

SAVOIRS

ASTROPHYSIQUE

ACTUELS

# LA VOIE LACTÉE



JAMES LEQUEUX,  
FRANÇOISE COMBES

edp sciences

CNRS ÉDITIONS

James Lequeux et Françoise Combes  
Astronomes à l'Observatoire de Paris

# La Voie lactée

S A V O I R S    A C T U E L S

---

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

*Illustration de couverture* : Photographie de l'ensemble de la Voie lactée, centrée sur la direction du Centre galactique dans la constellation du Sagittaire. Une bande de poussières interstellaires très irrégulière paraît séparer en deux la Voie lactée. On voit en bas à droite du centre les deux Nuages de Magellan, galaxies satellites de la nôtre. Les étoiles brillantes que l'on observe loin de la Voie lactée sont proches de nous et appartiennent à la Voie lactée, comme toutes les étoiles visibles à l'œil nu. © *ESO-Serge Brunier*.

Imprimé en France.

© 2013, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

et

**CNRS ÉDITIONS**, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

**ISBN** EDP Sciences 978-2-7598-0817-5

**ISBN** CNRS ÉDITIONS 978-2-271-07737-0

# Préface

Mais quelle est donc cette bande lumineuse qui traverse le ciel ? Même si Démocrite pensait déjà, au <sup>v</sup><sup>e</sup> siècle avant JC, que la Voie lactée était « formée d’astres tout petits et groupés si étroitement qu’ils nous paraissent ne faire qu’un » (Achille Tatius, cité par Jean Salem, dans « Démocrite »), il a fallu attendre Galilée et sa lunette astronomique pour confirmer cette idée audacieuse. Par la suite, l’obstacle majeur à une interprétation des observations, même de très bonne qualité, afin de préciser la taille de notre Galaxie et la position du Soleil en son sein, restait la mauvaise détermination des distances. Ce n’est que dans les années 1930 qu’une représentation correcte de la Galaxie était obtenue, montrant que notre Voie lactée était une galaxie parmi d’autres, de rayon environ 15 kpc (45 000 années-lumière) pour sa composante stellaire, environ 20 kpc pour sa composante gazeuse, et que le Soleil était bien loin d’être en son centre.

Ces deux dernières décennies, de nouveaux moyens d’observation et de calcul ont ouvert de nouveaux horizons : avènement de l’astrométrie spatiale avec le satellite Hipparcos de l’Agence Spatiale Européenne (ESA) qui, grâce à ses mesures astrométriques de grande précision pour plus de 100 000 étoiles brillantes (dont des distances très précises pour 30 000 étoiles), a apporté une connaissance approfondie du voisinage solaire et une révision des échelles de distances ; des observations photométriques systématiques sur de grandes surfaces du ciel telles que le Sloan Digital Sky Survey (SDSS) qui ont permis la découverte de courants d’étoiles dans le halo ; des observations spectroscopiques à haute résolution avec de gros télescopes qui ont entraîné de grands progrès dans la compréhension de l’évolution chimique de la Galaxie ; l’observation en ondes millimétriques et sub-millimétriques et la découverte de nombreuses molécules dans le milieu interstellaire ; et enfin des ordinateurs de plus en plus puissants permettant des simulations de plus en plus détaillées de la formation et de l’évolution dynamique des galaxies.

La décennie à venir est, de nouveau, pleine de promesses par la mise en service de télescopes et radiotélescopes beaucoup plus sensibles et/ou beaucoup plus précis que leurs prédécesseurs.

Dans le domaine optique, en 2013, Gaia, successeur d’Hipparcos à l’ESA et deuxième satellite astrométrique jamais lancé, va permettre un pas en avant fantastique dans la connaissance de toutes les composantes stellaires de notre

Voie lactée avec le recensement et la mesure systématique d'un milliard d'objets plus brillants que la magnitude 20, avec une précision astrométrique encore 50 à 100 fois plus grande que celle d'Hipparcos et l'observation parallèle de leurs caractéristiques physiques. Dans le domaine optique encore, mais prévu pour le début des années 2020, l'E-ELT (European Extremely Large Telescope) observera en très grand détail des objets très faibles de notre Galaxie, et bien au-delà.

Dans le domaine infrarouge, sub-millimétrique et millimétrique, des informations essentielles sont obtenues sur la formation des étoiles. Après les résultats spectaculaires du satellite européen Herschel, qui devrait achever sa mission en 2013, c'est ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), le réseau mondial observant dans le millimétrique, qui sera complètement opérationnel, puis le JWST (James Webb Space Telescope) qui devrait être lancé en 2018, avec le plus grand télescope jamais mis en orbite, 6,5 m de diamètre, observant dans le proche infrarouge.

Enfin, dans le domaine radio, domaine privilégié de l'étude du milieu interstellaire et en particulier du gaz, la mise en service de SKA (Square Kilometer Array) est espérée dans les années 2020.

