

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT

HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

par

**PIERRE-ALAIN DUC**

---

**Les galaxies naines de marée  
comme laboratoire astrophysique**

---

Soutenue publiquement le 23 février 2009  
au CEA– Saclay  
devant le jury composé de :

E. BRINKS .....	Examineur
F. COMBES .....	Examinatrice
E. EMSSELLEM .....	Examineur
E. GREBEL .....	Rapportrice
I. GRENIER .....	Rapportrice
R. IBATA .....	Examineur
G. MAMON .....	Rapporteur

Laboratoire AIM  
Université Paris Diderot – CNRS – DSM/CEA  
paduc@cea.fr



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Recyclage entregalactique</b>	<b>67</b>
1.1	A l'extérieur des galaxies : le milieu entregalactique . . . . .	67
1.2	Une nouvelle vision des galaxies et du milieu entregalactique . . . . .	68
1.2.1	Grand champ et faibles brillances de surface . . . . .	68
1.2.2	Des réserves entregalactiques de gaz moléculaire . . . . .	68
1.2.3	<i>Article : Visible and invisible molecular gas in collisional debris of galaxies</i> . . . . .	71
1.2.4	<i>Article : Formation of molecular gas in the tidal debris of violent galaxy-galaxy interactions</i> . . . . .	73
1.2.5	<i>Article : Molecular and ionized gas in the tidal tail in Stephan's Quintet</i> . . . . .	75
1.3	Origine des composantes du milieu entregalactique . . . . .	77
1.3.1	Expulsion . . . . .	77
1.3.2	Destruction . . . . .	77
1.3.3	Renaissance . . . . .	77
1.3.4	Dépistage . . . . .	77
1.4	Formation stellaire et galactique entregalactique . . . . .	78
1.4.1	Formation stellaire étendue . . . . .	78
1.4.2	(Super) Amas Stellaires jeunes . . . . .	79
1.4.3	Galaxies naines de marée . . . . .	80
1.4.4	Amas stellaires, globulaires ou galaxies ? . . . . .	81
1.4.5	<i>Article : Gas segregation in the interacting system Arp 105</i> . . . . .	82
1.4.6	<i>Article : Formation of a Tidal Dwarf Galaxy in the interacting system Arp 245 (NGC 2992/93)</i> . . . . .	84
<b>2</b>	<b>Formation et destruction des galaxies naines de marée</b>	<b>87</b>
2.1	Modèles de formation . . . . .	87
2.1.1	Instabilités gazeuses ou stellaires ? . . . . .	88
2.1.2	Un modèle de type "Bottom-Up" ou "Top-Down" ? . . . . .	88
2.1.3	<i>Article : A top-down scenario for the formation of massive Tidal Dwarf Galaxies</i> . . . . .	91
2.1.4	<i>Article : High-resolution simulations of galaxy mergers : Resolving globular cluster formation</i> . . . . .	93
2.2	Critères de formation, destruction et survie . . . . .	95
2.2.1	Pré-requis . . . . .	95
2.2.2	Survie . . . . .	95
2.2.3	<i>Article : From tidal dwarf galaxies to satellite galaxies</i> . . . . .	97
2.3	Remarques numériques . . . . .	99
2.3.1	Types de code : Sticky particles vs SPH . . . . .	99
2.3.2	Effets de la résolution . . . . .	99
2.3.3	Des conditions initiales réalistes . . . . .	100
2.4	Evolution des TDGs : BCD, dIrr, dSph ou UCDs ? . . . . .	100
<b>3</b>	<b>Recensement des galaxies naines de marée</b>	<b>103</b>
3.1	Critères d'identification . . . . .	103
3.1.1	Définition des TDGs . . . . .	103
3.1.2	Propriétés cinématiques : effets instrumentaux, de projection . . . . .	104

3.1.3	<i>Article : Kinematics of tidal tails in interacting galaxies : Tidal dwarf galaxies and projection effects</i>	106
3.1.4	<i>Article : Tidal debris from high-velocity collisions as fake dark galaxies</i>	108
3.1.5	Propriétés structurelles : contenu en matière noire	110
3.1.6	Propriétés chimiques : pré-enrichissement et histoire de formation stellaire	110
3.1.7	Propriétés statistiques : localisation	110
3.1.8	<i>Article : Tidal dwarf candidates in a sample of interacting galaxies : Properties and kinematics of the ionized gas</i>	113
3.1.9	<i>Article : Identifying old Tidal Dwarf Galaxies in Simulations and in the nearby Universe</i>	115
3.2	Dépistage des vieilles TDGs	117
3.2.1	Dans le Groupe Local	117
3.2.2	Dans les groupes proches	118
3.2.3	Dans les amas de galaxies	120
3.2.4	Dans l'Univers proche : apport du SDSS	120
3.2.5	Dans l'Univers lointain	121
3.2.6	<i>Article : VCC 2062 : an old Tidal Dwarf Galaxy in the Virgo Cluster ?</i>	122
3.2.7	<i>Article : HI-rich dwarf galaxies in the Hydra I cluster</i>	124
3.2.8	<i>Article : A study of HI-selected galaxies in the Hercules cluster</i>	126
<b>4</b>	<b>Les galaxies naines de marée comme laboratoires</b>	<b>129</b>
4.1	Formation stellaire entregalactique	129
4.1.1	Déclenchement de la formation stellaire	130
4.1.2	Histoire de la formation stellaire	130
4.1.3	<i>Article : Abundant molecular gas in tidal dwarf galaxies : On-going galaxy formation</i>	132
4.1.4	<i>Article : Polychromatic view of intergalactic star formation in NGC 5291</i>	134
4.1.5	<i>Article : Tidal dwarf galaxies in a sample of interacting galaxies</i>	138
4.1.6	<i>Travaux de thèse : P. Weilbacher et M. Boquien</i>	140
4.2	Sondes cosmologiques	141
4.2.1	Dénombrement des TDGs : le problème des galaxies satellites manquant accentué	141
4.2.2	Formation des TDGs : la nécessité de halos cosmologiques étendus	141
4.2.3	<i>Article : The large extent of dark matter halos probed by the formation of tidal dwarf galaxies</i>	143
4.2.4	Pesée des TDGs : prospection de(s) baryons manquants	145
4.2.5	Cinématique des TDGs : contraintes sur les théories alternatives de la gravité	147
4.2.6	<i>Article : Missing mass in collisional debris from galaxies</i>	149
<b>5</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>153</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>164</b>
	<b>Annexes</b>	<b>165</b>
	Résumé des travaux, originalité de l'étude	165
	Liste exhaustive des publications	168
	Curriculum vitae	176
	Activités d'encadrement	179

# Avertissement

Ce manuscrit dresse un panorama de mes études sur les collisions de galaxies. Il rassemble les travaux effectués sur le sujet depuis ma soutenance de thèse, en janvier 1995. J'ai choisi de ne pas y faire figurer deux pans de mes recherches, trop éloignés du thème principal évoqué ici : le rôle des grandes structures, en particulier les amas de galaxies sur le déclenchement de la formation stellaire, ainsi que la caractérisation des galaxies hôtes de sursauts gamma.

Les travaux qui ont déjà fait l'objet d'articles (insérés dans les pages jaunes) font l'objet d'un traitement succinct. Les résultats non encore publiés sont plus développés. Les figures ajoutées au manuscrit sont pour la plupart présentées ici pour la première fois. Leurs légendes ont donc à dessein été écrites en anglais.

La version électronique de la thèse comporte de nombreux liens vers les figures, références, ou images des systèmes étudiés rassemblées dans un portfolio. Les mots "cliquables" sont colorés.

---



---

# Portfolio

Parmi les objets du ciel les plus populaires de l'iconographie astrophysique figurent en bonne place, au côté des régions de formation stellaires galactiques, les galaxies en cours de collision. Si, de par leur éloignement relatif, elles ne constituent pas les cibles favorites des astronomes amateurs, elles sont invariablement choisies pour les premières images des nouveaux télescopes. Le cliché obtenu par le télescope spatial Hubble des disques en fusion des galaxies dites des "Antennes" fait parti du patrimoine astronomique mondial. Leur morphologie intrigue : de leurs disques déchirés s'échappent queues, ponts, boucles et autres appendices, autant de signes distinctifs qui souvent leur ont donné leur surnom : Antennes, Souris, Guitare. Des marées galactiques les forment et déforment au gré des vagues de rencontres. La richesse de leurs "couleurs", reflet de processus physiques complexes et variés, contribue à leur esthétique. Couleurs marronnâtes venues des vieilles étoiles des bulbes en fusion, rutilantes des flambées de formation stellaire encore enfouies dans leur cocon de poussières, bleuâtres des étoiles un peu moins jeunes qui ont déjà balayé leur environnement. Images en pseudo vraies couleurs, manipulées à coup de photoshop – ajustement des couches RVB, une pour chaque filtre à bande large – pour rehausser des couleurs malgré tout souvent blafardes. L'ajout de filtres en bande étroites,  $H\alpha$ , [OII], leur donnent des tours aussi flamboyants qu'artificiels, vert émeraude ou rouge vif des régions HII. Voilà pour la palette optique, celle la plus usitée. Mais pourquoi se restreindre au domaine du visible, celui des étoiles tellement négligeables lorsqu'on fait un bilan énergétique ? Le reste du spectre électromagnétique apporte, de chaque côté, son lot de couleurs et d'informations. Le bleu-radio du gaz hydrogène qui depuis les réseaux d'antennes terrestres concurrence le bleu-ultra-violet venu de satellites sus-atmosphériques. Le fuel, d'un côté, le chauffage dans la pouponnière de l'autre. Il y a bien sûr aussi les pertes de chaleur absorbées par la poussière : rouge de l'infrarouge, le moyen et le lointain – pas le proche trop alangui de ses vieilles étoiles – révélateur de pouponnières insoupçonnées.

Voilà plus de quinze ans que j'essaie de marier toutes ces teintes. Les pages suivantes donnent un aperçu du résultat pour une douzaine de systèmes choisis tant pour la richesse de leur panoplie "multi-longueur d'ondes" que pour le foisonnement de leurs tentacules tidales. Pour plusieurs d'entre eux, j'ai apporté directement une touche d'observations ; souvent j'ai bénéficié d'une palette déjà réduite qui chaque jour s'enrichit de nouvelles nuances, disponibles librement en ligne.

Chaque objet est représenté sous la forme d'un triptyque coloré accompagné d'une carte de position. Le HI qui sera au cœur des études présentées dans les chapitres suivants nous sert de guide dans ce creuset de données. D'un bleu éclatant sur la première image, il dévoile les formes du système, en particulier dans ces parties les plus ex-centriques, celles qui m'intéressent. Dans les régions les plus centrales, il peine toutefois à masquer les populations stellaires sous-jacentes qui à cet endroit domine de leur masse toutes les autres composantes. C'est là au cœur des galaxies en cours de fusion et de violente relaxation que se déroule sans doute le spectacle le plus populaire et le plus étudié : feu d'artifice des flambées de formation stellaire, jets nucléaires qu'accompagne l'essor de trous plus si noirs. C'est le rouge qui sur mes images témoigne de ces sursauts d'activité ; pas forcément celui naturel de l'infra-rouge, pas toujours disponible même dans sa variété moyenne et si difficile à interpréter. Il s'agit parfois d'émission  $H\alpha$ , plus piquée car optique –  $\lambda/D$  oblige – ou le plus souvent d'ultra-violet, certes bien plus flou – petit miroir sur lointaine orbite – mais qui dispose d'un champ de vue et d'une uniformité que n'oseraient imaginer les opticiens et infrarougeistes mêmes dans leurs visions cosmiques les plus ambitieuses. Surprise ! Le rouge n'est pas forcément très concentré. Il s'étend au delà des disques stellaires et est présent là où le bleu sature, même et surtout en bout de queue. Certes le truchement d'une représentation logarithmique lui donne une importance quantitative qu'il n'a probablement pas. De plus les objets représentés ont été justement choisis pour leur rougeoiement extérieur. Pourtant, je montrerai que ces lueurs tidales éclairent sur des points fondamentaux de la physique galactique.

---

Le voile HI est levé sur la seconde image du triptyque, révélant les couleurs nues et traditionnelles de la vieille imagerie optique qui témoigne de la diversité des populations stellaires. Le log de log de la figuration permet à peine de faire ressortir de l'obscurité du fond de ciel les appendices au bleu si vif sur la première représentation : les queues sont de gaz, et que de peu d'étoiles. Vieilles, souvent, jeunes, par endroit, comme l'exprime de manière ardente le dernier volet du triptyque. Ce dernier nécessite un décryptage. À nouveau, le HI présenté ici sous des aspects contournés nous oriente, et les couleurs nous dirigent. Désormais, le bleu évoque l'ultra-violet le plus lointain, le vert, nouveau venu, l'émission à travers l'ouverture étroite du  $H\alpha$  et le rouge retrouvera sa valeur éponyme, à l'infra près. Il s'agit de ce côté du spectre du "moyen", à  $8 \mu m$ . Le lointain, ce sera peut-être pour plus tard. Trois coloris donc pour dépeindre une même manifestation : la naissance de nouvelles étoiles qui se dissimulent dans l'IR, irradient dans le  $H\alpha$  et s'exhibent dans l'UV, tour à tour, avec des échelles de temps différentes, composant une polychromie souvent délicate à appréhender. La chromatographie de ces régions de formation stellaire a été au cœur du travail de thèse de l'un de mes encadrés. Enfin, coordonnées et champ de vue figurent sur une image anexe et décolorée du gaz d'hydrogène atomique. Une légende détaillée achève ce florilège ; la signature de chaque soumissionnaire authentifie les images.

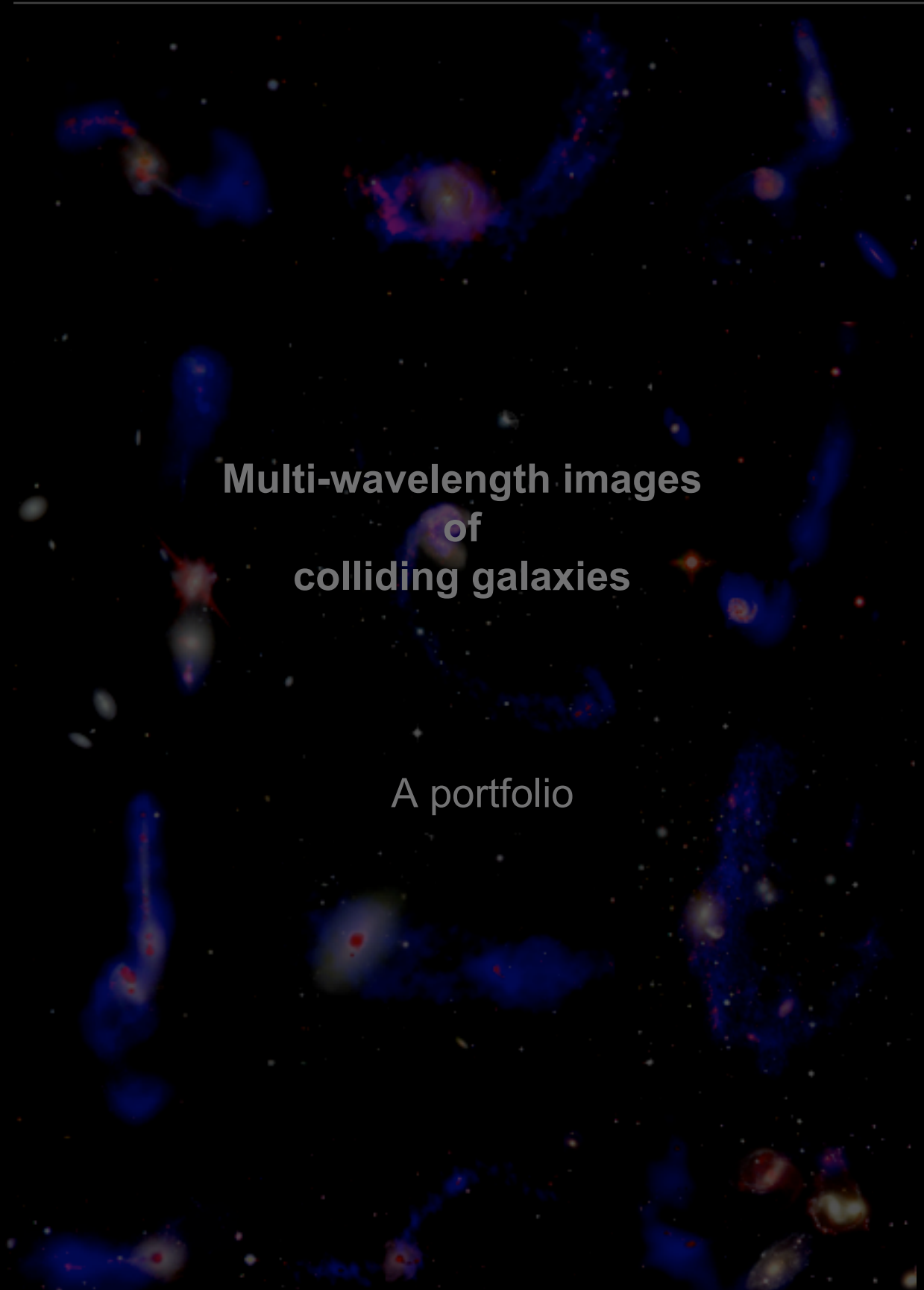
Qu'on pardonne mon vocabulaire coloré ! J'avais adopté pour mon manuscrit de thèse un langage quelque peu épique, voire licencieux, fait de culbutes galactiques, d'accouplements féconds, de bébés galaxies et de cordons ombilicaux. Quinze ans plus tard, bon père de famille<sup>1</sup>, je me suis assagi et ai réservé à ce seul prélude des envolées que d'aucuns trouveront discordantes.

