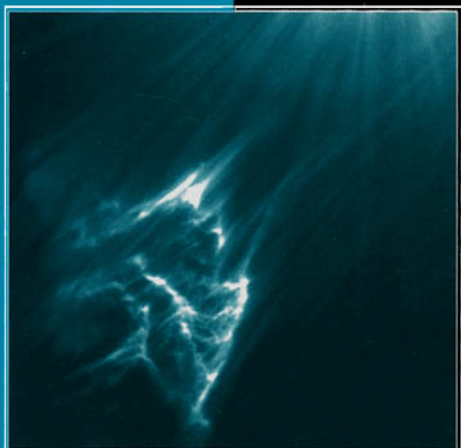


ASTROPHYSIQUE

**James LEQUEUX**

Avec le concours  
d'Edith FALGARONE et Charles RYTER

# Le milieu interstellaire



SAVOIRS ACTUELS

 CNRS EDITIONS

  
EDP  
SCIENCES



# Le milieu interstellaire

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

James Lequeux

Avec le concours

d'Edith Falgarone et Charles Ryter

# Le milieu interstellaire

S A V O I R S    A C T U E L S

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

*Illustration de couverture :*

La nébuleuse par réflexion IC 349 dans les Pléiades. La poussière interstellaire est illuminée par l'étoile Mérope située en haut, en dehors du champ. Voir la planche 15. *Document Télescope Spatial Hubble.*

© 2002, **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 2-86883-533-3

**ISBN** CNRS ÉDITIONS 2-271-05955-0

*À Geneviève*

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*



# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Notre Galaxie, hôte du milieu interstellaire</b>	<b>1</b>
1.1 Notre Galaxie : les ordres de grandeur . . . . .	2
1.2 Les populations stellaires . . . . .	6
1.2.1 Généralités . . . . .	6
1.2.2 Les populations du disque . . . . .	7
1.2.3 Le bulbe et le halo . . . . .	9
1.3 Distribution de la matière interstellaire . . . . .	10
<b>2 Rayonnements et champ magnétique</b>	<b>15</b>
2.1 Les champs de rayonnement . . . . .	15
2.1.1 Les rayonnements extragalactiques . . . . .	16
2.1.2 Les rayonnements galactiques . . . . .	16
2.2 Le champ magnétique interstellaire . . . . .	21
2.2.1 Mesure du champ magnétique par effet Zeeman . . . . .	24
2.2.2 Mesure du champ magnétique par rotation Faraday . . . . .	25
2.2.3 Estimation du champ magnétique à partir du rayonnement synchrotron galactique . . . . .	26
2.2.4 Estimation de la direction du champ magnétique par polarisation linéaire de la lumière . . . . .	28
2.2.5 Résultats . . . . .	29
<b>3 Transfert du rayonnement et excitation</b>	<b>31</b>
3.1 L'équation de transfert . . . . .	31
3.1.1 Démonstration . . . . .	31
3.1.2 Approximation de Rayleigh-Jeans. Notations radioastronomiques . . . . .	34
3.1.3 Température d'excitation . . . . .	37
3.2 Système à deux niveaux d'énergie hors ETL . . . . .	38
3.2.1 Relations générales . . . . .	38
3.2.2 Cas de l'équilibre radiatif pur . . . . .	39