Nouvel âge d'or pour l'astronomie, en particulier pour l'étude de notre Voie lactée et des galaxies proches, cette prochaine décennie promet donc d'être riche en surprises et découvertes, et ce livre arrive précisément au bon moment pour faire le point sur nos connaissances avant ces nouvelles étapes.

Avec les précisions atteintes par l'astrométrie spatiale, cette très ancienne spécialité est maintenant un outil aussi indispensable à l'astronomie que l'astrophysique (au sens de l'analyse physique des sources observées). Elle apporte les échelles de distance aussi bien des composantes stellaires que gazeuses, ainsi que les mouvements des étoiles, dans le voisinage solaire et bientôt, grâce à Gaia, dans l'ensemble de la Voie lactée et jusqu'aux galaxies voisines. Ces observations donnent ainsi accès non seulement à la structure de la Galaxie et de ses différentes composantes, mais aussi à la cinématique et à la dynamique de celles-ci, permettant le calcul des orbites décrites par les étoiles dans la Galaxie. De nombreuses corrélations peuvent ainsi être cherchées – et trouvées – entre les caractéristiques des orbites, par l'exemple l'excentricité, les vitesses moyennes et dispersions de vitesse de groupes d'étoiles soigneusement sélectionnées, et les abondances des éléments chimiques présents dans leurs atmosphères. Seule l'étude combinée de ces différents paramètres permet de relier entre eux les différents témoignages laissés par les étapes successives de la formation et de l'évolution de notre Galaxie. C'est par l'assemblage de ces différentes parties du puzzle, par la comparaison avec les caractéristiques de galaxies extérieures, et par l'interprétation grâce à des modélisations numériques de plus en plus détaillées, que les astronomes progressent dans la compréhension de notre Voie lactée. Réciproquement, la Voie lactée est, bien sûr, la Galaxie que nous pouvons étudier dans le plus grand détail (distances et mouvements très précis, observation détaillée des régions de formation d'étoiles,

détermination des orbites d'étoiles très proches du trou noir central, pour ne citer que ces exemples) ce qui apporte un éclairage essentiel à l'interprétation des observations beaucoup plus globales effectuées sur d'autres galaxies.

Le livre de Françoise Combes et James Lequeux nous emmène pas à pas dans ce domaine en pleine évolution, avec une description passionnante de l'état actuel de nos connaissances. Les deux auteurs, spécialistes reconnus internationalement de la dynamique des galaxies et du milieu interstellaire, ont l'un et l'autre une très vaste culture en astronomie et une parfaite clarté de présentation. Ils sont déjà les auteurs de nombreux ouvrages d'astronomie à destination du spécialiste comme du grand public. Ce livre, appelé à devenir une référence dans le domaine, est une initiation remarquable à la description de cet ensemble d'étoiles, de gaz et de poussières dans lequel nous vivons : Françoise Combes et James Lequeux nous exposent ici ces sujets complexes sous une forme concise mais très pédagogique, simple mais complète et rigoureuse. Étudiant, spécialiste ou simplement curieux, ce livre incitera le lecteur à approfondir encore ses connaissances et en poussera certains, j'en suis sûre, à se lancer dans l'aventure de la recherche et de l'interprétation des masses de données attendues des futurs instruments du XXI<sup>e</sup> siècle.

Catherine TURON  
Astronome émérite à l'Observatoire de Paris

**Vj ku' r ci g' k p v g p v k p c m { ' i g h v' d r e p m**

# Table des matières

<b>Préface</b>	<b>iii</b>
<b>Principales constantes physiques et astronomiques</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Forme et dimensions de la Voie lactée . . . . .	1
1.2 Rotation et structure spirale . . . . .	6
1.3 La Voie lactée à toutes les longueurs d'onde . . . . .	10
1.4 L'apport du satellite HIPPARCOS . . . . .	12
<b>2 Le voisinage du Soleil</b>	<b>17</b>
2.1 Les paramètres fondamentaux des étoiles et le diagramme de Hertzsprung-Russell . . . . .	17
2.2 Le disque stellaire local . . . . .	21
2.3 Cinématique et dynamique du disque stellaire local . . . . .	25
2.4 Les étoiles à grande vitesse . . . . .	30
2.5 La matière interstellaire près du Soleil . . . . .	31
<b>3 Structure et composants de la Galaxie</b>	<b>37</b>
3.1 Dimensions et rotation de la Galaxie . . . . .	37
3.2 Les populations stellaires dans la Galaxie . . . . .	45
3.2.1 Le halo stellaire . . . . .	47
3.2.2 Le bulbe . . . . .	49
3.2.3 Le disque épais . . . . .	49
3.2.4 Le disque mince . . . . .	50
3.3 Le milieu interstellaire dans la Galaxie . . . . .	52
3.3.1 Le milieu neutre atomique . . . . .	52
3.3.2 Le milieu moléculaire . . . . .	56
3.3.3 Le milieu ionisé . . . . .	60
3.3.4 Les restes de supernovae, les bulles et le gaz très chaud	63
3.4 Champs de rayonnement, champ magnétique, particules cosmiques et rayonnement radio . . . . .	64
3.5 La structure spirale de la Galaxie . . . . .	71