---

<sup>1</sup>Ludvine et Mathilde

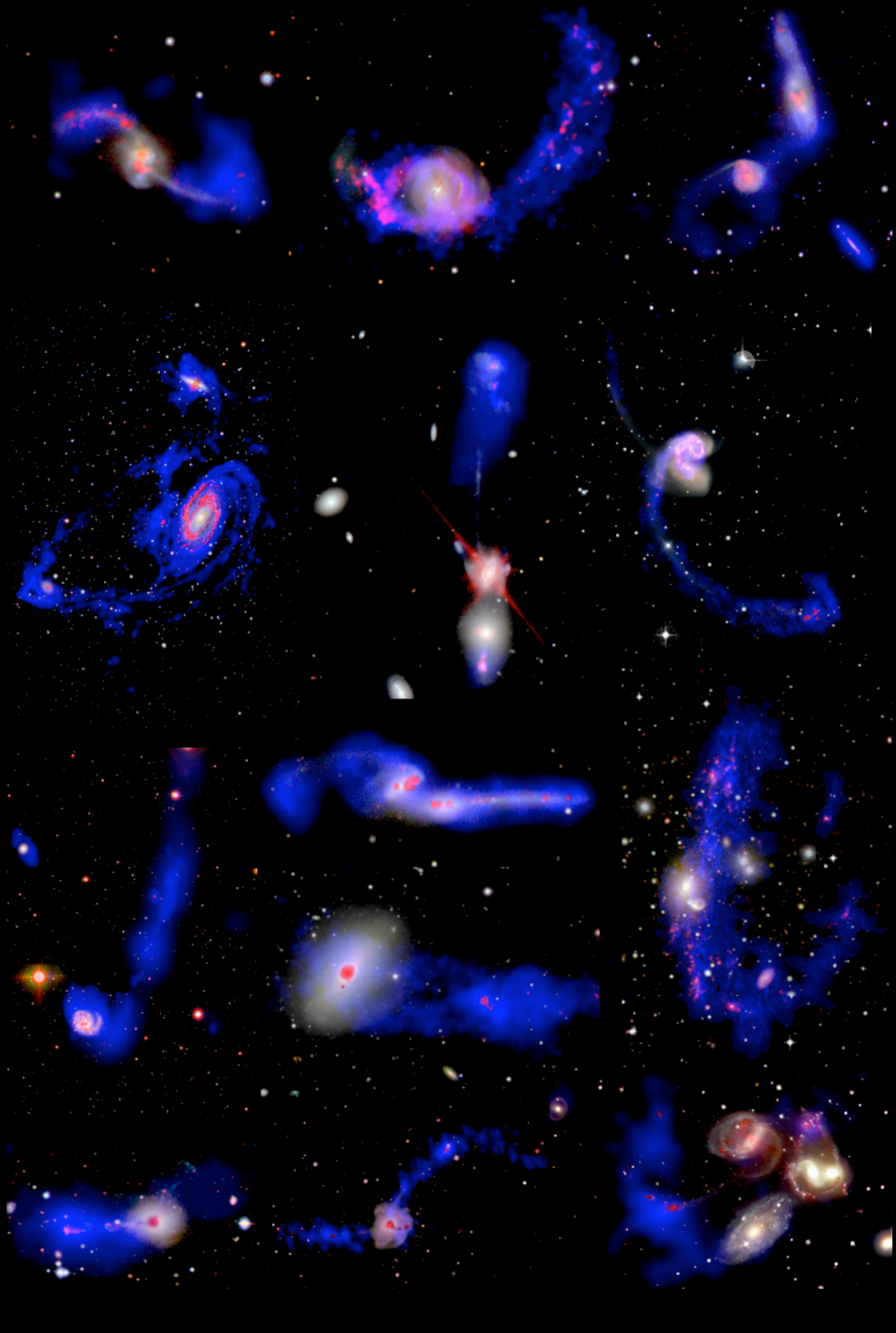
---

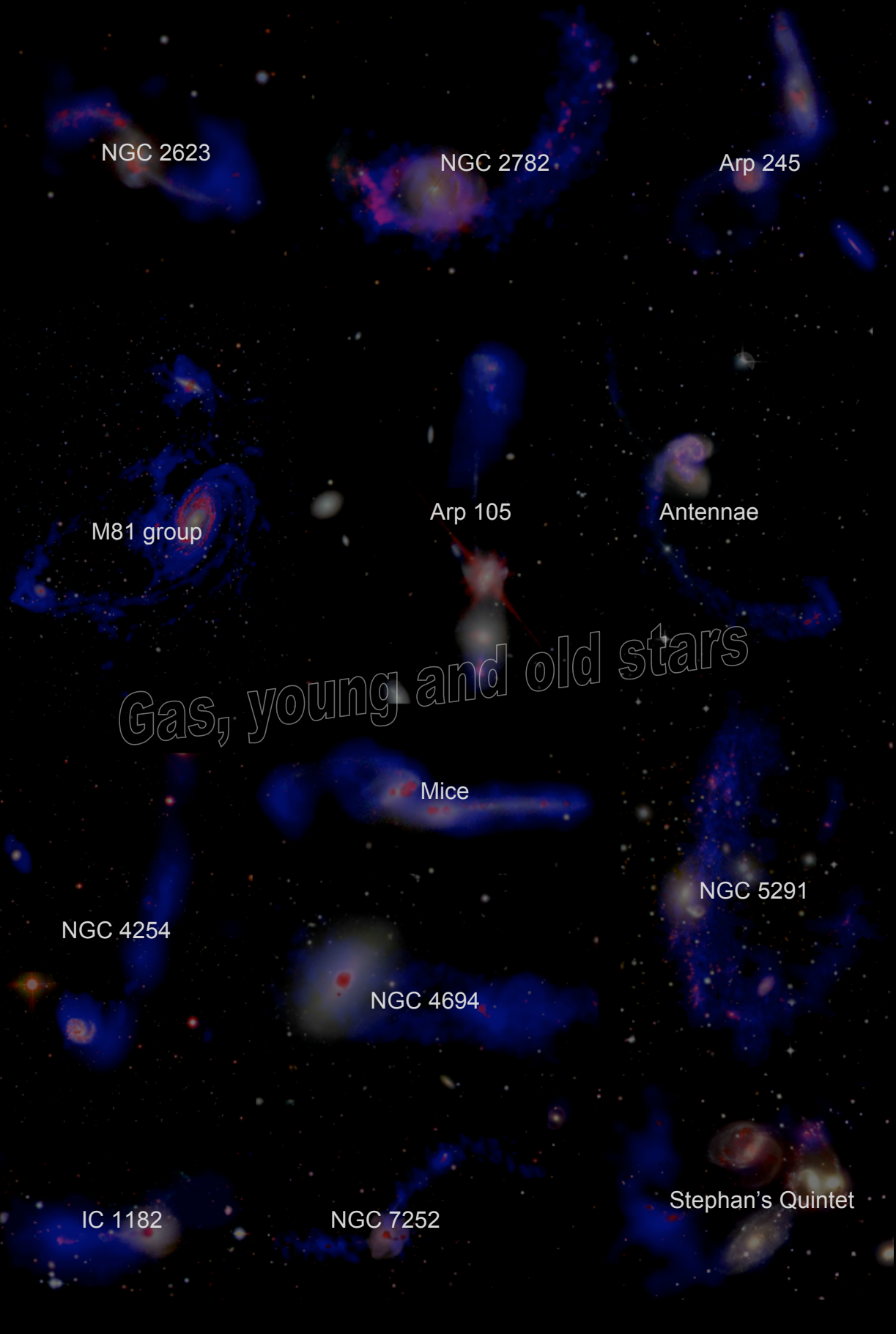




**Multi-wavelength images  
of  
colliding galaxies**

A portfolio





NGC 2623

NGC 2782

Arp 245

M81 group

Arp 105

Antennae

Gas, young and old stars

Mice

NGC 5291

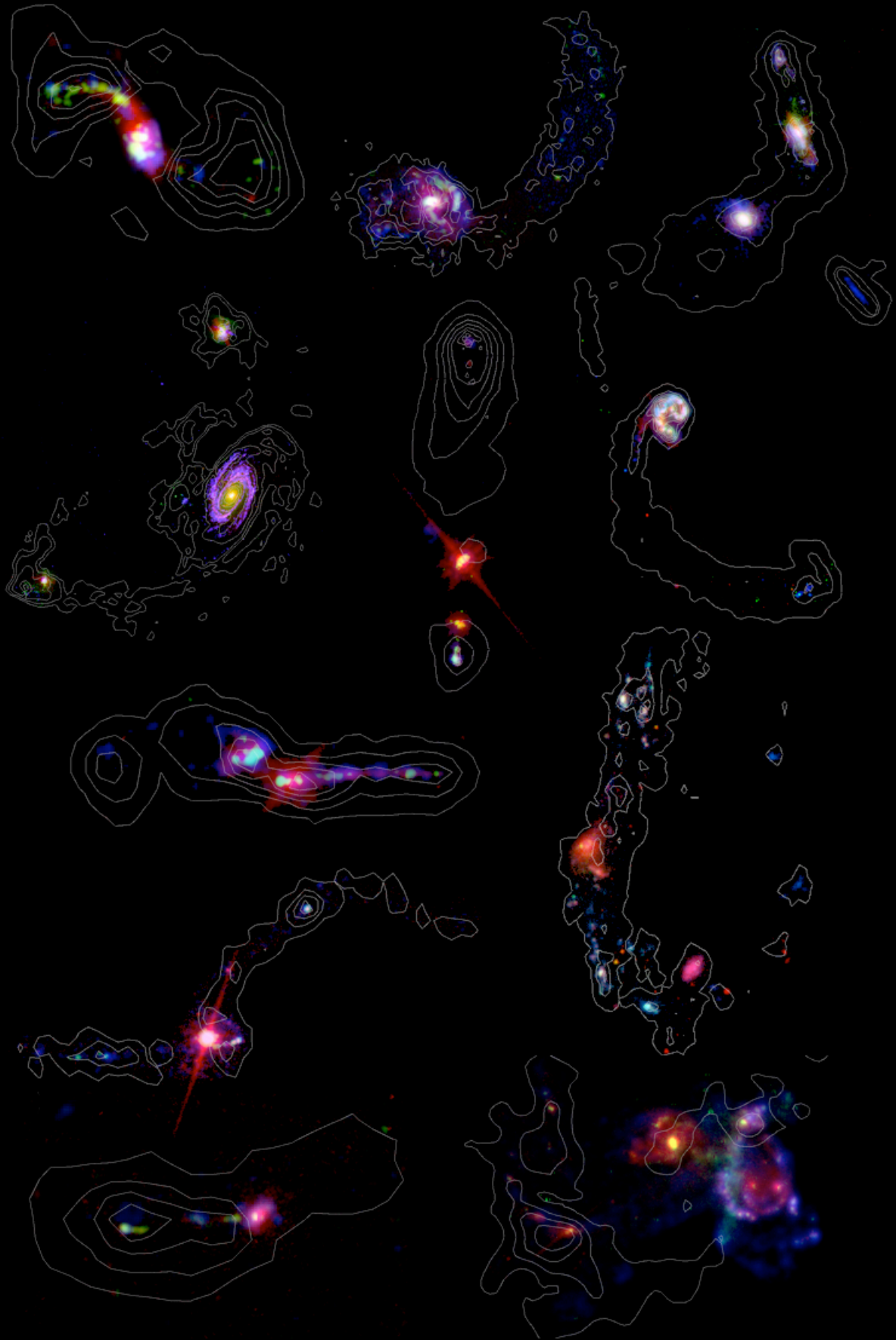
NGC 4254

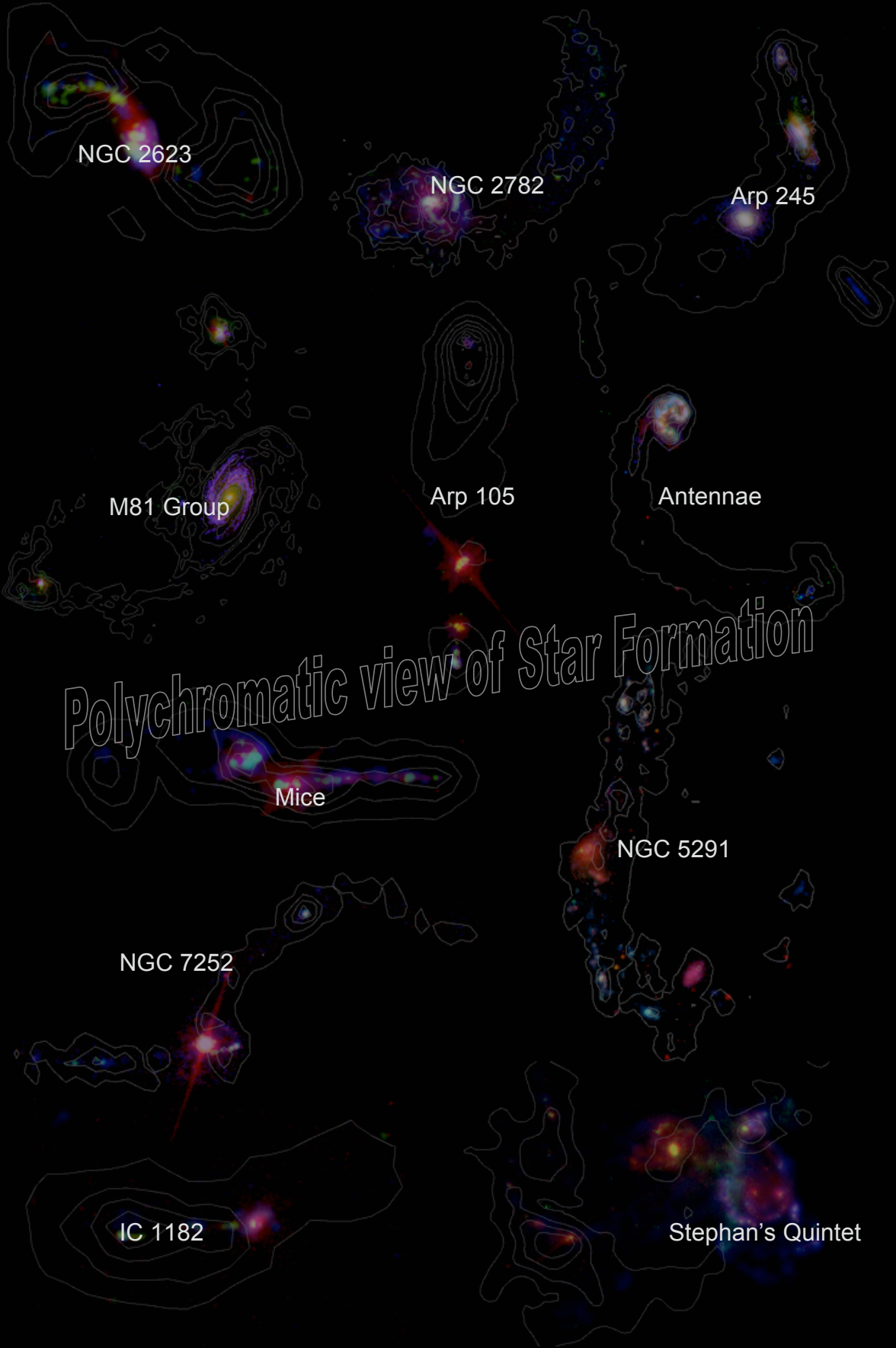
NGC 4694

IC 1182

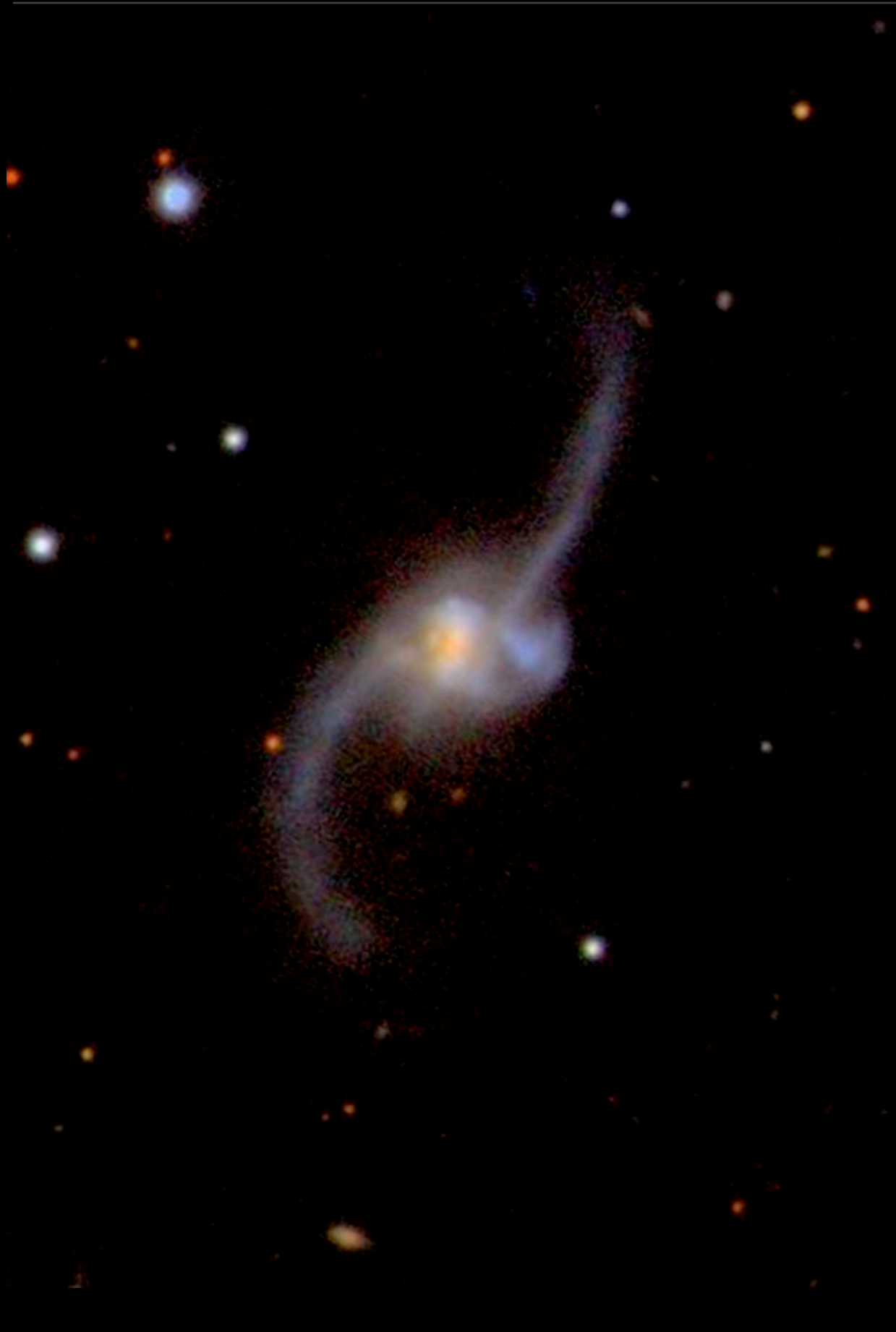
NGC 7252

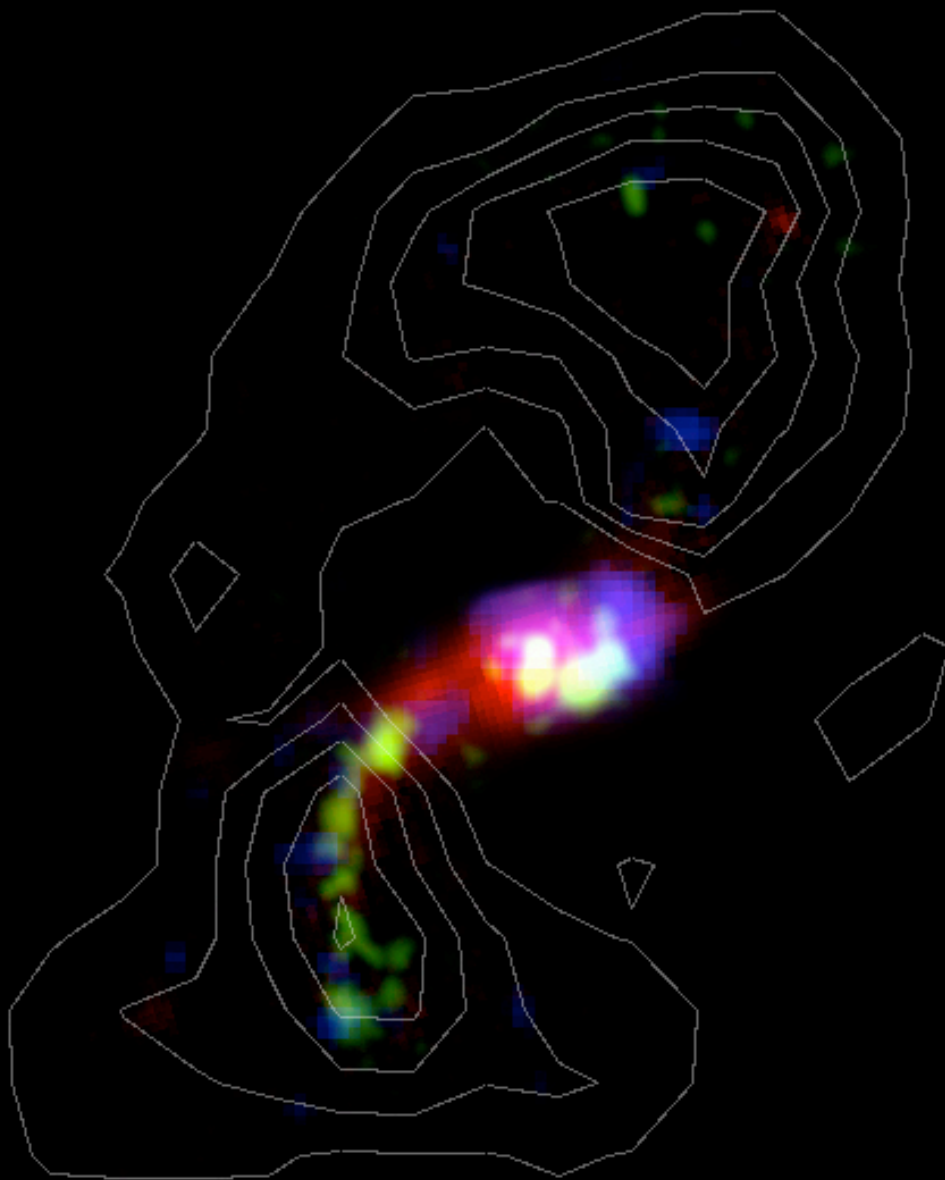
Stephan's Quintet



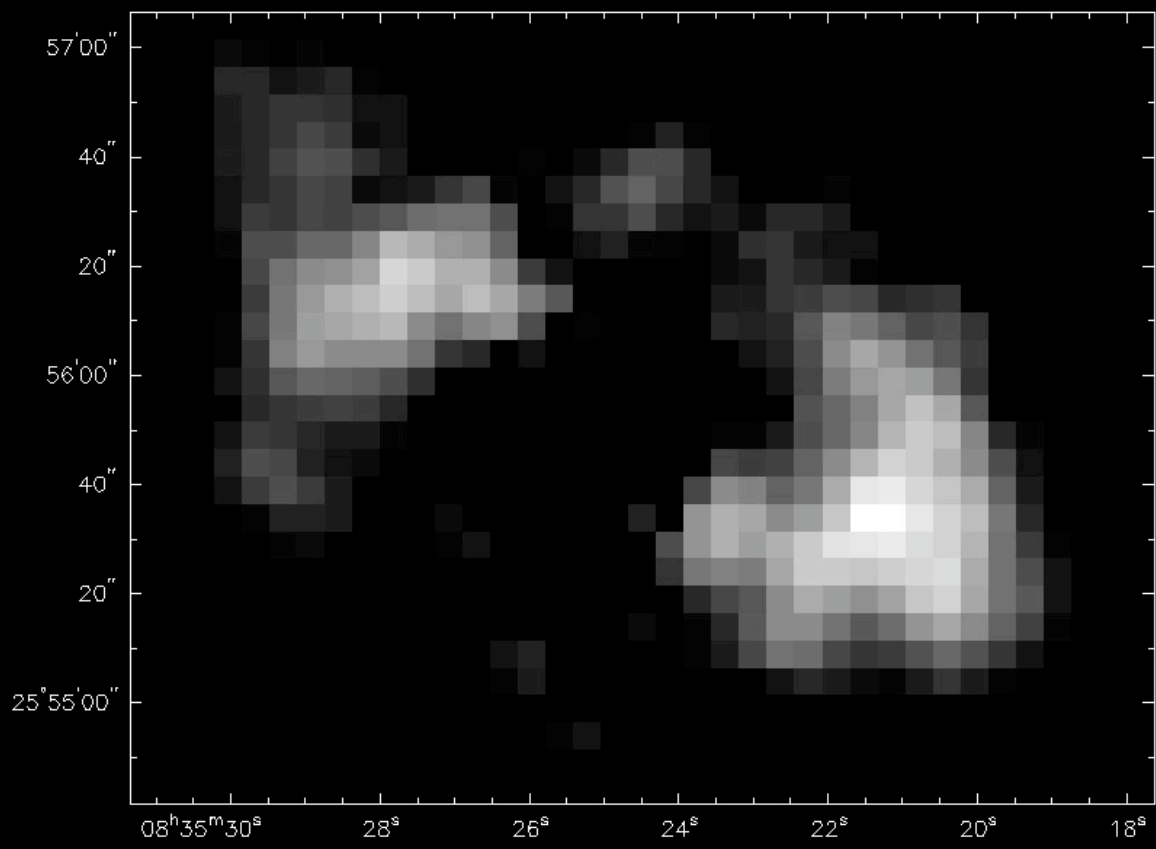






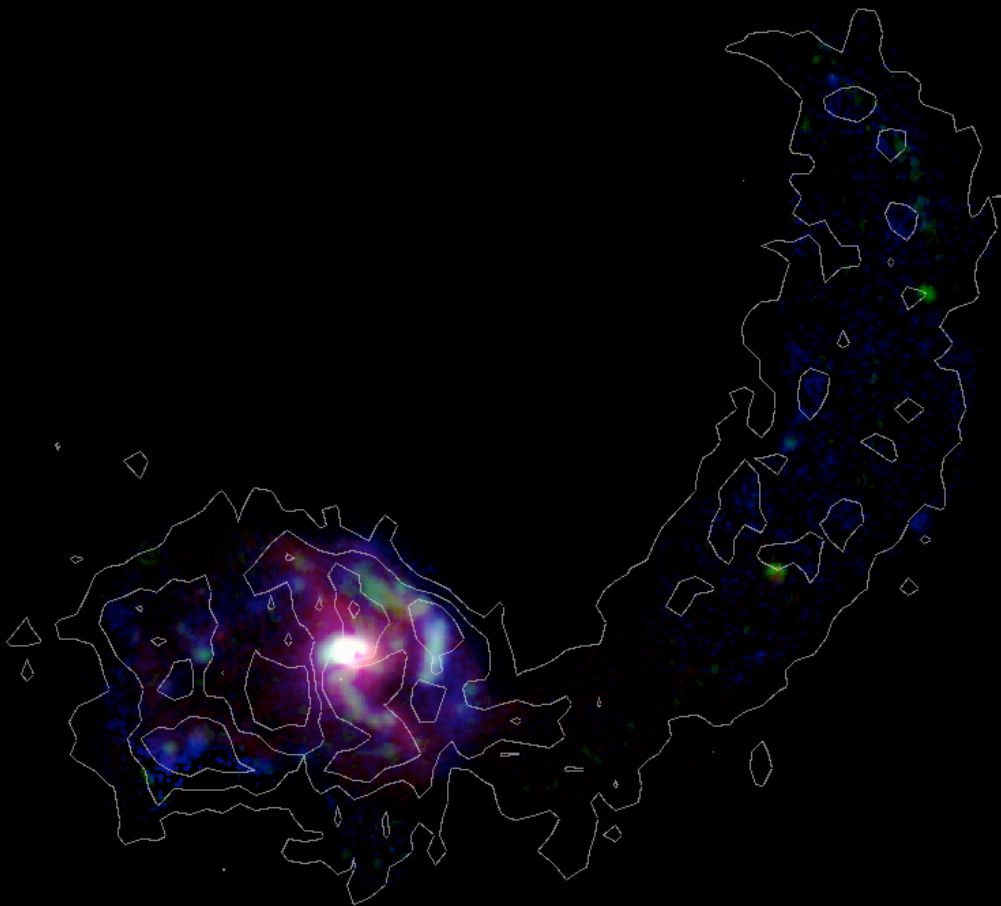


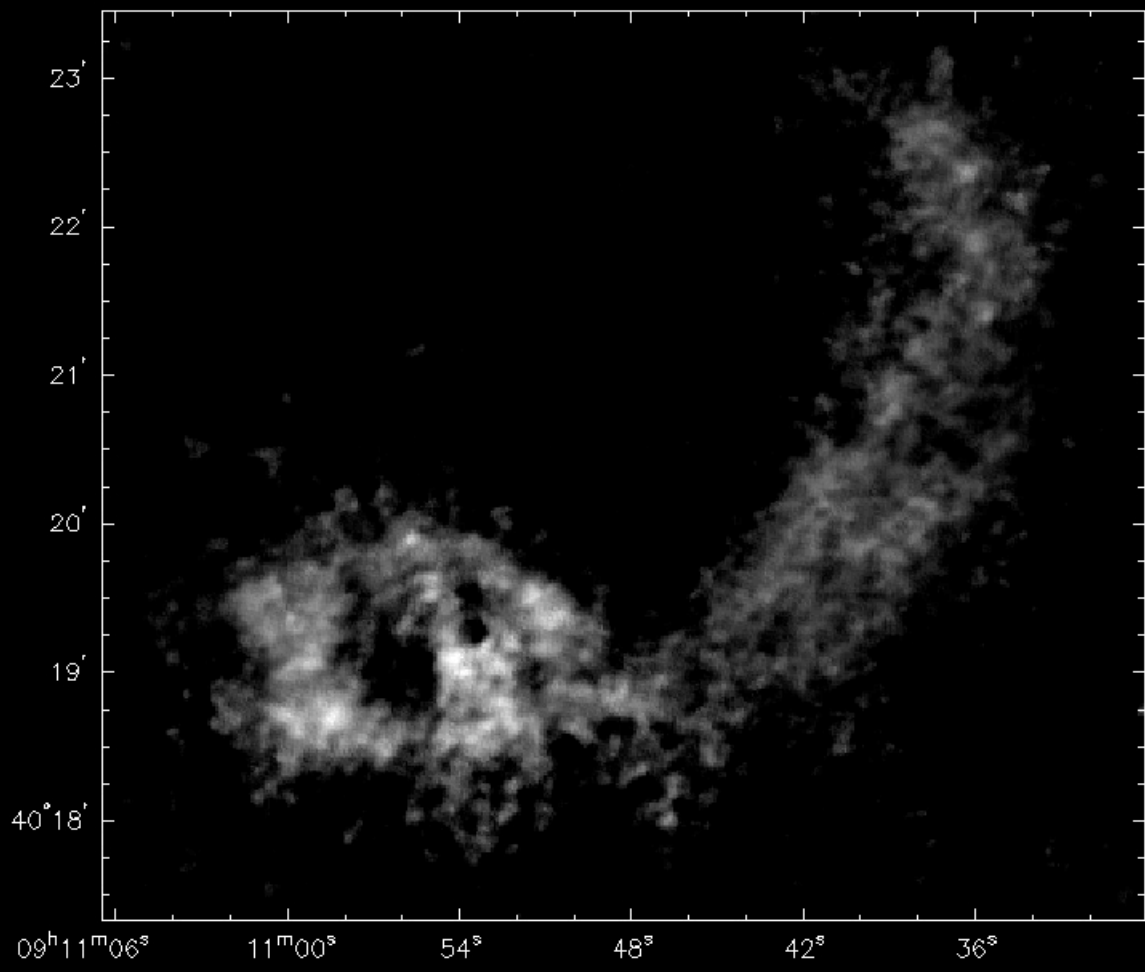






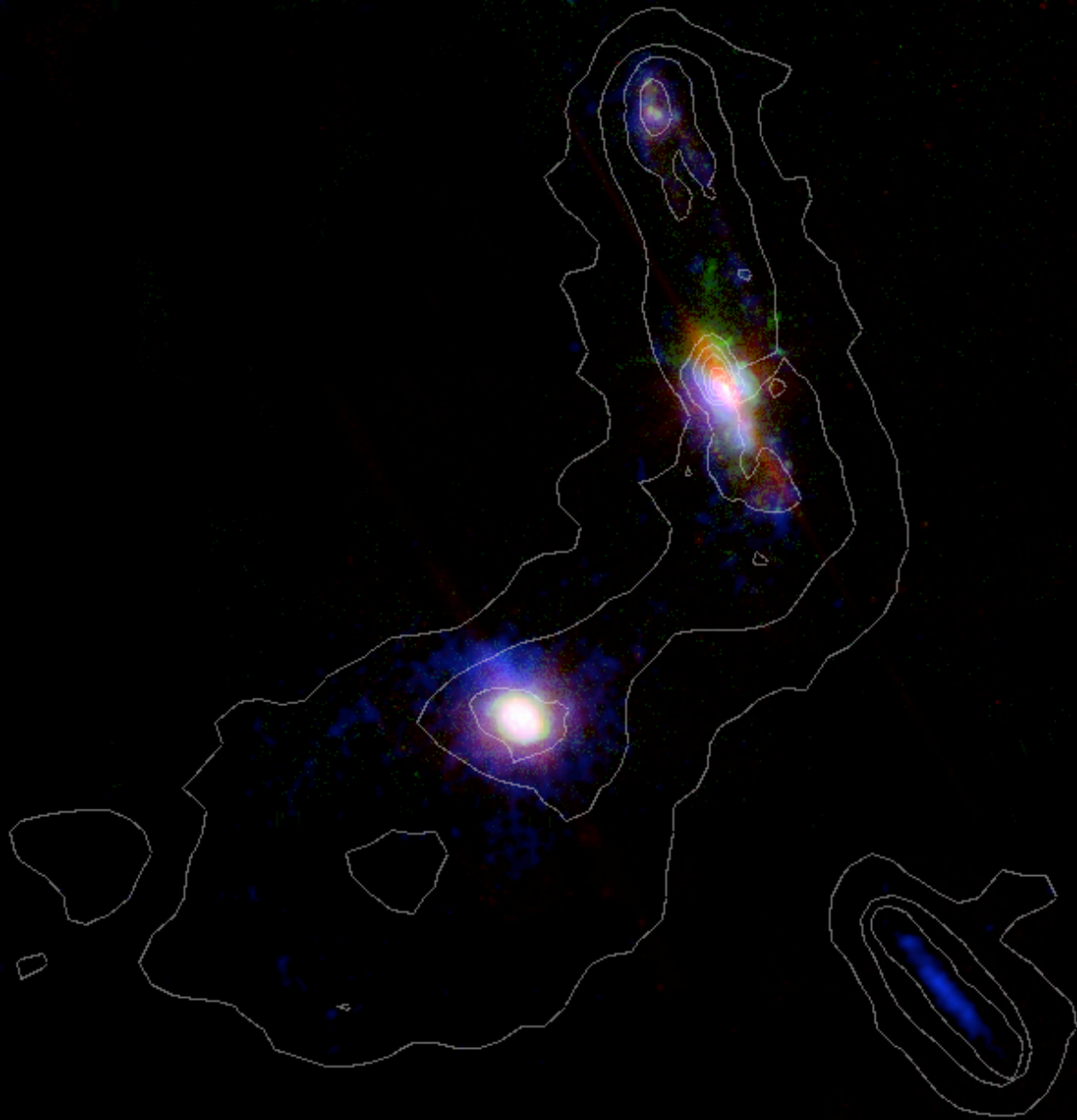




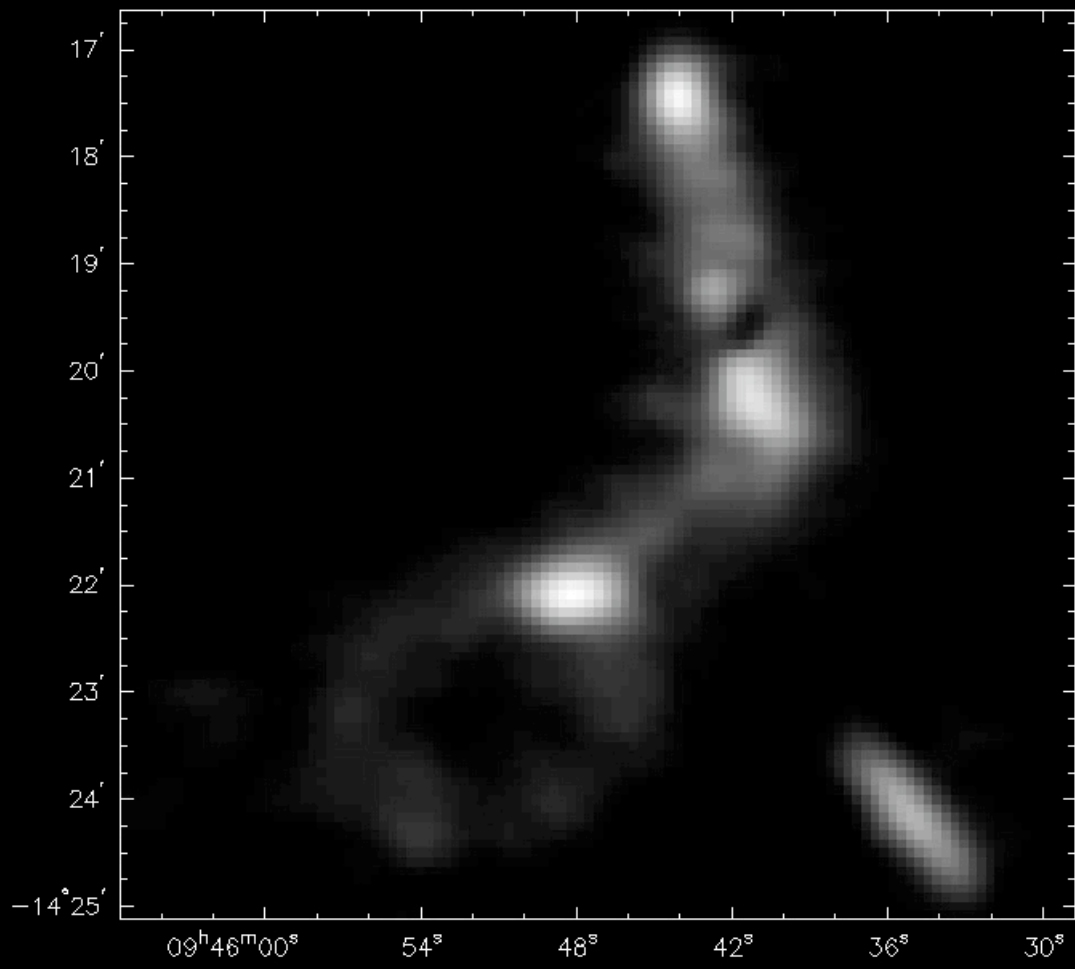


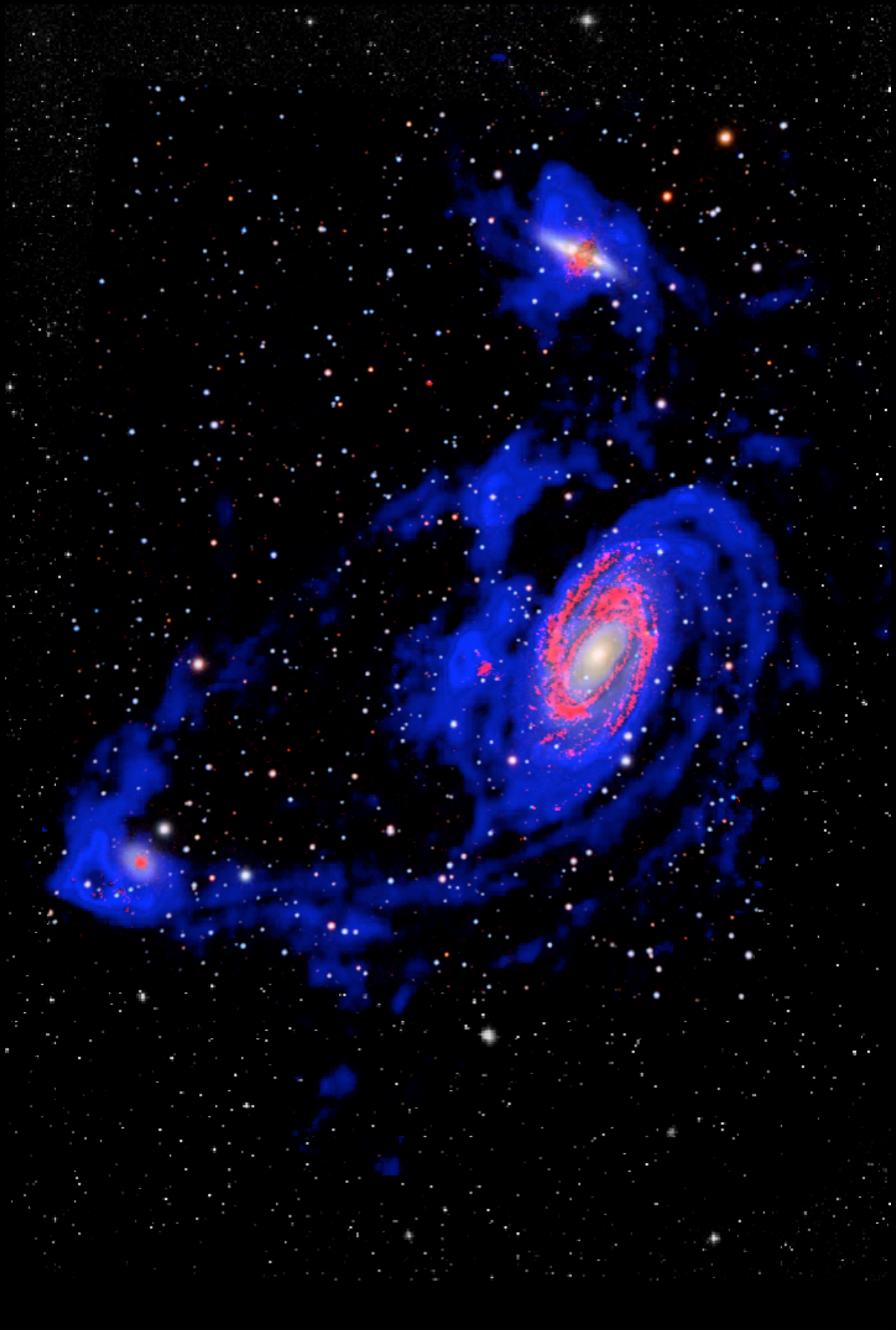




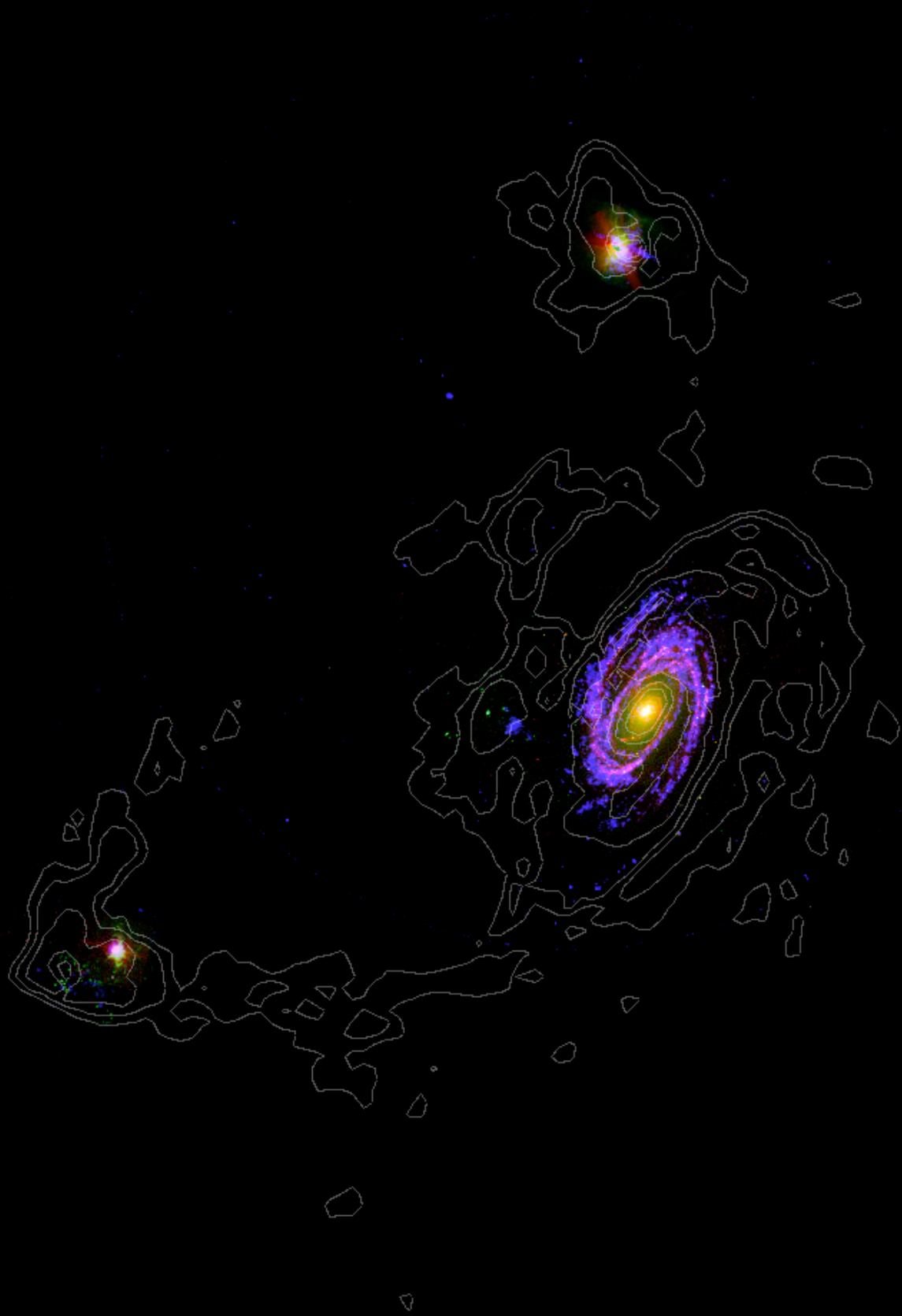


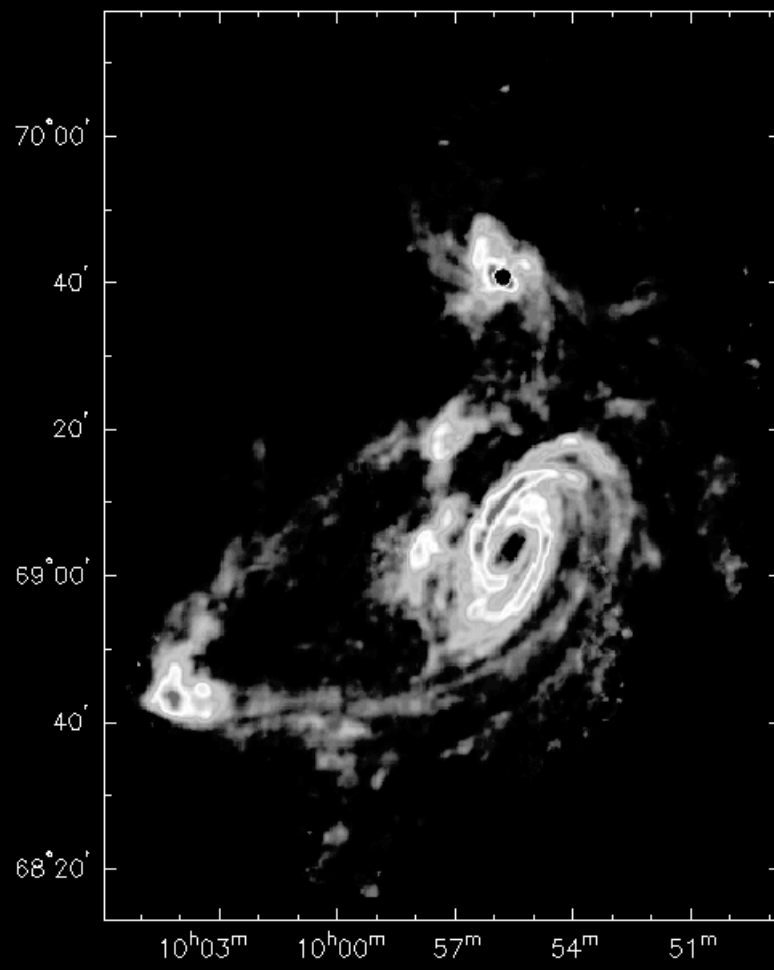






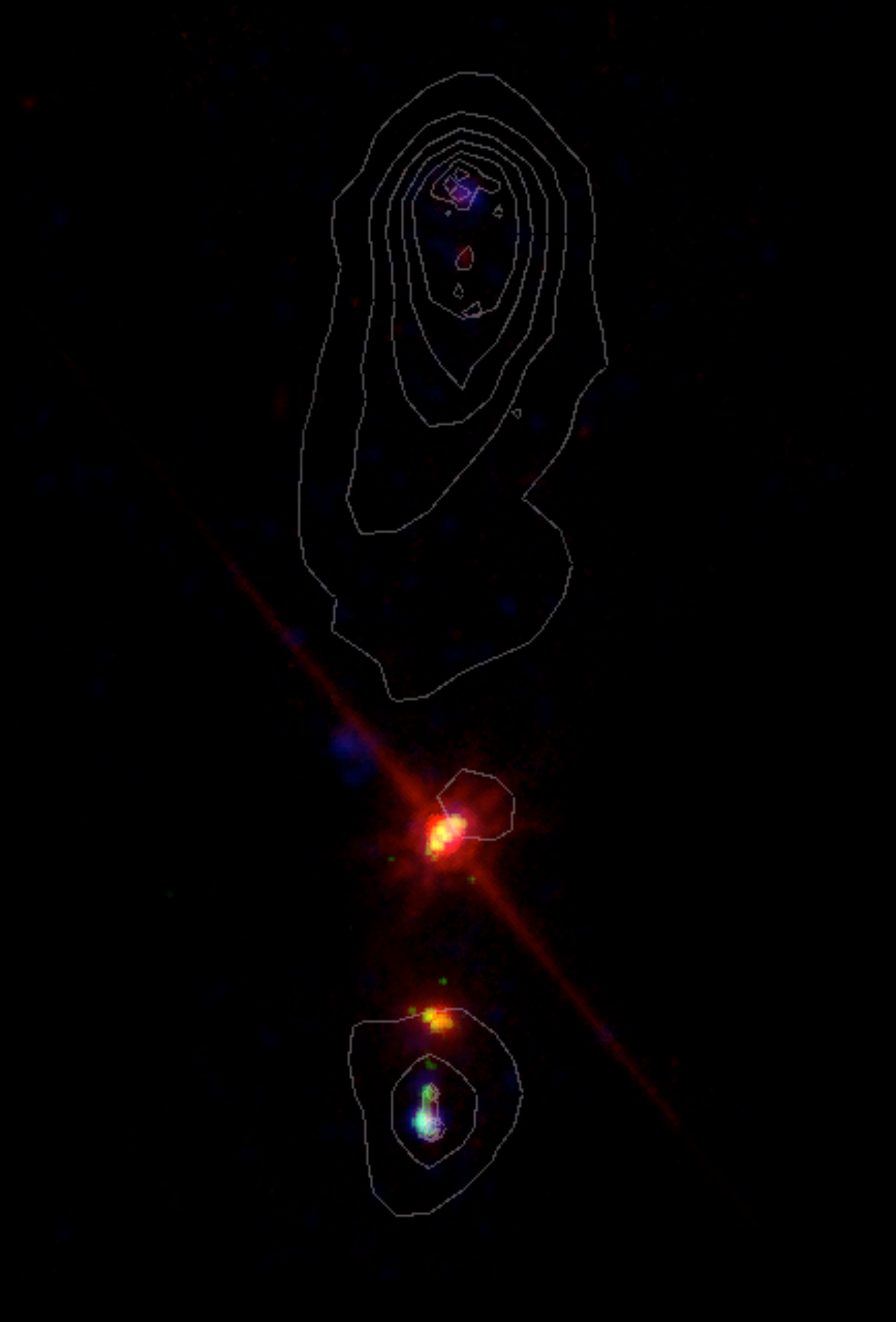




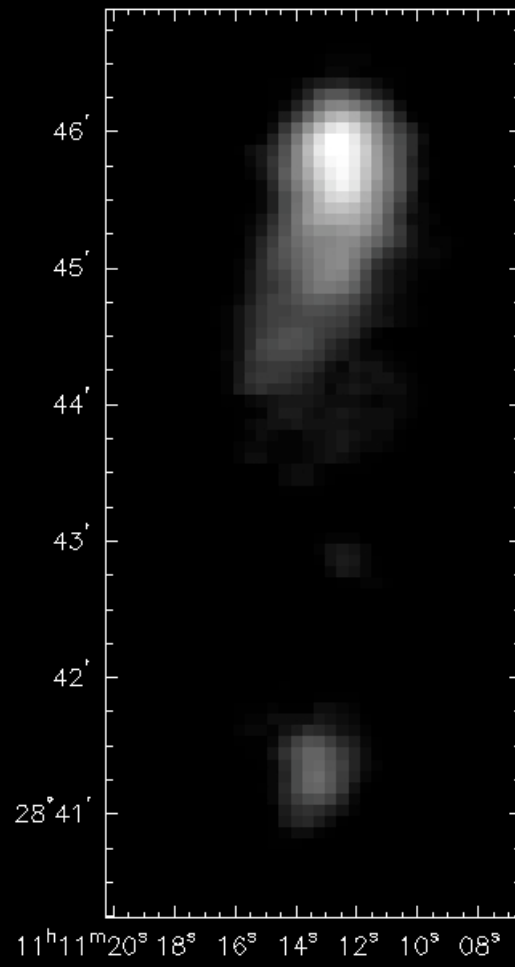


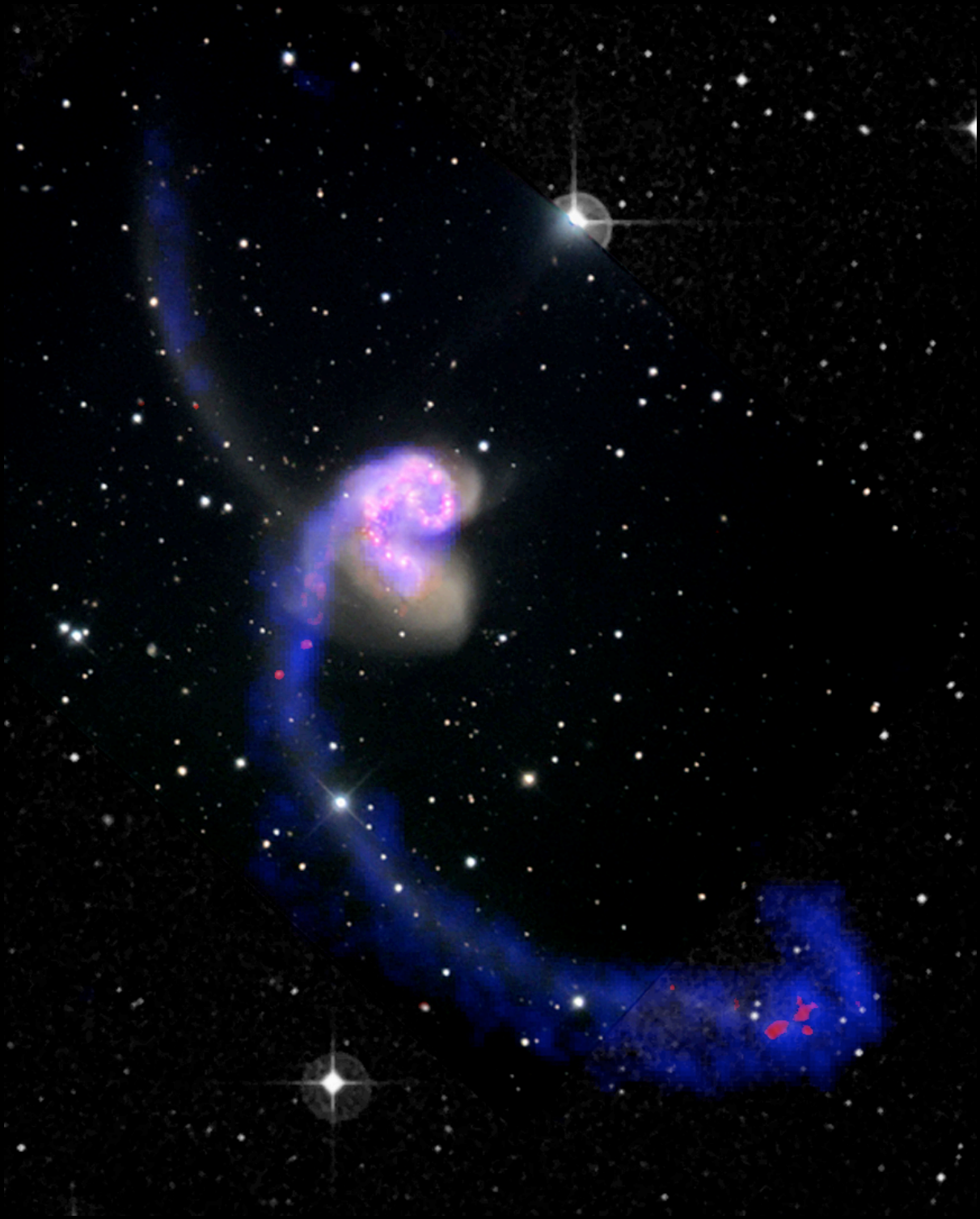




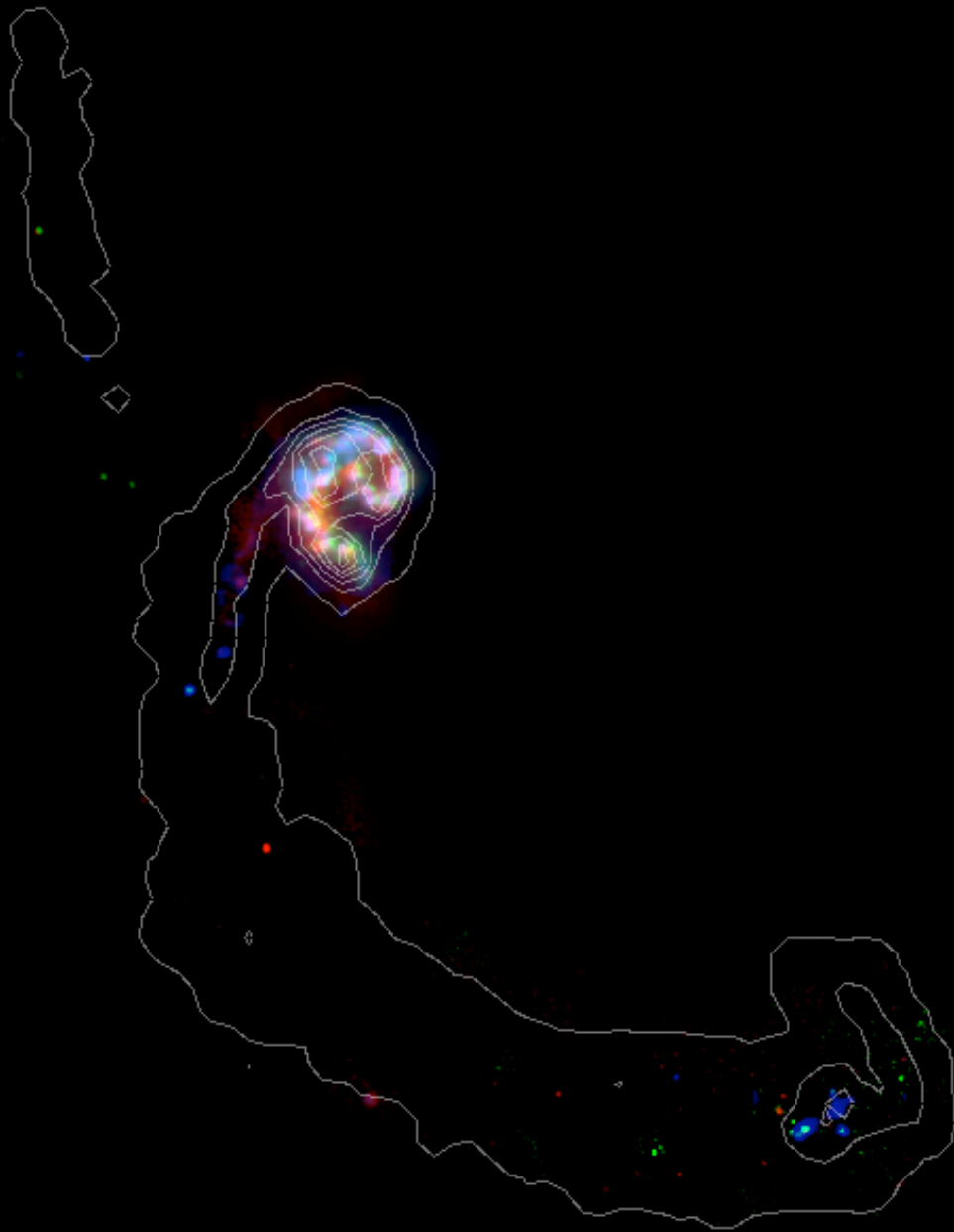


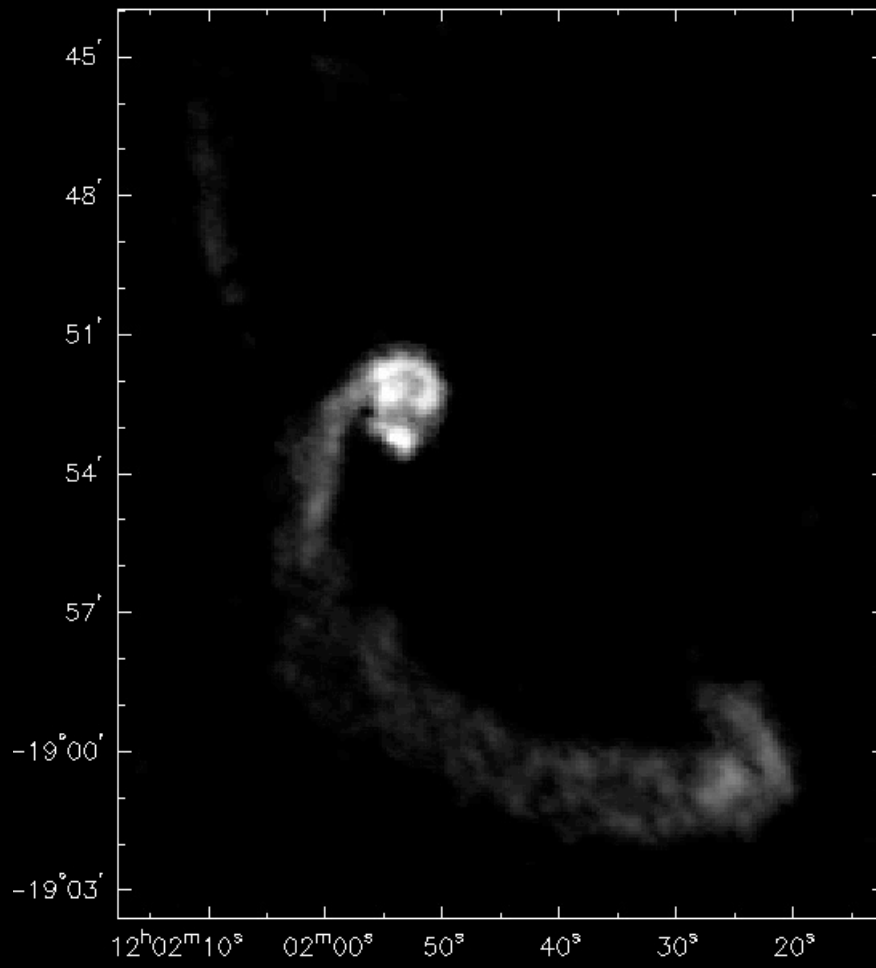


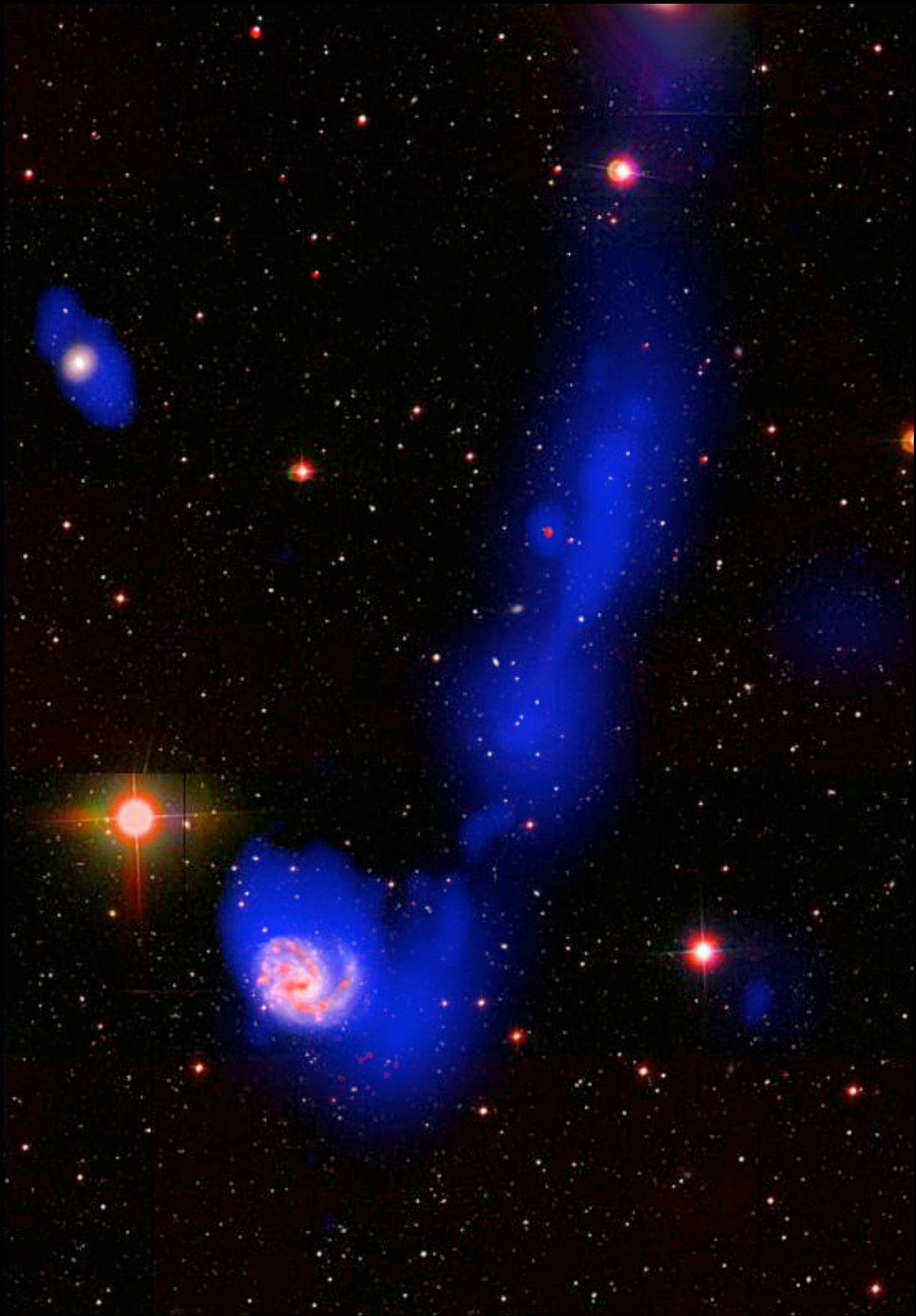








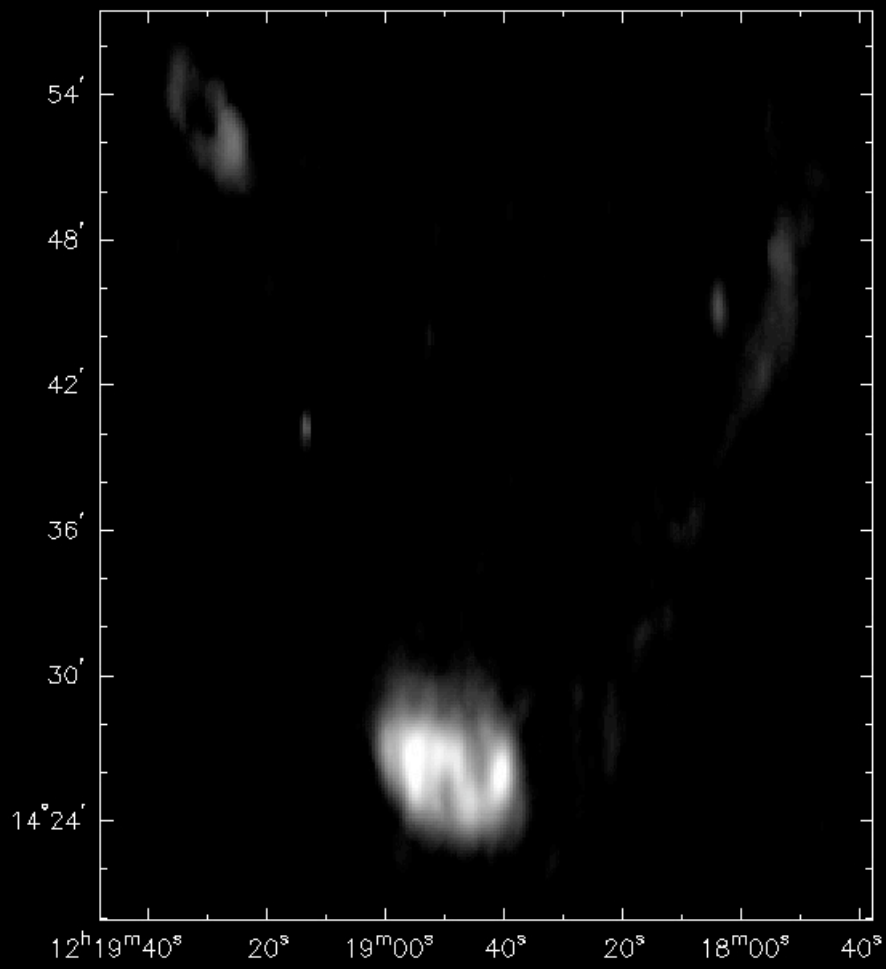


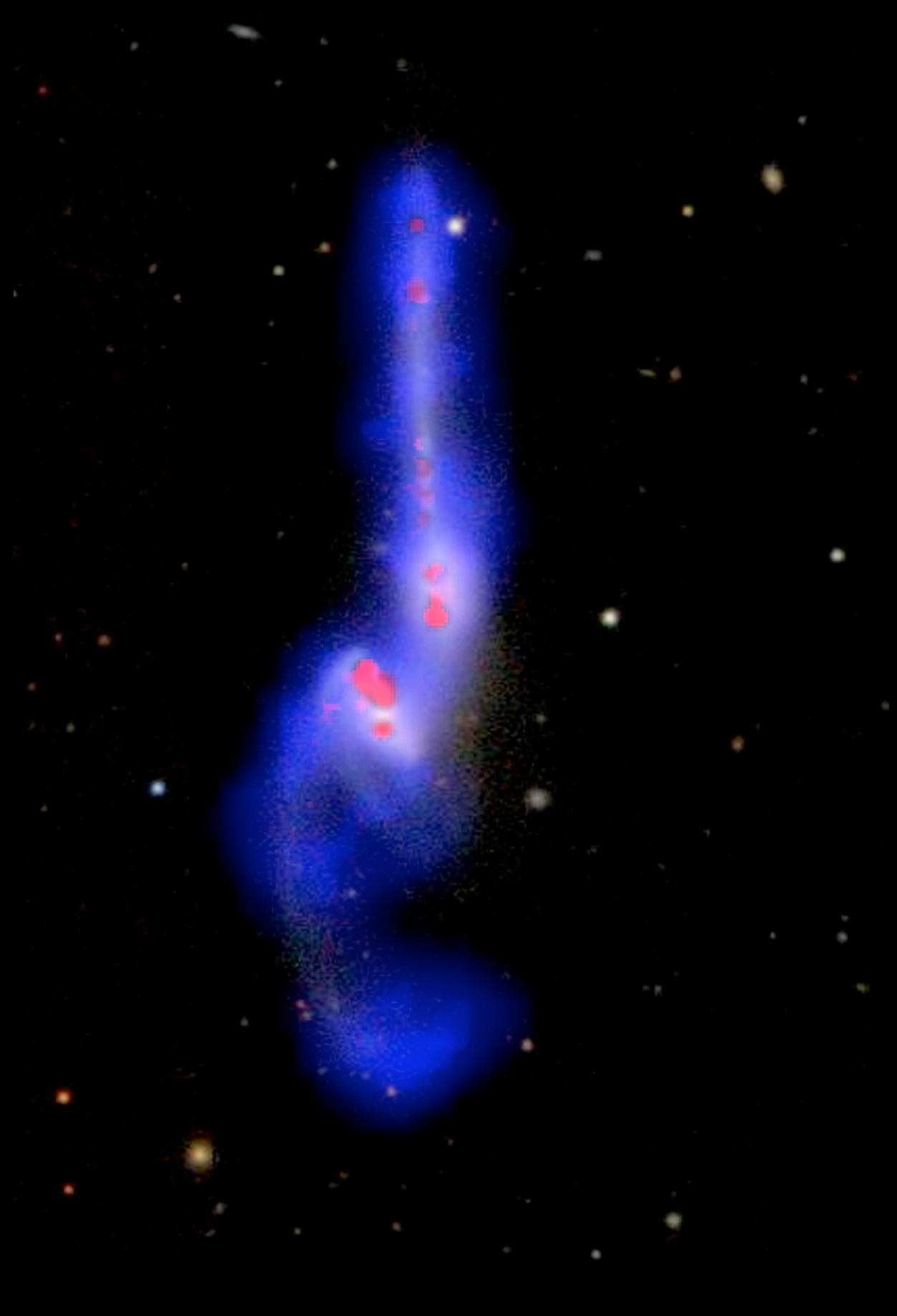


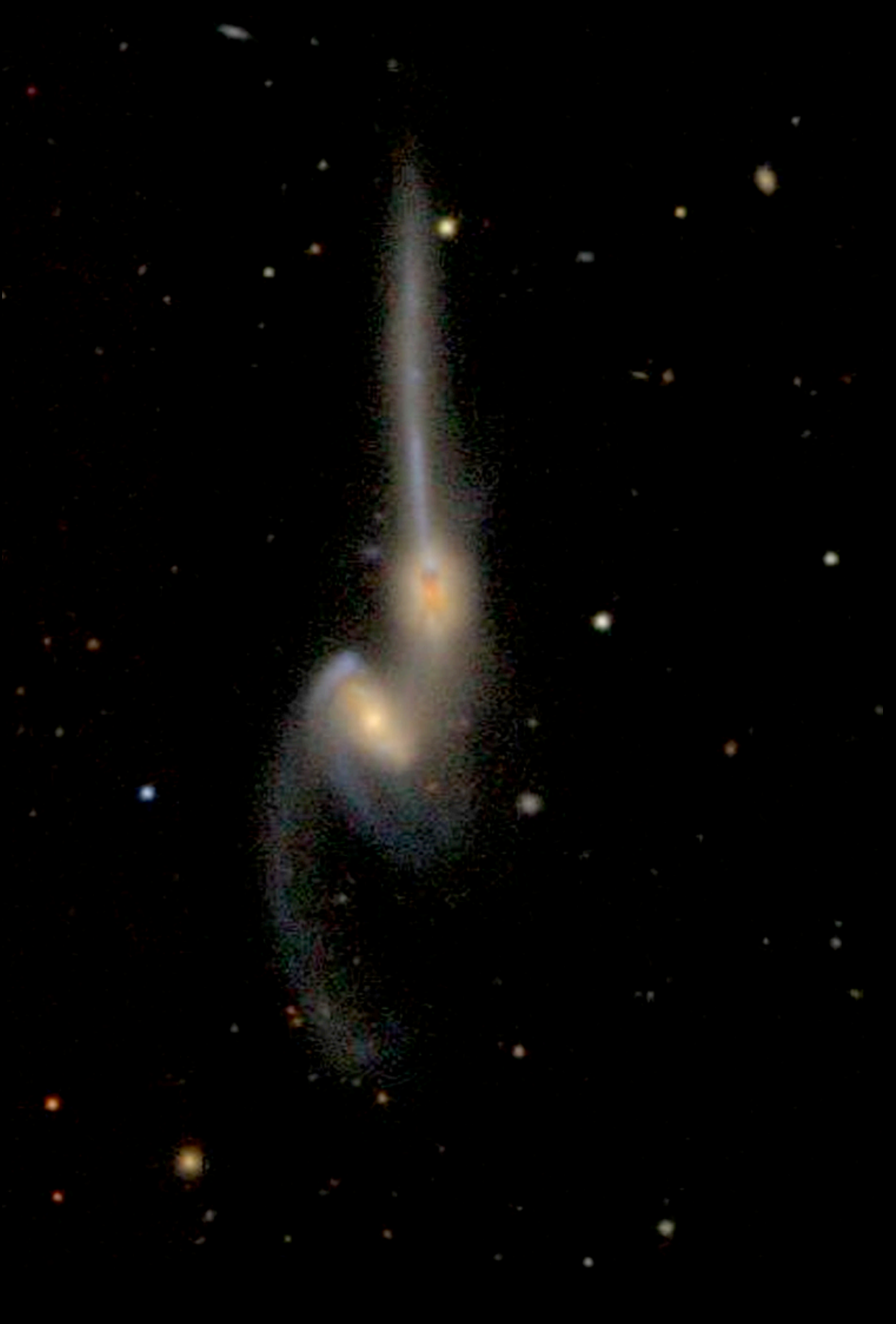


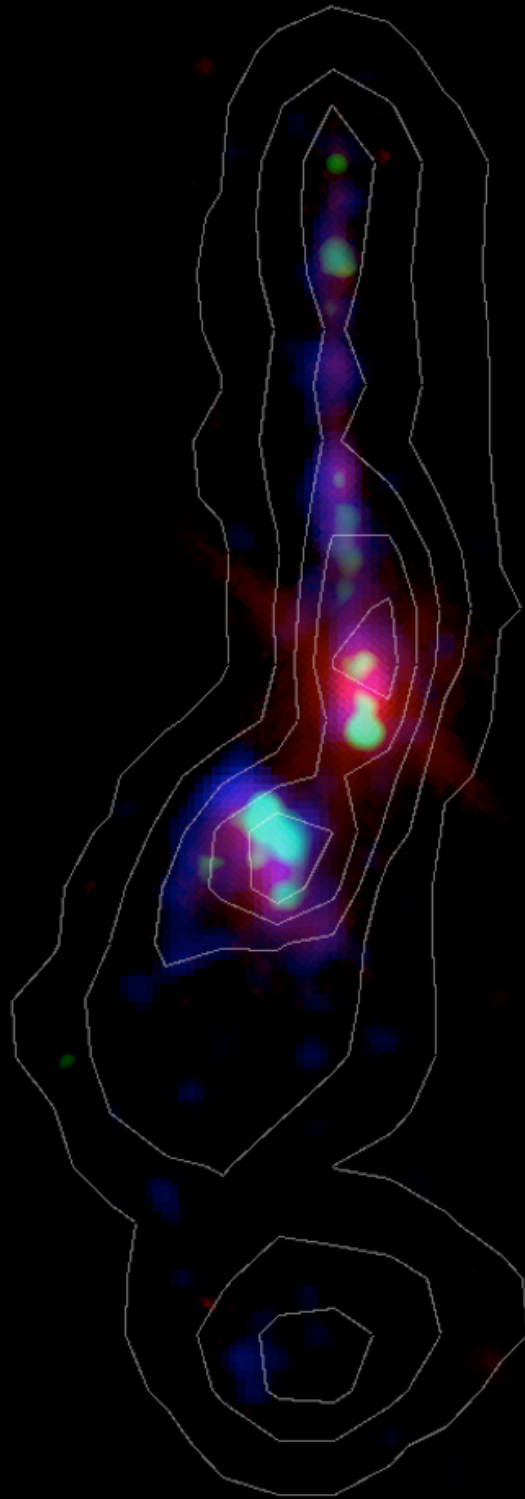


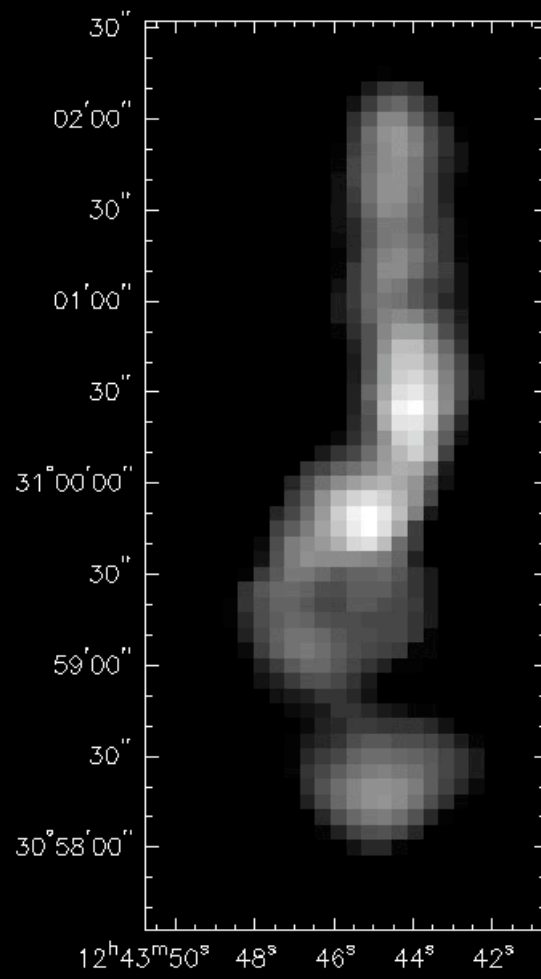


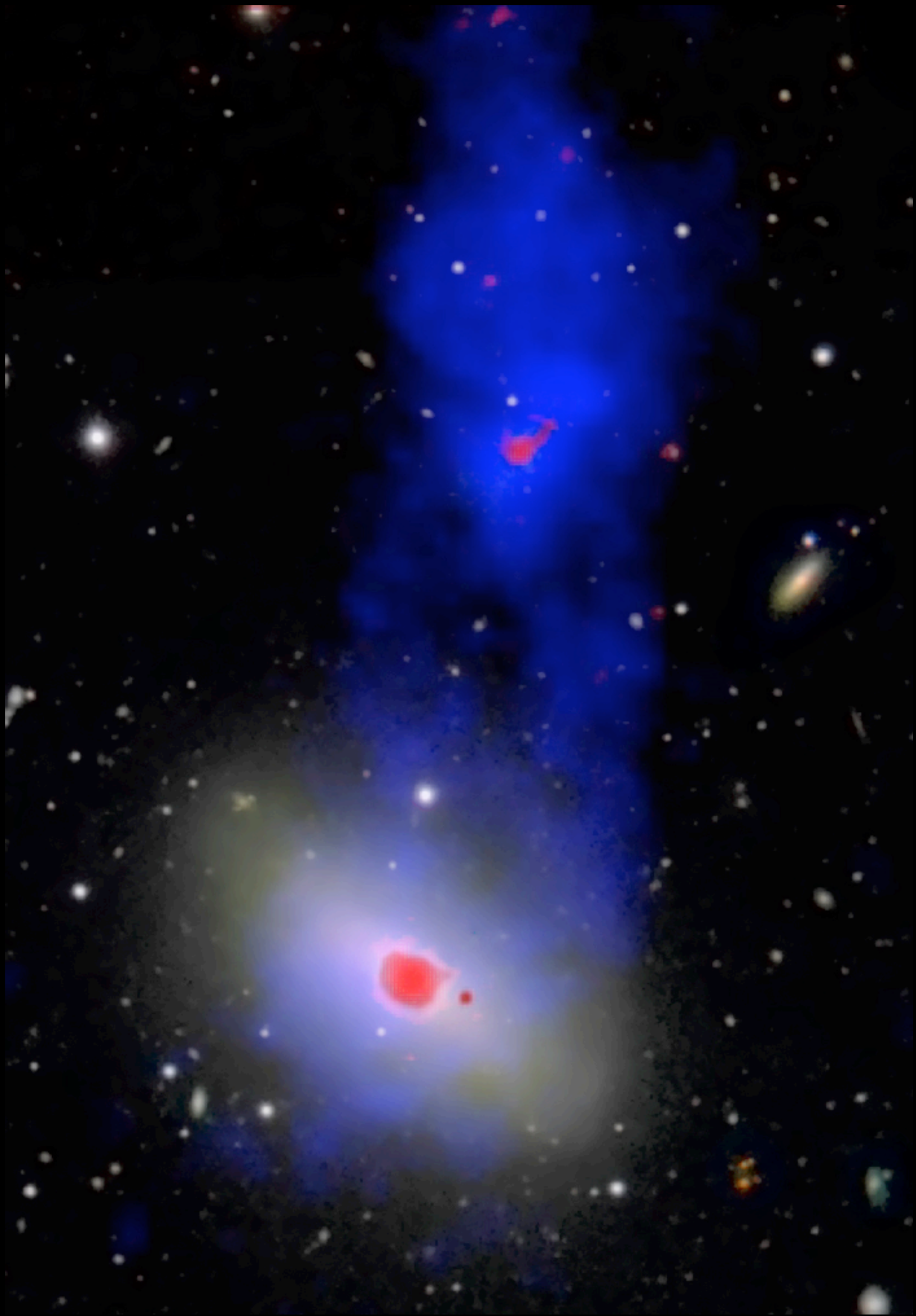








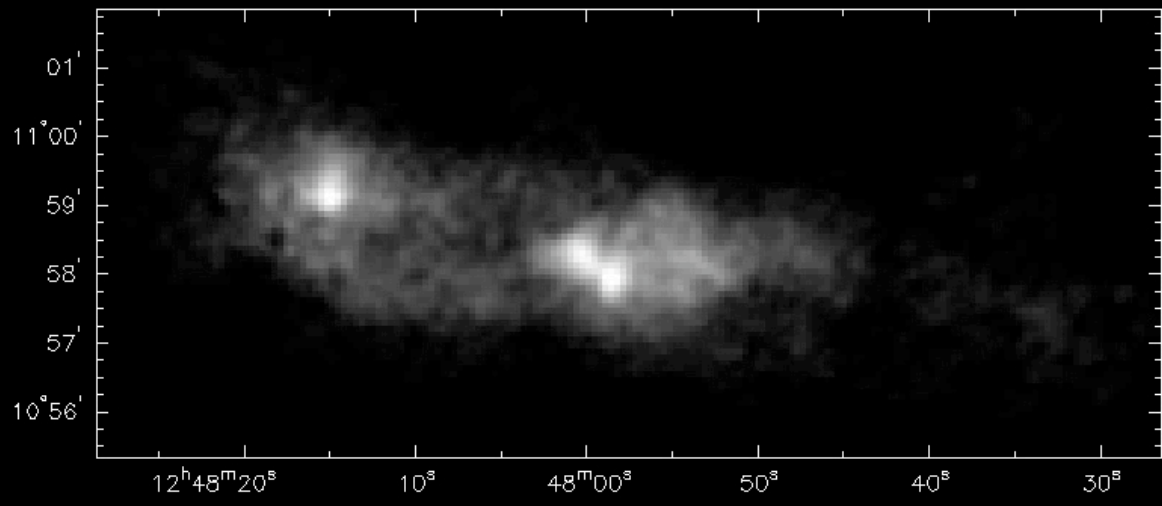






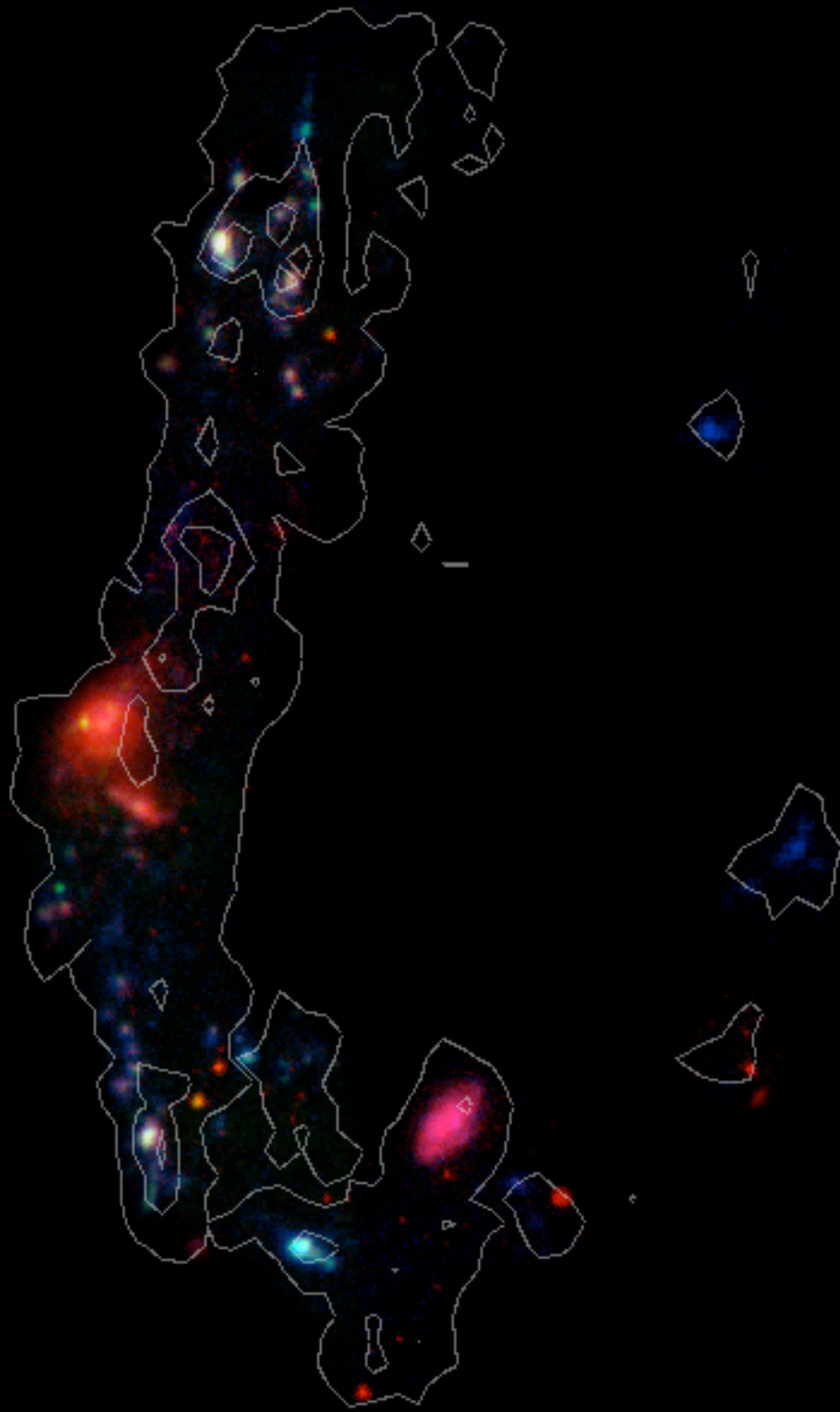


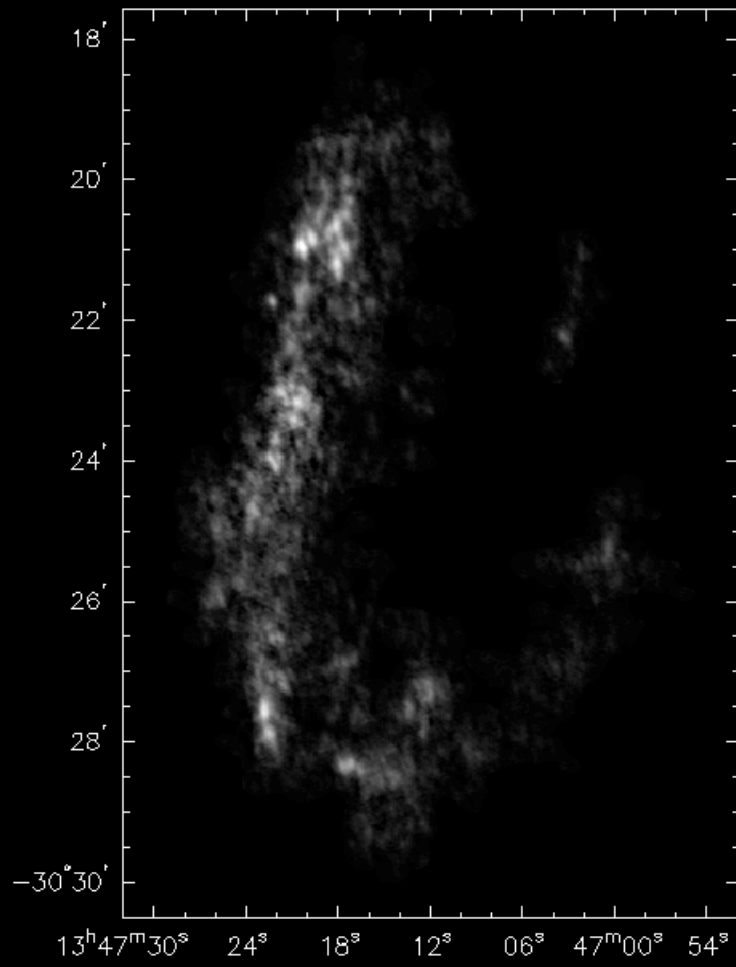






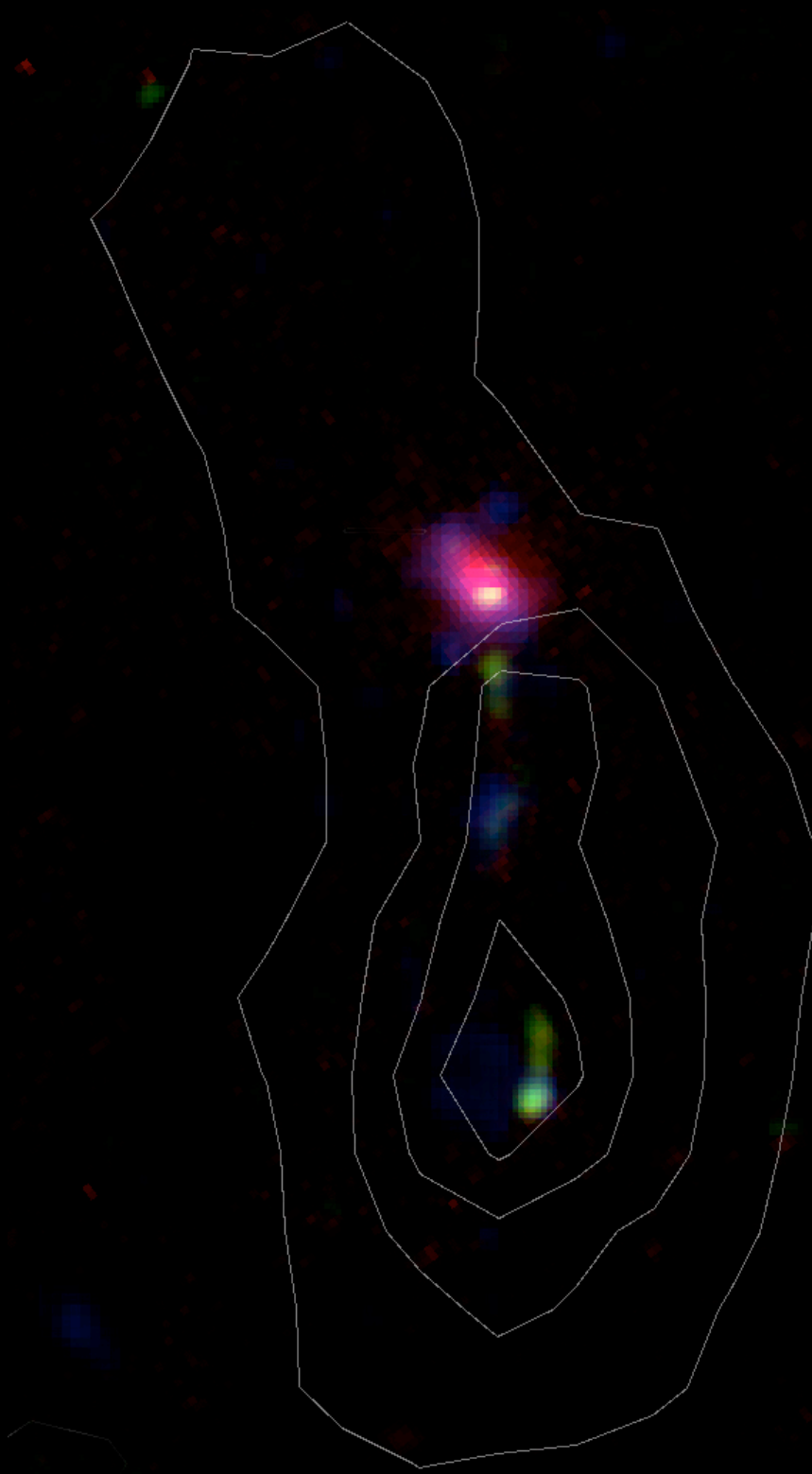




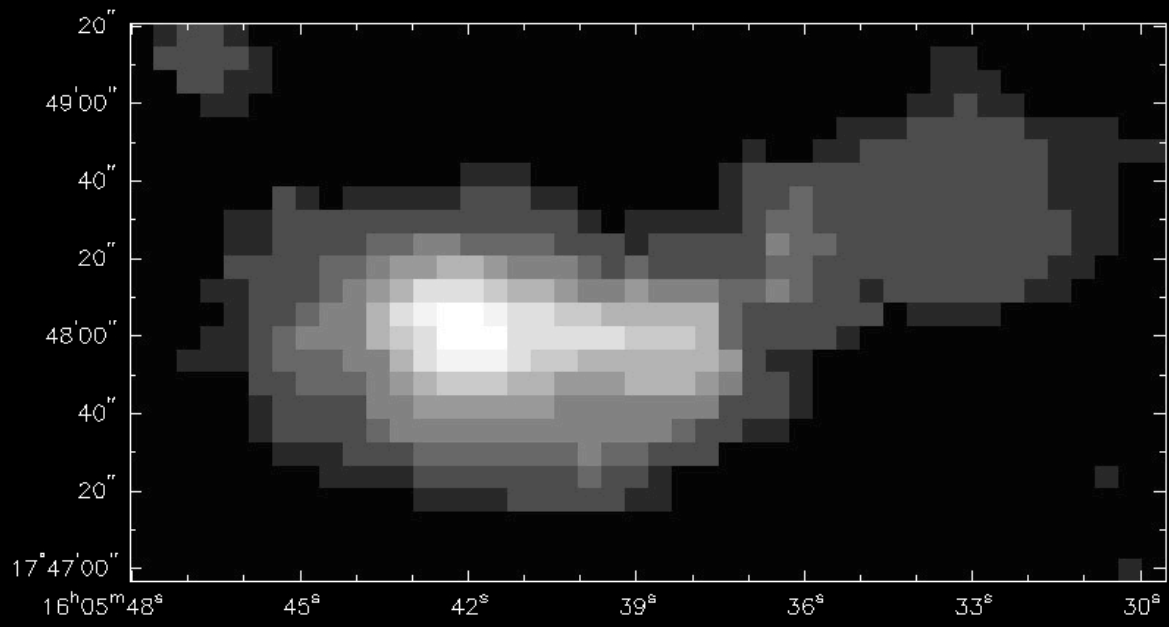


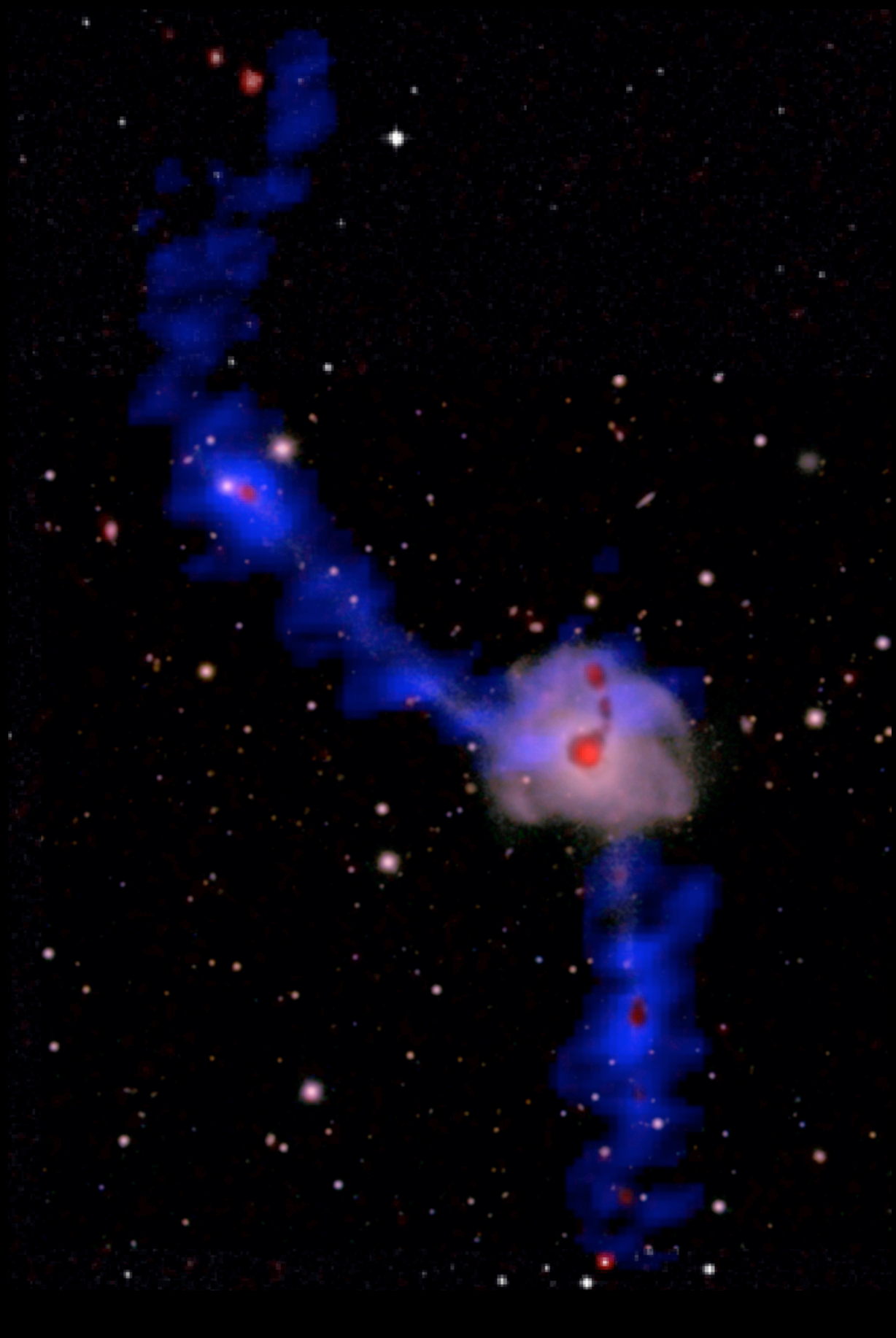




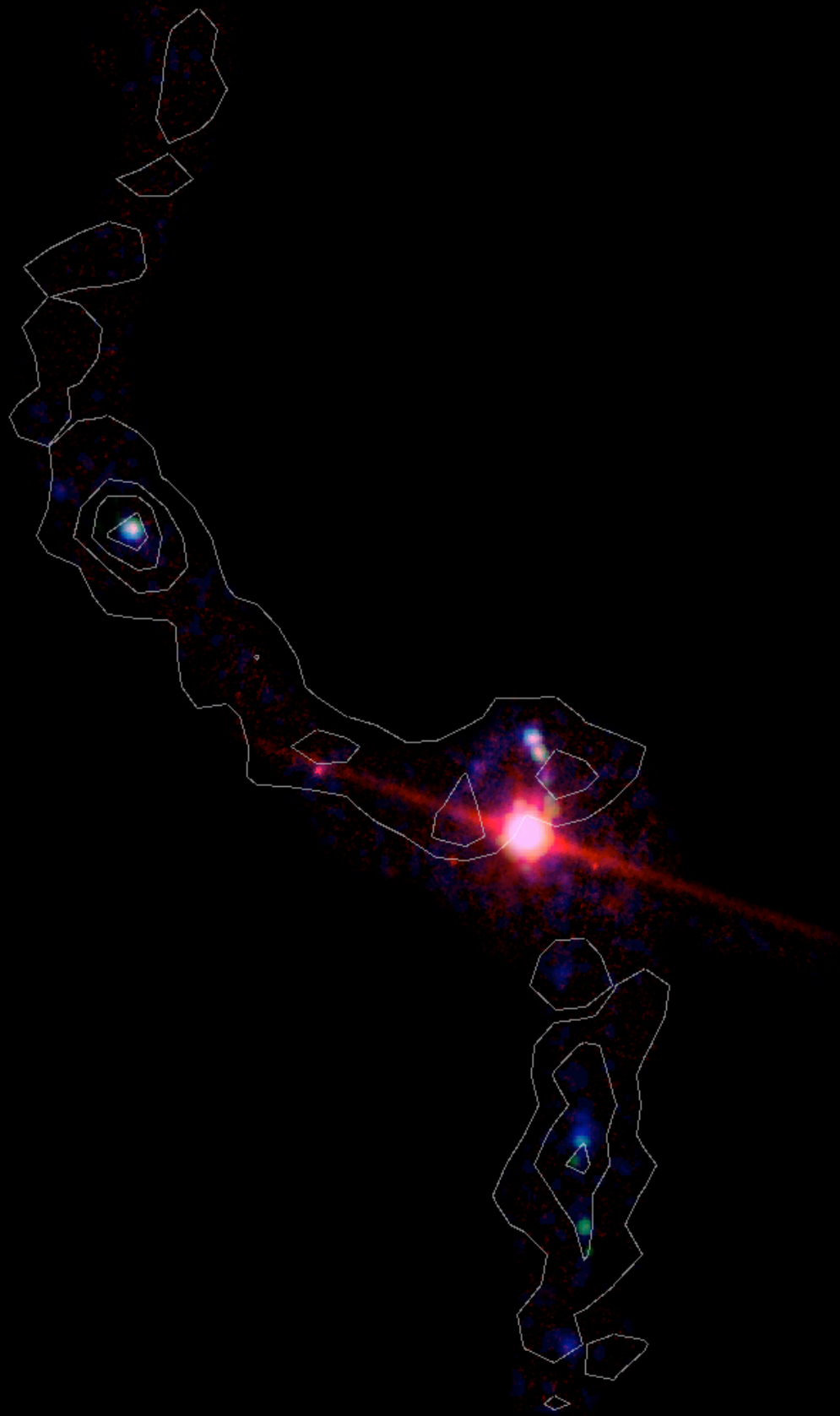


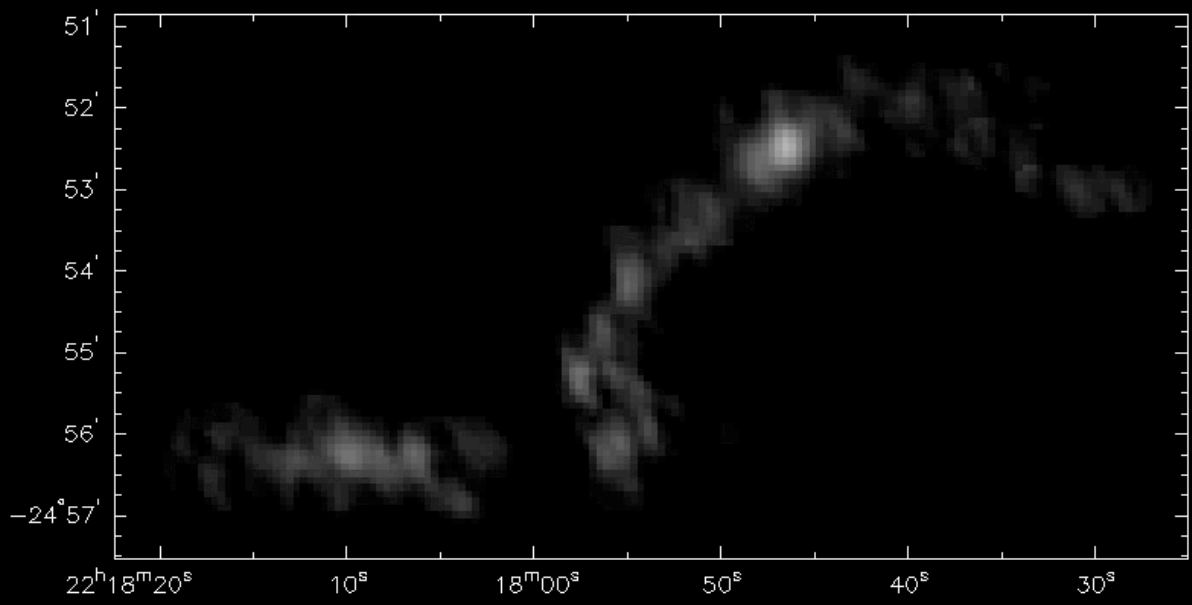






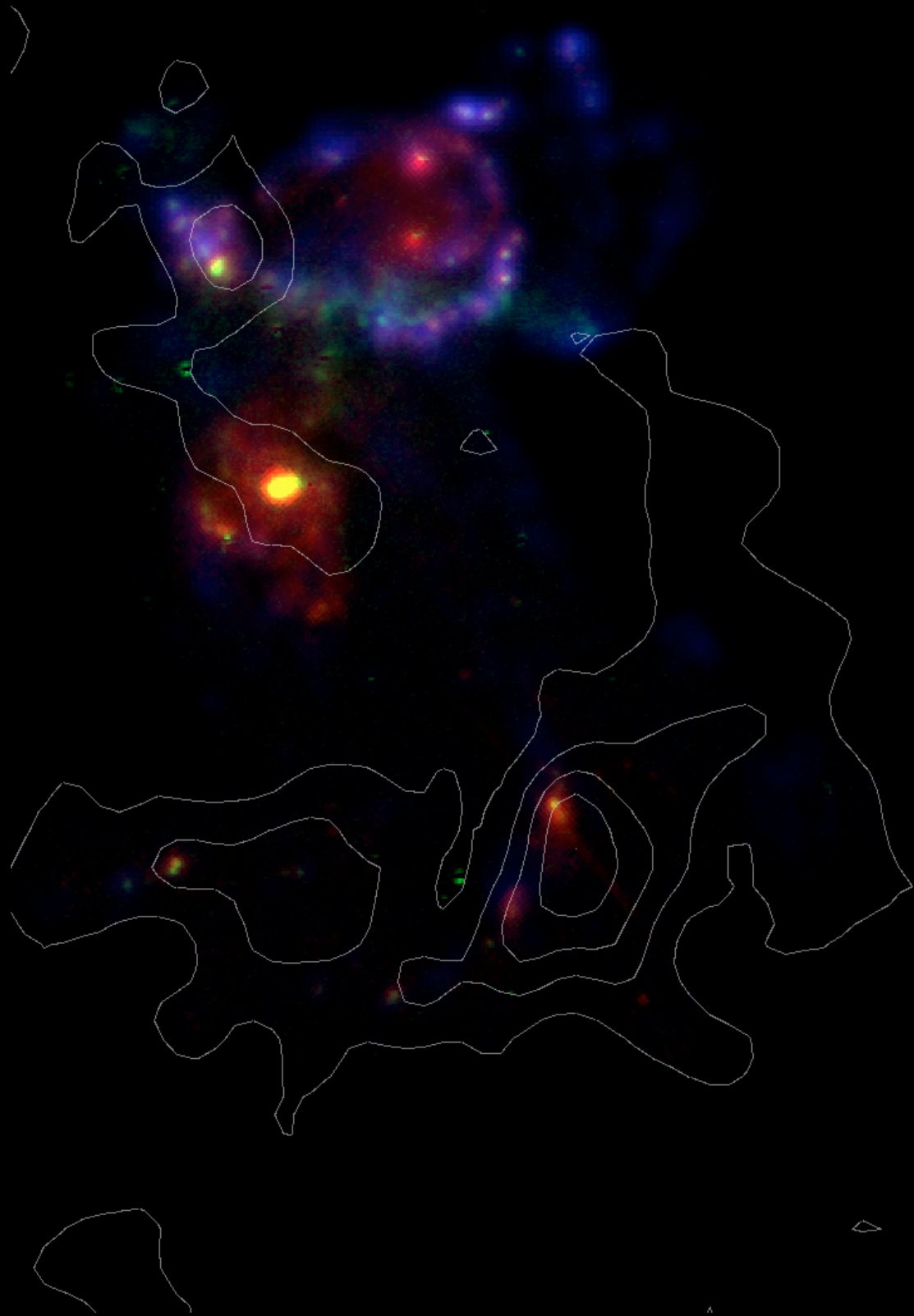




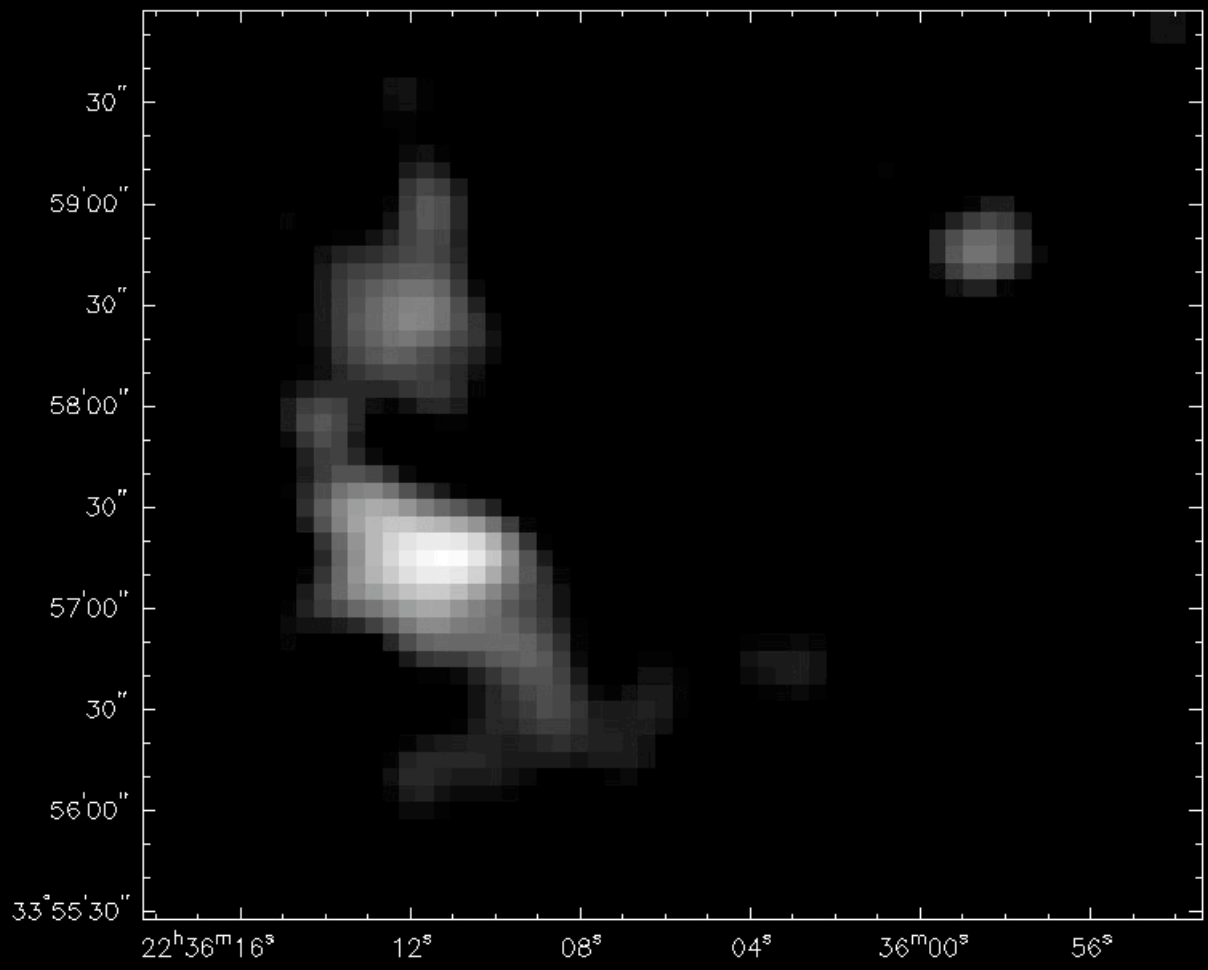


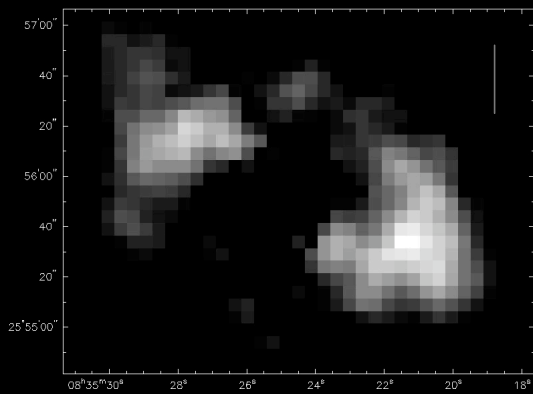












### NGC 2623 - Arp 243 @ D=74 Mpc

An advanced merger, luminous in the far-infrared; 2 stellar and gaseous tidal tails; knots of Star Formation in the eastern one.

*Image 1:* VLA-C/Hi (blue) + CFH/H $\alpha$  (red) on optical SDSS (true color)

*Image 2:* optical SDSS (true color)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue) + CFHT/H $\alpha$  (green) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red) + VLA-C/Hi contours

*Image 4:* VLA-C/Hi with J2000 coordinates

### NGC 2782 - Arp 215 @ D=33 Mpc

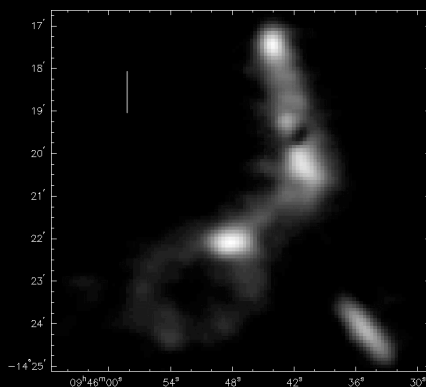
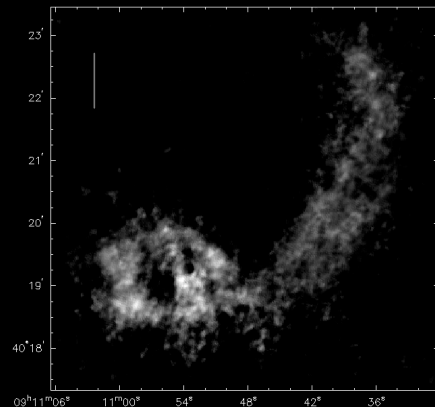
An Sa spiral currently accreting a dwarf galaxy. One prominent HI tail with faint knots of star-formation; active SF to the East.

*Image 1:* VLA-AB/Hi (blue) + GALEX/FUV (red) on optical SDSS (true color)

*Image 2:* optical SDSS (true color)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue) + CFHT/H $\alpha$  (green) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red) + VLA-AB/Hi contours

*Image 4:* VLA-AB/Hi with J2000 coordinates



### Arp 245 - NGC 2992/93 @ D=33 Mpc

An interacting system, observed about 100 Myr after the first encounter between two spirals. The tidal tail emanating from NGC 2992 hosts a TDG at its tip, while that of NGC 2993 does not actively form stars.

