

## **Grands relevés : leur rôle dans l'étude de l'évolution des galaxies**

Rodrigo Ibata et Hélène Ibata

*Observatoire de Strasbourg*

**Abstract.** The next generation of large systematic sky surveys are well underway, and many more ambitious surveys are planned. As well as probing the most distant galaxies, these surveys will give us a wealth of information on nearby galaxies with resolved stellar populations. The analysis of local galaxies will complement our much more restricted view of the high-redshift universe, and will allow a more complete understanding of the evolution of galaxies. We review some of the outstanding problems in the field of galaxy evolution and discuss several challenges that lie ahead.

Une simple recherche de tous les articles contenant les mots-clés "galaxy evolution" dans l'"Astrophysics Data System" (ADS) pourrait décourager même les plus enthousiastes, qui se rendraient vite compte de l'ampleur de la tâche, devant un nombre d'articles qui s'élève à plus de 20000 et qui ne cesse d'augmenter.

Pourquoi tant d'intérêt pour ce sujet ? Tout d'abord parce que les galaxies sont les blocs de construction de base de la structure à grande échelle de l'univers ; au cours de leur évolution, qui est très complexe, elles interagissent avec les étoiles, et permettent à ces dernières de synthétiser les éléments nécessaires pour notre vie. Il y a aussi un facteur esthétique. Mais la vraie raison est qu'elles sont si compliquées que plusieurs générations de recherche astronomique n'ont pas réussi à fournir d'explication satisfaisante même pour les questions les plus fondamentales. Cela veut dire qu'il y a encore un long chemin à parcourir, ce qui fait de l'évolution des galaxies un domaine fascinant et plein de défis.

Il n'est peut-être pas correct de parler d'un nombre astronomique concernant les 20000 articles publiés sur le sujet, mais en tout cas, l'énorme quantité de connaissances à assimiler sur le sujet peut effrayer les esprits faibles, dont le mien. Même les titres à eux seuls rempliraient un livre de 1000 pages.

L'objet de cette communication est donc difficile. Il faudrait une série de séminaires donnés par des experts pour expliquer de manière utile les problèmes les plus significatifs, lesquels sont de toutes façons déjà bien

connus. C'est pourquoi nous avons choisi de donner une perspective assez personnelle et plutôt restreinte sur la question.

## 1. Ce que nous ne savons toujours pas sur les galaxies et leur évolution

Dans une revue critique de cosmologie, Mike Disney (2000) a récemment pr esent e une liste des questions essentielles concernant les galaxies que jusqu'à présent nous n'avons pas réussi comprendre entièrement (son objectif était de suggérer par analogie que la cosmologie présente probablement des failles similaires, dont on se rend moins compte parce que la cosmologie est bien moins contrainte par les observations). Voici sa liste de questions fondamentales qui restent à résoudre :

1. Le fait que notre connaissance est déformée par les effets de sélection.
2. En quoi les galaxies consistent principalement ?
3. Comment elles se sont formées et quand ?
4. Quel est leur degré d'extinction interne ?
5. Ce qui contrôle leur taux de formation stellaire global.
6. Quel est le rôle joué par leur noyau et leur halo ?
7. Y a-t-il de réelles corrélations entre leurs propriétés globales ?
8. Comment maintenir l'équilibre gaz / étoiles ?

Nous restons donc d'une ignorance étonnante sur le sujet. Examinons rapidement chacun de ces problèmes.

### 1.1 Une connaissance déformée par les effets de sélection

Ce problème se présente partout en astronomie, chaque fois que nous essayons de déduire les propriétés globales d'une population, à partir d'une analyse d'un sous-ensemble accessible au moyen d'observations.

Nous devons nous souvenir que même dans la Voie Lactée, la plupart des sources astronomiques restent hors de portée de l'instrumentation la plus puissante que nous ayons sous la main. Nous n'avons même pas de recensement complet des étoiles qui se trouvent à moins de 10 pc du Soleil (Scholz et al. 2001).

