

~

FORMATION D'ETOILES ET D'AMAS STELLAIRES DANS LES COLLISIONS DE GALAXIES

~

SYNTHESE

Directeur de thèse :
Co-directeur de thèse :

Pierre-Alain DUC
Elias BRINKS

Docteur (Laboratoire AIM)
Professeur (University of Hertfordshire)

Composition du jury :

Président du jury :
Rapporteurs :

Guillaume PINEAU-DES-FORETS
Martin HARDCASTLE
Pascale JABLONKA
Frank BIGIEL
Carole MUNDELL

Professeur (Université Paris-Sud XI)
Docteur (University of Hertfordshire)
Docteur (École Polytec. Fédérale de Lausanne)
Docteur (University of Heidelberg)
Professeur (Liverpool John Moores University)

Examineurs :

I INTRODUCTION

1 LE ROLE DES FUSIONS DANS L'EVOLUTION COSMOLOGIQUE DES GALAXIES

Simulations et observations mettent en évidence un scénario de formation hiérarchique des grandes structures cosmologiques : les structures fusionnent pour former des plus grandes. Les fusions majeures de galaxies, impliquant des galaxies de masses équivalentes, s'inscrivent dans ce contexte, bien qu'elles ne semblent pas être un événement fréquent dans la vie des galaxies.

Outre la transformation morphologique, d'une morphologie spirale à une morphologie elliptique, la fusion majeure induit une forte augmentation de l'activité de formation d'étoile du système, appelée sursaut de formation d'étoiles.

2 QUE NOUS APPRENNENT LES FUSIONS SUR LES LOIS D'ECHELLE FONDAMENTALES DE LA FORMATION STELLAIRE ?

2.1 Les lois d'échelle de la formation stellaire

Plusieurs lois d'échelle de la formation stellaire existent. Nous nous focalisons sur la relation entre le Taux de Formation d'Etoiles (TFE) et la densité de gaz. Cette relation est une loi de puissance d'indice 1.4, appelée loi de Schmidt-Kennicutt (SK). Les galaxies à sursaut de formation d'étoiles sont des systèmes atypiques. En effet, elles n'obéissent pas à la loi SK et présentent des Efficacités de Formation Stellaire (EFS) plus élevées que les systèmes standards.

2.2 L'exploration de la relation TFE - Gaz

Deux séquences d'objets existent :

- la séquence des galaxies spirales, obéissant à la loi SK;
- la séquence des galaxies à sursaut de formation d'étoiles, dont font parties les fusions de galaxies à bas redshift, avec des EFS plus élevées que ceux des systèmes obéissant à la loi SK.

A bas redshift, l'utilisation de l'interférométrie radio permet de résoudre de petites régions spatiales dans les disques de galaxies. Ceci a permis d'établir l'équivalent de la loi SK à des échelles spatiales plus petites que le kilo-parsec. Cette loi locale est similaire à loi SK, déterminée, elle, à une échelle globale.

Dans ce contexte, nous avons pour but de déterminer la loi locale de formation stellaire dans des systèmes à sursaut de formation d'étoile. Nous basons notre analyse sur un échantillon de 3 systèmes en interactions pour lesquels nous avons des données sur la composante gazeuse (HI) et sur l'activité (récente) de formation stellaire.

La fusion galactique affecte toutes les échelles spatiales : des grandes échelles, avec

une forte augmentation globale de la turbulence du gaz jusqu'à l'échelle de la formation stellaire. Nous explorons également les effets de la fusion sur les propriétés du Milieu Inter-Stellaire (MIS) à travers la formation d'amas stellaires. Nous utilisons et analysons une simulation numérique de fusion majeure qui parvient à reproduire la formation d'amas massifs durant l'interaction.

3 PLAN DE LA THESE ET RESUME DE MON APPORT PERSONNEL SUR LE SUJET

S'y référer pour une description détaillée de mon apport personnel sur le sujet.

II PREDICTIONS DE SIMULATIONS NUMERIQUES

4 THEORIE SUR LA FORMATION D'ETOILES ET D'AMAS STELLAIRES DANS LES FUSIONS DE GALAXIES

4.1 De la formation d'étoiles à la formation d'amas stellaires

Une fusion de galaxie produit une importante augmentation de la turbulence du gaz. Cette turbulence "cascade" des grandes échelles aux plus petites et peut avoir des effets à la fois sur la taille des nuages moléculaires dans lesquels se formeront les amas stellaires et à la fois sur la masse des étoiles qui se forment au sein de chaque amas.