3.6	La matière noire dans la Galaxie . . . . .	75
3.6.1	La contribution des baryons . . . . .	78
3.6.2	La contribution du gaz . . . . .	81
3.6.3	La distribution de la matière noire dans la Galaxie . . .	81
3.6.4	Une autre possibilité : la gravité modifiée . . . . .	83
<b>4</b>	<b>Le Centre galactique</b>	<b>87</b>
4.1	Barre et bulbe . . . . .	87
4.2	La matière interstellaire au Centre galactique . . . . .	89
4.3	Le trou noir . . . . .	93
4.3.1	L'environnement proche du trou noir . . . . .	93
4.3.2	Sursauts près du trou noir . . . . .	96
4.3.3	Le trou noir lui-même . . . . .	96
4.3.4	Du gaz tombant sur le trou noir . . . . .	101
4.4	Conclusion . . . . .	103
<b>5</b>	<b>Dynamique galactique</b>	<b>105</b>
5.1	Dynamique de la structure spirale barrée . . . . .	105
5.2	Évolution cyclique des barres, migrations, ondes multiples . . .	110
5.2.1	Destruction et reformation des barres . . . . .	112
5.2.2	Migrations . . . . .	114
5.2.3	Barre secondaire, ondes multiples . . . . .	115
<b>6</b>	<b>L'évolution chimique de la Galaxie</b>	<b>125</b>
6.1	La formation de la Galaxie . . . . .	126
6.2	La production des éléments dans les étoiles . . . . .	127
6.3	La modélisation de l'évolution chimique . . . . .	132
6.4	L'évolution chimique du halo et du bulbe . . . . .	135
6.5	L'évolution chimique des disques . . . . .	139
<b>7</b>	<b>Formation et évolution de la Galaxie</b>	<b>145</b>
7.1	Les disques mince et épais . . . . .	145
7.2	La formation du bulbe . . . . .	147
7.3	La formation du halo : cosmologique ou non ? . . . . .	150
<b>8</b>	<b>La Galaxie parmi ses compagnes</b>	<b>155</b>
8.1	Une spirale parmi les spirales – classification de Hubble de la Galaxie . . . . .	155
8.2	Les satellites : Nuages de Magellan et galaxies elliptiques naines	157
8.3	Capture de l'elliptique naine du Sagittaire, et de multiples autres : les courants de marée . . . . .	160
8.4	Vent galactique, nuages à grande vitesse, accrétion cosmique . .	163
<b>9</b>	<b>Le futur</b>	<b>169</b>

<i>Table des matières</i>	ix
<b>Annexe A : Les paramètres stellaires</b>	<b>175</b>
<b>Annexe B : Quelques notions de base concernant les observations du milieu interstellaire</b>	<b>177</b>
<b>Glossaire</b>	<b>181</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>189</b>
<b>Index</b>	<b>193</b>

**Vj ku' r ci g' k p v g p v k p c m { ' i g h v ' d i e p m**

# Principales constantes physiques et astronomiques

Unité astronomique	$UA = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$
Année-lumière	$al = 9,46 \times 10^{15} \text{ m}$
Parsec	$pc = 3,086 \times 10^{16} \text{ m} = 3,262 \text{ al}$
Masse du Soleil	$M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Luminosité du Soleil	$L_{\odot} = 3,845 \times 10^{26} \text{ W}$
Année tropique	$an = 365,242 \text{ jours} = 3,156 \times 10^7 \text{ s}$
Vitesse de la lumière	$c = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Constante de la gravitation	$G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ $= 6,673 \times 10^{-8} \text{ dyne cm}^2 \text{ g}^{-2}$
Constante de Planck	$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ W s}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ W K}^{-1}$
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5,671 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
Masse de l'électron	$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton	$m_p = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Énergie de Rydberg	$ryd = 2,180 \times 10^{-18} \text{ J} = 13,606 \text{ eV}$
Longueur d'onde associée à 1 ryd	$91,176 \text{ nm}$
Énergie de masse de l'électron	$0,511 \text{ MeV} = 8,187 \times 10^{-14} \text{ J}$
Énergie de masse du proton	$938 \text{ MeV} = 1,503 \times 10^{-10} \text{ J}$

## Unités et conversion

### Longueur

mètre (unité S.I.)	$\text{m} = 100 \text{ cm}$
angström	$\text{Å} = 10^{-8} \text{ cm} = 10^{-10} \text{ m}$