Afin de comprendre les propriétés d'une galaxie quelconque, nous sommes forc es d'étudier soit l'ensemble, soit les objets les plus lumineux de cette galaxie, et les conclusions auxquelles nous parvenons sont faussées par des processus physiques, y compris ceux qu'on appelle "  volution galactique ", et qu'on ne comprend pas compl etement.

Ainsi par exemple, les premières études de la morphologie des galaxies étaient limitées aux régions spectrales bleues, à cause de la réponse des plaques photographiques qui étaient utilisées comme détecteurs. Maintenant qu'on a des détecteurs infra-rouge, on se rend compte que ces études étaient limitées aux régions qui contenaient des étoiles jeunes et des étoiles en formation. Il est fort probable que les études courantes des galaxies à grands décalage spectral soient pareillement limitées.

Un autre bon exemple est la question des galaxies à basse brillance de surface. La plupart des galaxies ont une brillance de surface à peine supérieure à celle du ciel terrestre nocturne. Est-ce une coïncidence ? Cela semble peu probable. Dans un relevé du télescope spatial Hubble, sur lequel je travaille, j'ai rencontré un groupe ou un amas de galaxies à basse brillance de surface. Le fond du ciel au niveau de l'orbite de Hubble autour de la terre est 2 à 3 magnitudes plus faible que le ciel le plus sombre que l'on puisse voir du sol. C'est grâce à cela qu'on peut accéder à des sources très faibles et diffuses. Les galaxies dans cette image sont plusieurs magnitudes au-dessous de la limite de détection des relevés couvrant tout le ciel. Etant donné que la brillance de surface est indépendante de la distance, (sauf pour la région à haut redshift, où la brillance de surface chute proportionnellement à  $(1+z)^4$ ) cela suggère qu'il pourrait y avoir beaucoup d'autres galaxies à basse brillance de surface isolées ou dans des amas, peut-être même proches, qui attendent encore d'être détectées. Il pourrait y avoir une quantité importante de matière cachée dans ces galaxies. Si cela était le cas, notre connaissance actuelle de la distribution de matière à grande échelle, et aussi notre connaissance de l'évolution des galaxies, seraient incomplètes ou incorrectes (O'Neil & Bothun 2000).

Les grands relevés en cours pourront aider à compléter le recensement des galaxies à basse brillance de surface et les relevés à multi-longueur d'onde nous donneront une vue plus complète, qui améliorera considérablement notre connaissance de ces grandes structures.

## 1.2 *En quoi les galaxies consistent principalement*

Les études cinématiques des galaxies, à commencer par celles de Zwicky (1937), nous ont montré que les galaxies nous cachent bien plus qu'elles ne nous montrent. Depuis, soixante-dix ans se sont écoulés, et nous avons appris énormément de choses sur ce que la matière noire n'est PAS, beaucoup de choses sur la façon dont elle est distribuée autour des galaxies et des amas de galaxies, un peu sur la façon dont elle est distribuée à de plus grandes échelles, mais nous n'avons toujours aucune idée de ce qu'elle est véritablement.

Examinons plus en détail ces questions, qui apportent de bons exemples de la façon dont fonctionnent les grands relevés :

Il y a dix ans, une grande partie de la communauté astronomique supposait que la matière noire était faite d'objets faibles sous-stellaires qui remplissaient les halos stellaires. Une autre possibilité envisagée était que le halo était composé de trous noirs primordiaux de masse stellaire ou planétaire. (Voir, par exemple, Gould 1993). La possibilité de découvrir le constituant principal de l'univers déclencha une course entre plusieurs groupes de recherche à travers le monde entier. Les deux groupes les plus importants dans cette course, le MACHO américain et l'EROS français, avaient un comportement très différent de celui des groupes d'astronomie habituels jusqu'alors. Et cela, pas seulement à cause de leur nom ni à cause de la présence de physiciens des particules parmi les chercheurs.