4.2 Reproduire la forme de la Fonction de Masse des Amas

Les observations ont révélé plusieurs types / formes de fonctions de masse des populations d'amas. Les jeunes populations d'amas, telles que trouvées dans les fusions de galaxies, suivent une loi de puissance, tandis que les populations d'amas plus âgées, telles que trouvées autour de galaxies elliptiques, suivent une loi normale. Divers processus, intrinsèques à la formation des amas et à leur évolution, influencent la forme de la fonction de masse.

5 APERÇU DES SIMULATIONS NUMERIQUES DE FUSIONS

5.1 Perspective historique sur les simulations numériques

Depuis les travaux pionniers de Toomre en la matière, jusqu'aux simulations hydrodynamiques les plus récentes, le réalisme des simulations numériques n'a cessé de s'améliorer.

5.2 Aperçu des simulations numériques du groupe de Saclay

Nous avons fait l'analyse d'une simulation basée sur la technique de particules-adhésives. Nous avons utilisé les prédictions de simulations hydrodynamiques pour

mener notre étude sur la loi (ou les lois) locale(s) de formation stellaire dans les fusions.

6 FORMATION DE SUPER-AMAS STELLAIRES DANS LES SIMULATIONS IDEALISEES DE FUSION

6.1 Propriétés de la simulation

Nous décrivons en détail les propriétés de la simulation : la résolution du code à particules-adhésives et les conditions initiales.

6.2 Analyse numérique : le suivi des structures stellaires

Nous décrivons notre méthode pour détecter et identifier les amas stellaires qui se forment dans la simulation au cours de l'interaction des deux galaxies. Nous travaillons initialement à 2D puis nous bénéficions de l'information tridimensionnelle et temporelle apportée par la simulation. Le suivi temporel est effectué grâce à la sélection de particules-traceurs au sein de chaque amas. Nous déterminons, à chaque instant, plusieurs grandeurs physiques associées à chaque amas : position, masse, rayon, dispersion de vitesse et vitesse de rotation (pour les plus massifs), abondance en étoiles vieilles, galaxie progénitrice et distance à son centre.

Le suivi des amas permet de distinguer deux grandes populations d'amas :

- les amas à longues durées de vies, avec des durées de vies supérieurs à 500 millions d'années ;
- les amas à courtes durées de vies, avec des durées de vies inférieurs à 500 millions d'années.

Nous focalisons notre étude sur les amas à longues durées de vies et plus spécialement sur les amas les plus massifs, une sous-population de cet échantillon.

6.3 Formation et évolution des amas

L'étude de l'histoire de formation des amas à longue durée de vie révèle une grande similitude avec l'évolution temporelle du TFE global du système. Les deux quantités apparaissent corrélées à l'évolution globale du système avec (1) une phase d'augmentation du TFE et du taux de formation d'amas jusqu'au passage au premier péricentre (le moment où les 2 galaxies sont les plus proches pour la première fois) (2) une phase de diminution de ces quantités après le passage au premier péricentre.

Par ailleurs, nous observons que les amas les plus massifs de la simulation (qualifiables de Super-Amas Stellaires) sont les premiers à se former. Ils se forment très tôt durant l'interaction, dans les régions externes des disques galactiques.

Ces résultats sont en accord avec la théorie de Jeans sur la formation de nuages de gaz massifs dans des environnements turbulents et le critère de Toomre sur la stabilité des nuages de gaz dans les disques de galaxies.

La galaxie prograde (i.e., dont le spin et le moment orbital sont parallèles) forme plus d'amas massifs que la galaxie rétrograde. Ceci est la conséquence du couplage spin-orbit sur l'intensité effective du champ de marée sur les disques galactiques.

La fonction de masse (initiale) des amas de la simulation suit bien une loi de puissance, en accord avec les observations de populations jeunes d'amas stellaires. La

simulation est donc réaliste.

Les amas les plus massifs ne montrent pas de claires signatures de mouvement de rotation. Les amas semblent dominés par la dispersion de vitesse, ce qui peut-être causé par divers biais dans la comparaison entre observations et simulations.

Nous observons que la plupart des amas perdent de la masse, probablement à cause de l'effet du puissant champ de marée généré par le système. Les amas éjectés dans la queue de marée, où d'importantes réserves de gaz sont probablement conservées, parviennent à maintenir parfois une masse constante.