*Image 1:* VLA-C+B/Hi (blue) + GALEX/FUV (red) on optical Dupont100inch (UVI)

*Image 2:* optical Dupont100inch (UVI)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue) + NTT/H $\alpha$  (green, partial) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red, partial) + VLA-C+B/Hi contours

*Image 4:* VLA-C/Hi with J2000 coordinates

### M81 group - M81/M82/NGC 3077 @ D=3 Mpc

A nearby group of galaxies, composed of 3 main interacting galaxies + many dwarfs; a prominent HI structure links the three galaxies.

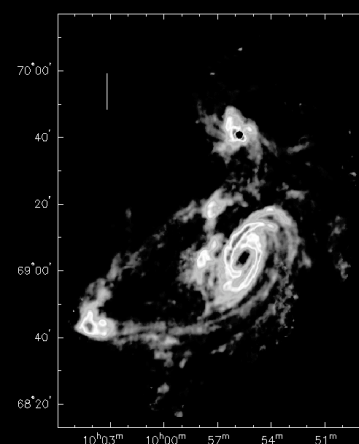
It hosts several Star Forming regions: in particular towards the Garland object and Holmberg IX

*Image 1:* VLA/Hi (blue) + GALEX/FUV (red, partial) on DSS + Amator 600m/350D

*Image 2:* Amator 600m/350D

*Image 3:* GALEX/FUV (blue, partial) + H $\alpha$  (green, partial) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red, partial)

*Image 4:* VLA/Hi with J2000 coordinates



### Arp 105 - Guitar - NGC 3561 @ D=120 Mpc (Abell 1185)

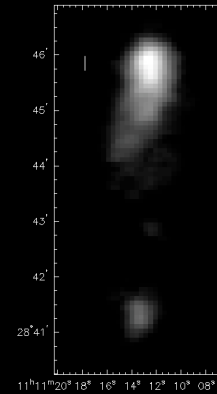
A collision between a spiral and an elliptical. Two star-forming TDGs at the end of the two tidal tails emanating from the spiral.

*Image 1:* VLA-C+B/HI (blue) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red) on optical CFHT/12k (BVR)

*Image 2:* optical CFHT/12k (BVR)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue) + CFHT/H $\alpha$  (green, partial) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m + VLA-C+B/HI contours

*Image 4:* VLA-C/HI with J2000 coordinates



### Antennae - Arp 244 - NGC 4038/39 @ D=20 Mpc

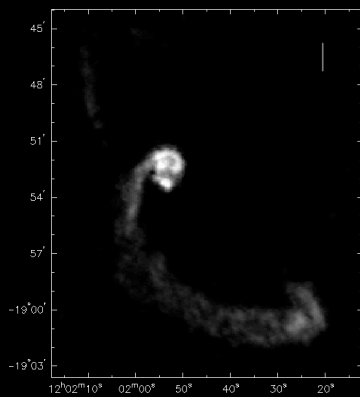
An advanced collision between two spirals. Faint knots of Star-Formation near the tip of the most prominent tidal tail (towards an old TDG candidate); no Star-Formation activity in the shorter northern tail.

*Image 1:* VLA-CB/HI (blue) + GALEX/FUV (red) on optical NOAO + DSS (True color)

*Image 2:* optical DSS + NOAO (true color)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue) + CFHT+Pal1.5m/H $\alpha$  (green, partial) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red) + VLA-CB/HI contours

*Image 4:* VLA-CB/HI with J2000 coordinates



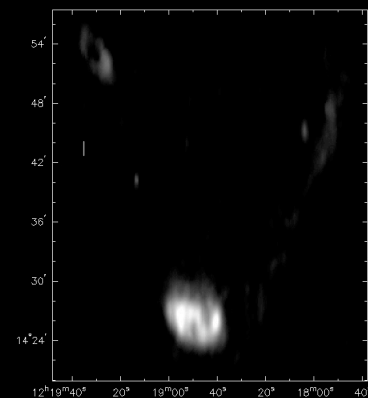
### NGC 4254 - VirgoHI21 @ D=17 Mpc (Virgo Cluster)

A spiral with a single, long but faint HI tidal tail without any optical counterpart. One sub-condensation known as VirgoHI21. Probably the result of a high-velocity encounter.

*Image 1:* WSRT+Arecibo/HI (blue) + GALEX/NUV (red) on optical SDSS (true color)

*Image 2:* optical SDSS (true color)

*Image 3:* WSRT/HI with J2000 coordinates



### Mice - NGC 4676 - Arp 242 @ D=91 Mpc

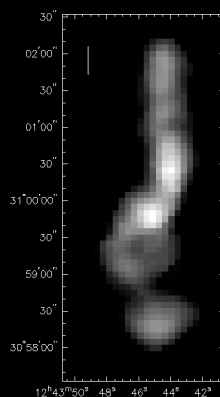
An advanced collision between two spirals, with two prominent tidal tails. Knots of Star-Formation all along the northern tail.

*Image 1:* VLA-CD/HI (blue) + CFHT/H $\alpha$  (red) on optical SDSS (true color)

*Image 2:* optical SDSS (true color)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue) + CFHT/H $\alpha$  (green) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red) + VLA-CD/HI contours