Pour ces expériences, il a fallu surveiller des dizaines de millions d'étoiles faibles dans les nuages de Magellan, pendant plusieurs années. Leur objectif était de détecter la signature achromatique caractéristique de l'amplification des sources, par effet de micro-lentille gravitationnelle. La quantité de données et la cadence à laquelle elles arrivaient étaient sans précédent en astronomie. Pour réduire et analyser un tel volume d'information, il a fallu une équipe d'ingénieurs-systèmes et des années de développement de logiciels automatiques adaptés au problème.

Le résultat a été que ces groupes ont fini par obtenir incomparablement plus d'informations qu'auparavant sur les variations de luminosité des populations stellaires. Rétrospectivement, on peut s'étonner de les voir s'étonner trouver tant de nouveaux types de variables. Mais en tout cas, ce qui est clair, c'est qu'on a là un très bon exemple du fait que les grands relevés, menés par de grandes équipes bien organisées, permettent d'aller largement plus loin que les initiatives individuelles. Si on peut faire le bilan de leur travail, les deux équipes ont trouvé moins de matière noire que prévu, mais beaucoup plus d'autres informations astrophysiques, qu'elles ne recherchaient pas. Ce mode de fonctionnement est typique des études menées au moyen de grands relevés.

### *1.3 Comment les galaxies se sont formées, et quand ?*

Les simulations de Cold Dark Matter, c'est à dire la matière noire non collisionnelle et dynamiquement froide, prédisent que les galaxies se sont formées par accrétion et fusion de petits grumeaux sous-galactiques (White 1978).

Etant donné les interactions évidentes entre les galaxies dans l'univers local, et la découverte de sous-structures dans les halos de galaxies, cette affirmation paraît vraisemblable. Pourtant, on ne sait toujours pas s'il s'agit ici du mécanisme principal dans le développement de grandes galaxies isolées comme la Voie Lactée. Pendant plusieurs années, la théorie de Cold Dark Matter a été transformée tant de fois pour s'ac-

corder aux nouvelles données qu'il est difficile de prendre trop au sérieux les prédictions actuelles concernant l'époque de formation des galaxies.

Notre propre disque galactique est très vieux et contient des étoiles qui selon certaines études ne sont que 10% plus jeunes que les plus vieilles populations stellaires de la Galaxie (Knox et al. 1999). Le fait que ce matériau soit retenu dans le disque indique que la Voie Lactée n'a pas absorbé d'autre galaxie de masse importante (c'est-à-dire de plus de  $\sim 10\%$  de la masse du disque) depuis cette époque-là (Toth et Ostriker 1992). J'ai moi-même procédé à un relevé des étoiles carbonnées du halo afin d'identifier les accrétions de galaxies naines dans la Voie Lactée (Ibata et al. 2001). La seule source identifiée est une petite galaxie naine, la galaxie du Sagittaire. Il semble donc que le plus gros de la Voie Lactée, y compris son disque et son halo, ont été formés très rapidement. Il se pourrait très bien que les structures de matière noire se forment par la coalescence de nombreuses petites structures, mais si cela se produit avant l'époque principale de formation d'étoiles, on ne peut pas vraiment dire que les "galaxies" se forment de cette façon. Un résultat intéressant qui semblerait apporter du poids à cet argument est la détection d'un gigantesque nuage de gaz froid, de masse environ  $10^{11}$  masses solaires, à  $z=4$ , près de la galaxie ultralumineuse APM08279 (Papadopoulos et al. 2001). Ce nuage de masse galactique est aussi de taille galactique, mais semble privé d'étoiles. Ce pourrait être une galaxie avant la formation d'étoiles. Il semble donc très intéressant de continuer à chercher des objets semblables. Seuls les grands relevés pourront vraiment permettre d'observer d'autres objets de ce genre. Celui-ci n'a été détecté que par hasard, parce qu'il se trouvait juste à côté d'un phare très lumineux, qui avait attiré notre attention.

