

Quatrième partie

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le relevé ESO-Sculpteur

Je décris dans une première partie les divers résultats concernant le relevé ESO-Sculpteur. Celui-ci a produit un catalogue photométrique (Arnouts et al. 1997) et un suivi spectroscopique (Bellanger et al. 1995) dans un pinceau étroit de l'Univers à $z \lesssim 0.6$. Ces données ont fourni la première cartographie des grandes structures à $z \simeq 0.5$ (Bellanger & de Lapparent 1995), montrant la même alternance de vides et feuillets qu'à faible décalage spectral. Par le soin apporté à la calibration en flux des spectres et aux mesures des décalages vers le rouge, nous avons obtenu une classification spectrale dont les corrections- k et magnitudes absolues résultantes permettent une séparation des différents groupes de galaxies géantes et naines. Nous avons ainsi mis en évidence les composantes géantes et naines des fonctions de luminosité "intrinsèques" des galaxies à $z \sim 0.5$, connues uniquement dans le groupe local (de Lapparent et al. 2003; de Lapparent 2003).

La connaissance détaillée des fonctions de luminosité a permis des analyses fines des distributions en magnitude et décalage spectral, ainsi que du regroupement spatial des galaxies. D'une part, nous avons pu montrer que l'excès de galaxies dans les comptages profonds est causé principalement par une évolution marquée des galaxies spirales tardives et Irrégulières (de Lapparent et al. 2004). Nous avons de surcroît effectué la première mesure des composantes géantes et naines dans la fonction de corrélation des galaxies à $z \sim 0.5$ (de Lapparent et al. 2003), et obtenu des indications sur la répartition relative des différents types de galaxies au sein des halos de matière noire au moyen de la fonction de corrélation à 2-points (de Lapparent & Slezak 2007). Par une revue de l'ensemble des mesures existantes de fonctions de luminosité, je montre la nécessité de nouveaux échantillons statistiques avec types morphologiques précis et fiables pour permettre la mesure des fonctions de luminosité "intrinsèques" (de Lapparent 2003). Enfin, un suivi dans l'infrarouge moyen à $12\mu\text{m}$ a confirmé l'excès dans les comptages normalisés, que nous modélisons au moyen des populations de galaxies normales du modèle PÉGASE.3 (Fioc et al. 2011) et d'une petite population supplémentaire de galaxies massives ultra-lumineuses dans l'infrarouge et évoluant selon un scénario de galaxies elliptiques (Seymour et al. 2007; Rocca-Volmerange et al. 2007).

Dans ce mémoire, je propose des analyses statistiques complémentaires du relevé ESO-Sculpteur. J'évalue d'abord le niveau de significativité de la surdensité marquée située dans l'intervalle $0.41 < z < 0.46$, soit 170 Mpc en distance comobile, et présentant un contraste de densité de 2.1. Pour cela j'utilise la fonction de corrélation le long de la ligne-de-visée et en séparation projetée. J'obtiens 2.6σ ou 3.3σ si j'inclus ou non cette structure inhabituelle dans le calcul de la fonction de corrélation, cette structure causant un excès de signal aux échelles entre 3 et 10 Mpc qui n'est pas observé dans les mesures effectuées à partir de relevés plus volumineux.

Je propose une autre estimation de la fréquence d'occurrence de telles structures en utilisant les simulations numériques et semi-analytiques du "Millennium" (Springel et al. 2005; De Lucia et al. 2006). Pour cela j'extrais 363 pinceaux étroits de même géométrie que le relevé ESO-Sculpteur, dans lesquels je recherche des fluctuations de densité avec les mêmes caractéristiques que la surdensité à $0.41 < z < 0.46$. La probabilité est faible, de moins de 1 à 3% selon la référence utilisée, indiquant que de telles structures sont rares. Si la surdensité détectée dans le relevé ESO-Sculpteur s'étendait angulairement sur 2×2 degré-carrés avec le même contraste de densité de ~ 2.1 , elle atteindrait un niveau de significativité de 4 à 5σ , ce qui serait plus difficile à réconcilier avec les résultats des simulations numériques.