*Image 4:* VLA-CD/HI with J2000 coordinates



### NGC 4694 @ D=17 Mpc (Virgo Cluster)

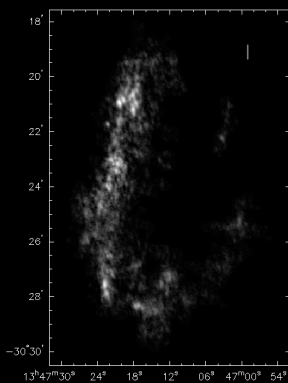
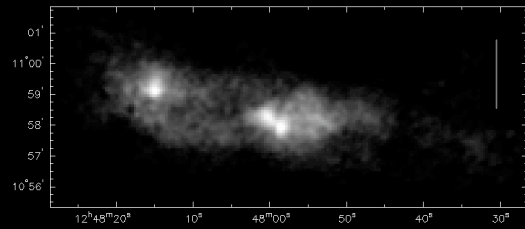
A disturbed early type galaxy with a single HI tail. A star-forming sub-condensation, VCC 2062, is a TDG candidate.

*Image 1:* VLA-C/HI (blue) + GALEX/FUV (red) on optical SDSS + NTT (BVR)

*Image 2:* optical SDSS + NTT (BVR)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue) + KP0.9m/H $\alpha$  (green) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red) + VLA-C/HI contours

*Image 4:* VLA-C/HI with J2000 coordinates



### NGC 5291 @ D=62 Mpc (Virgo Cluster)

A huge HI collisional ring around an early-type galaxy, formed during a direct high-velocity collision. Tens of Star-Forming regions along the ring; the most luminous ones belong to recycled dwarf galaxies.

*Image 1:* VLA-B/HI (blue) + GALEX/FUV (red) on DSS + NTT (BVR)

*Image 2:* DSS + NTT (BVR)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue) + ESO 3.6m/H $\alpha$  (green, partial) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red, partial) + VLA-B/HI contours

*Image 4:* VLA-B/HI with J2000 coordinates

### IC 1182 @ D=138 Mpc (Hercules Cluster)

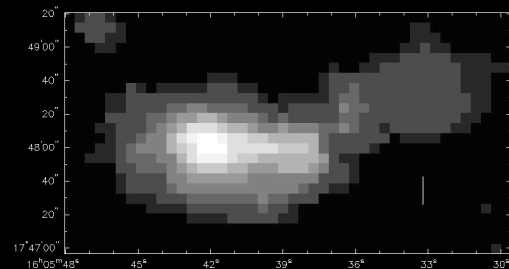
An advanced merger, with two tidal tails; most of the external star-forming activity takes place in the western tail.

*Image 1:* VLA-C+D/HI (blue) + GALEX/FUV (red) on INT (BVI)

*Image 2:* INT (BVI)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue, uncertain astrometry) + CFHT/H $\alpha$  (green) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red) + VLA-C+D/HI contours

*Image 4:* VLA-C+D/HI with J2000 coordinates



### NGC 7252 - Arp 226 @ D=66 Mpc

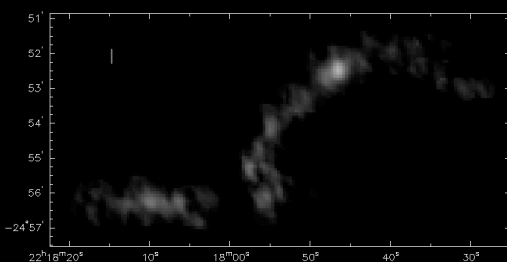
An advanced merger, with two tidal tails, each hosting a TDG candidate.

*Image 1:* VLA-D/HI (blue) + CFHT/H $\alpha$  (red) on DSS + NTT (BVR)

*Image 2:* DSS + NTT (BVR)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue) + KP2.1m/H $\alpha$  (green) + Spitzer/IRAC 8  $\mu$ m (red) + VLA-D/HI contours

*Image 4:* VLA-D/HI with J2000 coordinates



**Stephan's Quintet - HCG 092 - Arp 319 -  
NGC 7317/8/9 @ D=88 Mpc**

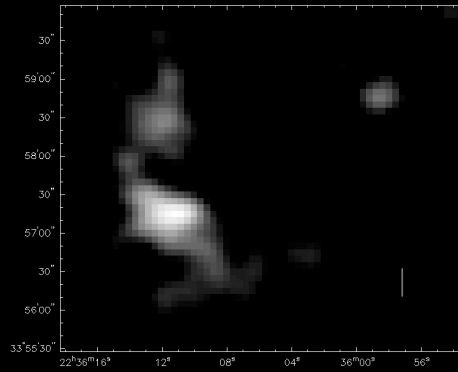
A compact group of galaxies, exhibiting several stellar and gaseous tidal tails + regions of intergalactic shocks; various intergalactic Star-Forming regions, including one TDG candidate, SQ-B

*Image 1:* VLA/HI (blue) + Spitzer/IRAC 8  $\mu\text{m}$  (red) on HST + Calar Alto 3.5m (BVR)

*Image 2:* HST + Calar Alto 3.5m (BVR)

*Image 3:* GALEX/FUV (blue) + Calar Alto 2.2m/H $\alpha$  (green) + Spitzer/IRAC 8  $\mu\text{m}$  (red) + VLA/HI contours

*Image 4:* VLA/HI with J2000 coordinates





# Chapitre 1

## Recyclage entregalactique

### Sommaire

<b>1.1 A l'extérieur des galaxies : le milieu entregalactique</b>	<b>67</b>
<b>1.2 Une nouvelle vision des galaxies et du milieu entregalactique</b>	<b>68</b>
1.2.1 Grand champ et faibles brillances de surface	68
1.2.2 Des réserves entregalactiques de gaz moléculaire	68
1.2.3 <i>Article : Visible and invisible molecular gas in collisional debris of galaxies</i>	71