3.2.3	Couplage de l'excitation et du transfert, approximation LVG . . . . .	40
3.3	Cas général ; masers . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Le gaz interstellaire neutre</b>	<b>51</b>
4.1	Le gaz neutre atomique . . . . .	51
4.1.1	La raie 21 cm de l'hydrogène atomique . . . . .	52
4.1.2	Les raies de structure fine dans l'infrarouge lointain . . . . .	58
4.1.3	Les raies d'absorption interstellaires . . . . .	62
4.2	La composante moléculaire . . . . .	71
4.2.1	Généralités . . . . .	71
4.2.2	Les transitions électroniques . . . . .	74
4.2.3	Les transitions vibrationnelles . . . . .	76
4.2.4	Les transitions rotationnelles . . . . .	81
4.2.5	Les bandes interstellaires diffuses . . . . .	93
<b>5</b>	<b>Le gaz interstellaire ionisé</b>	<b>97</b>
5.1	Les régions H II . . . . .	97
5.1.1	Théorie de l'ionisation ; la sphère de Strömgen . . . . .	98
5.1.2	L'émission continue du gaz ionisé . . . . .	102
5.1.3	Les raies de recombinaison . . . . .	107
5.1.4	Les raies de recombinaison radio . . . . .	113
5.1.5	Les raies interdites . . . . .	117
5.1.6	La détermination des abondances dans les régions H II . . . . .	120
5.2	Le gaz ionisé diffus . . . . .	122
5.3	Le gaz chaud . . . . .	125
5.3.1	L'ionisation par collisions électroniques à haute température . . . . .	125
5.3.2	L'émission de raies X . . . . .	128
5.3.3	Émission X thermique continue . . . . .	128
5.3.4	Résultats . . . . .	129
5.4	L'absorption X . . . . .	130
<b>6</b>	<b>Le milieu interstellaire aux hautes énergies</b>	<b>133</b>
6.1	Les rayons cosmiques . . . . .	133
6.1.1	Origine des rayons cosmiques . . . . .	134
6.1.2	Les rayons cosmiques solaires et la modulation solaire . . . . .	135
6.1.3	Les rayons cosmiques galactiques . . . . .	136
6.1.4	Les rayons cosmiques de très haute énergie . . . . .	142
6.1.5	Les électrons cosmiques . . . . .	145
6.1.6	Confinement des rayons cosmiques dans la Galaxie . . . . .	145
6.2	Le continuum en rayons gamma . . . . .	149
6.2.1	Production de gammas par interactions nucléaires . . . . .	150
6.2.2	Production de gammas par rayonnement de freinage . . . . .	153
6.2.3	Production de gammas par effet Compton inverse . . . . .	153

6.3	La masse du milieu interstellaire . . . . .	154
6.3.1	Utilisation des observations gamma pour déterminer la masse du milieu interstellaire dans la Galaxie . . . . .	155
6.3.2	Utilisation de la masse du viriel des nuages moléculaires	158
6.3.3	Comparaison $W_{\text{CO}}$ -extinction . . . . .	159
6.3.4	Absorption en rayons X ou en infrarouge moyen . . . . .	162
6.4	Les raies gamma . . . . .	163
<b>7</b>	<b>Les poussières interstellaires</b>	<b>167</b>
7.1	Rougisement et extinction interstellaires . . . . .	168
7.1.1	Généralités . . . . .	168
7.1.2	Extinction et modèles de poussières . . . . .	175
7.1.3	Diffusion des rayons X par les poussières . . . . .	178
7.2	L'émission des poussières interstellaires . . . . .	179
7.2.1	Les grains à l'équilibre thermique . . . . .	179
7.2.2	Les petits grains hors d'équilibre thermique . . . . .	184
7.2.3	Les bandes d'émission aromatiques dans l'infrarouge moyen . . . . .	189
7.2.4	Les très petits grains . . . . .	195
7.2.5	Les gros grains . . . . .	195
7.3	Modèles globaux . . . . .	196
7.4	Absorptions infrarouges et manteaux de glace . . . . .	197
7.5	La fluorescence infrarouge . . . . .	200
<b>8</b>	<b>Chauffage et refroidissement du gaz interstellaire</b>	<b>201</b>
8.1	Processus de chauffage . . . . .	202
8.1.1	Généralités, temps de thermalisation . . . . .	202
8.1.2	Chauffage par rayons cosmiques de basse énergie . . . . .	206
8.1.3	Chauffage par effet photoélectrique sur les grains . . . . .	210
8.1.4	Chauffage par ionisation des atomes et des molécules . . . . .	215
8.1.5	Chauffage par rayons X . . . . .	216
8.1.6	Chauffage chimique . . . . .	217
8.1.7	Chauffage par échange thermique grains/gaz . . . . .	219
8.1.8	Chauffage hydrodynamique et magnéto-hydrodynamique . . . . .	221
8.2	Processus de refroidissement . . . . .	222
8.2.1	Refroidissement par les raies de structure fine . . . . .	222
8.2.2	Refroidissement par excitation collisionnelle de raies permises . . . . .	225
8.2.3	Refroidissement par recombinaisons électrons-ions . . . . .	228
8.2.4	Refroidissement par les poussières . . . . .	229
8.3	Équilibre et stabilité thermiques . . . . .	229
8.3.1	Milieu atomique . . . . .	229