6.4 Comparaison avec les observations

Nous comparons les propriétés structurelles (en particuliers les rayons effectifs et les masses) des amas identifiés dans la simulation avec les amas observés. Les amas qui vont perdre de la masse et diminuer en taille pourraient être les progéniteurs d'Amas Globulaires. Les amas qui vont conserver leur masse pourraient être des Galaxies Naines de Marées ou des Galaxies Naines Ultra Compacts.

La fonction de masse et de luminosité des amas évolue peu avec le temps et reste cohérente avec celles obtenues par les observations.

La trajectoire des amas indique un important phénomène de migration radiale, déjà mis en évidence dans les observations.

6.5 Les limites de notre simulation

Nous abordons et discutons les effets des différentes limites de la simulation sur nos résultats : la recette de formation stellaire, le modèle de particules-gaz, l'unicité de la simulation (et de son histoire de formation stellaire).

6.6 Résumé

S'y référer pour un résumé de la Section 6.

7 LA STRUCTURE DU MILIEU INTER-STELLAIRE DANS LES SIMULATIONS HYDRODYNAMIQUES DE FUSIONS

7.1 Le rôle de la turbulence

La turbulence du gaz est reliée à la longueur de Jeans, caractérisant la taille des nuages de gaz se formant dans le MIS. Si la turbulence du gaz augmente, par exemple au cours de l'interaction entre 2 galaxies, la masse des nuages de gaz se formant dans le MIS augmente également ainsi que la fraction de gaz dense du système.

7.2 Impact sur la forme de la Fonction de Densité de Probabilité (FDP) de la densité du gaz

Une augmentation de la fraction de gaz dense dans le système se traduit par une modification de la FDP de la densité de gaz vers les plus fortes densités. Les simulations

hydrodynamiques de fusions de galaxies, tenant compte des effets de la turbulence sur les différentes phases de gaz, prédisent une augmentation du rapport Gaz dense / Gaz atomique, tracé par le rapport TFE / HI. Cette augmentation serait même plus importante que celle du rapport TFE / H₂. Ainsi, les observables à considérer pour mettre en évidence l'effet de la turbulence sur la formation stellaire sont donc le traceur de gaz atomique, HI, et les traceurs de formation stellaire récente (tel que l'Ultra-Violet, UV, l'Infra-Rouge, IR, ou l'émission du gaz ionisé H α).

7.3 Impact sur l'efficacité de formation stellaire

Une augmentation de la fraction de gaz dense dans le système implique une plus forte efficacité de formation d'étoile et expliquerait le comportement atypique (i.e., ne suivant pas la loi standard de formation stellaire, la loi SK) des fusions majeures de galaxies.

III LA RELATION TFE-HI A L'ECHELLE DU KPC DANS LES FUSIONS DE GALAXIES

8 OBSERVATIONS DE LA RAIE A 21 CM POUR TROIS SYSTEMES EN INTERACTION

8.1 Sélection de l'échantillon

Nous détaillons les critères de sélection de l'échantillon de systèmes en interaction. La première limitation est l'accès à des données radio-interférométriques hautement résolues. Nous avons obtenu des données en configuration D, C et B du Very Large Array (VLA/EVLA) permettant de résoudre les propriétés du gaz HI à de petites échelles spatiales.

8.2 Synthèse d'image en radio-interférométrie

Nous expliquons succinctement les principes basiques de radio-interférométrie utiles pour comprendre la réduction de données que nous avons effectuée. Nous détaillons également l'algorithme de nettoyage des cartes brutes de l'interféromètre, expliquons ce qu'est le lobe synthétique et le lobe primaire.

8.3 Réduction des données et calibration

Nous détaillons toutes les particularités de la calibration de nos données, qui, pour certaines, ont été prises durant la phase de transition du VLA en EVLA. Calibration de la bande-passante, calibration en amplitude et calibration des phases sont abordées et plus particulièrement la méthode d'auto-calibration des données. Nous détaillons la technique de "band-stitching", optimisant l'utilisation des ressources de l'instrument, en combinant large bande en fréquence et haute résolution spectrale.

Nous expliquons également une méthode de modélisation et de soustraction des interférences solaires dans le plan de Fourier.

8.4 Cartes de moments et mesures des masses H_I

Nous présentons les cartes de moments 0, 1 et 2, correspondantes aux cartes de densité, de vitesse et de dispersion de vitesse du gaz, issues du processus de calibration et de réduction pour les 3 systèmes en interaction de notre échantillon : NGC 7252, Arp 245 et Arp 105. Nous donnons les formules pour calculer la masse H_I à partir des cartes de moment 0.