1.2.4 <i>Article : Formation of molecular gas in the tidal debris of violent galaxy-galaxy interactions</i>	73
1.2.5 <i>Article : Molecular and ionized gas in the tidal tail in Stephan's Quintet</i>	75
<b>1.3 Origine des composantes du milieu entregalactique</b>	<b>77</b>
1.3.1 Expulsion	77
1.3.2 Destruction	77
1.3.3 Renaissance	77
1.3.4 Dépistage	77
<b>1.4 Formation stellaire et galactique entregalactique</b>	<b>78</b>
1.4.1 Formation stellaire étendue	78
1.4.2 (Super) Amas Stellaires jeunes	79
1.4.3 Galaxies naines de marée	80
1.4.4 Amas stellaires, globulaires ou galaxies ?	81
1.4.5 <i>Article : Gas segregation in the interacting system Arp 105</i>	82
1.4.6 <i>Article : Formation of a Tidal Dwarf Galaxy in the interacting system Arp 245 (NGC 2992/93)</i>	84

### 1.1 A l'extérieur des galaxies : le milieu entregalactique

Cette thèse porte sur des phénomènes se déroulant à la périphérie de galaxies, hors des disques stellaires, mais encore probablement dans le halo de matière noire qui les englobe. Dans mes publications, j'ai souvent qualifié ce milieu d'INTERGALACTIQUE. Mais ce terme qualifie pour beaucoup ce gaz ténu, primordial, du champ qui lorsqu'il est chauffé dans les grandes structures et émet dans le domaine des rayons X devient le milieu INTRA-AMAS ou INTRAGROUPE. C'est aussi celui sondé en absorption dans la ligne de visée des quasars à l'origine de la forêt de Lyman. "Au delà des galaxies", EXTRA-GALACTIQUE pourrait être le terme ad-hoc s'il n'avait été utilisé pour désigner les objets du ciel situé hors de notre "Galaxie". Pour éviter donc toute ambiguïté, je baptiserai cet environnement hors des galaxies, mais pas encore tout à fait intergalactique, de ENTREGALACTIQUE. Il s'agira le plus souvent dans cette étude des régions situées entre des galaxies en collision ou à proximité de celles-ci.

## 1.2 Une nouvelle vision des galaxies et du milieu entregalactique

### 1.2.1 Grand champ et faibles brillances de surface

Dans les années récentes, la qualité accrue des détecteurs et l'augmentation de leur champ de vue, plus d'ailleurs que l'utilisation de télescopes de grand diamètre, a permis d'étendre de manière considérable le champ d'investigation des galaxies proches et ainsi de changer de manière parfois radicale notre vision de ces objets pourtant familiers. En atteignant des brillances de surface optiques de 30–31 mag arcsec<sup>-2</sup> – ce qui est possible dans le Groupe Local à l'aide de comptages d'étoiles – les chercheurs ont révélé l'extrême complexité des régions externes des galaxies spirales, et la présence de disques et halos stellaires bien plus étendus que ne le laissaient prévoir les théories standards de formation des structures. La présence de filaments à plus de 70 kpc du cœur d'Andromède (Ibata et al. 2005) témoigne d'un passé perturbé et de l'accrétion par la galaxie voisine de la Voie Lactée de galaxies satellites. Ainsi, si on les observe suffisamment profondément, même des galaxies apparemment tranquilles peuvent présenter des structures jusqu'alors essentiellement connues dans des galaxies très perturbées comme celles des **Antennes**.