8.3.2	Gaz ionisé chaud . . . . .	234
8.3.3	Régions H II . . . . .	234
8.3.4	Nuages moléculaires . . . . .	235
<b>9</b>	<b>Chimie interstellaire</b>	<b>237</b>
9.1	Chimie en phase gazeuse . . . . .	237
9.1.1	Réactions ion-molécule . . . . .	238
9.1.2	Association radiative . . . . .	239
9.1.3	Recombinaison dissociative . . . . .	241
9.1.4	Réactions neutre-neutre . . . . .	241
9.1.5	Photodissociation et photo-ionisation . . . . .	242
9.2	Chimie à la surface des grains de poussière . . . . .	244
9.2.1	Formation de H <sub>2</sub> sur les grains . . . . .	245
9.2.2	Formation d'autres molécules sur les grains . . . . .	247
9.3	Chimie à l'équilibre et cinétique chimique . . . . .	249
9.4	Quelques résultats . . . . .	250
9.4.1	Chimie dans le milieu interstellaire diffus . . . . .	251
9.4.2	Chimie dans les nuages moléculaires denses . . . . .	253
<b>10</b>	<b>Les régions de photodissociation</b>	<b>259</b>
10.1	Présentation générale . . . . .	259
10.2	Physico-chimie . . . . .	262
10.2.1	Pénétration du rayonnement UV lointain et photodissociation . . . . .	262
10.2.2	Chimie . . . . .	263
10.2.3	Mécanismes de chauffage . . . . .	263
10.2.4	Mécanismes de refroidissement . . . . .	265
10.3	Modèles stationnaires . . . . .	266
10.4	Modèles hors d'équilibre . . . . .	274
<b>11</b>	<b>Les chocs</b>	<b>277</b>
11.1	Équations de la dynamique du gaz . . . . .	277
11.1.1	Fluide unique . . . . .	277
11.1.2	Milieu multi-fluide . . . . .	279
11.2	Les différents types de chocs . . . . .	280
11.2.1	Chocs sans champ magnétique . . . . .	282
11.2.2	Chocs avec champ magnétique . . . . .	286
11.2.3	Chocs multi-fluides dans un gaz faiblement ionisé . . . . .	287
11.3	Chocs non stationnaires . . . . .	290
11.4	Physico-chimie dans les chocs . . . . .	292
11.5	Rayonnement et diagnostic des chocs . . . . .	295
11.6	Instabilités dans les chocs . . . . .	298

<b>12 Applications des chocs</b>	<b>301</b>
12.1 Les restes de supernova . . . . .	301
12.1.1 Phase d'expansion libre . . . . .	302
12.1.2 Phase adiabatique . . . . .	303
12.1.3 Phase d'expansion isotherme, ou radiative . . . . .	306
12.1.4 Évolution des plérions . . . . .	307
12.1.5 Expansion des restes de supernova dans un milieu inhomogène . . . . .	308
12.1.6 Rayonnement non thermique des restes de supernova . . . . .	309
12.2 Les bulles . . . . .	311
12.3 Dynamique des régions H II . . . . .	314
12.3.1 Le front d'ionisation . . . . .	314
12.3.2 Le choc . . . . .	317
12.3.3 Globules neutres dans une région H II . . . . .	319
12.3.4 Évolution des régions H II . . . . .	323
12.4 Accélération des rayons cosmiques . . . . .	325
12.4.1 Propagation des particules chargées dans un champ magnétique . . . . .	326
12.4.2 Diffusion des particules chargées dans un milieu désordonné . . . . .	330
12.4.3 Pertes d'énergie . . . . .	333
12.4.4 Accélération des particules chargées . . . . .	334
<b>13 La turbulence interstellaire</b>	<b>345</b>
13.1 Structure en vitesse et fragmentation . . . . .	345
13.2 La turbulence incompressible . . . . .	349
13.2.1 Apparition de la turbulence . . . . .	349
13.2.2 La turbulence développée de Kolmogorov . . . . .	350
13.2.3 Viscosité et pression turbulentes . . . . .	352
13.2.4 L'intermittence . . . . .	354
13.3 La turbulence dans le milieu interstellaire . . . . .	355
13.4 Quelques effets de la turbulence interstellaire . . . . .	357
13.4.1 Transport turbulent et chimie interstellaire . . . . .	357
13.4.2 L'intermittence, source de chauffage pour le gaz . . . . .	361
<b>14 Équilibre, effondrement, formation des étoiles</b>	<b>367</b>
14.1 Stabilité et instabilité : le théorème du viriel . . . . .	367
14.1.1 Forme simple du théorème du viriel, sans champ magnétique et sans pression extérieure . . . . .	367
14.1.2 Longueur et masse de Jeans . . . . .	369
14.1.3 Forme générale du théorème du viriel . . . . .	372
14.1.4 Stabilité de l'équilibre du viriel . . . . .	374
14.1.5 Distribution de densité dans un nuage sphérique à l'équilibre . . . . .	378