9 LA RELATION TFE-H_I

9.1 L'échantillon de régions de formation d'étoiles

Nous commençons par décrire les propriétés globales des galaxies sélectionnées et nous les localisons dans le plan densité de surface du TFE - densité surfacique du gaz. Les régions centrales des systèmes sélectionnés sont bien représentatives du mode de formation stellaire que nous souhaitons étudier : le mode de sursaut de formation d'étoiles.

Nous exposons ensuite notre méthode de sélection des régions de formation stellaires dans les systèmes en interaction, basée sur leur émission UV. Nous adoptons une résolution linéaire commune à tous les systèmes, établie à 4.5 kilo-parsecs. Cette limite est fixée par la résolution des données radio pour le système le plus lointain. Les régions sont définies pour être indépendantes les unes des autres, ce qui correspond à une analyse pixel par pixel.

Enfin, nous donnons les hypothèses et les formules pour le calcul du TFE. Nous corrigeons de l'extinction interne par la poussière (en utilisant directement nos cartes de densité de gaz H_I) ainsi que de l'extinction galactique. Nous adoptons des hypothèses identiques à celles des travaux sur les disques de galaxies spirales résolues (définissant la loi de formation stellaire locale standard), en vue de comparer les propriétés de cet échantillon avec le notre.

9.2 La relation TFE-H_I

Nous commençons par explorer les variations spatiales du rapport Proche-UV/H_I dans les différents systèmes. Le rapport est plus élevé, de plusieurs ordres de grandeurs, dans les régions centrales des galaxies en interaction. Ceci n'est pas seulement dû à l'importante activité de formation stellaire qui a lieu dans ces régions, c'est aussi dû à la déficience en gaz H_I des régions centrales. Dans ces régions, le gaz H_I est un mauvais traceur de gaz et ne peut donc pas être utilisé pour étudier la relation TFE - Gaz. Au contraire, les régions externes des systèmes en interaction (les queues de marées) sont très riches en gaz H_I.

Dans les régions externes, la relation densité de surface TFE - densité de surface H_I est comparée à celle trouvée dans des environnements standards dominés par la composante H_I, tels que les disques externes des galaxies spirales ou les galaxies naines. Nous observons que, en moyenne, les régions de formation d'étoiles situées dans les régions externes de fusions de galaxies ont des EFS plus élevées que celles trouvées

pour des régions de formation stellaires situées dans des environnements standards.

Parallèlement, nous n'observons pas de seuil de formation stellaire. L'efficacité de formation d'étoile augmente à mesure qu'on se rapproche des régions centrales du système. Cette tendance est sans doute due à une transition de phase du gaz atomique au gaz moléculaire.

Enfin, nous vérifions, par comparaison à une galaxie appartenant à l'échantillon de THINGS (The HI Nearby Galaxy Survey est un projet visant à étudier, sous l'échelle du kilo-parsec, la relation entre les propriétés du MIS et l'activité de formation stellaire), que les systèmes en interaction présentent une plus grande turbulence de la composante gazeuse.

Nous terminons par un résumé de la Section 9.

IV DISCUSSION ET PERSPECTIVES FUTURES

10 EXTENSION DE L'ETUDE DU HI

10.1 Le projet Chaotic THINGS

Ce projet vise à étendre notre échantillon de systèmes en interaction en observant de nouveaux systèmes avec le Jansky VLA (JVLA). La campagne d'observation a déjà débuté et devrait se terminer d'ici mai 2013. Trois nouveaux systèmes seront alors disponibles, permettant :

- (1) d'améliorer la statistique de régions de formation d'étoiles,
- (2) de sonder la relation TFE - Gas à une échelle encore plus petite que 4.5 kpc,
- (3) de commencer à identifier d'éventuelles tendances en fonction du stade évolutif du système en interaction.

10.2 Les traceurs IR et H α de formation stellaire

Parallèlement à l'extension de l'échantillon de systèmes en interaction, nous projetons d'étendre l'étude à d'autres domaines de longueurs d'ondes, de façon à confirmer les mesures de TFE. Ces valeurs, dérivées de l'émission UV, ont été corrigées de l'extinction. L'utilisation du traceur IR permettrait de s'affranchir de l'extinction par la poussière. Des données *SPITZER* sont déjà disponibles et des données *Herschel* sont en cours d'acquisition. Par ailleurs, combiner les différents traceurs de formation d'étoiles entre eux permettrait d'obtenir une meilleure précision dans la mesure des TFE à petites échelles spatiales.