### Masse

kilogramme (unité S.I.)	$\text{kg} = 10^3 \text{ g}$
-------------------------	------------------------------

### Énergie

joule (unité S.I.)	$\text{J} = 10^7 \text{ erg}$
--------------------	-------------------------------

### Puissance

watt (unité S.I.)	$\text{W} = 10^7 \text{ erg s}^{-1}$
-------------------	--------------------------------------

**Densité de flux**

jansky (sous-unité S.I.)

$$\begin{aligned} \text{Jy} &= 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \\ &= 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \end{aligned}$$

**Force**

newton (unité S.I.)

$$\text{N} = 10^5 \text{ dyne}$$

**Pression**

pascal (unité S.I.)

$$\text{Pa} = \text{N m}^{-2} = 10 \text{ dyne cm}^{-2} = 10^{-5} \text{ bar}$$

**Champ ou induction magnétique**

tesla (unité S.I.)

$$\text{T} = 10^4 \text{ G (gauss)}$$

# Chapitre 1

## Introduction

La bande lumineuse de la Voie lactée (aussi dénommée Galaxie), qui traverse le ciel en écharpe, a donné lieu à bien des mythes depuis la préhistoire. On y a vu par exemple la trace du lait échappé du sein d'Héra qui refusait de nourrir Héraclès, découvrant qu'il n'était pas son fils : d'où son nom qui a survécu jusqu'à nos jours. Au Moyen Âge, c'était le « chemin de Saint-Jacques », censé orienter les pèlerins en route vers Saint-Jacques de Compostelle. Claude Ptolémée (c.90–c.168) en a fait une description détaillée et précise, qui est longtemps restée insurpassée. Mais la véritable nature de la Voie lactée n'a été révélée qu'en 1610 par Galilée (1564–1642), qui, grâce à la lunette astronomique, a résolu sa lumière diffuse en nombreuses étoiles. Il en dit : « La Voie lactée n'est rien d'autre qu'un amas d'étoiles innombrables. » En fait, toutes les étoiles que nous voyons dans le ciel appartiennent à la Voie lactée, et les seuls objets visibles à l'œil nu qui ne lui appartiennent pas sont les deux Nuages de Magellan dans l'hémisphère austral, et la Galaxie d'Andromède dans l'hémisphère Nord.

### 1.1 Forme et dimensions de la Voie lactée

Il faudra attendre un siècle et demi après Galilée pour voir apparaître les premières idées sur la forme et les dimensions de la Voie lactée. Certes Thomas Wright (1711–1786), dans son ouvrage de 1750 *An original Theory or new Hypothesis of the Universe*, avait décrit la Voie lactée comme un système stellaire aplati à l'intérieur duquel nous nous trouvons, système qui ferait lui-même partie d'une immense coquille sphérique ; mais cela relève plus d'une cosmogonie de type médiéval que d'une véritable réflexion scientifique. D'autres, comme Emanuel Swedenborg (1688–1772), Immanuel Kant (1727–1804) et Johann Heinrich Lambert (1728–1777), se limitent à des considérations du même ordre. Tous considèrent cependant que les étoiles de la Voie lactée doivent tourner autour d'un centre inconnu pour assurer la stabilité du système. Mais c'est à William Herschel (1738–1822) que l'on doit les premières études scientifiques sérieuses de la Galaxie.

Herschel sait que certaines étoiles ne sont pas réellement fixes dans le ciel, mais sont animées d'un *mouvement propre* (déplacement latéral). Edmond Halley (1656–1742) avait soupçonné en 1718 qu'Aldébaran, Sirius et Arcturus pourraient être dans ce cas, et Jacques Cassini (1677–1756) avait établi en 1738 le déplacement d'Arcturus de façon irréfutable. En 1783, Herschel, qui a lui-même fait de nouvelles observations, remarque que la douzaine de mouvements propres stellaires alors bien connus montrent un déplacement dans une direction privilégiée. Il en conclut que c'est en fait le Soleil qui se dirige dans la direction opposée, l'*apex*, vers la constellation d'Hercule : c'est le début des études sur la cinématique des étoiles. Cependant, la vitesse de déplacement du Soleil vers l'apex est alors inconnue (elle est en fait de l'ordre de 20 km/s).