En outre, par comparaison avec les types spectro-photométriques obtenus par l'ajustement des scénarios évolutifs PÉGASE.2, je montre des différences systématiques avec la classification spectrale, cette dernière étant resserrée autour du type central Sbc. Pour les galaxies les plus brillantes, ces différences sont en lien avec l'orientation des fentes de spectroscopie par rapport à l'orientation du grand axe projeté des galaxies. Je montre par ailleurs que les très grandes fluctuations telles que la surdensité à $0.41 < z < 0.46$ peuvent être détectées au moyen des décalages vers le rouge photométriques lorsque la précision de la photométrie optique est au plus de 0.01 mag., ou 0.05 mag. si l'on dispose de surcroît de la photométrie infrarouge proche. En revanche, une mesure précise à 1% des décalages photométriques dans l'intervalle $0 < z < 0.7$ nécessite la photométrie optique et infrarouge, avec une dispersion maximale de ~ 0.01 mag.

Ces analyses à partir des simulations du Millennium et des mesures de décalages vers le rouge photométriques posent des limites intéressantes sur la capacité des futurs relevés tels que le "Dark Energy Survey" et le "Large Synoptic Survey", ainsi que le projet "EUCLID", à détecter des structures atypiques dans la distribution spatiale des galaxies.

Le catalogue EFIGI

Dans la deuxième partie du mémoire, je présente le relevé morphologique EFIGI. Celui-ci a produit un catalogue de galaxies proches avec images bien résolues dans les bandes *ugriz* du relevé SDSS, et couvrant 6670 deg^2 du ciel. La morphologie visuelle se présente sous la forme de 16 attributs de forme, et du type de Hubble (Baillard et al. 2011). Ces attributs fournissent pour la première fois une description quantitative de la séquence de Hubble en termes de rapport de luminosité bulbe/total et d’enroulement des bras spiraux. Les fréquences des barres et anneaux sont mesurées pour chaque type morphologique. On confirme que les galaxies de type spirale Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc, Scd sont de grands systèmes et que parmi ces types, les naines sont rares ; seul deux objets sont trouvés dans le catalogue. En revanche, les galaxies de type Sd, Sdm, Sm sont systématiquement plus petites que les spirales Sa à Scd, avec une décroissance progressive le long de la séquence de Hubble, et les galaxies cE, Im et dE sont bien des galaxies naines (de Lapparent et al. 2011).

Dans un deuxième temps, j’ai utilisé le catalogue EFIGI pour tester les nouveaux ajustements multi-profil insérés par E. Bertin dans SExtractor. Une somme d’un bulbe avec profil “de Vaucouleurs” et d’un disque exponentiel fournit des mesures en très bon accord avec les magnitudes d’ouverture, et présente l’avantage de récupérer la fraction du flux manquant qui varie systématiquement avec le type morphologique. L’ajustement des modèles permet aussi de s’affranchir des problèmes de contamination qui affectent les magnitudes d’ouverture.

Ces nouvelles mesures des magnitudes des galaxies de l’échantillon EFIGI me permettent de montrer que l’analyse effectuée par la chaîne de traitement du relevé SDSS morcelle 9% des galaxies d’EFIGI en différentes unités, ce qui crée un déficit de flux dans les mesures, qui peut atteindre 10 magnitudes. En outre, l’ensemble des galaxies d’EFIGI (à $g \simeq 9 - 14$) présente un déficit systématique de flux de 2 à 0.5 mag. (depuis les plus brillantes vers les plus faibles), à cause d’une surestimation croissante du fond de ciel pour les objets étendus. De nombreuses sources des catalogues photométriques du SDSS sont en outre des artefacts, et cela ramène la complétude photométrique du catalogue EFIGI à plus de 80% aux magnitudes brillantes dans les cinq filtres.

Ces mesures fiables des magnitudes des galaxies d’EFIGI me permettent de revisiter la relation couleur-magnitude des galaxies. Je confirme qu’il n’y a pas de bi-modalité dans ce plan, mais un glissement progressif selon les types morphologiques. Les erreurs de photométrie des catalogues du SDSS contribuent en outre à rétrécir les intervalles de couleur et de magnitudes pour les galaxies des différents types morphologiques. Ainsi, les pics ou vallées de densité éventuellement détectés dans d’autres analyses dépendent des effets de sélection affectant les types morphologiques de l’échantillon considéré.