#### 1.4 Le degré d'extinction interne des galaxies

Les galaxies sont-elles transparentes, ou n'en voyons-nous que l'enveloppe externe (voir, par exemple, Bosma et al. 1992)? Cette question est fondamentale pour beaucoup d'études, y compris les études dynamiques de notre équipe à Strasbourg. Nous essayons de comprendre la stabilité des disques des galaxies spirales afin de contraindre la quantité de matière noire dans les parties centrales. L'analyse part des données cinématiques de ces galaxies et suppose qu'on mesure la distribution de vitesse sur la ligne de visée. Si seule l'enveloppe de la galaxie est observée, cette analyse sera erronée.

#### 1.5 Ce qui contrôle le taux de formation stellaire global des galaxies

Les galaxies se forment par accumulation et fusion de nombreuses sous-structures, dont au moins certaines contiennent un composant gazeux. Le processus de fusion comprend donc des collisions de gaz et les

chocs qui en résultent causent la formation d'étoiles, comme on le voit dans de nombreux systèmes interactifs. Toutefois, lorsqu'elles ne sont pas en interaction, les galaxies évoluent de façon séculaire ; il y a une accréation relativement limitée de gaz environnants. Durant ces périodes d'isolement, les galaxies consomment leurs propres réserves de gaz et recyclent le gaz rejeté par les étoiles, l'ensemble étant mélangé de façon complexe par un brassage dynamique comprenant une "fontaine galactique". Nous ne savons toujours pas si l'évolution d'une galaxie spirale normale est déterminée par la fusion ou par l'évolution séculaire.

### 1.6 *Le rôle joué par le halo et le noyau des galaxies*

On suppose que presque toutes les galaxies passent par une phase active, dans laquelle leur noyau peut changer radicalement son environnement. Le flux de gaz vers le centre, qui est nécessaire pour alimenter l'activité du noyau, semble être régulé par la formation et la dissolution de la barre (Sellwood et Moore 1999). Comme la barre est en partie responsable de la structure spirale, il semble que la formation du trou noir central ait des implications globales pour la structure et l'évolution de la galaxie. Il reste encore à trouver comment.

La structure du halo définit le potentiel dans lequel le gaz et les étoiles tombent, ainsi que le potentiel dans lequel les nouvelles générations d'étoiles se forment. Les théories dites de la "Cold Dark Matter" prédisent que les galaxies ont un halo de matière noire avec une distribution piquée au centre (Navarro et al. 1997). Le profil est dit "universel" ( $1/r$  au centre,  $1/r^3$  dans les régions externes). Cette prédiction va à l'encontre des observations de la courbe de rotation des galaxies à faible brillance de surface (de Blok et al. 2001). De plus, ces mêmes simulations de la "Cold Dark Matter" prévoient l'existence d'une population de centaines de petits satellites autour des galaxies normales comme la Voie Lactée, qui ne sont pas observés en réalité (Moore et al. 1999). En fait, comme la gravité ne donne pas d'échelle caractéristique, dans cette description de l'évolution des grandes structures, les galaxies sont des versions réduites d'amas de galaxies.

Il est possible que certains processus de collision, associés aux baryons (comme par exemple des explosions de supernovae), réorganisent la distribution de matière noire en agissant sur les baryons. Les détails de cette interaction entre le halo de matière noire et la matière visible restent un mystère, mais il est raisonnable de supposer que c'est un des facteurs dominants de l'évolution des galaxies.

### 1.7 *Y a-t-il de réelles corrélations entre leurs propriétés globales ?*

La relation Tully-Fisher, la relation Faber-Jackson et le plan fondamental sont des corrélations entre les propriétés physiques globales des

galaxies. Cependant, toutes les galaxies ne s'y conforment pas, en particulier les galaxies à basse brillance de surface. Certains affirment qu'elles résultent d'effets de sélection (O'Neil et al. 2000).

### 1.8 Comment maintenir l'équilibre gaz / étoiles ?

Du gaz froid forme des étoiles et la formation des étoiles en retour chauffe le gaz. L'équilibre qui est probablement maintenu dans la plupart des galaxies normales résulte d'une sorte de distribution climatique stable. Si un tel processus existe, nous n'en connaissons pas les détails.