Par ailleurs, Herschel est le premier à tenter d'obtenir une meilleure géométrie pour la Voie lactée, à partir du comptage d'étoiles dans différentes directions. Pour cela, il suppose que toutes les étoiles ont le même éclat intrinsèque, et donc que leur éclat apparent diminue comme le carré de leur distance, ce qui permet d'estimer cette distance au moins en valeur relative. Il suppose également que le nombre d'étoiles par unité de volume est partout le même. Les étoiles les plus faibles observées sont pour lui à la limite du système. Il obtient ainsi en 1784–1785 une géométrie à trois dimensions de la Galaxie, dont il représente une coupe perpendiculaire au plan de la Voie lactée dans le ciel (Figure 1.1). Il affirme que la Voie lactée s'étend dans ce plan de 800 fois la distance moyenne entre les étoiles, et seulement de 150 fois dans la direction perpendiculaire. Quant aux dimensions réelles, elles sont impossibles à obtenir à l'époque car on ne connaît la distance d'aucune autre étoile que le Soleil. On ne sait pas non plus quel est le rapport entre l'éclat apparent d'une étoile comme Sirius et celui du Soleil, ce qui aurait permis d'avoir une idée de la distance de l'étoile. Ce n'est qu'au cours de la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle que l'on aura un début de réponse à ces questions.

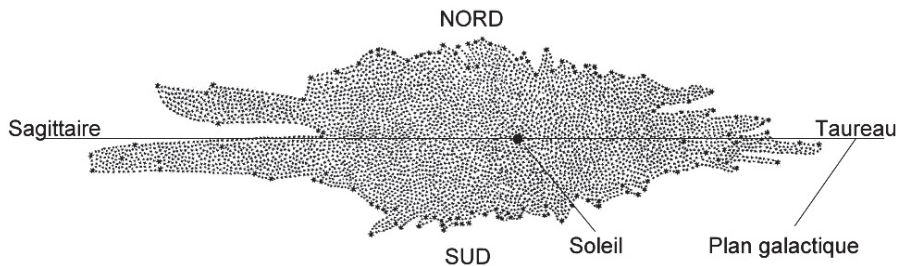


FIG. 1.1 – Une coupe perpendiculaire au plan de la Voie lactée telle qu'elle apparaît dans le ciel. Vers la gauche, le manque d'étoiles, qui correspond à la section d'une bande obscure irrégulière qui sépare en deux la Voie lactée dans la direction du Sagittaire, est en fait dû à l'extinction par les poussières interstellaires, ce qu'ignorait Herschel. D'après Herschel, W. (1785) *Philosophical Transactions* 75, 213-266.

Cependant, Herschel va avoir des doutes légitimes sur les hypothèses qu'il a dû faire dans ce travail : il se rend compte qu'il doit y avoir des étoiles plus faibles que ce que permettent de voir les télescopes, et que l'on ne peut donc pas atteindre réellement les limites de la Voie lactée. Dans ses derniers articles, qui datent de 1817–1818, il admet que « la Voie lactée est insondable ».

Ce constat d'échec va ralentir les travaux ultérieurs, jusqu'à ce que l'astronome russe Otto Struve (1819–1905) les reprenne sur de nouvelles bases. Il reconnaît en 1847 que la densité des étoiles dans la Galaxie est loin d'être uniforme, contrairement à ce qu'avait supposé Herschel : elle diminue progressivement lorsqu'on s'éloigne du plan de la Voie lactée. Comme on dispose enfin de distances stellaires, on peut obtenir les dimensions du système, dont Struve affirme qu'il s'étend sur au moins  $8,17 \times 10^8$  unités astronomiques, soit  $1,2 \times 10^{17}$  km, ou 13 000 années-lumière, ou 4 000 parsecs<sup>1</sup>. Mais on n'en voit pas les limites puisque les étoiles les plus faibles échappent aux instruments d'observation. Enfin, Struve soupçonne la présence d'une extinction interstellaire, qui ferait que l'éclat d'une étoile diminuerait plus vite que le carré de sa distance.

L'étape suivant la plus importante dans la description de la Galaxie est due à l'astronome hollandais Jacobus Cornelius Kapteyn (1851–1922), qui fait de son laboratoire de Groningue le principal centre d'études galactiques. Déjà, on dispose de catalogues d'étoiles profonds et assez complets, de catalogues de mouvements propres (déplacement sur le ciel) et de vitesses radiales (vitesse d'éloignement ou de rapprochement, obtenue à partir du déplacement des raies spectrales par effet Doppler-Fizeau), de photographies du ciel, etc. En 1906, Kapteyn lance un grand projet pour l'étude de la distribution des étoiles dans la Galaxie, qui consiste à mesurer l'éclat et à obtenir le spectre, la vitesse radiale et le mouvement propre des étoiles dans 206 zones du ciel (les *selected areas*). En attendant l'achèvement de ce projet qui impliquera la coopération de plus de 40 observatoires différents, Kapteyn s'attaque à son tour au problème de la géométrie et de la distribution des étoiles dans la Galaxie. Cette fois, il tient compte du fait que les étoiles n'ont pas toutes la même luminosité intrinsèque, mais qu'il y a toute une gamme de luminosités que l'on peut décrire par une *fonction de luminosité*. Il se trouve donc confronté à une difficulté nouvelle : la distribution de l'éclat apparent des étoiles dans une direction donnée est l'effet combiné de leurs luminosités différentes et de leurs distances différentes. Kapteyn va résoudre ce problème de façon très ingénieuse. Il illustre ses résultats sous la forme schématique de la Figure 1.2, qui représente son modèle final de 1922 : la Galaxie est pour lui un système ellipsoïdal aplati, où le Soleil occupe une position un peu excentrique. Ce modèle est certes plus schématique que celui d'Herschel, mais il représente un progrès