Je montre ensuite que les types spectro-photométriques obtenus par l’ajustement des scénarios de PÉGASE.2 au moyen de ZPEG exhibent une dispersion importante par rapport aux types morphologiques. L’effet principal est le rougissement des distributions en énergie spectrale causée par l’inclinaison des galaxies, qui cause une dispersion des types spectro-photométriques sur plusieurs types morphologiques, ainsi qu’un décalage systématique vers les types spectro-photométriques plus précoces pour les galaxies spirales de morphologie Sa jusqu’à Scd.

J’examine ensuite les fonctions de luminosité de l’échantillon EFIGI. La fonction globale est bien ajustée par une loi de Schechter. Le catalogue EFIGI permet pour la première fois à partir d’une photométrie de qualité et pour de grands échantillons statistiques de calculer les fonctions de luminosité intrinsèques par type morphologique. Je retrouve les fonctions bornées pour les galaxies elliptiques, lenticulaires et spirales géantes, et les fonctions croissantes aux faibles magnitudes pour les spirales tardives, pour les irrégulières et les naines elliptiques. L’utilisation de la photométrie des catalogues du SDSS introduit des biais causant un déficit d’objets aux magnitudes brillantes et faibles pour tous les types. J’utilise le catalogue EFIGI pour illustrer le mélange dramatique des types morphologiques lorsqu’on utilise une séparation en couleur ou en type spectro-photométrique.

Enfin, je présente des résultats préliminaires concernant les couleurs des bulbes et des disques ajustés par SExtractor sur les galaxies du catalogue EFIGI. Les couleurs des disques des spirales exhibent un bleuissement progressif le long de la séquence de Hubble, alors que les bulbes sont aussi rouges ou plus rouges que ceux des elliptiques, suggérant un rougissement par les poussières, principalement pour les spirales de types Sa, Sab, Sb et Sbc.

Perspectives

Les différences systématiques mises en évidence entre les types spectraux, les types spectro-photométriques, et les types morphologiques illustrent la difficulté à déterminer de façon cohérente le type d'une galaxie proche ou lointaine. La morphométrie, ou mesure des paramètres de forme des galaxies, apparaît comme une approche performante pour effectuer une séparation univoque des différents types physiques de galaxies, grâce à la caractérisation en taille et en flux des composantes dynamiques des galaxies, et donc des populations stellaires sous-jacentes. La morphométrie permet en outre la mesure des fonctions de luminosité intrinsèques, qui sont non seulement utiles pour contraindre les mécanismes de formation des galaxies au sein des halos de matière noire, mais constituent des outils indispensables pour déterminer les effets de sélection dans les relevés observationnels, systématiquement limités en flux. Les fonctions de luminosité sont en effet l'outil de base pour prédire les distributions de comptages, et les répercussions sur l'évolution des galaxies sont importantes par exemple dans l'infrarouge moyen. Un complément important dans le calcul des fonctions de luminosité sera la prise en compte des limitations en brillance de surface (voir Cross & Driver 2002).

Les effets systématiques dans la photométrie des galaxies brillantes du relevé SDSS, que nous avons mis en évidence, montrent que la performance des logiciels de mesure dépend de l'objectif scientifique qui est fixé, et peuvent affecter de façon importante la photométrie des galaxies proches. Ayant montré que le relevé SDSS ne permet pas un recensement complet et précis de l'Univers proche, une réanalyse de l'ensemble du relevé SDSS est nécessaire jusqu'à $g \sim 17$. Ce projet sera démarré en 2011 à l'IAP, avec pour objectif de fournir à la communauté astronomique une photométrie précise pour les galaxies de l'Univers proche, ainsi que la mesure de leurs paramètres morphométriques.