14.1.6	Stabilité et instabilités en présence d'un champ magnétique . . . . .	380
14.1.7	Couplage du gaz au champ magnétique : la diffusion ambipolaire . . . . .	384
14.2	Effondrement et fragmentation . . . . .	389
14.2.1	Le temps de chute libre . . . . .	389
14.2.2	Configurations pendant l'effondrement . . . . .	390
14.2.3	Rôle de la rotation . . . . .	392
14.2.4	Rôle du champ magnétique . . . . .	395
14.3	Fin de l'effondrement, formation des étoiles . . . . .	397
14.4	La fonction de masse initiale et son origine . . . . .	398
14.4.1	Déterminations de la fonction de masse initiale et problèmes . . . . .	398
14.4.2	Origine de la fonction initiale de masse . . . . .	401
<b>15</b>	<b>Changements d'état et transformations</b>	<b>403</b>
15.1	Gaz atomique, gaz moléculaire et gaz ionisé tiède . . . . .	404
15.1.1	Gaz ionisé et échanges avec le gaz neutre . . . . .	404
15.1.2	Échanges gaz atomique/gaz moléculaire . . . . .	406
15.2	Gaz chaud, fontaine galactique . . . . .	411
15.3	Échanges gaz-poussières . . . . .	414
15.4	Évolution des poussières interstellaires . . . . .	418
15.4.1	Poussières dans les enveloppes circumstellaires et les nébuleuses planétaires . . . . .	418
15.4.2	Poussières dans le milieu interstellaire . . . . .	419
15.4.3	Poussières autour des protoétoiles et dans le Système solaire . . . . .	420
	<b>Signification des sigles des références</b>	<b>422</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>423</b>
	<b>Planches en couleurs</b>	<b>441</b>
	<b>Signification des principaux symboles</b>	<b>473</b>
	<b>Principales constantes</b>	<b>477</b>
	<b>Unités et conversions</b>	<b>478</b>
	<b>Index</b>	<b>479</b>

# Avant-propos

CET OUVRAGE s'insère dans la série des livres de la collection « Savoirs actuels » consacrés à l'astronomie. Les précédents traitent respectivement des techniques de l'astronomie, du Système solaire, des étoiles, des galaxies et de la cosmologie.

Bien que sa densité soit en général faible, la matière située entre les étoiles joue un grand rôle. C'est à partir d'elle que se forment les étoiles par effondrement gravitationnel. Au cours de leur vie, et surtout pendant la phase finale de leur évolution, les étoiles rejettent une partie de leur matière dans le milieu interstellaire. Cette matière est enrichie en éléments lourds par les réactions thermonucléaires qui ont eu lieu au sein des étoiles. De nouvelles étoiles se forment dans le milieu interstellaire ainsi enrichi. L'évolution de l'Univers est donc caractérisée par un échange continu de masse entre les étoiles et le milieu qui les baigne. Cet échange a lieu à l'intérieur des galaxies, mais il y a aussi échange de matière entre le milieu interstellaire des galaxies et le milieu intergalactique.