---

1. L'unité astronomique (UA) est le demi grand-axe de l'orbite terrestre, soit  $1,496 \times 10^{11}$  m. Le parsec est la distance sous laquelle on voit ce demi grand-axe sous un angle de 1 seconde de degré :  $1 \text{ pc} = 206\,285 \text{ UA} = 3,086 \times 10^{16} \text{ m} = 3,26 \text{ années-lumière}$ .



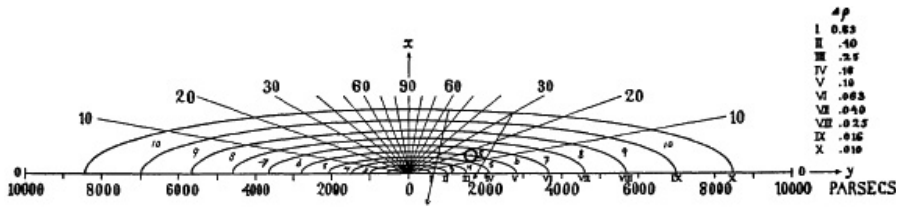


FIG. 1.2 – La Galaxie d’après Kapteyn en 1922. Elle est schématisée par des ellipsoïdes concentriques, où la densité diminue vers l’extérieur selon l’échelle relative de droite. Le Soleil occupe la position indiquée par un cercle. D’après Kapteyn, J.C. (1922) *Astrophysical Journal* 55, 302-328, avec l’autorisation de l’AAS.

considérable puisqu’il montre comment la densité d’étoiles diminue quand on s’éloigne du plan de la Voie lactée, et comporte une échelle de distances.

Cependant, le modèle de Kapteyn s’est révélé grossièrement faux car, comme tous ses prédécesseurs, il n’a pas tenu compte du fait que la lumière des étoiles éloignées est fortement atténuée par l’extinction due au milieu interstellaire. Il avait pourtant supposé l’existence d’une telle extinction dans ses premiers travaux, mais l’avait rejetée par la suite. En 1904, Johannes Franz Hartmann (1865–1936), de l’Observatoire astrophysique de Potsdam, avait remarqué, dans le spectre de l’étoile  $\delta$  Orionis, des raies d’absorption très étroites qu’il avait attribuées à des ions calcium situés dans des nuages de gaz interposés. En 1912, l’américain Vesto Slipher (1875–1969) découvrait les poussières interstellaires illuminées par les étoiles des Pléiades, et suggérait que ces poussières pourraient bien atténuer la lumière des étoiles situées à l’arrière. Enfin, les photographies de Edward E. Barnard (1857–1923) et de Max Wolf (1863–1932) avaient montré l’existence de régions de la Voie lactée apparemment dépourvues d’étoiles, ce que l’on attribua vers la fin des années 1910 à la présence de nuages de poussières opaques. On commençait à interpréter la bande sombre qui paraît séparer en deux la Voie lactée non plus par une absence d’étoiles, mais par l’extinction par les poussières.

Il devait revenir à un astronome suisse-américain, Robert J. Trumpler (1886–1956), de donner en 1930 une image définitive de la Galaxie. Trumpler remarque pour commencer que le diamètre angulaire des amas stellaires ouverts<sup>2</sup> lointains, qui se trouvent tout près du plan de la Galaxie, paraît anormalement grand, si du moins ils sont à la distance que l’on peut déduire de leur luminosité. Mais s’il existe une extinction interstellaire, leur distance est en fait plus petite et tout rentre dans l’ordre. Trumpler en déduit une valeur numérique de l’extinction par unité de distance dans le plan de la Voie lactée. Il examine ensuite la distribution des amas stellaires globulaires, dont la

2. Voir l’encadré à la fin de ce chapitre pour la définition des différents objets rencontrés dans la Galaxie, avec des exemples en image.

plupart sont loin de ce plan : ils doivent donc être peu affectés par l'extinction interstellaire, laquelle est visiblement concentrée au voisinage du plan galactique. Harlow Shapley (1885–1972) avait montré précédemment que ces amas étaient presque tous groupés dans une moitié du ciel, et formaient un système sphérique dont le centre se trouvait loin du Soleil, dans la direction de la constellation du Sagittaire. Il avait estimé leur distance grâce aux étoiles variables qu'ils contiennent (les RR Lyrae) et avait conclu que, si ces amas appartenaient bien à la Galaxie, le centre de leur système était aussi celui de la Galaxie et devait se trouver à environ 20 000 parsecs. Trumpler révisé quelque peu cette distance, dont la valeur estimée actuellement est d'environ 8 000 pc. Il résulte de ces études un modèle de la Galaxie qui est celui que nous adoptons encore (Figure 1.3).