La qualité des images et la grande couverture angulaire du relevé SDSS offrent l'opportunité unique d'élaborer un catalogue morphométrique de galaxies à $z \simeq 0.1$. Cela requiert des capacités de stockage et de calcul important, que notre équipe a pu acquérir et installer à l'IAP. L'idéal serait de mettre en place un service web qui fournirait les images FITS et les paramètres morphométriques de toutes les galaxies jusqu'à $g \simeq 17$, soit $\sim 100,000$ galaxies. Ce catalogue représentera un échantillon statistique sans précédent, de par le nombre d'objets, la qualité photométrique, et l'éventail complet des différents types et particularités morphologiques. L'analyse qui sera effectuée permettra en outre de tester la photométrie des catalogues de galaxies fournis par le projet SDSS aux magnitudes $g > 17$, dans un domaine de flux où la photométrie ne devrait pas être affectée par les erreurs systématiques présentées ici. On pourra par ailleurs montrer quel est l'effet des biais d'ouverture et des erreurs sur la calibration en flux des spectres obtenus par fibre optique, qui affectent peut-être la spectroscopie des galaxies les plus distantes du relevé SDSS. Celle-ci a été largement utilisée pour déduire des contraintes sur l'évolution des galaxies et montrer l'effet de "down-sizing" (Panter et al. 2004; Heavens et al. 2004).

Les fonctions de luminosité et de corrélation, permettant de caractériser les différentes populations de galaxies et leur regroupement à grande échelle, pourront alors être mesurées avec une excellente statistique en fonction des nombreuses caractéristiques morphologiques identifiées. On pourra aussi revisiter la controverse sur les relations et distinctions entre les galaxies elliptiques et les galaxies naines elliptiques, ainsi qu'entre les galaxies elliptiques géantes et aux cœurs déficients en lumière, et les elliptiques plus petites, en rotation, et présentant un excès central de lumière (Graham 2005; Kormendy et al. 2009; Kormendy 2009). L'existence de traces morphométriques résultant de la distinction dynamique entre les galaxies elliptiques et lenticulaires pourra aussi être examinée (Cappellari et al. 2011).

Ce recensement complet des galaxies de l'Univers proche donnera en outre la possibilité de comparer les propriétés spectrales et les propriétés morphologiques des galaxies SDSS, et de mieux contraindre les spectres de références auxquels les divers modèles de synthèse spectrale sont confrontés. Cela devrait conduire à une amélioration de la performance des techniques de classification spectro-photométrique et de mesure des décalages vers le rouge photométriques. Une étape déterminante sera l'ajout dans les modèles des scénarios manquants parmi les types morphologiques mis en évidence par EFIGI galaxies, comme par exemple les galaxies naines elliptiques. La définition d'un nouveau scénario nécessite des mesures statistiques en quantité et qualité suffisantes au temps présent pour peupler les divers diagrammes couleur-couleur. Une meilleure compréhension de l'ajustement des spectres de référence pour la mesure des décalages vers le rouge photométriques est importante pour les mesures d'oscillations baryoniques acoustiques (Eisenstein et al. 2005), ainsi que pour celles du cisaillement gravitationnel, la distribution

des sources en décalage spectral ayant un impact déterminant sur les résultats (Fu et al. 2008).

Les ajustements de modèles bidimensionnels de bulbe + disque effectués sur les galaxies du catalogue EFIGI au moyen de SExtractor (Bertin et al. 2011) donnent des résultats prometteurs sur les mesures statistiques des propriétés des bulbes et des disques. Les mesures de fonctions de luminosité pour les composantes de bulbe et de disque des galaxies seront intéressantes pour une comparaison avec les simulations à N-corps (voir par exemple Baugh et al. 1996; Kauffmann et al. 1997; Cole et al. 2000). La modélisation des profils devrait servir à évaluer les biais d'inclinaison sur la photométrie des galaxies, dans le but d'une prise en compte dans les analyses des catalogues de galaxies distantes. Ce travail devra se baser sur les mesures de profil des composantes de bulbe et de disque effectuées sur les galaxies bien résolues du catalogue EFIGI, puis sur l'ensemble du relevé SDSS, afin d'échantillonner les populations de galaxies dans des conditions réalistes.

Les attributs morphologiques visuels du catalogue EFIGI, et les résultats conjoints des simulations numériques de formation des galaxies nous aiguillent sur les développements critiques à introduire dans les ajustements de profil. Des composantes de barre et d'anneau, et une bande de poussière pour les galaxies inclinées, peuvent par exemple être ajoutées. Mais les dégénérescences doivent être testées au moyen d'images simulées si l'on souhaite une application "automatique" à de grands échantillons.