11 AJOUT DE LA CONTRIBUTION DU H $_2$

11.1 Régimes de phase gazeuse dans les galaxies isolées

L'étude de la relation TFE - Gas à petites échelles spatiales dans les disques de galaxies spirales a montré qu'il existe plusieurs régimes de phases gazeuses :

- un régime dominé par le H_I, sondé par la raie à 21 cm du H_I, caractérisé par des faibles EFS (ou, de façon équivalente, par de long temps de consommation du H_I, plus longs que 10 milliards d'années). Ce régime prévaut dans des environnements tels que les disques externes des galaxies spirales et est caractérisé par une relation assez dispersée entre la densité de surface du TFE et la densité de surface du H_I ;
- un régime dominé par le H₂, sondé par la molécule CO, caractérisé par un temps de consommation du H₂ de environ 2 milliards d'années. Ce temps de consommation semble être indépendant de l'environnement.

11.2 Régimes de phase gazeuse dans les fusions

Les observations CO de régions externes de systèmes en interaction sont assez rares dans la littérature. Les seules observations pointées existantes, suggèrent une fraction H₂/H_I relativement faible : inférieure à 15% dans la plupart des régions les plus denses identifiées dans les queues de marées de systèmes en interaction. Ceci confirme que les régions externes de systèmes en interaction sont dans un régime dominé par le H_I, validant la comparaison entre notre échantillon de régions de formation d'étoiles avec celui dans les disques externes de galaxies spirales. Des observations CO seraient cependant utiles pour consolider nos mesures d'EFS dans les régions externes de systèmes en interaction.

Dans les régions centrales de systèmes en interaction, le régime est dominé par le H₂. L'étude de la relation TFE - Gas nécessite donc l'accès à des observations hautement résolues dans le domaine millimétrique.

11.3 Incertitudes sur la détermination des masses H_I et H₂ et conséquences sur la relation SK

La présence éventuelle de régions de gaz H_I optiquement épaisses est la principale source d'incertitude sur la détermination de la masse H_I. Ceci peut conduire à une surestimation du rapport TFE / H_I de 10 à 20%. Si les rapports TFE / H_I étaient revus à la baisse, ils resteraient néanmoins supérieurs à ceux observés dans les disques externes de galaxies.

La détermination de la masse H₂ nécessite l'utilisation d'un facteur de conversion, X_{CO}, associant une masse H₂ à une intensité intégrée de la raie CO. Il est bien connu que ce facteur n'est pas universel et dépend de la métallicité du gaz. En outre, certaines études sur l'état thermodynamique du gaz moléculaire (incluant des molécules CO) suggèrent que le facteur X_{CO} pourrait être sous-estimé dans les systèmes à sursaut de formation stellaire.

12 PRISE EN COMPTE DE TOUTES LES PHASES DE GAZ

12.1 Gaz sombre dans les galaxies

Le gaz sombre correspond à une phase de gaz moléculaire non tracée par la molécule CO. Il a notamment été mis en évidence par des observations dans l'IR lointain d'un excès d'émission de la poussière.

Dans nos systèmes, la présence de gaz sombre peut être mise en évidence par des

observations IR (par exemple avec *Herschel*) ou, plus spécifiquement, par l'analyse de la cinématique d'objets en rotation tels que des Galaxies Naines de Marées.

12.2 Cas d'étude de détection de gaz sombre : NGC 7252NW

Après une description du système et des observations H α et H β que nous avons obtenues, nous faisons l'analyse de la cinématique du gaz H α associé à la Galaxie Naine de Marée NGC 7252NW. La comparaison entre la masse dynamique et la masse totale visible, révèle la présence d'une composante invisible. Ce résultat est conforté par d'autres observations de Galaxies Naines de Marées, révélant également un rapport masse dynamique / masse visible plus grand que 1.

Le scénario de formation des Galaxies Naines de Marées implique qu'elles se forment dans la partie externe des disques galactiques. Elles héritent donc de leur composition chimique. La fraction de matière noire non baryonique est, en particuliers, faible et ne permet pas d'expliquer les abondances observées. La composante manquante est donc principalement de nature baryonique.

Une phase de gaz moléculaire est un bon candidat à cette composante manquante.

V CONCLUSION ET RESUME

S'y référer pour une conclusion globale sur le sujet et un résumé de celui-ci.

APPENDICES

A Papier soumis à MNRAS : Etude comparative entre simulations et observations

Ce papier présente une tentative de comparaison entre la fonction de masse des amas détectés dans la simulation à particules-adhésives, aux observations.