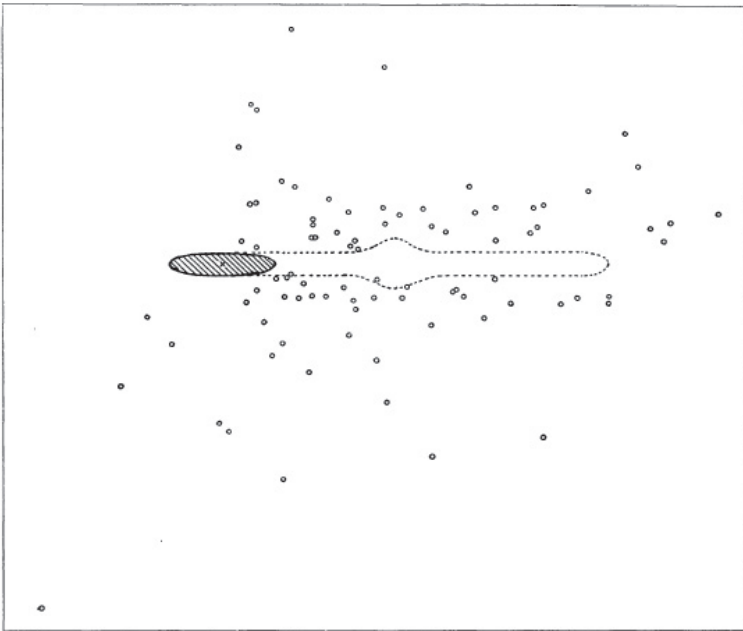


FIG. 1.3 – La Galaxie vue en coupe, d'après Shapley et Trumpler. La courbe en traits interrompus englobe l'essentiel des étoiles et de la matière interstellaire. L'ellipse hachurée est la Galaxie de Kapteyn, limitée en fait par l'extinction interstellaire, avec le Soleil presque au centre. Les petits cercles symbolisent les amas globulaires. D'après Trumpler, R.J. (1941) *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 53, 155-165, avec l'autorisation de l'ASP.

Les astronomes de l'époque ne manquent pas de constater que la Galaxie ressemble beaucoup à la Nébuleuse d'Andromède et à bien d'autres objets du même genre. Ils réalisent donc pleinement que la Voie lactée n'est qu'une

galaxie parmi d'autres, et que le Soleil, loin d'en occuper le centre, se trouve dans une région extérieure.

## 1.2 Rotation et structure spirale

Il nous faut maintenant dire quelques mots des mouvements dans la Galaxie. Lorsque suffisamment de vitesses radiales d'amas globulaires et de galaxies ont été mesurées, dans les années 1920, on se rend compte que l'ensemble des étoiles voisines du Soleil se déplace avec une vitesse énorme, de l'ordre de 300 km/s, par rapport à la moyenne de tous ces objets : on a découvert la rotation de la Galaxie, qui maintient ses différentes parties – dont le voisinage solaire – en équilibre entre l'attraction gravitationnelle des régions centrales et la force centrifuge. L'astronome suédois Bertil Lindblad (1895–1965) et son collègue hollandais Jan Oort (1900–1992) montrent que le disque de la Galaxie ne tourne pas comme un corps solide, mais en se déformant, si bien que les régions intérieures au Soleil tournent plus vite que les régions extérieures : c'est la *rotation différentielle*. Ils comprennent ainsi un phénomène découvert précédemment par Kapteyn. Celui-ci avait observé que les étoiles du voisinage solaire forment deux courants opposés perpendiculaires à la direction du Sagittaire, dont nous avons dit que c'est celle du Centre galactique : ces deux courants sont la manifestation de la rotation différentielle. Grâce à l'étude de la rotation de la Galaxie, on peut maintenant avoir une idée de sa masse.

Un événement majeur pour l'astronomie galactique, et pour l'astronomie en général, survient en 1951: la découverte de l'émission radio des atomes d'hydrogène interstellaire à la longueur d'onde bien déterminée de 21 cm, la *raie à 21 cm*. Prévues par le physicien hollandais Hendrick van de Hulst (1918–2000) et découvertes par les américains Harold I. Ewen (né en 1922) et Edward M. Purcell (1912–1997), cette raie permet enfin d'accéder à l'ensemble de la Galaxie, car il n'y a pas d'extinction interstellaire pour les ondes radio. Par ailleurs, il est possible de connaître la vitesse radiale des régions émettrices grâce au décalage de la raie par effet Doppler-Fizeau. On peut ainsi pour la première fois connaître la vitesse de rotation de la Galaxie en fonction de la distance au Centre galactique (ce que les spécialistes appellent la *courbe de rotation*), et en dresser la première carte d'ensemble, du moins celle du gaz interstellaire dont la composition chimique est dominée par l'hydrogène (Figure 1.4). On y voit des bras spiraux, dont les plus proches de nous n'avaient qu'été soupçonnés par les observations optiques : ceci confirme la similarité de notre Galaxie avec les galaxies spirales.

