



Françoise Combes

Mystères de la formation des galaxies

Vers une nouvelle physique ?

UniverSciences



DUNOD

Mystères de la formation des Galaxies

Vers une nouvelle physique ?

Françoise Combes

Astronome à l'Observatoire de Paris,
membre de l'Académie des sciences

DUNOD

Illustrations de couverture :

(Bas) Galaxie en interaction, ARP 87 (© ESA / NASA - Hubble)

(Haut) : © ESO

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2008
ISBN 978-2-10-053942-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

AVANT-PROPOS	1
CHAPITRE 1 • REMONTER LE TEMPS ET OBSERVER L'UNIVERS JEUNE	3
Le télescope, une machine à remonter le temps	5
L'horizon de notre Univers	6
Horizon et expansion de l'Univers	8
Plusieurs distances vers l'Univers lointain	10
Le paradoxe d'Olbers	12
Les fluctuations initiales	13
Le développement des structures	16
La formation des galaxies requiert l'existence d'une matière peu ordinaire	18
Mais comment s'effondrent les structures de différentes tailles ?	20
L'évolution des galaxies : reportage en direct	22
Que de galaxies bleues, à grand décalage spectral !	26
Une surprenante inversion d'échelle	28
Les astronomes, archéologues des galaxies	30
D'où viennent les halos stellaires ?	33

CHAPITRE 2 • LES BÉBÉS GALAXIES DANS LEUR COCON	37
À la recherche des galaxies lointaines	39
Grandes cartographies Lyman- α	42
Distribution d'énergie dans une galaxie	46
Nature de la poussière	48
De grosses molécules jouent le rôle de petits grains de poussière	49
Des galaxies plus ou moins poussiéreuses	52
Un moyen de détecter les galaxies lointaines : les ondes millimétriques	52
Les résultats de la recherche en millimétrie	55
Le début de l'histoire...	59
Et toujours des questions sans réponse	62
 CHAPITRE 3 • À LA SOURCE DES TROUS NOIRS	69
Qu'est-ce qu'un trou noir ?	70
Les trous noirs de type galactique existent-ils ?	73
Trous noirs et galaxies	75
Combien y a-t-il de trous noirs dans l'Univers ?	76
Comment grandit un trou noir ?	79
Premiers trous noirs dans l'Univers jeune et trous noirs de masse intermédiaire	82
Trous noirs binaires et leur possible observation	85
L'observation des trous noirs binaires nous renseignerait sur la démographie des trous noirs	88
Activité des trous noirs : « <i>downsizing</i> »	89
Phénomènes d'autorégulation	94
Et si c'était l'inverse ?	96
Pour conclure...	96
 CHAPITRE 4 • SCÉNARIOS DE FORMATION DES GALAXIES	99
Formation des structures : « <i>Top-down</i> » ou « <i>Bottom-up</i> » ?	101
Formation des structures par fusion	105
Plusieurs scénarios pour les galaxies	107
L'évolution séculaire des galaxies	112

Les effets d'environnement	115
Bimodalité entre galaxies rouges et bleues	118
Le cas des elliptiques naines, ou naines sphéroïdales	124
CHAPITRE 5 • LE PROBLÈME DE LA MATIÈRE NOIRE	129
Structuration à grande échelle :	
les succès du modèle de matière noire froide CDM (<i>Cold Dark Matter</i>)	131
Les oscillations baryoniques : autre succès du modèle CDM	134
La matière visible suit-elle la matière noire ? Le biais	136
Matière noire et relations d'échelles entre les galaxies :	
loi de Tully-Fisher pour les spirales	141
Matière noire et plan fondamental pour les galaxies elliptiques	144
Le rapport entre masse noire et masse visible a-t-il évolué au cours du temps ?	148
Premier grand problème du modèle CDM : les cuspidés	150
Deuxième grand problème du modèle CDM : le moment angulaire	153
Troisième grand problème du modèle CDM : les halos satellites	155
Mais qu'est-ce que la matière noire?	158
CHAPITRE 6 • COMMENT RÉSOUDRE LES PROBLÈMES, ET AVEC QUELS INSTRUMENTS ?	165
Les succès, les problèmes : état des lieux	166
Des particules de matière noire en auto-interaction, ou en collision ?	167
Première piste : une meilleure connaissance des processus baryoniques complexes	170
Gravité modifiée	174
Problème de MOND dans les amas de galaxies	179
MOND et la formation des galaxies	181
Instruments futurs : ALMA, JWST, ELT, SKA...	184
GLOSSAIRE	193
INDEX	205
LÉGENDES ENCART COULEUR	209

*Que soit vivement remerciés mon
père André Combes pour sa relecture patiente
et ses demandes d'explications, et aussi Denis Bottaro
pour ses conseils avisés et son soutien sans faille.*

Avant-propos

L'Univers qui nous entoure est composé de galaxies, elles-mêmes rassemblées en groupes d'une dizaine, ou en amas de centaines de galaxies, puis en superamas. Comment se sont formées toutes ces structures ? D'où viennent-elles ?