## 2. Pourquoi le problème est-il si difficile à résoudre ?

La raison pour laquelle une compréhension quantitative de l'évolution galactique est si difficile vient de ce qu'il s'agit d'un problème fortement non-linéaire. Même avec la physique propre de la gravitation newtonienne, l'évolution dynamique du système dépend fortement de paramètres de départ inconnus. La situation est encore pire quand on considère les problèmes liés à la formation d'étoiles, pour laquelle nous n'avons pas de théorie statistique. Mais la régularité de la fonction de masse initiale dans un si grand nombre d'environnements différents (Kroupa 2001) me laisse espérer que cela sera développé un jour.

Les défis sont semblables à ceux qui se présentent pour les chercheurs qui tentent de donner des modèles climatiques de la Terre, mais j'ai bien l'impression que le cas de la Terre est bien plus facile à résoudre, puisque la source d'énergie principale dans cette situation (c'est-à-dire le Soleil), n'est pas affectée par les conditions climatiques sur Terre.

Pour finir, nous ne savons même pas si notre description de la nature, comme par exemple la théorie de la gravitation donnée par Newton est applicable aux échelles galactiques.

## 3. Pourquoi persister à observer l'univers local ?

Tout le monde se passionne pour l'observation des galaxies les plus distantes. C'est ce que demande la presse ; c'est ce qui semble retenir le plus l'attention des comités d'attribution de temps d'observation et des comités de recrutement à travers le monde. Alors pourquoi s'obstiner à observer les galaxies proches, ou même pire, les étoiles de la Voie Lactée ?

Après tout, on voit les galaxies lointaines telles qu'elles étaient quand la lumière en a émané ; nous pouvons donc observer directement différentes étapes de leur évolution. Si nous pouvions étudier l'histoire humaine de la même façon, nous le ferions certainement.

Néanmoins, cette façon de procéder est le chemin le plus ardu. Les galaxies à grand décalage spectral sont presque des sources ponctuelles

quand elles sont observées avec les instruments actuels ; les problèmes liés aux effets de sélection dont j'ai parlé plus tôt sont beaucoup plus sévères ; mais le plus important, c'est que les spectres de ces galaxies demeurent largement hors de portée, alors qu'on en tirerait l'essentiel de l'information physique.

La solution des paresseux, c'est d'attendre que les galaxies arrivent à nous au temps présent, qu'elles soient proches et sous la main, ce qui donne aux observations beaucoup plus d'information. La difficulté de cette approche, c'est de démêler l'histoire évolutionnaire des galaxies quand cette histoire, comme on l'a vu, est fortement non-linéaire. De toute évidence, les deux options sont complémentaires, mais en étant "paresseux", on peut davantage voir les petites structures comme les galaxies naines, ou les sous-structures des grandes galaxies ; on peut aussi étudier la dynamique interne de galaxies et étudier en détail les populations stellaires qui constituent une grande partie de leurs composantes observables. Personnellement, je préfère la solution des paresseux, puisqu'elle me permet d'observer des sujets visuellement spectaculaires ; elle me permet aussi d'obtenir des données de très bonne qualité, avec lesquelles je peux construire des modèles détaillés.

#### 4. Les grands relevés

Dans le passé, les études les plus marquantes de l'évolution galactique ont été menées au moyen de grands relevés, et c'est une tendance qui va sûrement s'accentuer, comme Yannick Mellier l'explique dans cet ouvrage. La raison en est que les études d'évolution à grand décalage spectral ont besoin d'un matériel statistique important.

Dans l'univers proche, c'est-à-dire la Voie Lactée, le Groupe Local et les galaxies proches, on a besoin de couvrir une grande surface et de sonder jusqu'à de très faibles magnitudes. C'est le terrain parfait pour les grands relevés.