La matière interstellaire se compose de gaz atomique, moléculaire et ionisé à diverses températures, et aussi de poussières, lesquelles renferment une grande partie des éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. Ces poussières sont formées autour des étoiles à la fin de leur vie, mais elles sont continuellement détruites, altérées et reformées dans le milieu interstellaire. Elles jouent un double rôle. D'une part elles absorbent une grande partie des photons émis par les étoiles, les poussières ainsi chauffées réémettant l'énergie qu'elles ont absorbée par rayonnement thermique dans l'infrarouge moyen et lointain. D'autre part, la surface des poussières est le siège de la formation de nombreuses molécules, notamment de la plus abondante : la molécule d'hydrogène  $H_2$ . La physique et la chimie interstellaires ont un grand intérêt

général car les conditions qui règnent dans le milieu sont très différentes de celles des laboratoires terrestres, et les processus élémentaires sont souvent mieux visibles en raison de la faiblesse des densités.

Le but de cet ouvrage est de décrire la matière interstellaire de notre Galaxie sous ses différentes phases, ainsi que les processus physiques et chimiques qui y prennent place. Le lecteur se heurtera, comme les auteurs s'y sont heurtés, à l'extrême complexité du milieu interstellaire, qui fait qu'il n'est pas possible de le décrire d'une façon linéaire. De surcroît, notre conception même de ce milieu subit une profonde évolution au moment où nous écrivons, car on réalise progressivement qu'il est le plus souvent turbulent et hors d'équilibre. Mais nous n'en savons pas encore assez pour qu'il soit nécessaire d'abandonner les concepts relativement simples qui ont régi son étude jusqu'à ce jour, concepts qui restent à la base de ce livre et dont le rôle pédagogique subsistera longtemps encore.

Les sept premiers chapitres présentent les différentes composantes de la matière interstellaire, et détaillent leurs principales méthodes d'étude. Les sept chapitres qui suivent sont centrés sur les processus physiques et dynamiques qui régissent son comportement, entre autres les instabilités et l'effondrement gravitationnel qui aboutissent à la formation des étoiles. Le dernier chapitre résume les transformations entre les phases du milieu interstellaire.

Suivant la ligne de cette série, le présent ouvrage est destiné aux étudiants avancés, ainsi qu'aux chercheurs débutants ou aux chercheurs confirmés désireux d'aborder un domaine nouveau pour eux. Il peut paraître exagérément ambitieux de vouloir écrire un nouveau traité sur le milieu interstellaire après l'ouvrage classique de Spitzer, *Physical processes in the interstellar medium* [467]. Cependant le sujet s'est considérablement développé depuis la parution de ce livre il y a un quart de siècle. Par ailleurs, il nous semble que le livre de Spitzer, malgré sa haute valeur pédagogique, est souvent très concis et difficile à suivre même par des étudiants avancés. Nous n'avons pas hésité à reproduire certaines démonstrations données dans cet ouvrage, mais avec davantage de détails afin d'éviter au lecteur des efforts inutiles.

Nous avons choisi d'insister sur les méthodes d'étude, qui évoluent relativement peu, plutôt que sur les résultats qui sont souvent rapidement dépassés. Sans prétendre à être complets dans un domaine aussi complexe, nous avons voulu fournir au lecteur l'essentiel des outils nécessaires pour aborder directement la recherche. C'est pourquoi, à côté de tables contenant des données utiles, nous donnons une quantité substantielle de références. Ces références ont principalement été choisies pour leur rôle pédagogique : notre ouvrage n'est pas une revue, et il ne nous est pas possible de donner crédit à tous ceux qui ont développé le sujet. Les illustrations dans le texte sont le plus souvent extraites directement des articles de recherche, et nous n'avons pas en général traduit en français les annotations présentes sur ces figures, car nous



avons pensé que le lecteur n'aurait pas de difficulté à les comprendre. Nous avons par ailleurs inséré dans l'ouvrage de nombreuses planches en couleurs, quelquefois inédites. Regroupées à la fin du volume, elles illustrent les aspects très variés du milieu interstellaire.

Nous avons choisi d'exprimer en général les quantités que nous discutons dans le système c.g.s. et non pas dans le système international (S.I.) m.k.s.a. Nous avons conscience d'aller ainsi quelque peu à contre-courant, mais on ne peut que constater que le système c.g.s. est utilisé dans la très grande majorité des articles que l'on sera amené à consulter. Une table de conversion des principales unités c.g.s./m.k.s.a. et une liste des valeurs des constantes les plus utilisées sont données en fin d'ouvrage.