Prenons le cas de notre galaxie, la Voie Lactée : c'est une bande blanche, « laiteuse », lumineuse car formée d'une grande quantité d'étoiles. Notre Soleil est une étoile parmi les centaines de milliards qui peuplent la Voie Lactée.

Une galaxie est un ensemble d'étoiles (typiquement une centaine de milliards), cohabitant avec du gaz et de la poussière, formant le milieu interstellaire dans lequel vont naître les nouvelles étoiles.

Le mystère de la formation des galaxies est complexe, et nécessite la connaissance de nombreuses notions et phénomènes concernant la naissance de l'Univers. Nous allons les présenter au fur et à mesure de notre parcours.

Tout d'abord nous présenterons au chapitre 1 le contexte dans lequel tous ces événements se placent : l'expansion de l'Univers à partir du Big-Bang, les premières « inhomogénéités », qui en croissant ont donné lieu aux premières structures. C'est le cadre

dans lequel tous nos « personnages » ou objets célestes vont évoluer, et il est essentiel de décrire d'abord leur décor, même si celui-ci est repris et brossé plus en détail par la suite.

Lorsque l'on parle de l'Univers, les distances et les durées sont déroutantes. Nous allons aborder des ordres de grandeur extraordinaires : la distance Terre-Soleil nous paraît déjà très grande, 150 millions de kilomètres, et la lumière met déjà 8 minutes à nous parvenir de notre étoile familière.

Toutefois, cette unité astronomique est encore trop petite pour nous servir de règle. Nous allons utiliser les années-lumière, qui représentent la distance que la lumière parcourt en un an, à la vitesse de 300 000 km par seconde. Mais la région de l'Univers que nous allons décrire mesure plus d'une dizaine de milliards d'années-lumière. Nous utiliserons donc une unité plus grande, le *parsec*, qui vaut 3,26 années-lumière, soit environ 3×10^{13} km. Cette unité vaut 200 000 fois la distance Terre-Soleil !

Enfin, l'espace et le temps vont nous apparaître intimement mêlés, contrairement à notre expérience de tous les jours. En astronomie, le télescope est une machine à remonter le temps, comme nous le verrons dès le premier chapitre. Cela permet d'observer aujourd'hui le passé des galaxies lointaines ; c'est pourquoi nous parlerons d'elles au présent. Mais il s'agira des étapes de leur jeunesse à jamais révolue ! Le mélange des temps pourra surprendre au départ, mais va devenir bien vite une habitude.

En préambule à chaque chapitre apparaît un bref résumé de celui-ci. Cela permet de se faire une idée de son contenu général, et de découvrir les termes et les notions qui vont y être définis. La lecture des divers chapitres ne sera pas forcément linéaire et continue, et ces résumés permettent de vagabonder d'un chapitre à l'autre, avec des sauts et des retours, selon la logique préférée de chaque lecteur.

Bien que les termes techniques soient définis la première fois qu'ils apparaissent, il est possible de consulter le glossaire à n'importe quel moment, pour y retrouver leur définition ainsi que celle des unités utilisées.

Chapitre 1

Remonter le temps et observer l'Univers jeune

Si notre connaissance de la formation des galaxies a fait des progrès immenses ces dernières années, c'est grâce à la puissance accrue des télescopes, qui peuvent détecter les galaxies très lointaines, et ainsi remonter dans le temps, pratiquement jusqu'à 95 % de l'âge de l'Univers. Quel est le volume d'Univers qui nous est ainsi accessible ? Il existe une limite naturelle qui est celle de l'horizon, aux confins duquel nous remontons aujourd'hui.

Pour cartographier ce volume accessible, il nous faut définir des distances, et dans un Univers en expansion ce n'est pas facile : il existe plusieurs distances différentes, un phénomène auquel nous ne sommes pas habitués dans l'Univers local.

Comment les premières structures se sont-elles formées ? Dans la soupe initiale faite de particules ionisées, de matière noire et de photons, les fluctuations primordiales de densité qui sont les graines des structures actuelles, sont observées aujourd'hui sous forme d'anisotropies du fond cosmologique micro-onde, mais elles sont extrêmement faibles. Auront-elles le temps de s'effondrer sous l'effet de leur gravité, malgré l'expansion de l'Univers ?

Les images à haute définition du télescope spatial Hubble permettent non seulement de suivre l'évolution en direct, en observant les galaxies lointaines, mais aussi d'observer les étoiles individuelles dans les galaxies proches, afin de connaître leurs âges respectifs, et de retrouver ainsi l'évolution des galaxies comme par une reconstitution historique.