Les bases de données de nombreux recensements seront mises à la disposition de la communauté astronomique dans les années à venir. Elles comprennent 2MASS, DENIS, TERAPIX, SDSS, DIVA, GAIA, etc, comme Daniel Egret l'explique en détail dans ce volume. Les programmes de grande ampleur, de type "pierre angulaire", sont d'un grand intérêt pour les recensements de l'évolution de la Voie Lactée et du Groupe Local. Les premiers recensements CCD d'une fraction significative du ciel (2MASS, DENIS, SDSS) commencent tout juste à être accessibles, et ils nous donnent les moyens d'étudier en détail les petites et grandes structures des galaxies du le Groupe Local, à partir des populations stellaires. En y associant les mesures de distance et de mouvement propre des missions astrométriques à venir (DIVA, FAME, GAIA), il deviendra



possible de découvrir l'évolution dynamique de notre Galaxie, et celle de ses satellites. Une telle richesse d'informations (mesures photométriques d'étoiles individuelles, distances, vitesses radiales, mouvements propres) nous donnent un tableau complet de ces galaxies au temps présent, et nous permet de déduire leur évolution passée en analysant leur évolution dynamique et celle de leurs populations stellaires. Mais nous risquons alors d'être submergés sous les données. Ce grand volume d'information nécessitera de nouvelles méthodes d'analyse. Il faudra optimiser les traitements au maximum. Une solution sur laquelle nous travaillons à Strasbourg consiste à couper les calculs en petits segments pour pouvoir procéder à des calculs parallèles sur des ordinateurs individuels. Il faudra peut-être que la communauté s'organise pour produire des structures de données dans un format standard, et pour produire des outils de réduction et analyse qui soient suffisamment robustes pour bien fonctionner sur de nombreux problèmes. Il est évident que nous entrons dans l'ère de l'Observatoire Virtuel...

## 5. Conclusion

A travers cet exposé, nous avons eu seulement un tout petit aperçu de l'étendue du problème. J'ai laissé de côté la majorité des questions, mais j'espère vous avoir convaincus d'une chose au moins : il y a toujours une immense quantité de travail à faire sur le sujet, et il est certain qu'une partie importante de ce travail sera effectuée au moyen des grands relevés à venir. Il faut maintenant relever ce défi sans s'effrayer devant les quantités de données en jeu. L'observatoire virtuel permettra d'aborder des problèmes d'une telle ampleur.

## Références

- [1] Bosma, A., Byun, Y., Freeman, K. C., Athanassoula, E. 1992, ApJ 400, L21
- [2] de Blok, W., McGaugh, S., Bosma, A., Rubin, V. C. 2001, ApJ 552, L23
- [3] Disney, M. J, 2000, General Relativity and Gravitation 32, 1125
- [4] Gould, A. 1993, ApJ 404, 451
- [5] Ibata, R., Lewis, G. F., Irwin, M., Totten, E., Quinn, T. 2001, ApJ 551,294
- [6] Knox, R., Hawkins, M., Hambly, N. 1999, MNRAS 306, 736
- [7] Kroupa, P. 2001, MNRAS 322, 231
- [8] Moore, B., Ghigna, S., Governato, F., Lake, G., Quinn, T., Stadel, J., Tozzi, P. 1999, ApJ 524, L19

- [9] Navarro, J., Frenk, C., White, S. 1997, *ApJ* 490, 493
- [10] O'Neil, K., Bothun, G. 2000, *ApJ* 529, 811
- [11] O'Neil, K., Bothun, G., Schombert, J. 2000, *AJ* 119, 136
- [12] Papadopoulos, P., Ivison, R., Carilli, C., Lewis, G. 2001, *Nature* 409, 58
- [13] Scholz, R.-D., Meusinger, H., Jahreiß, H. 2001, *A&A* 374, L12
- [14] Sellwood, J. A., Moore, E. M. 1999, *ApJ* 510, 125
- [15] Toth, G. and Ostriker, J. P. 1992, *ApJ* 389, 5
- [16] White, S. 1978, *MNRAS* 184, 185
- [17] Zwicky, F. 1937, *ApJ* 86, 217