En 1970, la découverte des raies radio de la molécule CO interstellaire a ouvert de nouveaux horizons pour notre connaissance de la Galaxie : en effet, cette molécule s'est révélée être un excellent traceur du gaz moléculaire, dominé par la molécule d'hydrogène H<sub>2</sub> qui est malheureusement très difficile à observer. De très gros efforts observationnels ont été faits pour cartographier les raies de CO dans l'ensemble de la Galaxie, bien qu'étant dans le

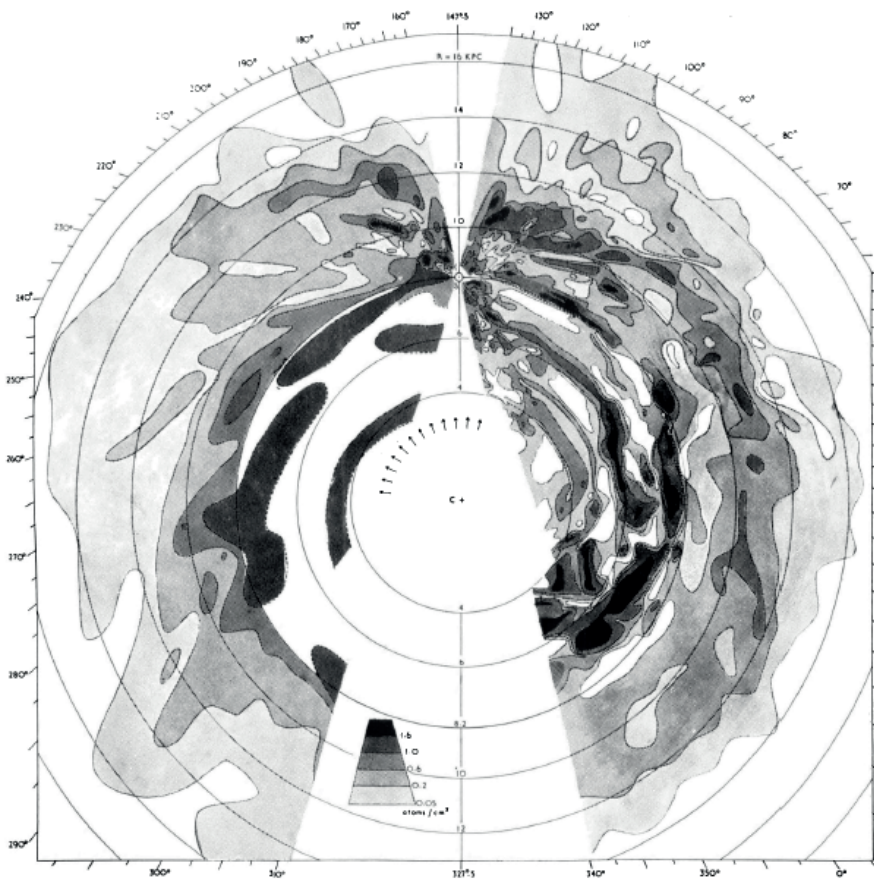


FIG. 1.4 – La première carte complète de la Galaxie dans la raie à 21 cm de l'hydrogène atomique interstellaire. C est le Centre galactique; le Soleil est à 8 kpc au-dessus. Les niveaux de gris indiquent la densité de l'hydrogène. La structure spirale est visible, mais les détails sont encore discutés car les distances sont obtenues à partir des vitesses radiales en admettant une courbe de rotation, à partir de laquelle peuvent exister des déviations locales de vitesse. Le système de coordonnées galactiques utilisé ici n'est plus en usage aujourd'hui. D'après Oort, J.H., Kerr, F.T. & Westerhout, G. (1958) *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 118, 379-389 avec l'autorisation de Wiley.

domaine des ondes millimétriques (2,6 et 1,3 mm de longueur d'onde), elles soient moins faciles à observer que la raie à 21 cm. La Figure 1.5 montre une comparaison entre une image visible de la moitié intérieure de la Galaxie et la distribution de la molécule CO dans la même région. On observe une parfaite correspondance entre les marques d'absorption dues à la poussière interstellaire et le gaz moléculaire. L'avantage de l'observation de la molécule CO est