La présence dans le milieu intra-amas d'une population stellaire sous-jacente responsable d'une luminosité diffuse optique a longtemps été discutée et remise en question - une mauvaise correction du fond du ciel et sous-traction des étoiles de champ pouvant l'expliquer. Or la détection directe dans l'amas de la Vierge de nébuleuses planétaires non liées à des galaxies (e.g. Feldmeier et al. 2004; Arnaboldi et al. 2004) a levé les doutes : une fraction non négligeable de la population stellaire des amas de galaxies, estimée entre 10 et 30%, réside loin ou hors des disques galactiques. De même, des supernovae hors disque galactique ont été découvertes (Cenko et al. 2008).

S'il a fallu attendre une période récente pour mettre en évidence l'existence de populations stellaires externes voire intergalactiques dans des environnements où on ne les attendait pas, la cartographie radio, en particulier avec le VLA, avait montré depuis longtemps, grâce à un grand champ de vue, l'importante extension du gaz d'hydrogène atomique, jusqu'à 10 fois celle du disque optique pour certaines classes de galaxies et l'existence de filaments de gaz d'origine de marée autour de galaxies apparemment calmes. Le groupe constitué par les galaxies **M81**, **M82** et **NGC 3077** fournit une illustration emblématique des différences d'interprétation que l'on peut avoir en comparant l'optique et la radio. Les deux images du groupe souvent présentées en vis à vis montrent d'un côté trois galaxies indépendantes et de l'autre un système lié par plusieurs ponts et queues HI qui sont autant d'évidences d'une interaction gravitationnelle en cours. Celle-ci explique d'ailleurs l'activité de formation stellaire particulièrement exacerbée de M82. Toutefois comme je l'ai déjà souligné, ces différences ne sont plus aussi flagrantes avec des images optiques modernes : ainsi la caméra MegaCam, par exemple, vient de révéler la présence de sous-structures diffuses liées aux filaments HI. De son côté, l'imagerie HI a elle aussi fait des progrès et le niveau de sensibilité atteint a mis en évidence de nouvelles structures, filaments, en particulier dans l'amas de la Vierge, jusqu'alors inconnus. Indéniablement, le HI moins lié gravitationnellement à sa galaxie parent que les étoiles est plus sensible aux effets d'environnement et réagit de manière immédiate. A contrario, les composantes stellaires restent plus longtemps visibles et gardent la mémoire de très vieilles interactions : quelques milliards d'années après une collision, le HI a disparu, évaporé ou consommé, comme nous le verrons plus tard.

### 1.2.2 Des réserves entregalactiques de gaz moléculaire

Si les interféromètres radio ou les caméras optiques grand-champ ont permis de démasquer relativement facilement la présence de nuages de gaz atomique ou d'étoiles hors des galaxies ou dans leurs régions les plus externes, les télescopes millimétriques à même de cartographier le gaz moléculaire sont encore loin de disposer du champ de vue ad-hoc, tandis que les techniques de balayage couvrant de grandes zones du ciel restent laborieuses. Les observations pointées restent le moyen le plus usité pour la détection de monoxyde de carbone, le traceur le plus commun du gaz d'hydrogène moléculaire. Or pendant longtemps, celui-ci n'a été recherché que là où on estimait pouvoir maximiser les chances de le trouver : au cœur des galaxies, en particulier les spirales. La découverte de réserves insoupçonnées de gaz moléculaire en dehors des disques galactiques est à l'actif de notre équipe. En utilisant l'antenne de 30 mètres de l'IRAM au Pico Veleta (Espagne), nous avons pour la première fois détecté le signal à 3 mm (115 GHz) de la raie de <sup>12</sup>CO venu de régions situées à des distances supérieures à 50 kpc des noyaux galactiques (Braine et al. 2000, **article ci-dessous**). Cette détection n'a cependant pas été fortuite. Nous avons pointé le télescope en direction de nuages de gaz HI entregalactiques, plus précisément à l'endroit où le HI présentait un pic dans sa densité de colonne. Les transitions (1-0) et (2-1) de la raie de <sup>12</sup>CO ont été initialement observées dans deux objets, Arp 105 et Arp 245 (Braine et al. 2000), puis dans une dizaine d'autres systèmes (Braine et al.



2001). La figure 1.1 résume les détections CO obtenues subséquentement par diverses équipes, y compris la notre. Des cartes détaillées de l'émission ont pu être faites pour les objets les plus lumineux avec les interféromètres du Plateau de Bure (Lisensfeld et al. 2004, [article ci-dessous](#)) et de Owens Valley. Plus de 80% des cibles sélectionnées à partir de données HI ont été détectées. Le rapport masse de  $H_2$ , déterminé à partir de l'intensité CO, sur masse HI est typiquement de 30%, mais peut atteindre dans des objets exceptionnels plus de 50%. C'est notamment le cas dans le [Quintette de Stefan](#), qui dans la région tidale nommée SQ-B, possède une quantité de gaz moléculaire équivalente à celle de la Voie Lactée (Lisensfeld et al. 2002).

Comme nous le verrons par la suite, ces réserves de gaz alimentent des épisodes de formation stellaire intergalactique.

---

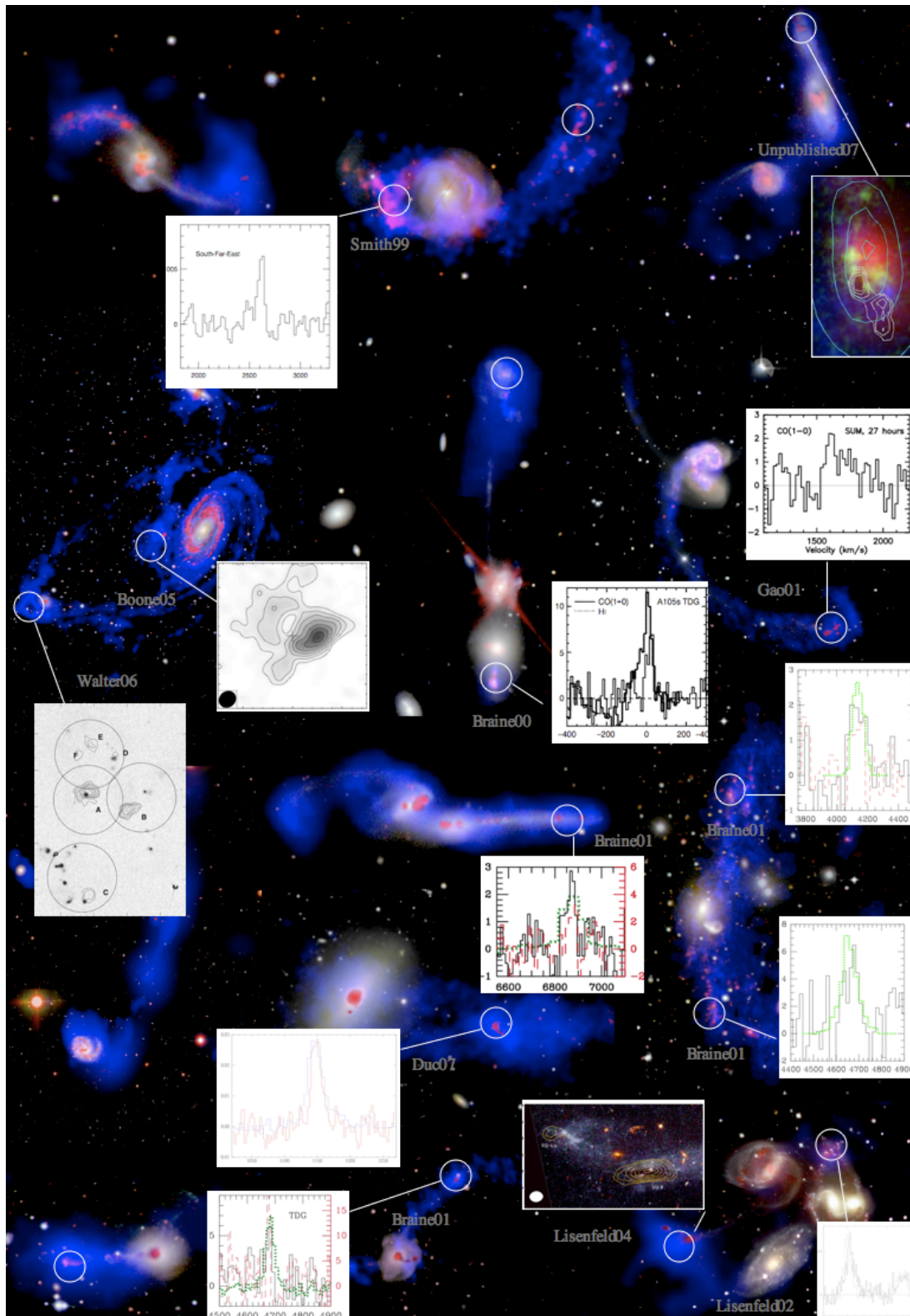


Fig. 1.1 – CO observations of collisional debris in a sample of interacting systems. A CO intensity map is shown in the insets whenever it is available. Otherwise the CO spectra are shown. The circles locate the targets. Whenever no spectra or maps are shown, the line has not been detected. See the portfolio for details on the background image and the quoted references for information on the CO observations. The unpublished CO map of the TDG candidate North of NGC 2992 (upper-right panel) has been obtained with the OVRO interferometer. The (white) contours of the CO intensity are overlaid on a composite FUV-H $\alpha$ -IR 8  $\mu$ m image, together with the (blue) contours of the HI emission.

### 1.2.3 Article : *Visible and invisible molecular gas in collisional debris of galaxies*

L'article [Duc \(2007\)](#) dresse une revue des connaissances actuelles sur le gaz moléculaire dans les débris de collision. Il aborde aussi la question de l'existence d'un gaz moléculaire froid. Ce point sera détaillé dans le chapitre [4.2.4](#).

#### **Abstract**

*Star formation may take place in a variety of locations in interacting systems : in the dense core of mergers, in the shock regions at the interface of the colliding galaxies and even within the tidal debris expelled into the intergalactic medium. Along tidal tails, objects may be formed with masses ranging from those of super-star clusters to dwarf galaxies : the so-called Tidal Dwarf Galaxies (TDGs). Based on a set of multi-wavelength observations and extensive numerical simulations, I will show how TDGs may simultaneously be used as laboratories to study the process of star-formation (SFE, IMF) in a specific environment and as probes of various cosmological properties, such as the distribution of dark matter and satellites around galaxies.*

SF2A 2007

J. Bouvier, A. Chalabaev, C. Charbonnel (eds)

## VISIBLE AND INVISIBLE MOLECULAR GAS IN COLLISIONAL DEBRIS OF GALAXIES

P.-A. Duc<sup>1</sup>

**Abstract.** Molecular gas has been searched for and found in unexpectedly large quantities in some collisional debris of interacting galaxies: HI-rich tidal tails, bridges and collisional rings. It was so far observed through millimeter observations of the CO line and detected towards or near regions of star-formation associated to dense condensations of the atomic hydrogen. The discovery of cool H<sub>2</sub> at distances greater than 50 kpc from the parent (colliding) galaxies, whereas the external disk of spirals is generally considered to be CO-poor, raised question on its origin and favored the hypothesis of a local production out of collapsed HI clouds. However recent observations of a diffuse CO component along tidal debris have challenged this idea. Another recent puzzle is the measurement in the collisional debris of two interacting systems and four recycled objects of a missing mass, whereas no dark matter is expected there. One debated interpretation is that this unseen component is cold, “invisible” molecular gas initially present in the disk of spirals.

### 1 Introduction: the many components of collisional debris

The collisional debris addressed here refer to all the material that is expelled into the intergalactic medium during galaxy-galaxy interactions. This is the result of either the tidal forces that shape bridges and tails, of direct high-speed impacts at the origin of rings or head-on collisions forming systems similar to the so-called “Taffy” galaxies (see Struck 1999 for a review). Collisional debris may consist of old and young stars, gas clouds and dust with a relative proportion that depends very much on the type of interactions and properties of the parent galaxies. Tidal tails with a prominent old stellar population will be common in slow encounters between late-type galaxies – see the famous Antennae galaxies. Purely stellar tails may exist, when the gaseous counterpart has for some reason been displaced and is now offset (Mihos 2001). More commonly, the gaseous tail extends further than the stellar one, because it was originally more extended in the disk of its parent galaxies. Collisional rings are particularly gas-rich, being embedded in a faint stellar halo. Finally, long, purely gaseous, tidal tails may form during high-speed collisions, as recently shown by Duc & Bournaud (2007). Finally, if the gas in the collisional debris is dense enough, it collapses and locally form a new generation of stars.

Whereas stellar debris have been known for a long time – they are the peculiarities in the optical catalog of Peculiar Galaxies by Arp (1966) –, their gaseous, HI, counterparts have been systematically studied from less than twenty years (e.g., Hibbard & van Gorkom 1996). This was possible thanks to interferometers like the Very Large Array which offer a very large field of view. In situ star formation in collisional debris has been discovered through several ways, including broad-band optical (e.g. Schombert et al. 1990) and UV (e.g., Neff et al. 2005; Boquien et al., 2007) imaging, narrow-band H $\alpha$  images (e.g. Iglesias-Páramo & Vílchez 2001) as well as mid-infrared photometry. If ongoing star-formation is present in collisional debris, molecular gas should be present as well. This paper reviews the various attempts that have been done so far to detect it.

### 2 Detecting conventional molecular gas

Cool H<sub>2</sub> gas is usually detected through the emission of the CO millimeter line. The abundance of carbon monoxide depends, among other factors, on the metallicity of the medium. Since tidal debris are composed

---

<sup>1</sup> AIM, DSM/CEA – CNRS – Université Paris Diderot, DAPNIA/Service d’astrophysique, CEA-Saclay, 91191 Gif sur Yvette cedex, France

### 1.2.4 Article : *Formation of molecular gas in the tidal debris of violent galaxy-galaxy interactions*

L'article [Braine et al. \(2000\)](#) présente la détection de la raie de monoxyde de carbone CO<sup>12</sup> à l'extrémité de queues de marée. Cette première a pu être réalisée dans les systèmes en interaction [Arp 245](#) et [Arp 105](#).

#### **Abstract**

*In many gravitational interactions between galaxies, gas and stars that have been torn from the precursor galaxies can collect in tidal 'tails'. Star formation begins anew in some of these regions, producing tidal dwarf galaxies. Observations of these new galaxies provides insight into processes relevant to galaxy formation more generally, because the timescale of the interaction is well defined. But tracking the star formation process has hitherto been difficult because the tidal dwarf galaxies with young stars showed no evidence of the molecular gas out of which those young stars formed. Here we report the discovery of molecular hydrogen (traced by carbon monoxide emission) in two tidal dwarf galaxies. In both cases, the concentration of molecular gas peaks at the same location as the maximum in atomic-hydrogen density, unlike the situation in most gas-rich galaxies. We infer from this that the molecular gas formed from the atomic hydrogen, rather than being torn in molecular form from the interacting galaxies. Star formation in the tidal dwarf galaxies therefore appears to mimic the process in normal spiral galaxies like our own.*

## Formation of molecular gas in the tidal debris of violent galaxy–galaxy interactions

Jonathan Braine\*, Ute Lisenfeld†, Pierre-Alain Due‡ & Stéphane Leon§

\* Observatoire de Bordeaux, UMR 5804, CNRS/INSU, BP89, F-33270 Floirac, France

† Institut de Radioastronomie Millimétrique, Avenida Divina Pastora 7, NC18012 Granada, Spain

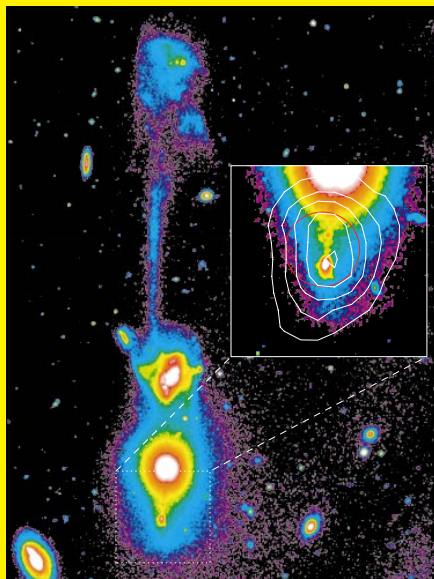
‡ Institute of Astronomy, Madingley Road, Cambridge CB3 0HA, UK and CNRS and CEA/DSM/DAPNIA Service d'astrophysique, Saclay, 91191 Gif sur Yvette cedex, France

§ ASIAA, Academia Sinica, PO Box 1-87, Nanking, Taipei 115, Taiwan

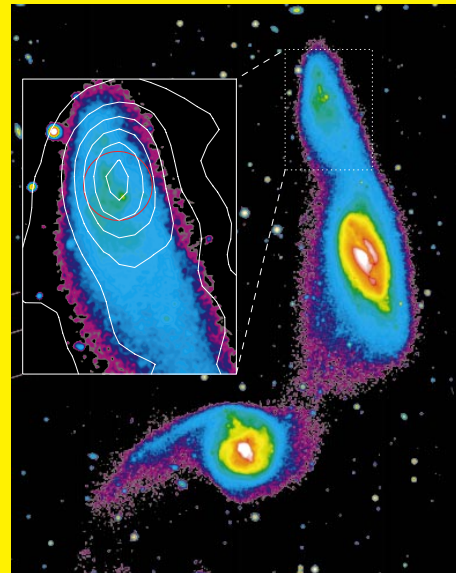
In many gravitational interactions between galaxies, gas and stars that have been torn from the precursor galaxies can collect in tidal 'tails'. Star formation begins anew in some of these regions, producing tidal dwarf galaxies<sup>1–4</sup>. Observations of these new galaxies provides insight into processes relevant to galaxy formation more generally, because the timescale of the interaction is well defined. But tracking the star formation process has hitherto been difficult because the tidal dwarf galaxies with young stars showed no evidence of the molecular gas out of which those young stars formed<sup>5–8</sup>. Here we report the discovery of molecular hydrogen (traced by carbon monoxide emission) in two tidal

dwarf galaxies. In both cases, the concentration of molecular gas peaks at the same location as the maximum in atomic-hydrogen density, unlike the situation in most gas-rich galaxies. We infer from this that the molecular gas formed from the atomic hydrogen, rather than being torn in molecular form from the interacting galaxies. Star formation in the tidal dwarf galaxies therefore appears to mimic the process in normal spiral galaxies like our own.

Tidal dwarf galaxies (TDGs) are gas-rich irregular galaxies made out of stellar and gaseous material pulled out by tidal forces from the disks of the colliding parent galaxies into the intergalactic medium<sup>9–12</sup>. They are found at the ends of long tidal tails, sometimes 100 kpc from the nuclei of their progenitors, and host active star-forming regions. TDGs contain two main stellar components: young stars recently formed by collapse of expelled atomic hydrogen (H I) clouds, and an older stellar population, at least 1 Gyr old, originally part of the disk of the parent galaxies. Their overall gaseous and stellar properties range between those of classical dwarf irregular galaxies and blue compact dwarf galaxies, with the exception of their metallicity which is higher—typical of the outer disk of a spiral galaxy<sup>12</sup>. Whether a large fraction of dwarf galaxies were formed through tidal encounters in the early Universe—when spiral galaxies were more gaseous and less metal-rich, and collisions more frequent—is an open question, and one of the reasons to study TDGs. One way to answer this question is the dark-matter content of dwarf galaxies. Observations of ordinary dwarf galaxies show that a lot of dark matter, or mass that is in some as yet invisible form, is necessary to account for their rotation velocities. Numerical simulations of gravitational interactions indicate that TDGs should have very little dark matter<sup>13</sup> if the dark matter is, as currently believed, in the form of a large halo and not in, say, a



**Figure 1** The southern Tidal Dwarf Galaxy (shown in the magnified view) in the interacting system Arp105. (The latter is also known as NGC3561 (ref. 24) and the "Guitar"). H I emission contours are superposed on a magnified view of a V-band image of A105S (ref. 3). The frame is  $4.4' \times 5.9'$ ; north is up and east to the left. Red circle is (0,0) position of CO observations, and represents the full-width at half-maximum FWHM ( $22''$ ) of the CO(1–0) beam. The Arp105 system<sup>2,3</sup> is an interaction between a spiral and an elliptical which has generated an H I-rich extended TDG at the end of the northern tidal tail and a more compact TDG at the tip of the southern tail from the spiral. A105S contains roughly  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  of H I and strong H $\alpha$  emission, corresponding to a star-formation rate of  $\sim 0.2 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ . Nonetheless, stellar synthesis models<sup>29</sup> of A105S indicate that the stellar mass is dominated by the old spiral disk population while the luminosity comes mostly from stars formed *in situ*.



**Figure 2** The tidal dwarf galaxy (shown in the magnified view) in the interacting system Arp245 (NGC2992/3<sup>24</sup>). H I emission contours are superposed on magnified view of a V-band image of A245N (ref. 14). The frame is  $5.8' \times 7.4'$ ; north is up and east to the left. Red circle is (0,0) position of CO observations and represents the FWHM ( $22''$ ) of the CO(1–0) beam. Arp245 is an interaction between two spirals. The TDG, A245N, has been formed in the tidal tail which stems from NGC2992 and contains nearly twice as much H I as A105S but slightly weaker H $\alpha$  emission. The old stellar population is more prominent in A245N than in A105S (ref. 14). The physical size and total H I mass of Arp245 are smaller than in Arp105.

### 1.2.5 Article : *Molecular and ionized gas in the tidal tail in Stephan's Quintet*

L'article [Lisenfeld et al. \(2004\)](#) présente des observations CO de la région SQ-B du **Quintette de Stephan**, obtenues avec l'interféromètre du plateau de Bure. Elles ont permis de dresser une carte détaillée du gaz moléculaire et montrer une coïncidence remarquable avec à la fois celle du gaz ionisé H $\alpha$  et de l'émission de la poussières à 8  $\mu$ m. SQ-B est une des régions les plus obscurcies trouvées à ce jour dans des débris de collision.

#### Abstract

*We have mapped with the IRAM interferometer at Plateau de Bure (PdBI) the  $^{12}\text{CO}$  emission towards intergalactic star forming regions located in the tidal tail stemming from NGC 7319, in the Stephan's Quintet compact group of galaxies. The  $^{13}\text{CO}$  emission of the same region was observed with the IRAM 30 m telescope and optical spectroscopy of several HII regions in the area were obtained with the Calar Alto 3.5 m telescope. We recovered with the interferometer about 50% of the  $^{12}\text{CO}(1-0)$  total emission that had been earlier measured with single dish observations (Lisenfeld 2002), indicating that about half of the molecular gas is distributed on spatial scales larger than about 10-15 arcsec (corresponding to 4-6 kpc) to which PdBI is not sensitive. We find two main areas of CO emission : (i) an elongated region towards the area known as SQ B where a Tidal Dwarf Galaxy could currently be forming and (ii) a barely resolved area at the tip of the optical tidal arm. Both regions follow dust lanes visible on HST images and their CO peak coincides spatially exactly with the maximum of the H $\alpha$  line emission. In SQ B, there is furthermore very good kinematical agreement between the CO, H $\alpha$  and HI components. We conclude from these coincidences that the gaseous matter found in quantities in the area is physically associated to the optical tidal tail and thus that the intergalactic atomic hydrogen there was expelled from NGC 7319. Its origin had previously been much debated. Furthermore, the relatively high oxygen abundances (about solar) estimated from the optical spectra of the HII regions imply that the gas feeding the star formation originated from the inner regions of the parent galaxy. In SQ B, we derive from different tracers a star formation rate, corrected for dust extinction - which is important in the area - of 0.5  $M_{\odot}/\text{yr}$ , i.e. one of the highest values so far measured outside galaxies. The inferred molecular gas consumption time of 0.5 Gyr lies in the range of values found for spiral and starburst galaxies. On the other hand, the ratio of  $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO} > 25$  is much higher than the values found in disks of spiral galaxies. A relatively low opacity for the  $^{12}\text{CO}$  gas is the most likely reason.*

## Molecular and ionized gas in the tidal tail in Stephan's Quintet

U. Lisenfeld<sup>1,2</sup>, J. Braine<sup>3</sup>, P.-A. Duc<sup>4</sup>, E. Brinks<sup>5</sup>, V. Charmandaris<sup>6,7</sup>, and S. Leon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Apdo. 3004, 18040 Granada, Spain

<sup>2</sup> Dept. de Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada, Granada, Spain

<sup>3</sup> Observatoire de Bordeaux, UMR 5804, CNRS/INSU, BP 89, 33270 Floirac, France

<sup>4</sup> CNRS URA 2052 and CEA/DSM/DAPNIA Service d'Astrophysique, Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

<sup>5</sup> INAOE, Apdo. Postal 51 & 216, Puebla, Pue 72000, Mexico

<sup>6</sup> Cornell University, Astronomy Department, Ithaca, NY 14853, USA

<sup>7</sup> Chercheur Associé, Observatoire de Paris, LERMA, 61 Av. de l'Observatoire, 75014 Paris, France

Received 21 May 2004 / Accepted 7 July 2004

**Abstract.** We have mapped with the IRAM interferometer at Plateau de Bure (PdBI) the  $^{12}\text{CO}$  emission towards intergalactic star forming regions located in the tidal tail stemming from NGC 7319, in the Stephan's Quintet compact group of galaxies. The  $^{13}\text{CO}$  emission of the same region was observed with the IRAM 30 m telescope and optical spectroscopy of several HII regions in the area were obtained with the Calar Alto 3.5 m telescope. We recovered with the interferometer about 50% of the  $^{12}\text{CO}(1-0)$  total emission that had been earlier measured with single dish observations (Lisenfeld 2002, A&A, 394, 823), indicating that about half of the molecular gas is distributed on spatial scales larger than about  $10-15''$  (corresponding to 4–6 kpc) to which PdBI is not sensitive. We find two main areas of CO emission: (i) an elongated region towards the area known as SQ B where a Tidal Dwarf Galaxy could currently be forming and (ii) a barely resolved area at the tip of the optical tidal arm. Both regions follow dust lanes visible on HST images and their CO peak coincides spatially exactly with the maximum of the H $\alpha$  line emission. In SQ B, there is furthermore very good kinematical agreement between the CO, H $\alpha$  and HI components. We conclude from these coincidences that the gaseous matter found in quantities in the area is physically associated to the optical tidal tail and thus that the intergalactic atomic hydrogen there was expelled from NGC 7319. Its origin had previously been much debated. Furthermore, the relatively high oxygen abundances (about solar) estimated from the optical spectra of the HII regions imply that the gas feeding the star formation originated from the inner regions of the parent galaxy. In SQ B, we derive from different tracers a star formation rate, corrected for dust extinction – which is important in the area – of  $0.5 M_{\odot}/\text{yr}$ , i.e. one of the highest values so far measured outside galaxies. The inferred molecular gas consumption time of 0.5 Gyr lies in the range of values found for spiral and starburst galaxies. On the other hand, the ratio of  $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO} > 25$  is much higher than the values found in disks of spiral galaxies. A relatively low opacity for the  $^{12}\text{CO}$  gas is the most likely reason.

**Key words.** stars: formation – ISM: molecules – galaxies: clusters: individual: Stephan's Quintet – galaxies: interactions – galaxies: ISM – galaxies: intergalactic medium

### 1. Introduction

The Hickson Compact Group Stephan's Quintet (Hickson Compact Group 92; hereafter SQ) consists of four interacting galaxies (NGC 7319, NGC 7318a, NGC 7318b, and NGC 7317) and a foreground galaxy (NGC 7320). A fifth galaxy, NGC 7320c, situated  $\sim 4$  arcmin to the east, is also dynamically associated to the group. The group has experienced a violent dynamical history with numerous interactions between the different members during the past Gyr (see Moles et al. 1997; Sulentic et al. 2001, for plausible scenarios). As a result of these interactions, two tidal arms, a faint older one, and a brighter young one stemming from NGC 7319, have been created towards the eastern side of the group. Sulentic et al. (2001), suggest that each of these tails was created by a passage of NGC 7320c, the galaxy towards which both tails are pointing.

Several knots of star formation (SF) are visible in the young tidal arm extending from NGC 7319 to the east. The brightest region, identified as B by Xu et al. (1999) and hereafter called SQ B, shows also mid-infrared and H $\alpha$  emission. This region has been identified as a good candidate for a Tidal Dwarf Galaxy (TDG) (Lisenfeld et al. 2002). Another fainter SF region is visible at the very tip of the tidal tail, hereafter called SQ tip.

One of the most striking properties of this group is that the major part of the gas is in the intragroup medium. Abundant atomic gas is present to the east of the three central galaxies. Williams et al. (2002) concluded from the HI kinematics that in reality this gas clouds consist of two subclouds, which they called Arc-N and Arc-S. Arc-N coincides at its southern end with the young tidal tail and Arc-S largely overlaps with the old tidal tail. In the northern part of Arc-N several HII regions are detected (Sulentic et al. 2001; Mendes de Oliveira et al. 2004).



## 1.3 Origine des composantes du milieu entregalactique

Ainsi le milieu entregalactique possède des ingrédients généralement présents au sein de galaxies : étoiles et autres objets stellaires (nébuleuses planétaires, supernovae), gaz moléculaire mais aussi poussières. Se pose ainsi la question de leur origine. Trois scénarii sont possibles :

- ils ont été synthétisés au sein de galaxies puis expulsés suite à divers effets d'environnement.
- ils sont les seuls reliquats de galaxies détruites suite à divers effets d'environnement.
- ils ont été formées *in situ* dans le milieu entregalactique.

### 1.3.1 Expulsion

Divers processus expliquent la présence dans le milieu entregalactique de matière ordinairement présente au sein de galaxies. Les mécanismes d'expulsion sont multiples et se divisent en deux classes :

- Mécanismes internes, résultat de l'activité des galaxies : super-vents liés à des épisodes de flambées de formation stellaire ; jets nucléaires associés au processus d'alimentation du trou noir central. Ces processus expulsent essentiellement des éléments lourds et de la poussière ; ils contribuent à l'enrichissement du milieu intergalactique mais ne concourent guère au transport de matière galactique.
- Mécanismes externes, liés à des effets d'environnement : pression dynamique et collisions en particulier. Le gaz intra-amas, voire inter-groupe, ainsi que le halo de gaz chaud autour des galaxies, exerce sur les objets en mouvement dans celui-ci une pression proportionnelle à sa densité du gaz et au carré de la vitesse. S'en suit un balayage du milieu interstellaire de la galaxie. Ce mécanisme affecte uniquement le gaz, en particulier l'hydrogène atomique. Les interactions gravitationnelles quant à elles qui s'exercent notamment lors de collisions entre galaxies redistribuent composantes stellaires et gazeuses en chassant une partie d'entre elles le long de queues de marée ou d'anneaux collisionnels.