Nous remercions Patrick Boissé, François Boulanger et Guillaume Pineau des Forêts, qui ont bien voulu relire des parties de cet ouvrage, et surtout Laurent Verstraete et Anthony Jones pour leurs critiques toujours pertinentes et constructives. Nous remercions aussi tous les collègues qui nous ont fourni des illustrations, notamment Jean-Charles Cuillandre. Nous voudrions enfin exprimer notre gratitude envers le NASA Astrophysics Data System (ADS), qui nous a été d'une très grande utilité dans nos recherches bibliographiques.

Charles Ryter tient à remercier le Service d'Astrophysique du CEA et son directeur, Laurent Vigroux, pour son hospitalité pendant la rédaction de ce livre.

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

# Chapitre 1

## Notre Galaxie, hôte du milieu interstellaire

COMME TOUTES les galaxies, notre Galaxie<sup>1</sup>, la Voie lactée, est un système extrêmement complexe d'étoiles, de gaz et de particules solides (voir la Planche 1 pour une galaxie vue de face et la Planche 2 pour des images de la Voie lactée à différentes longueurs d'onde). Ces éléments baignent dans un champ magnétique, des rayonnements s'étendant sur l'ensemble du spectre électromagnétique, et des particules « cosmiques » neutres ou chargées de toutes énergies. Les galaxies sont liées par leur propre gravité, et leurs différents constituants interagissent fortement, échangeant masse, quantité de mouvement et énergie. Il n'est donc pas possible de faire de ces systèmes une description linéaire dans laquelle les différents éléments seraient analysés les uns après les autres. La description ne pourra se faire que par approximations successives.

Il y a là non seulement une difficulté de présentation, mais aussi une vraie difficulté intellectuelle. Pour beaucoup de problèmes, une étoile peut être considérée comme un système isolé. Une galaxie comme la nôtre est, elle aussi, un système qu'on peut considérer comme isolé en première approximation, mais ce système est bien plus complexe qu'une étoile individuelle. On est donc amené à considérer des sous-systèmes plus simples : amas d'étoiles, nuages de matière interstellaire, etc. que l'on peut essayer de décrire par un modèle pour lequel les interactions avec le reste de la Galaxie sont prises comme des conditions aux limites. Ces conditions aux limites sont issues d'autres observations que l'on a elles-mêmes représentées par des modèles, qui isolent d'autres sous-systèmes avec des degrés variés d'approximation. Il en résulte que notre connaissance de la physique de la Galaxie – et plus spécialement de son problème central, la formation des étoiles – ne peut progresser que par approximations successives dans une description qui, même grossière, se doit

---

1. Dans ce livre, nous écrivons partout Galaxie avec un G majuscule, pour notre Voie lactée, afin d'éviter la confusion avec les autres galaxies.

d'être globale. À chaque étape, de nouvelles observations et une meilleure compréhension d'un sous-système modifient cette image globale et réagissent par là même sur la description des autres sous-systèmes.

La nature de l'astronomie, science d'observation où l'expérience directe est presque toujours impossible, interdit de tester la validité d'un mécanisme tendant à expliquer un ensemble d'observations, comme on le fait en physique expérimentale. Le plus souvent, on ne peut même pas avoir recours, comme en physique stellaire, à l'analyse statistique de familles relativement homogènes d'objets dont on peut espérer qu'un seul paramètre domine les variations observées. En effet, les propriétés qu'on veut décrire dépendent le plus souvent de l'environnement de l'objet.

Nous serons, au cours de l'exposé, amenés à donner avec peu de justifications des valeurs numériques pour certains paramètres galactiques. La confiance (ou les doutes) que l'on peut avoir en ces valeurs, et plus généralement dans l'identification des mécanismes essentiels, dépend de l'étendue de notre compréhension de l'ensemble de la Galaxie. Ce n'est que par la cohérence d'un ensemble complexe d'observations disparates que l'on pourra se convaincre de leur solidité.

## 1.1 Notre Galaxie : les ordres de grandeur

La Galaxie est un ensemble auto-gravitant. La partie la plus apparente est un *disque* d'étoiles en rotation. Le rayon de ce disque est d'environ 20 kpc (kiloparsec ; 1 parsec =  $3,08 \cdot 10^{18}$  cm). Son épaisseur est de quelques centaines de parsecs. Le Soleil se trouve à 7-8 kpc du Centre galactique et tourne autour de lui avec une vitesse de l'ordre de  $180\text{-}200 \text{ km s}^{-1}$ . Ces quantités sont encore incertaines : pour une discussion récente, voir Olling & Merrifield [364]. La période de rotation pour les régions du disque situées à ce rayon est donc de l'ordre de 240 millions d'années.