Les images résiduelles de l'ajustement bulbe + disque de SExtractor peuvent aussi être utilisées pour étudier les autres composantes des galaxies. Des résultats prometteurs ont été obtenus et devront être réexplorés au moyen du catalogue EFIGI, les attributs visuels et des images bien résolues étant indispensables à ce travail. D'une part, une méthode de détermination automatique et quantitative de la flocculence des galaxies a été effectuée sur les galaxies du catalogue EFIGI (Dumoncel et al. 2008). Au cours de sa thèse, A. Baillard a par ailleurs testé l'ajustement linéaire d'anneaux multipolaires sur ces résidus, dans le but de modéliser les bras spiraux, les anneaux et les barres. Ces ajustements permettent d'obtenir une réduction dimensionnelle des images de galaxies avec une centaine de coefficients, et ceci indépendamment de la variation de qualité d'image (Baillard 2008). Des résultats préliminaires sur l'application d'un système d'apprentissage aux coefficients de projection sur la base d'anneaux ont été obtenus, permettant d'évaluer automatiquement et quantitativement la présence d'attributs comme les barres, les anneaux, la poussière ou la flocculence avec des taux de succès allant de 69 à 92 %. Cette approche permet aussi de mesurer le sens de rotation des bras avec un taux de succès comparable à celui des déterminations visuelles pour le catalogue EFIGI (47% par apprentissage contre 55% par les astronomes).

Les outils performants d'*AstrOmatic* (<http://www.astromatic.net>) qui sont développés à l'IAP par Emmanuel Bertin et concernent la modélisation automatique de la réponse impulsionnelle et ses variations spatiales sur les images seront cruciaux pour étudier l'évolution de la morphométrie avec le décalage spectral. Les champs DEEP et WIDE du relevé "Legacy" du TCFH sont en cours d'analyse morphométrique, et, par de nombreux tests, ont contribué aux améliorations apportés récemment à SExtractor. L'analyse de ces images profondes nécessitera un contrôle des mesures par simulation d'images au moyen d'un autre outil d'*AstrOmatic*, SkyMaker, afin d'évaluer quantitativement les biais et limites des algorithmes automatiques, et l'impact sur la séparation des différentes populations de galaxies. La connaissance de la morphométrie des galaxies bien résolues du catalogue EFIGI, et de l'ensemble du relevé SDSS sera en parallèle indispensable.

Les champs WIDE et DEEP du relevé "Legacy" du TCFH permettront d'explorer en détail et avec une bonne statistique les liens entre le contenu spectral, la luminosité, la masse, et la morphologie. L'intérêt de la connaissance des types morphologiques est de lever les dégénérescences spectrales, et d'obtenir une meilleure détermination des fonctions de masse par type de galaxie. Un des objectifs est de retracer l'histoire de l'accumulation de la masse dans les galaxies, en déterminant le rôle des fusions ainsi que la nature des objets dans lesquels ces fusions jouent un rôle déterminant, caractérisé notamment par des épisodes de formation d'étoiles. Un indicateur de fusions majeures pour une catégorie de galaxies serait une variation systématique du rayon d'échelle. Le défi réside dans la difficulté à isoler et suivre un même type de galaxies au cours du temps. L'analyse des comptages infrarouge-moyen montre l'étendue de la marge de modélisation, posant le dilemme récurrent entre l'évolution en nombre et l'évolution en luminosité. L'analyse des relevés optiques et infrarouge-proche des champs des relevés "Legacy" correspondants du TCFH devrait fournir des résultats discriminants.

Nous estimons pouvoir détecter et quantifier les composantes de bulbe et de disque des galaxies jusqu'à $z \sim 1$. Les données du relevé SDSS serviront de référence à faible décalage vers le rouge, en particulier pour la modélisation des effets de sélection présents à $z \sim 1$. Par les ajustements de profil, on pourra examiner comment se comportent à grand décalage spectral la relation entre la brillance de surface effective et le rayon effectif pour les bulbes (Kormendy 1977), ainsi que celle entre la brillance de surface centrale et le rayon d'échelle pour les disques (de Jong 1996; Graham et al. 2001). L'existence d'une "ligne fondamentale" pour les galaxies elliptiques à $z \leq 0.1$ et les conséquences pour les scénarios de formation par fusions montrent l'intérêt de mesurer avec fiabilité les relations d'échelle (Nair et al. 2011). Il sera intéressant de reconsidérer la séquence de Hubble en termes d'histoire des bulbes et des disques. On pourra aussi examiner le rôle des barres, des anneaux, de la flocculence, et de la poussière, aux plus faibles décalages vers le rouge auxquels ces composantes seront détectées.