### 1.3.2 Destruction

Les forces de marée peuvent déchirer les galaxies les plus fragiles, en particulier les galaxies naines satellites de galaxies plus massives (e.g. [Mayer et al. 2001](#)). Étoiles et nuages de gaz seront alors dispersés avant d'éventuellement tomber sur le compagnon à l'origine de leur destruction. Ce scénario explique probablement la présence des filaments stellaires visibles dans les régions les plus externes des spirales (e.g. [Helmi et al. 1999](#); [Ibata et al. 2001](#)) et de la lumière diffuse détectée dans les régions centrales d'amas (e.g. [Calcáneo-Roldán et al. 2000](#)).

### 1.3.3 Renaissance

Dernier scénario : étoiles et leurs ancêtres - les nuages moléculaires - se forment *in situ*, soit à partir de matériaux primordiaux présents localement, soit à partir de matière expulsée de galaxies par l'un des mécanismes exposés plus haut. Il s'agit alors d'un recyclage de la matière, utilisée d'abord au sein de disques galactiques où elle s'est pré-enrichie puis directement dans le milieu entregalactique, pour former de nouvelles générations stellaires. C'est à ce dernier processus que je me suis plus particulièrement intéressé, en montrant qu'il pouvait donner naissance, sous certaines conditions, à des galaxies naines recyclées.

### 1.3.4 Dépistage

Comment établir un dépistage de l'origine de la matière entregalactique ? On peut penser à deux méthodes : une "chimique", l'autre "dynamique", qui s'appliqueront selon la nature des composantes à analyser.

- La teneur en éléments lourds du gaz renseigne directement sur son origine : une valeur élevée (une fraction de l'abondance solaire) implique un pré-enrichissement galactique suivi d'une expulsion ; une valeur faible suggère à contrario une origine primordiale ; une valeur nulle est de fait peu probable car, comme le montrent les études sur la forêt de Lyman, la pollution par les supervents semble universelle. La détermination de la métallicité du HI est toutefois particulièrement délicate. Elle pourra être directement réalisée si par chance une source d'arrière plan, en particulier un quasar, l'illumine. Dans ce cas les abondances chimiques pourront être déterminées directement dans les raies en absorption. Autrement, la mesure pourra être effectuée à partir de raies en émission si le gaz est ionisé. C'est le cas s'il est suffisamment dense pour avoir formé

localement des étoiles. Voir le chapitre 3.1.6 pour un exemple concret de l'application de cette méthode pour les galaxies naines de marée. A vrai dire, jusqu'à présent, la quasi-totalité des nuages de gaz HI vagabonds, hors disque galactique, qui ont pu être diagnostiqués ont montré une métallicité compatible avec une origine galactique. Parmi les exceptions figurent les très controversées "galaxies noires" dont il sera question dans le chapitre 3.1.2. Une détection de gaz moléculaire, en particulier de la raie de monoxyde de carbone CO est aussi un bon indice d'une métallicité élevée.

- Il n'est pas toujours possible de déterminer si un nuage de gaz a été pré-enrichi. Par contre, des données cinématiques peuvent apporter des renseignements utiles. Une vitesse du nuage dans le prolongement de la courbe de rotation d'une galaxie proche conforte l'hypothèse que cette dernière est la galaxie parent. Par ailleurs, si le nuage est gravitationnellement lié, sa masse dynamique peut être estimée à l'aide de mesures de courbe de rotation ou au moins de largeurs de raies. Une valeur comparable à la masse lumineuse suggèrera un déficit en matière noire, ce qui privilégiera l'origine galactique. En effet, les débris de collisions proviennent des disques galactiques pauvres en matière noire non-baryonique (voir chapitre 4.2.4).

## 1.4 Formation stellaire et galactique entregalactique

Qu'on ne s'y trompe pas : ce matériau stellaire et gazeux intergalactique révélé par les observations HI et optiques profondes constitue, dans l'univers proche, une fraction faible des constituants des galaxies : quelques pourcents au plus. Mais comme nous le verrons dans le chapitre 4, le milieu entregalactique peut servir de laboratoire pour l'étude de processus cosmiques aussi importants que la formation stellaire ou la distribution et nature de la matière noire.

Sujet jeune, la nomenclature des régions de formation stellaire entregalactiques n'est pas encore bien définie. Elles sont appelées indifféremment dans la littérature "régions HII intergalactiques", "EL-dots" ou "régions HII géantes"(GHRs, pour Giant HII regions) (English et Freeman 2003). Tout aussi confuse est la dénomination des objets formés dans ces pouponnières stellaires : "amas stellaires jeunes (massifs)" (YMCs, pour Young Massive Star Clusters), "super amas stellaires" (SSCs pour Super Star Clusters), proto amas globulaires, ou galaxies naines de marée (TDGs pour Tidal Dwarf Galaxies). Or ces objets de seconde génération présentent une grande variété de propriétés, au delà même de leurs différences de luminosité. Nous allons montrer qu'ils se distinguent tant par leur origine que par leur évolution (voir le chapitre 2.1).

Le prototype des galaxies en fusion, NGC 7252, fournit un exemple éloquent de la diversité des régions de formation stellaire hors disque galactique. La carte H $\alpha$  montre la présence de régions de formation stellaire à la fois dans les débris de collision très proches du corps en fusion, le long des queues de marée (à l'est) et à leur extrémité (au nord), outre la flambée nucléaire. Les images optiques obtenues avec le HST (voir figure 1.2) révèlent la genèse d'objets disparates, très compacts pour les uns, proches d'amas globulaires, étendus pour les autres, typiques de galaxies naines.

### 1.4.1 Formation stellaire étendue

Les images composites du portfolio illustrent le fait que la formation stellaire dans les systèmes en interaction ne se cantonne pas aux régions centrales, bien que ce soit dans cet environnement qu'elle a été surtout étudiée. Les différents traceurs de formation d'étoiles (UV, H $\alpha$ , IR) montrent en particulier l'existence de pouponnières stellaires jusque dans les débris de collisions, à des distances parfois supérieures à 100 kpc de galaxies parents. La couleur bleue des queues de marée suggèrera d'ailleurs depuis longtemps qu'elles abritaient des étoiles jeunes (Schombert et al. 1990). Rien d'étonnant d'ailleurs dans cette constatation : d'abondantes réserves de gaz, en particulier d'hydrogène atomique, sont présentes dans cet environnement. Invariablement, au delà d'un seuil critique de la densité de colonne HI (discuté dans le chapitre 4.1), le gaz est ionisé par des associations OB. Les taux de formation stellaire varient d'un système à l'autre, très faible, de l'ordre de  $10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  dans les régions HII les moins lumineuses – les EL-dots quasi ponctuelles – et autres régions HII intergalactiques (Ryan-Weber et al. 2004; Mendes de Oliveira et al. 2004), à de valeurs dépassant  $0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  dans les naines de marée (Boquien et al. 2007). Des régions HII dites isolées, car non liées de manière évidente à des galaxies parents, ont aussi été identifiées, en particulier dans l'amas de la Vierge (Gerhard et al. 2002; Cortese et al. 2004). Des images profondes à 21 cm, si elles existaient, révéleraient sans doute le cordon ombilical gazeux les liant à leurs géniteurs.

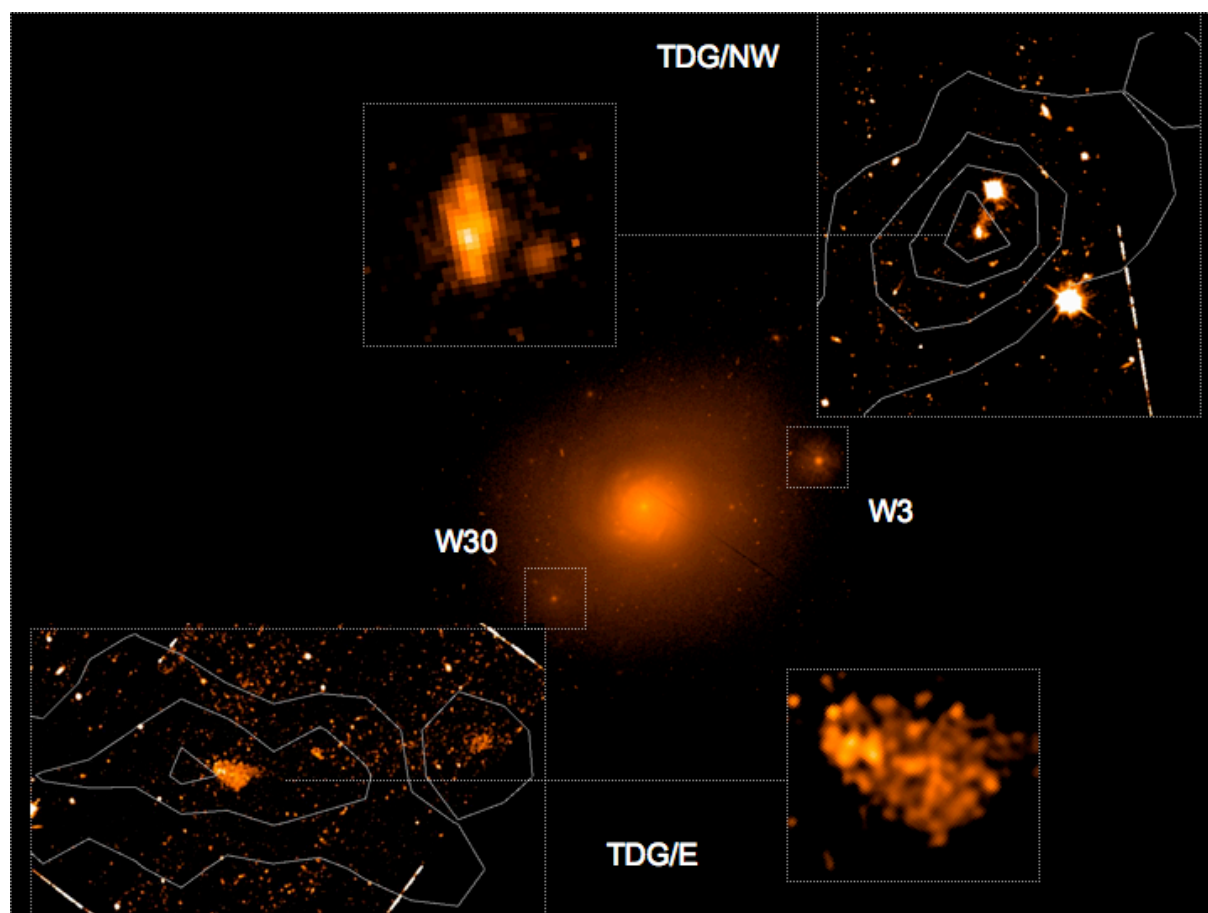


FIG. 1.2 – HST WFPC2/F555W images of NGC 7252. The central region is shown as well as the tip of the northern and eastern tidal tails. Various recycled objects, formed during the merger, are highlighted : two TDG candidates, and two young super star clusters.

Toutes ces régions HII ont pour caractéristique une abondance en oxygène élevée, typiquement moitié solaire, qui ne laisse aucun doute sur l'origine galactique de leurs réserves de gaz. Par contre, l'âge de la flambée de formation stellaire, inférieur à 10 millions d'années, indique qu'elle a débuté bien après le développement des structures de marée (qui a une échelle de temps de 100 millions d'années). Autrement dit, les étoiles se sont formées in situ dans le milieu entragalactique

### 1.4.2 (Super) Amas Stellaires jeunes

La littérature sur les amas stellaires jeunes présents en grand nombre dans les systèmes en interaction est abondante. Les plus jeunes, âgés de moins de 10 millions d'années et encore enfouis dans leur cocon de gaz et de poussières, ont été détectés sur des images infrarouges ou radio, à l'instar de l'amas obscurci présent dans la zone de chevauchement des disques des *Antennes*, étudié par [Mirabel et al. \(1998\)](#). Les images optiques à haute résolution spatiale fournies par le télescope spatial Hubble ont joué un rôle moteur dans la découverte et le recensement des amas un peu plus âgés qui ont nettoyé leur enveloppe gazeuse. Parmi les travaux pionniers figurent ceux de [Whitmore et al. \(1993\)](#) sur *NGC 7252*, qui ont mis à jour une population d'une quarantaine d'amas stellaires bleus, quasi-ponctuels, avec un rayon effectif moyen de 10 pc. Ils se seraient formés il y a moins de 1 milliard d'années. Le système a été ré-observé quelques années plus tard avec le HST corrigé de ses problèmes d'aberration, et ce sont cette fois près de 500 amas, avec des rayons effectifs inférieurs à 5 pc, qui ont été recensés ([Miller et al. 1997](#)). Leur âge, inférieur à 600 millions d'années d'après les modèles de synthèse de populations stellaires, et leur métallicité élevée, quasi solaire, confirment qu'il s'agit là d'objets de seconde génération formés durant la phase de fusion de leurs galaxies hôtes ([Schweizer et Seitzer 1998](#); [Trancho et al. 2007a](#)). Leur masse, estimée

à partir de la vitesse de dispersion de leurs étoiles, peut atteindre quelques  $10^7 M_{\odot}$ , jusqu'à  $8 \times 10^7 M_{\odot}$  pour W3 dans NGC 7252 (Maraston et al. 2004, voir Figure 1.2). La compacité de ces amas stellaires jeunes en fait des candidats proto-amas globulaires naturels. La formation d'amas globulaires lors de collisions galactiques pourrait ainsi expliquer la bi-modalité de la distribution en métallicité constatée pour les amas globulaires présents dans les galaxies de type précoce. La survie de ces amas a été abondamment discutée (voir, par exemple, la revue de de Grijs et Parmentier 2007). Après une phase de forte mortalité infantile qui voit disparaître près de 90% des amas, dissolus sous l'effet de la perte rapide de leur gaz due entre autres aux vents galactiques et supernovae (Fall et al. 2005), leur espérance de vie à long terme dépend de facteurs tant internes, en particulier leur fonction de masse initiale, qu'externes, par exemple les forces de marée. Ainsi, dans le cas de fusions galactiques, le lieu de naissance – régions circumnucléaires, zone de chevauchement des disques, ponts et queues de marée – doit jouer un rôle important, tant dans la formation initiale des amas à partir de nuages de gaz moléculaires massifs, que dans leur destruction ou survie. La grande majorité des amas stellaires massifs dans les systèmes en interaction ont été détectés dans les régions centrales ou le disque des galaxies en cours de fusion. Quelques études ont montré qu'ils étaient aussi présents dans les queue de marée (e.g. Knierman et al. 2003; Tran et al. 2003; de Grijs et al. 2003b; Bastian et al. 2005; Trancho et al. 2007b), avec des masses typiques estimées de  $10^6 M_{\odot}$  pour des tailles de 10-20 pc.

### 1.4.3 Galaxies naines de marée

Mon mémoire de thèse (Duc 1995) comporte un historique de la genèse des “galaxies naines de marée”<sup>1</sup>, de l'intuition de leur existence par l'omniscient F. Zwicky (Zwicky 1956), à leur découverte par Schweizer (1978) dans Les Antennes et leur redécouverte par Mirabel et al. (1992). Ma thèse présentait les premières études détaillées, multi-longueur d'ondes, de systèmes en interaction comportant des candidats TDGs, tels la galaxie de la Guitare (Arp 105) ou Arp 245. Ils ont été publiés quelques années plus tard dans Duc et al. (1997) (article ci-dessous) et Duc et al. (2000) (article ci-dessous). Depuis, de nombreux travaux ont été réalisés sur des candidats TDGs, tant par notre équipe que par des groupes concurrents. A vrai dire, ils ont aussi contribué à entretenir une certaine confusion sur la nature de ces objets. Ainsi, selon Hibbard et al. (2001), la naine de marée de référence dans Les Antennes ne serait pas une galaxie, car elle ne contiendrait pas suffisamment de gaz pour être gravitationnellement liée. Second candidat historique, l'objet au sud des Super-Antennes (Mirabel et al. 1991) s'est avéré être une galaxie d'arrière plan. De même d'ailleurs pour de nombreux candidats TDGs de l'échantillon de Deeg et al. (1998), selon l'étude postérieure de Delgado-Donate et al. (2003). Par ailleurs, nous avons montré que pour les deux autres systèmes mentionnés ci-dessus, Arp 105 et Arp 245, des effets de projection notables, détaillés dans le chapitre 3.1.2, contribuent à la sur-évaluation de la masse de leurs éventuelles TDGs (Bournaud et al. 2004). Enfin, les “young tidal dwarf galaxies” mises en exergue par Duc et Mirabel (1998) dans le titre de leur article sur le système NGC 5291 ne sont certainement pas “de marée” selon les simulations numériques de Bournaud et al. (2007).

Dans ces conditions, qu'appelle t'on “Galaxie naine de marée” et comment identifier un candidat TDG ? En existe t'il d'ailleurs de suffisamment probants pour considérer de façon sérieuse un mode de formation galactique basé sur un recyclage des débris de collision ? Répondre à ces interrogations occupe une grande partie de la présente HDR. Avant de tenter de donner dans le chapitre suivant une définition *physique* des naines de marée, j'en esquisse ici les principales caractéristiques *observationnelles* qui les distinguent, entre autres, des Super Amas Stellaires.

Avant tout, les TDGs apparaissent comme des concentrations *étendues* de gaz et d'étoiles, généralement situées près de l'extrémité de longues queues de marée. Plusieurs d'entre elles sont repérables dans le **portfolio**. Celles identifiées jusqu'à présent connaissent toutes des flambées de formation stellaire. Du point de vue optique, elles ont, selon les systèmes, la morphologie de galaxies naines irrégulières ou bleues compactes. Leur taille dépasse facilement le kiloparsec et leur luminosité optique dans le bleu, intensifiée par leurs étoiles jeunes et bleues, peut atteindre celle du Grand Nuage de Magéllan (Duc 1995). Toutefois, il s'agit intrinsèquement d'objets (encore) gazeux. L'hydrogène atomique (HI), auquel il faut ajouter une composante non négligeable de gaz moléculaire (30% typiquement, Braine et al. 2001), constitue l'essentiel de leur masse lumineuse égale typiquement à quelques  $10^9 M_{\odot}$ . Les étoiles y contribuent souvent pour moins de 10%.

<sup>1</sup>L'acronyme GNM n'ayant jamais été utilisé en français, j'utilise sa version anglaise, TDG

#### 1.4.4 Amas stellaires, globulaires ou galaxies ?

Qu'il s'agisse d'amas stellaires, globulaires ou de galaxies, les objets formés au sein de débris de collision sont susceptibles, *s'ils survivent*, de devenir indépendants par rapport à leur galaxie parent, en gravitant autour d'elle, voire même en s'en échappant et en rejoignant le milieu entregalactique, par exemple lors d'un processus d'expulsion provoqué par une nouvelle collision. Ils se mélangeront alors à la population pré-existante de galaxies naines satellites, et se confondront avec elles. C'est l'une des origines possibles de la nouvelle population de galaxies naines ultracompactes (UCDs pour Ultra Compact Dwarf Galaxies) décelée dans les amas proches et qui a fait dans les dernières années l'objet d'une littérature abondante (e.g. [Phillipps et al. 2001](#); [Drinkwater et al. 2003](#); [Hilker et al. 2007](#)). Durant la même période, plusieurs sondages ont recensé autour de la Voie Lactée des satellites aux propriétés structurellement semblables aux galaxies, mais dont la masse stellaire est jusqu'à cent fois inférieure à celle d'amas globulaires ([Belokurov et al. 2007](#); [Simon et Geha 2007](#)). Toutes ces découvertes ont contribué à brouiller les frontières traditionnelles entre amas stellaires et galaxies. L'un des enjeux de cette HDR est de les re-définir.

---

### 1.4.5 Article : Gas segregation in the interacting system Arp 105

L'article [Duc et al. \(1997\)](#) présente une étude multi-longueur d'ondes du système en interaction Arp 105.

#### Abstract

*Arp 105 is an example of a collision between an infrared luminous spiral (NGC 3561A) and an elliptical (NGC 3561B) galaxy in a cluster of galaxies. Duc & Mirabel (1994) reported in this system the genesis of star-forming tidal dwarf galaxies at the ends of the tidal tails emanating from the spiral. In this paper, the gas distribution in Arp 105 is analyzed based on HI and  $^{12}\text{CO}(1-0)$  emission, mapped with the Very Large Array and the Plateau de Bure interferometers. The observations reveal an extreme segregation between the atomic and molecular gas distributions. HI clouds as massive as  $6 \times 10^9 M_{\odot}$  are found along the tidal tails and are associated with the dwarf galaxies at their tip; the spiral disk itself contains less than  $5 \times 10^7 M_{\odot}$  of HI. About  $10^{10} M_{\odot}$  of molecular gas is concentrated in the central 3kpc region of the spiral. Towards the elliptical, HI is seen in absorption. The shape of the absorption line suggests inflow and capture of gas by the giant galaxy. Arp 105 thus shows direct evidence of mass transfer between a spiral and an elliptical. All these phenomena are interpreted as a direct consequence of the interaction between NGC 3561A and B. A study of the dynamics of the system reveal that the HI in the northern tail is composed of two individual components, one along the optical tail, and a second one, kinematically decoupled, which shows signs of rotation. Indications of rotation are also seen in H $\alpha$  in the tidal object at the tip of the southern tail. These observations show that these tidal dwarf galaxies might have already acquired dynamical independence.*

Astron. Astrophys. 326, 537–553 (1997)

ASTRONOMY  
AND  
ASTROPHYSICS

## Gas segregation in the interacting system Arp 105

P.-A. Duc<sup>1,2</sup>, E. Brinks<sup>3,4</sup>, J.E. Wink<sup>5</sup>, and I.F. Mirabel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ESO, Karl-Schwarzschild-Str. 2, D-85748 Garching bei München, Germany

<sup>2</sup> CEA, DSM, DAPNIA, Service d'Astrophysique, C.E. Saclay, F-91191 Gif sur Yvette Cedex, France

<sup>3</sup> NRAO, P.O. Box O, Socorro, NM 87801-0387, USA

<sup>4</sup> Departamento de Astronomía, Universidad de Guanajuato, Apdo. Postal 144, Guanajuato, C.P. 36000, México

<sup>5</sup> IRAM, 300, rue de la Piscine, F-38406 Saint-Martin-d'Hères Cedex, France

Received 27 January 1997 / Accepted 30 April 1997

**Abstract.** Arp 105 is an example of a collision between an infrared luminous spiral (NGC 3561A) and an elliptical (NGC 3561B) galaxy in a cluster of galaxies. Duc & Mirabel (1994) reported in this system the genesis of star-forming tidal dwarf galaxies at the ends of the tidal tails emanating from the spiral. In this paper, the gas distribution in Arp 105 is analyzed based on HI and <sup>12</sup>CO(1–0) emission, mapped with the Very Large Array and the Plateau de Bure interferometers. The observations reveal an extreme segregation between the atomic and molecular gas distributions. HI clouds as massive as  $6 \times 10^9 M_{\odot}$  are found along the tidal tails and are associated with the dwarf galaxies at their tip; the spiral disk itself contains less than  $5 \times 10^7 M_{\odot}$  of HI. About  $10^{10} M_{\odot}$  of molecular gas is concentrated in the central 3 kpc region of the spiral. Towards the elliptical, HI is seen in absorption. The shape of the absorption line suggests inflow and capture of gas by the giant galaxy. Arp 105 thus shows direct evidence of mass transfer between a spiral and an elliptical. All these phenomena are interpreted as a direct consequence of the interaction between NGC 3561A and B. A study of the dynamics of the system reveal that the HI in the northern tail is composed of two individual components, one along the optical tail, and a second one, kinematically decoupled, which shows signs of rotation. Indications of rotation are also seen in H<sub>α</sub> in the tidal object at the tip of the southern tail. These observations show that these tidal dwarf galaxies might have already acquired dynamical independence.

**Key words:** galaxies–individual: Arp 105 – galaxies: interactions – galaxies: formation – galaxies: ISM – galaxies: kinematics and dynamics – radio lines: galaxies

### 1. Introduction

Collisions cause major perturbations in the stellar and gaseous contents of galaxies. The optical disks of spirals may be torn into elongated structures to form the tails, bridges, and shells which feature prominently in catalogues of interacting galaxies (Vorontsov-Velyaminov, 1959; Arp, 1966; Arp & Madore, 1987); in addition, the distribution of the different gas components becomes highly perturbed. Whereas unusually high concentrations of molecular gas have been detected in the core of mergers (Sargent & Scoville, 1991; Scoville et al., 1991), HI gas clouds are found in the outskirts of interacting systems, along and mostly at the end of optical tails emanating from the colliding bodies (van der Hulst, 1979; Hibbard, 1995). All these phenomena may be explained by gravitational disturbances, although some other environmental effects, like ram pressure by intracluster gas (Gunn & Gott, 1972), cannot be excluded. Numerical simulations (Toomre & Toomre, 1972; Barnes & Hernquist, 1992; Elmegreen et al., 1993; Hibbard & Mihos, 1995) have played a crucial role in demonstrating how tidal forces shape the stellar and gaseous structures in interacting systems. Moreover, interactions are capable of triggering star formation. Vigorous starbursts are found associated with the molecular clumps in the central regions (Sargent & Scoville, 1991), whereas material pulled into extragalactic space may form new objects known as tidal dwarf galaxies (Schweizer, 1978; Mirabel et al., 1992; Duc, 1995).

One of the clearest objects where both these phenomena can be observed is the interacting system Arp 105, studied in detail in Duc & Mirabel (1994) (hereafter Paper I). Arp 105, which is situated at a distance of 115 Mpc<sup>1</sup>, is an example of a close encounter between a gas rich spiral, NGC 3561A, and an elliptical galaxy, NGC 3561B, near the centre of the galaxy cluster Abell 1185. Some general properties of both galaxies are summarized in Table 1. Two tidal tails emanate from NGC 3561A. The northern, 100 kpc long tail, hosts at its tip an irregular galaxy of Magellanic type, hereafter referred to as A105N. The

Send offprint requests to: pduc@eso.org

<sup>1</sup> In this paper, we use  $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

#### 1.4.6 Article : *Formation of a Tidal Dwarf Galaxy in the interacting system Arp 245 (NGC 2992/93)*

L'article [Duc et al. \(2000\)](#) présente une étude multi-longueur d'ondes du système en interaction Arp 245.

##### **Abstract**

*Among the various phenomena observed in interacting galaxies is the ejection due to tidal forces of stellar and gaseous material into the intergalactic medium and its subsequent rearranging which can lead to the formation of self-gravitating tidal dwarf galaxies (TDGs). We investigate this process with a detailed multiwavelength study of the interacting system Arp 245 and a numerical model of the collision computed with a Tree-SPH code. Our observations consist of optical/near-infrared broadband imaging, H $\alpha$  imaging, optical spectroscopy, H I VLA cartography and CO line mapping. The system, composed of the two spiral galaxies NGC 2992 and NGC 2993, is observed at an early stage of the interaction, about 100 Myr after perigalacticon, though at a time when tidal tails have already developed. The VLA observations disclose a third partner to the interaction : an edge-on, flat galaxy, FGC 0938, which looks strikingly undisturbed and might just be falling toward the NGC 2992/93 system. Our H I map shows prominent counterparts to the optical tails. Whereas the stellar and gaseous components of the plume that originates from NGC 2992 match, the stellar and H I tails emanating from NGC 2993 have a different morphology. In particular, the H I forms a ring, a feature that has been successfully reproduced by our numerical simulations. The H I emission in the system as a whole peaks at the tip of the NGC 2992 tail where a gas reservoir of about  $10^9 M_{\odot}$ , about 60% of the H I toward NGC 2992, coincides with a star-forming optical condensation, A245N. The latter tidal object exhibits properties ranging between those of dwarf irregular galaxies (structural parameters, gas content, star formation rate) and those of spiral disks (metallicity, star formation efficiency, stellar population). Although it is likely, based on our analysis of the H I and model data cube, that A245N might become an independent dwarf galaxy, the dynamical evidence is still open to debate. Prompted by the questions raised for this particular object, we discuss some issues related to the definition and identification of TDGs and highlight some specific conditions which seem required to form them. Finally, we outline what is needed in terms of future numerical simulations in order to further our understanding of these objects.*



THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 120:1238–1264, 2000 September  
 © 2000. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## FORMATION OF A TIDAL DWARF GALAXY IN THE INTERACTING SYSTEM ARP 245 (NGC 2992/93)

P.-A. DUC,<sup>1,2</sup> E. BRINKS,<sup>3</sup> V. SPRINGEL,<sup>4,5</sup> B. PICHARDO,<sup>6</sup> P. WEILBACHER,<sup>7</sup> AND I. F. MIRABEL<sup>8,9</sup>

Received 2000 February 29; accepted 2000 May 19

### ABSTRACT

Among the various phenomena observed in interacting galaxies is the ejection due to tidal forces of stellar and gaseous material into the intergalactic medium and its subsequent rearranging which can lead to the formation of self-gravitating tidal dwarf galaxies (TDGs). We investigate this process with a detailed multiwavelength study of the interacting system Arp 245 and a numerical model of the collision computed with a Tree-SPH code. Our observations consist of optical/near-infrared broadband imaging, H $\alpha$  imaging, optical spectroscopy, H I VLA cartography and CO line mapping. The system, composed of the two spiral galaxies NGC 2992 and NGC 2993, is observed at an early stage of the interaction, about 100 Myr after perigalacticon, though at a time when tidal tails have already developed. The VLA observations disclose a third partner to the interaction: an edge-on, flat galaxy, FGC 0938, which looks strikingly undisturbed and might just be falling toward the NGC 2992/93 system. Our H I map shows prominent counterparts to the optical tails. Whereas the stellar and gaseous components of the plume that originates from NGC 2992 match, the stellar and H I tails emanating from NGC 2993 have a different morphology. In particular, the H I forms a ring, a feature that has been successfully reproduced by our numerical simulations. The H I emission in the system as a whole peaks at the tip of the NGC 2992 tail where a gas reservoir of about  $10^9 M_{\odot}$ , about 60% of the H I toward NGC 2992, coincides with a star-forming optical condensation, A245N. The latter tidal object exhibits properties ranging between those of dwarf irregular galaxies (structural parameters, gas content, star formation rate) and those of spiral disks (metallicity, star formation efficiency, stellar population). Although it is likely, based on our analysis of the H I and model data cube, that A245N might become an independent dwarf galaxy, the dynamical evidence is still open to debate. Prompted by the questions raised for this particular object, we discuss some issues related to the definition and identification of TDGs and highlight some specific conditions which seem required to form them. Finally, we outline what is needed in terms of future numerical simulations in order to further our understanding of these objects.