À ce disque s'ajoute un système sphéroïdal peu aplati qui s'étend plus loin que le disque. Sa partie centrale, le *bulbe*, est très lumineuse sur un rayon de l'ordre de 2 kpc, mais ses parties externes, le *halo*, sont peu brillantes.

Ce système d'étoiles peut être considéré comme sans collisions. Le temps entre collisions est en effet :

$$\tau = (n\sigma_v 2\pi R^2)^{-1} = 10^{28} \left( \frac{n}{\text{pc}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{R}{R_\odot} \right)^{-2} \left( \frac{\sigma_v}{\text{km s}^{-1}} \right)^{-1} \text{ s}, \quad (1.1)$$

où la densité numérique des étoiles est  $n$ ,  $R$  leur rayon moyen,  $\sigma_v$  leur dispersion de vitesse et  $R_\odot = 6,955 \cdot 10^{10}$  cm le rayon du Soleil. Au voisinage du Soleil,  $n < 1 \text{ pc}^{-3}$  et  $\sigma_v$  est de l'ordre de 10 à 30  $\text{km s}^{-1}$ . Le temps de collision est donc typiquement  $10^{10}$  fois l'âge de la Galaxie, qui est de l'ordre de  $3 \cdot 10^{17}$  s. Même dans le parsec central de la Galaxie, où la densité d'étoiles est  $10^7$  fois plus grande, le temps de collision reste très grand.

Supernova de Tycho, 468  
 SWAS (*satellite*), 62, 92, 225  
 synchrotron (rayonnement), **26–28**, 29,  
 145, 149, 303, 309, 310, 442,  
 444, 465  
 Système solaire, 333, 420, 421

## T

Taurus, 10, 396  
 Taylor (échelle de), 357  
 télescope spatial Hubble, 62, 69, 449, 455,  
 462, 470  
 température  
 d'antenne  
   *voir* antenne, 35  
 d'excitation, **37–38**, 45, 83  
 de brillance, 34, 83, 114  
 de lobe primaire, 35  
 de spin, 52  
 Tête de cheval (*nuage sombre*), 460, 461  
 thermalisation, **202–206**  
 Toomre (critère de), 407  
 transfert  
   équation de, 31, 114, 262  
   du rayonnement, **31–50**  
 trifide (Nébuleuse) (*région H II*), 458  
 trompes d'éléphant, 322  
 turbulence, 344, 378  
   compressible, 352, 355, 361, 372  
   échelle dissipative de, 350  
   échelle inertielle de, 350  
   échelle intégrale (ou énergétique) de,  
   350  
   général, 56, 124, 311, **345–366**, **372**,  
   396, 409  
   incompressible (de Kolmogorov),  
   **349–355**, 364  
   intermittence dans la, 206, 354,  
   **361–366**, 421

## U

UIB  
   *voir* bandes aromatiques  
 ULYSSES (*satellite*), 341, 421

## V

viriel (théorème du), 158, **367–374**  
 viscosité, 278, 288, 362  
   cinématique (ou moléculaire), 349,  
   352, 356  
   dynamique, 349  
   général, 414  
   turbulente, 352, 353, 357  
 VLA (*Very Large Array du NRAO*),  
 310, 465, 466, 468  
 VLT (*Very Large Telescope de l'ESO*),  
 452, 469, 472  
 Voigt (fonction de), 64  
 vortacité, 351, 354, 362–364

## X

X  
 absorption, 20, **130–132**, 162, 216  
 diffusion, **178–179**, 180, 304, 421  
 émission, 21, 51, 125, 128, 130, 155,  
   **216–217**, 218, 295, 309, 442,  
   451, 456, 465, 467, 468  
 raie, 125, 127–129, 304, 468

## Z

Zanstra (méthode de), 107  
 Zeeman (effet), 24

Composition : e-press, Angle 197 bd Zerktouni et rue d'Avignon  
Casablanca, Maroc  
Imprimé en France – Jouve, 18, rue Saint-Denis, 75001 Paris  
Dépôt légal : mars 2002