Par la mesure du regroupement spatial des galaxies, on pourra poser des contraintes sur les fonctions de distribution des différents types morphologiques au sein des halos de matière noire. L'évolution avec le décalage vers le rouge permettra de confronter ces fonctions à l'histoire théorique de l'assemblage des halos. On pourra ainsi examiner directement l'évolution du lien entre la nature des galaxies et leur environnement. Nous estimons que cette connaissance détaillée des propriétés des galaxies proches et lointaines, en comparaison avec les simulations numériques à venir, qui allieront résolution et grand volume, marquera des avancées substantielles.

Références

- Arnouts, S., de Lapparent, V., Mathez, G., et al. 1997, *A&AS*, 124, 163
- Baillard, A. 2008, PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications
- Baillard, B., Bertin, E., de Lapparent, V., et al. 2011, *A&A* in press
- Baugh, C. M., Cole, S., & Frenk, C. S. 1996, *MNRAS*, 283, 1361
- Bellanger, C. & de Lapparent, V. 1995, *ApJ*, 455, L103+
- Bellanger, C., de Lapparent, V., Arnouts, S., et al. 1995, *A&AS*, 110, 159
- Bertin, E., Delorme, P., Baillard, A., Marmo, C., & Semah, G. 2011, in preparation
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnovic, D., et al. 2011, *ArXiv Astrophysics e-prints*, astro-ph/1104.3545
- Cole, S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., & Frenk, C. S. 2000, *MNRAS*, 319, 168
- Cross, N. & Driver, S. P. 2002, *MNRAS*, 329, 579
- de Jong, R. S. 1996, *A&A*, 313, 45
- de Lapparent, V. 2003, *A&A*, 408, 845
- de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., & Bardelli, S. 2004, *A&A*, 422, 841
- de Lapparent, V., Baillard, B., & Bertin, E. 2011, *A&A* in press
- de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., & Arnouts, S. 2003, *A&A*, 404, 831
- de Lapparent, V. & Slezak, E. 2007, *A&A*, 472, 29
- De Lucia, G., Springel, V., White, S. D. M., Croton, D., & Kauffmann, G. 2006, *MNRAS*, 366, 499
- Dumoncel, J., Campedel, M., Maître, H., et al. 2008, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 394, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII*, ed. R. W. Argyle, P. S. Bunclark, & J. R. Lewis, 497
- Eisenstein, D. J., Blanton, M., Zehavi, I., et al. 2005, *ApJ*, 619, 178
- Fioc, M., Rocca-Volmerange, B., & Dwek, E. 2011
- Fu, L., Semboloni, E., Hoekstra, H., et al. 2008, *A&A*, 479, 9
- Graham, A. W. 2005, in *IAU Colloq. 198: Near-fields cosmology with dwarf elliptical galaxies*, ed. H. Jerjen & B. Binggeli, 303–310
- Graham, A. W., Trujillo, I., & Caon, N. 2001, *AJ*, 122, 1707
- Heavens, A., Panter, B., Jimenez, R., & Dunlop, J. 2004, *Nature*, 428, 625
- Kauffmann, G., Nusser, A., & Steinmetz, M. 1997, *MNRAS*, 286, 795
- Kormendy, J. 1977, *ApJ*, 218, 333
- Kormendy, J. 2009, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 419, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, ed. S. Jogee, I. Marinova, L. Hao, & G. A. Blanc, 87
- Kormendy, J., Fisher, D. B., Cornell, M. E., & Bender, R. 2009, *ApJS*, 182, 216
- Nair, P., van den Bergh, S., & Abraham, R. G. 2011, *ArXiv e-prints*, astro-ph/1105.2063
- Panter, B., Heavens, A. F., & Jimenez, R. 2004, *MNRAS*, 355, 764
- Rocca-Volmerange, B., de Lapparent, V., Seymour, N., & Fioc, M. 2007, *A&A*, 475, 801
- Seymour, N., Rocca-Volmerange, B., & de Lapparent, V. 2007, *A&A*, 475, 791
- Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., et al. 2005, *Nature*, 435, 629