <sub>2</sub> C—SH	H <sub>2</sub> C—O—CH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> CNCN
NH <sub>2</sub> —CH—O		H <sub>2</sub> C=C—O	
<b>Molécules cycliques:</b>		<b>Ions:</b>	
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		CH <sup>+</sup>	HCS <sup>+</sup>
SiC <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> D <sup>+</sup>	HCNH <sup>+</sup>
		HN <sub>2</sub> <sup>+</sup>	SO <sup>+</sup>
		HOCO <sup>+</sup>	HOC <sup>+</sup>
			HCO <sup>+</sup>
<b>Radicaux:</b>			
CH	C <sub>2</sub> H	CN	HCO
OH	C <sub>2</sub> H	C <sub>2</sub> N	NO
	C <sub>2</sub> H	NS	SO
	C <sub>2</sub> H		

2 Les expériences MACHOS de EROS avaient pour but de détecter des corps massifs «invisibles» par l'effet de microlentille gravitationnelle.

3 Evidemment sans tenir compte de l'éventuel trou noir pouvant exister au centre d'une galaxie.



million de masses solaires (c'est les objets les plus massifs existant dans une galaxie) a été une révélation surprenante (figure 9). La majorité de ces nuages moléculaires semble être concentrée dans le disque galactique, mais rien ne permet d'exclure qu'ils puissent aussi exister dans le halo (voir paragraphe 7) en nombre suffisant pour contribuer d'une façon non négligeable à la masse noire.

### 7. La structure globale et la masse totale d'une galaxie

Revenons aux galaxies. La matière visible ne représente donc approximativement qu'un dixième de la masse totale. Comment la matière invisible est-elle distribuée? Les courbes de rotation ne permettent pas de décider si la matière noire est distribuée sous forme de halo sphérique ou sous forme de disque. La conviction actuelle des astronomes est celle de dire qu'il existe autour d'une galaxie un halo sphérique massif de matière invisible dont la densité décroît selon le carré de la distance. Cette conviction est fondée sur les connaissances et sur les hypothèses qui sont à la base des théories sur la formation et l'évolution des galaxies. Le halo pouvant s'étendre jusqu'à une centaine de fois les dimensions visibles d'une galaxie.

Il a été montré (Ostiker et Peebles) qu'un halo sphérique est nécessaire pour une stabilisation dynamique du disque galactique. Si on place toute la matière invisible dans un disque, au lieu de la répartir dans un halo sphérique, ce disque devient vite instable et se transforme progressivement en une barre. D'autres indices comme le gauchissement du plan galactique (figure 10) parlent aussi en faveur de l'existence d'un halo. Il est donc très difficile de donner la «bonne» valeur de la masse d'une galaxie. L'incertitude sur ses dimensions réelles, sur le halo et sur la quantité réelle de matière noire ne permettent que de donner une estimation. On a, par contre,

Fig. 10. Modèle de gauchissement du plan galactique pour la galaxie M83 (source [1]).

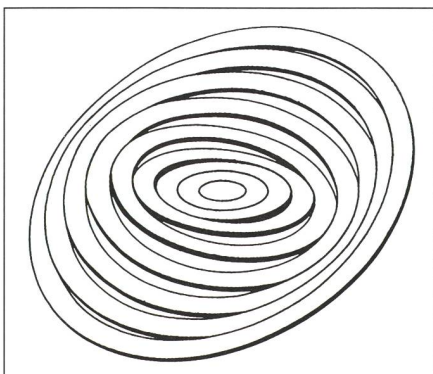


Fig. 9. Nuages moléculaires dans la région de la constellation d'Orion. L'image a été obtenue en traçant la molécule CO dans la longueur d'onde de 2.6 mm (source [4]).



acquis la certitude que la distribution des masses des galaxies ne suit pas une courbe gaussienne. La découverte des galaxies elliptiques naines à faible masse (quelques millions de masses solaires seulement) fait penser que ces objets sont probablement très fréquents et qu'ils concentrent une fraction importante de la masse totale de l'Univers. On adopte actuellement les valeurs de référence suivantes pour les masses des différents types de galaxies:

- Elliptique géante*  
10<sup>13</sup> masses solaires,
- Grandes spirales*  
3 10<sup>11</sup> masses solaires,
- Petites spirales et irrégulières*  
10<sup>10</sup> masses solaires,
- Elliptiques naines*  
10<sup>6</sup> masses solaires.

Pour obtenir ces estimations, les astronomes ont élaboré trois méthodes différentes de détermination de la masse d'une galaxie:

- a) par des moyens statistiques en utilisant les vitesses de couples de galaxies,
- b) par la dispersion des vitesses stellaires déduites des profils des raies spectrales, pour des galaxies individuelles de type E et S0,
- c) par le comportement des vitesses radiales pour des galaxies individuelles, plates, spirales ou irrégulières, ayant une rotation suffisamment rapide.

La description approfondie de ces trois méthodes dépasse largement le cadre d'une telle présentation, nous nous contentons donc de les citer.

<sup>4</sup> Ces galaxies naines sont extrêmement difficiles à détecter parce qu'on les distingue très difficilement des amas d'étoiles de champ.

En combinant la relation de Tully – Fischer et le théorème de Viriel, on peut montrer que la masse d'une galaxie est proportionnelle au carré de son rayon (R), si on admet que pour les galaxies elliptiques, la distribution des masses varie en 1/R (ce qui est approximativement correct pour la partie centrale) et que pour les galaxies spirales la densité de surface reste constante ce qui est vrai aussi. En effet, on constate que quelle que soit la galaxie, la brillance de surface est d'environ 21.63 B-mag/arcsec<sup>2</sup>. Cette «universalité» laisse perplexe, mais on constate que des lois semblables régissent les nuages moléculaires et les nuages de gaz plongés dans un milieu de pression constante à la limite de l'instabilité gravitationnelle. Ces propriétés jouent un rôle fondamental dans toutes les théories de formation et d'évolution des galaxies.

Dans le prochain épisode, nous parlerons plus spécifiquement des galaxies spirales et du problème de formation de la barre.

FABIO BARBLAN

17. route de Vireloup  
Ch-1293 Bellevue/GE

### Bibliographie

- [1] F. COMBES, P. BOISSÉ, A. MAZURE, A. BLANCHARD, *Astrophysique Galaxies et Cosmologie*, InterEditions, 1991
- [2] D. PROUST, CH. VANDERRIEST, *Les Galaxies et la structure de l'Univers*, Editions de Seuil, collection Point Bleu, 1997
- [3] V. C. RUBIN, *Dark Matter in Spiral Galaxies*, Readings from Scientific American, W.H. Freeman and Company, 1984
- [4] G. WYNN-WILLIAMS, *The Fullness of Space*, Cambridge University Press, 1992