*Key words:* galaxies: individual (Arp 245, NGC 2992, NGC 2993, FGC 0938) — galaxies: interactions — methods: numerical

### 1. INTRODUCTION

Research activity in the field of interacting galaxies has increased quite dramatically over the last thirty years (see the recent very comprehensive review by Struck 1999). Galactic collisions trigger a number of phenomena, such as the inward transportation of gas from distances of up to kiloparsecs to the nucleus, which is thought to be an efficient means to fuel a central starburst or nuclear activity. The inverse process is the ejection of material into the intergalactic medium by tidal forces. The prominent tidal tails and bridges that emanate from interacting galaxies have

proved to be important tools to study the interaction, constraining the orbital parameters (Toomre & Toomre 1972) of the collision. Recently, attempts have even been made to use the formation of tidal tails as a diagnostic of the mass distribution of halos within the framework of cold dark matter cosmologies (Dubinski, Mihos, & Hernquist 1996; Springel & White 1999). Much less attention has been paid to what goes on within these tidal features (see, for instance, Schombert, Wallin, & Struck-Marcell 1990; Wallin 1990; Hibbard, Vacca, & Yun 2000).

Detailed H I maps of a number of interacting systems (e.g., Hibbard & van Gorkom 1996; Kaufman et al. 1997, and references therein) have shown that a large fraction of the gaseous component of colliding galaxies can be expelled into the galactic halos or even into the intergalactic medium as a result of tidal forces. In some systems, up to 90% of the atomic hydrogen is observed outside the optical disk (as in Arp 105, Duc et al. 1997). Even if part of this gas falls back toward its progenitors (Hibbard & Mihos 1995), a significant amount of gas will be lost for the merger remnant for timescales of at least 1–10 Gyr. The stellar/gaseous tidal debris might be dispersed in the intergalactic/intracluster medium where the stellar component then contributes to the diffuse background light observed in clusters (Gregg & West 1998) or recondense within the halo of the merger and form a new generation of galaxies: the so-called tidal dwarf galaxies (TDGs; see the review by Duc & Mirabel 1999).

<sup>1</sup> CNRS URA 2052 and CEA-Saclay, DSM, DAPNIA, Service d'Astrophysique, 91191 Gif-sur-Yvette, France; paduc@cea.fr.

<sup>2</sup> Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge, CB3 0HA, UK.

<sup>3</sup> Departamento de Astronomía, Apdo. Postal 144, Guanajuato, Gto. 36000, Mexico.

<sup>4</sup> Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild Strasse 1, 85740 Garching bei München, Germany.

<sup>5</sup> Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, MS 51, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138.

<sup>6</sup> Instituto de Astronomía, UNAM, Mexico.

<sup>7</sup> Universitätssternwarte, Geismarlandstr. 11, D-37083 Göttingen, Germany.

<sup>8</sup> CEA-Saclay, DSM, DAPNIA, Service d'Astrophysique, 91191 Gif-sur-Yvette, France.

<sup>9</sup> IAFE, cc 67, snc 28 (1948), Buenos Aires, Argentina.



## Chapitre 2

# Formation et destruction des galaxies naines de marée

### Sommaire

<b>2.1 Modèles de formation</b> . . . . .	<b>87</b>
2.1.1 Instabilités gazeuses ou stellaires ? . . . . .	88
2.1.2 Un modèle de type “Bottom–Up” ou “Top–Down” ? . . . . .	88
2.1.3 <i>Article : A top-down scenario for the formation of massive Tidal Dwarf Galaxies</i> . . . . .	91
2.1.4 <i>Article : High-resolution simulations of galaxy mergers : Resolving globular cluster formation</i> . . . . .	93
<b>2.2 Critères de formation, destruction et survie</b> . . . . .	<b>95</b>
2.2.1 Pré-requis . . . . .	95
2.2.2 Survie . . . . .	95
2.2.3 <i>Article : From tidal dwarf galaxies to satellite galaxies</i> . . . . .	97
<b>2.3 Remarques numériques</b> . . . . .	<b>99</b>
2.3.1 Types de code : Sticky particles vs SPH . . . . .	99
2.3.2 Effets de la résolution . . . . .	99
2.3.3 Des conditions initiales réalistes . . . . .	100
<b>2.4 Evolution des TDGs : BCD, dIrr, dSph ou UCDs ?</b> . . . . .	<b>100</b>

Nous nous intéressons à partir de ce chapitre aux plus massifs des objets formés lors des fusions galactiques, en l’occurrence les galaxies naines de marée ... telles qu’elles seront définies rigoureusement un peu plus tard. On se contentera pour l’instant d’une définition basée sur leur taille, étendue, leur masse, supérieure à  $10^8 M_{\odot}$ , et leur localisation, en bout de longues queues de marée.

## 2.1 Modèles de formation

Depuis les années 1970, les chercheurs font abondamment appel aux simulations numériques pour interpréter les données d’observation des systèmes en interaction. Leur utilité première est de reconstruire leur histoire dynamique et prévoir leur évolution. L’âge de la rencontre, ainsi que son type (majeure ou mineure, prograde ou rétrograde, etc) peuvent être facilement contraints par la taille et la forme des queues de marée qui se développent (ou pas) lors de la collision. Autre objectif classique des simulations de collision : comprendre comment se déclenchent au coeur de galaxies en fusion les flambées de formation stellaire, telles celles observées dans les galaxies ultralumineuses infrarouges. Bien moins de travaux concernent les régions les plus externes des galaxies en fusion, en particulier les débris de collision où se forment les naines de marée. Ces longues structures sortent d’ailleurs le plus souvent des grilles de calcul. Parce-qu’elles sont peu massives au regard des disques galactiques, leur présence est le plus souvent ignorée.

### 2.1.1 Instabilités gazeuses ou stellaires ?

Wallin (1990) a été l'un des premiers à essayer de modéliser la formation stellaire le long des queues de marée. L'intérêt relatif pour ces régions est né de la (re)découverte des galaxies naines de marée dans les Antennes (Mirabel et al. 1992). Deux équipes ont alors cherché à les produire dans des modèles numériques. Leur approche du problème et l'interprétation retenue s'opposent. Selon le modèle de Elmegreen et al. (1993), les embryons de TDGs naissent au sein des disques en collisions. Grâce à l'augmentation de la dispersion de vitesse provoquée par la collision, des nuages de gaz d'une masse supérieure à celle autorisée dans les disques de spirales non perturbées peuvent se former. Expulsés par effet de marée, ils s'effondrent dans le milieu entregalactique, au delà d'une distance critique à leur galaxie parent déterminée par le critère de Toomre. Le scénario concurrent, proposé par Barnes et Hernquist (1992), voit dans les ancêtres des TDGs des grumeaux nés d'instabilités locales dans la composante stellaire des débris de marée et qui auraient grossis par accréation de la matière environnante. Ces travaux ont récemment été mis à mal par les simulations à haute résolution de Wetzstein et al. (2007) qui concluent que les condensations stellaires observées par Barnes et Hernquist (1992) dans leurs modèles étaient des artefacts numériques dus à un manque de résolution. Ces auteurs montrent toutefois que des condensations *de gaz* peuvent *elles* se développer le long des queues de marée.

Les précurseurs des TDGs sont-ils donc surtout fait de gaz ou d'étoiles ? Une autre réponse, pragmatique, tient dans la distribution des composantes gazeuse et stellaire dans les systèmes en interaction. Lors de collisions, une fraction négligeable des étoiles du disque est projetée dans les débris de marée, alors que plus du tiers (jusqu'à 90%) de l'hydrogène atomique est expulsé par effet de marée. Ces différences de comportement s'expliquent par la répartition initiale des deux composantes : plus étendu, le disque de gaz est moins lié gravitationnellement à la galaxie parent. L'essentiel de la masse des queues de marée est ainsi gazeuse. Les débris de collision de systèmes tels NGC 5291 sont d'ailleurs exclusivement formés d'hydrogène atomique et moléculaire – leurs seules étoiles sont nées in situ –. Il s'agit là d'une contrainte incontournable pour les scénarios de formation des objets de marée.

### 2.1.2 Un modèle de type "Bottom-Up" ou "Top-Down" ?

Par leur masse particulièrement élevée, les naines de marée se démarquent parmi les objets formés lors de collisions galactiques. La fonction de masse (ou de luminosité) des amas stellaires jeunes, comme des nuages de gaz dans lesquelles elles se sont formées, suit une loi de puissance  $N(M) \propto m^{-\alpha}$ , avec  $\alpha$  proche de 2, loi observée dans une variété de galaxies proches, y compris dans les systèmes en interaction (voir par exemple Zhang et Fall 1999; de Grijs et al. 2003a). Les amas stellaires massifs sont donc rares et leur masse dépasse rarement  $10^7 M_{\odot}$ . La masse maximum observée, si elle doit dépendre de certains critères physiques, comme la masse initiale du nuage de gaz, est donc pour l'essentiel régit par le nombre total d'amas formés, et donc indirectement par le taux de formation stellaire de la galaxie hôte (Gieles et al. 2006). Or les systèmes que nous avons étudiés n'ont pas des taux de formation stellaire intégrés particulièrement élevés, bien qu'ils aient réussi à former des objets de masse supérieure à  $10^9 M_{\odot}$ . Les simulations numériques effectuées dans notre groupe (voir figure 2.1 et Bournaud et al. 2008, article ci-dessous) suggèrent aussi que les TDGs ne suivent pas la fonction de masse des autres amas stellaires. Ils s'en forment trop par rapport à la distribution attendue, en particulier dans la tranche des objets de masse intermédiaire, comme l'indique la figure 2.2.

En outre, de part leur une masse anormalement élevée, les TDGs se distinguent des amas stellaires classiques, par leur taille qui dépasse, dans les systèmes observés comme simulés, la centaine de parsec, alors que celle des SSCs est inférieure à 10 pc. Enfin, leur dynamique est gouvernée par des moments de rotation.

Plusieurs explications peuvent rendre compte de ce comportement particulier des naines de marée.

- Les TDGs n'ont pas encore converti toutes leurs réserves de gaz en étoiles et amas stellaires, soit parce qu'ils le font avec une faible efficacité, soit qu'ils sont encore jeunes. De fait, contrairement aux SSCs qui ont rapidement consommé tout leur gaz ou l'ont expulsé, les TDGs apparaissent comme des objets essentiellement gazeux dans les systèmes réels comme simulés. Rien ne dit d'ailleurs qu'ils ne formeront pas eux même des amas stellaires. Ainsi, si l'on considère la fonction de luminosité des amas <sup>1</sup>, plutôt que leur fonction de masse, les TDGs ne paraîtraient plus aussi exceptionnels. Reste toutefois que les études de Knierman et al. (2003), basées uniquement sur des images optiques HST, suggèrent un déficit de SSCs massifs dans les queues de marée lorsque celles-ci possèdent une condensation optique lumineuse associée à une TDG.

<sup>1</sup>Surtout si elle est déterminée dans des bandes peu affectées par la formation stellaire en cours

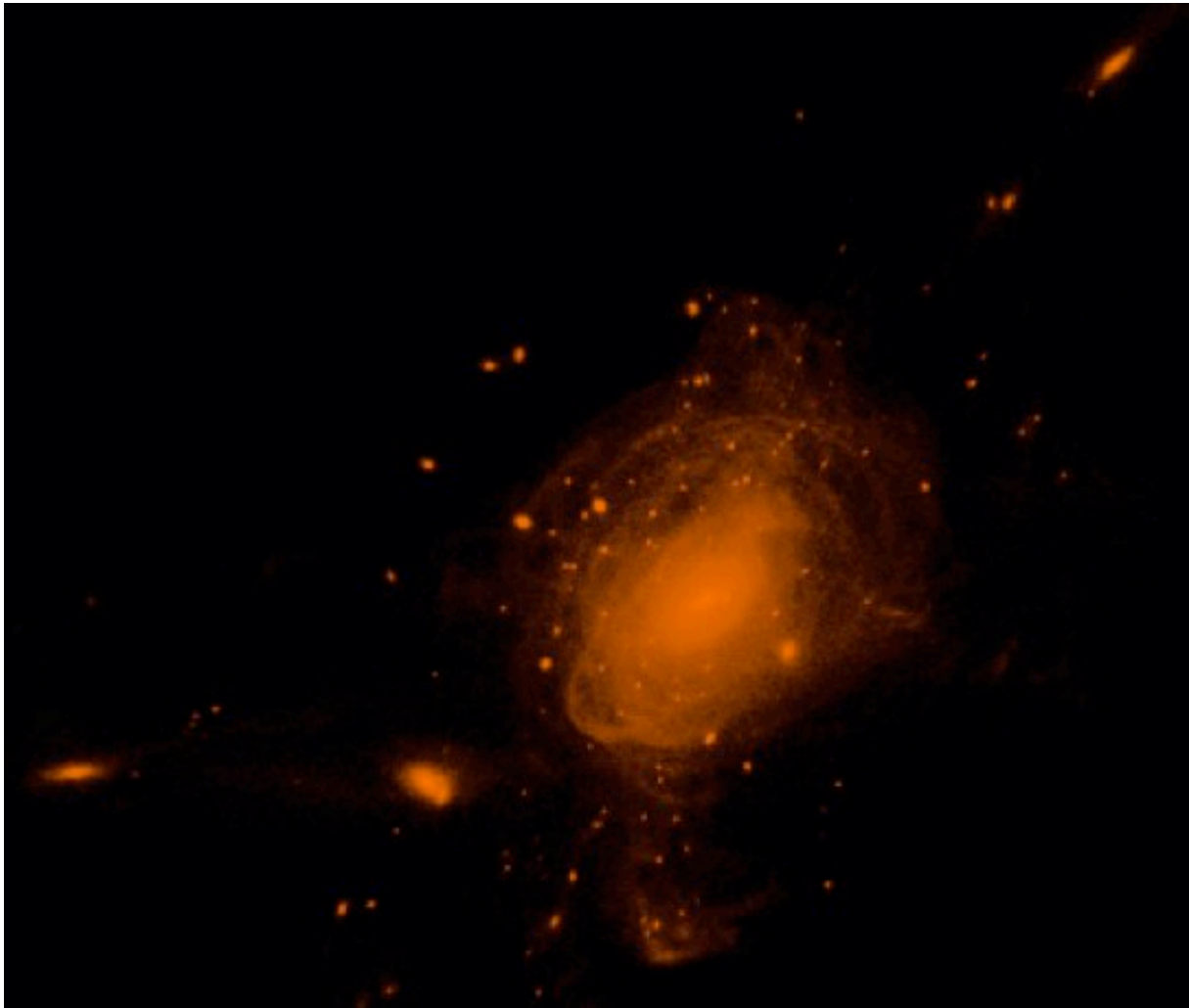


FIG. 2.1 – Late stage ( $T=700$  Myr after peripase) of a simulated wet merger (Mass resolution of  $2 \cdot 10^4 M_{\odot}$  and spatial resolution of 32 pc, the highest ever achieved for a simulation of galaxy collisions). The young stellar component is shown. The formation of structures with masses ranging from a few  $10^5$  (SSCs) to  $10^9 M_{\odot}$  (TDGs) is directly resolved in this model ([Bournaud et al. 2008](#))

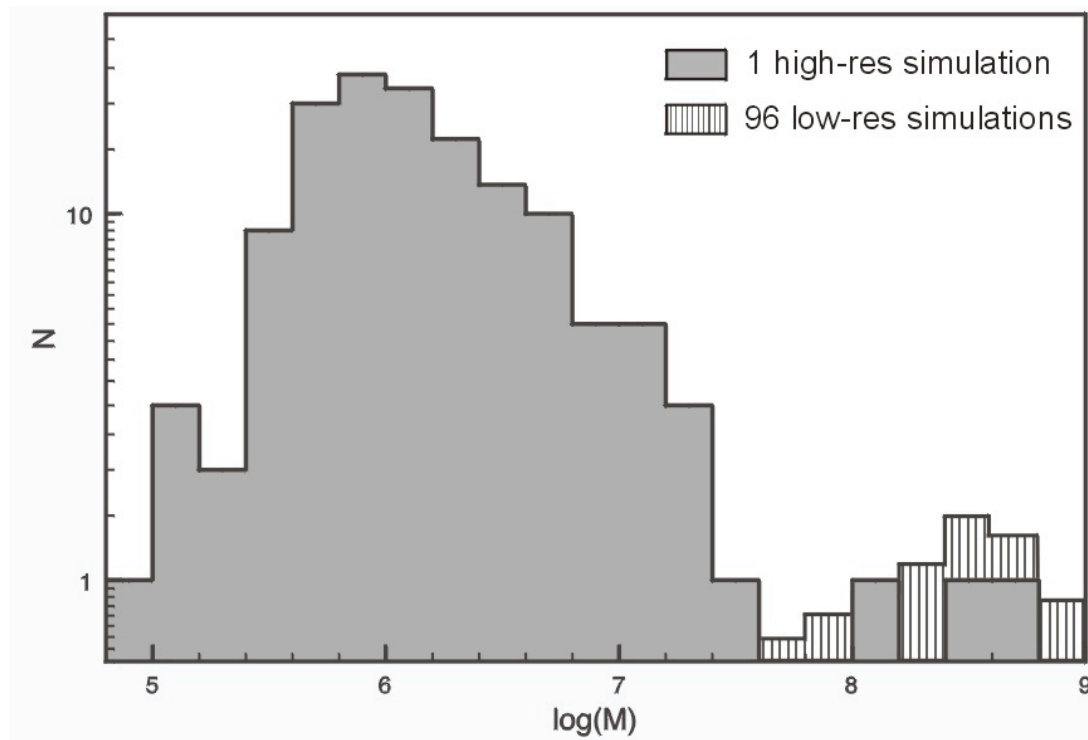


Fig. 2.2 – The filled histogram presents the mass spectrum of the sub-structures identified in the simulated merger, shown in Fig. 1.1. A library of about 100 lower resolution simulations (Bournaud et Duc 2006) has been added (hatched). The mass function looks bimodal, with an apparent deficiency of objects of masses  $5 \cdot 10^7 M_{\odot}$  (Bournaud et al. 2008)

- Les TDGs se forment suite à la fusion d’amas stellaires massifs. Ce scénario, type “bottom-up”, rappelle celui mis en avant dans la théorie de la formation hiérarchique des structures pour rendre compte de la formation des galaxies. Il pourrait expliquer le déficit d’amas massifs en présence de TDGs. En se basant sur des simulations numériques N-corps de la littérature, Kroupa (1998) montre comment la fusion d’une cinquantaine d’amas globulaires situés initialement dans un rayon de 1 kpc donne naissance en cent millions d’années à un “super-amas” de la masse d’une galaxie naine (contenant  $10^8$  étoiles), avec un rayon à mi-masse de 50-100 pc, et un temps de relaxation très élevé, typique de galaxies. Toutefois, ce modèle de fusion multiple requiert des conditions initiales très particulières, dont le réalisme n’a pas été discuté. Par ailleurs il n’explique pas les mouvements de rotation observés dans les TDGs.
- Nous avons proposé que les TDGs résultent plutôt d’un processus dit “Top-Down”, et se démarquent ainsi des amas stellaires classiques formés lors de collisions galactiques. Ce scénario explicité dans Duc et al. (2004a) (article ci-dessous) s’appuie sur des simulations numériques qui, pour la première fois, ont pu reproduire la présence en bout de queues de marée de condensations de gaz massives, telles qu’elles sont observées dans plusieurs systèmes en interaction. Rappelons que les précédents modèles numériques (Barnes et Hernquist 1992; Wetzstein et al. 2007) formaient des condensations de masse intermédiaire tout au long des queues. Nous avons montré que sous certaines conditions sur lesquelles nous reviendront plus tard, des nuages de gaz initialement situés en périphérie de disques galactiques pouvaient être transférés en bout de queues sans subir de trop gros dommages, en particulier sans être dilués. En conservant leur densité de colonne initiale, ils conservent toute leurs chances de former des étoiles une fois dans le milieu entregalactique. Là, ils se découplent cinématiquement du reste des débris de collision, entrent en rotation et s’affranchissent en partie de l’influence de leurs galaxies parents. Leur effondrement déclenche une flambée de formation d’étoiles, provoque éventuellement une fragmentation des nuages et donne naissance à une ou plusieurs TDGs. Il s’agit donc initialement d’un processus d’origine purement cinématique : le transport de matière dans un champ de marée donné, phénomène que nous avons pu analyser à l’aide d’un modèle analytique sommaire (Duc et al. 2004a).

### 2.1.3 Article : *A top-down scenario for the formation of massive Tidal Dwarf Galaxies*

L'article [Duc et al. \(2004a\)](#) explicite le scénario de formation des TDGs qui, de notre point de vue, reproduit de la manière la plus réaliste les TDGs massives observées dans plusieurs systèmes en interaction. Il présente des simulations N-corps (composante stellaire) et Sticky particles (composante gazeuse) montrant la formation de TDGs massives en bout de queues de marée.

#### Abstract

*Among those objects formed out of collisional debris during galaxy mergers, the prominent gaseous accumulations observed near the tip of some long tidal tails are the most likely to survive long enough to form genuine recycled galaxies. Using simple numerical models, Bournaud03 claimed that tidal objects as massive as  $10^9 M_\odot$  could only form, in these simulations, within extended dark matter (DM) haloes. We present here a new set of simulations of galaxy collisions to further investigate the structure of tidal tails. First of all, we checked that massive objects are still produced in full N-body codes that include feedback and a large number of particles. Using a simpler N-body code with rigid haloes, we noticed that dissipation and self-gravity in the tails, although important, are not the key factors. Exploiting toy models, we found that, for truncated DM haloes, material is stretched along the tail, while, within extended haloes, the tidal field can efficiently carry away from the disk a large fraction of the gas, while maintaining its surface density to a high value. This creates a density enhancement near the tip of the tail. Only later-on, self-gravity takes over; the gas clouds collapse and start forming stars. Thus, such objects were fundamentally formed following a kinematical process, according to a top-down scenario, contrary to the less massive Super Star Clusters that are also present around mergers. This conclusion leads us to introduce a restrictive definition for Tidal Dwarf Galaxies (TDGs) and their progenitors, considering only the most massive ones, initially mostly made of gas, that were able to pile up in the tidal tails. More simulations will be necessary to precisely determine the fate of these proto-TDGs and estimate their number.*

## A top-down scenario for the formation of massive Tidal Dwarf Galaxies

P.-A. Duc<sup>1,2</sup>, F. Bournaud<sup>3,1,4</sup>, and F. Masset<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEA/DSM/DAPNIA, Service d'Astrophysique, Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France  
 e-mail: paduc@cea.fr

<sup>2</sup> CNRS, FRE 2591

<sup>3</sup> Observatoire de Paris, LERMA, 61 Av. de l'Observatoire, 75014 Paris, France

<sup>4</sup> École Normale Supérieure, 45 rue d'Ulm, 75005 Paris, France

Accepted 4 June 2004 / Accepted 9 August 2004

**Abstract.** Among those objects formed out of collisional debris during galaxy mergers, the prominent gaseous accumulations observed near the tip of some long tidal tails are the most likely to survive long enough to form genuine recycled galaxies. Using simple numerical models, Bournaud et al. (2003) claimed that tidal objects as massive as  $10^9 M_{\odot}$  could only form, in these simulations, within extended dark matter (DM) haloes. We present here a new set of simulations of galaxy collisions to further investigate the structure of tidal tails. First of all, we checked that massive objects are still produced in full  $N$ -body codes that include feedback and a large number of particles. Using a simpler  $N$ -body code with rigid haloes, we noticed that dissipation and self-gravity in the tails, although important, are not the key factors. Exploiting toy models, we found that, for truncated DM haloes, material is stretched along the tail, while, within extended haloes, the tidal field can efficiently carry away from the disk a large fraction of the gas, while maintaining its surface density to a high value. This creates a density enhancement near the tip of the tail. Only later-on, self-gravity takes over; the gas clouds collapse and start forming stars. Thus, such objects were fundamentally formed following a kinematical process, according to a top-down scenario, contrary to the less massive Super Star Clusters that are also present around mergers. This conclusion leads us to introduce a restrictive definition for Tidal Dwarf Galaxies (TDGs) and their progenitors, considering only the most massive ones, initially mostly made of gas, that were able to pile up in the tidal tails. More simulations will be necessary to precisely determine the fate of these proto-TDGs and estimate their number.

**Key words.** galaxies: formation – galaxies: interactions – galaxies: dwarf – galaxies: halos – cosmology: dark matter

### 1. Introduction

Numerous papers have reported the formation of presumably bound stellar structures around interacting systems. Their blue colors and high metallicity indicate that they were formed rather recently out of material processed in the disk of their parent galaxies. The census of young objects in mergers is still on going and their taxonomy not yet completed.

– *Super Star Clusters (SSCs)*, with typical masses of  $10^5 M_{\odot}$ , appear on optical images as compact stellar condensations. They are either located in the central regions of mergers (e.g., Holtzman et al. 1992; Whitmore et al. 1999; Zepf et al. 1999), in tidal bridges or along extended tidal tails (e.g., Gallagher et al. 2001; Knierman et al. 2003; Saviane et al. 2004) and may be dust enshrouded (Gilbert et al. 2000). *Young Massive Clusters (YMCs)* were identified in high-resolution HST images (e.g., de Grijs et al. 2003; Tran et al. 2003). Their blue luminosity, inferred mass and size are such that some of them may evolve into Globular Clusters with typical masses of  $10^6 M_{\odot}$  (e.g., Schweizer et al. 1996). Some  $10^7 M_{\odot}$

HI fragments discovered around mergers could be their gaseous progenitors (English et al. 2003).

– *Giant HII Complexes (GHCs)*, i.e. star-forming regions with luminosities exceeding the Giant HII Regions found in isolated spiral disks, were discovered in long optical tidal tails (e.g., Weilbacher et al. 2003; López-Sánchez et al. 2004). Further away, *Intergalactic Emission Line Regions*, characterized by a very low underlying old stellar content, and sometimes by their compact aspect (the so-called *EL-Dots*) were detected in several clusters of galaxies. Their optical spectra are typical of star-forming HII regions and their rather high oxygen abundances indicate that they are formed of pre-enriched gas probably stripped from parent colliding galaxies (e.g., Gerhard et al. 2002; Cortese et al. 2004; Ryan-Weber et al. 2004; Mendes de Oliveira et al. 2004).

– Finally, the formation in tidal debris of *Tidal Dwarf Galaxies (TDGs)*, i.e. objects with apparent masses and sizes of dwarf galaxies, has been reported in several studies of interacting systems (e.g., Duc & Mirabel 1999; Hibbard & Barnes 2004, and references therein). They contain large quantities of gas in



### 2.1.4 Article : *High-resolution simulations of galaxy mergers : Resolving globular cluster formation*

L'article [Bournaud et al. \(2008\)](#) présente la simulation de collision disposant de la plus haute résolution jamais effectuée à ce jour. Elle nous a permis de réaliser un spectre de masse des objets formés lors d'une collision entre deux spirales massives, des amas stellaires de masse inférieure à  $10^5 M_{\odot}$ , aux naines de marée les plus massives.

#### **Abstract**

*Massive star clusters observed in galaxy mergers are often suggested to be progenitors of globular clusters. To study this hypothesis, we performed the highest resolution simulation of a gas-rich galaxy merger so far. The formation of massive star clusters of  $10^5$  to  $10^7 M_{\odot}$ , triggered by the galaxy interaction, is directly resolved in this model. We show that these clusters are tightly bound structures with little net rotation, due to evolve into compact long-lived stellar systems. Massive clusters formed in galaxy mergers are thus robust candidates for progenitors of long-lived globular clusters. The simulated cluster mass spectrum is consistent with theory and observations. Tidal dwarf galaxies of  $10^{8-9} M_{\odot}$  can form at the same time, and appear to be part of a different class of objects, being more extended and rotating.*

# High-resolution simulations of galaxy mergers: Resolving globular cluster formation

F. Bournaud<sup>1,2\*</sup>, P.-A. Duc<sup>2,1</sup> & E. Emsellem<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEA, IRFU, SAp, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup>Laboratoire AIM, CNRS, CEA/DSM, Université Paris Diderot. F-91191 Gif-sur-Yvette, France.

<sup>3</sup>Université de Lyon, Lyon, F-69003, France ; Université Lyon 1, Observatoire de Lyon, 9 avenue Charles André, Saint-Genis Laval, F-69230, France  
CNRS, UMR 5574, Centre de Recherche Astrophysique de Lyon ; Ecole Normale Supérieure de Lyon, Lyon, F-69007, France

Accepted 2008 June 5. Received 2008 May 13; in original form 2008 April 18

## ABSTRACT

Massive star clusters observed in galaxy mergers are often suggested to be progenitors of globular clusters. To study this hypothesis, we performed the highest resolution simulation of a gas-rich galaxy merger so far. The formation of massive star clusters of  $10^5$  to  $10^7 M_{\odot}$ , triggered by the galaxy interaction, is directly resolved in this model. We show that these clusters are tightly bound structures with little net rotation, due to evolve into compact long-lived stellar systems. Massive clusters formed in galaxy mergers are thus robust candidates for progenitors of long-lived globular clusters. The simulated cluster mass spectrum is consistent with theory and observations. Tidal dwarf galaxies of  $10^{8-9} M_{\odot}$  can form at the same time, and appear to be part of a different class of objects, being more extended and rotating.

**Key words:** globular clusters: general – galaxies: star clusters – galaxies: interactions

## 1 INTRODUCTION

Globular clusters (GCs) are an important fossil record of the evolution of physical conditions in galaxies (Bekki et al. 2008), because the formation of massive clusters is triggered by shocks and high pressures in the interstellar medium (van den Bergh 1979; Ashman & Zepf 2001). Fundamental properties along the Hubble sequence are a higher frequency of GCs around elliptical than disk galaxies (Harris 1991) and a bimodal population in particular around early-type galaxies, with a population of low-metallicity GCs and a population of younger, higher-metallicity ones (Ashman & Zepf 1992).

Since the works of Schweizer (1987) and Whitmore et al. (1993), there has been increasing evidence that young massive star clusters (YMC) form in interacting and merging galaxies, and these are often proposed to be GC progenitors. Theoretically, massive clusters form in mergers because of shocks and high turbulent pressure in interacting galaxies, which favors the formation of tightly bound clusters rather than unbound associations (Elmegreen & Efremov 1997). If GCs can form this way, given that most elliptical galaxies formed by galaxy mergers (Naab & Burkert 2003, Bournaud et al. 2005), this mechanism could account for the youngest and most metallic GCs that are more frequent around early-type galaxies (Ashman & Zepf 2001).

These GCs would come in addition to those formed early in the Universe as a result of thermal instabilities in protogalaxies (Fall & Rees 1985), strong shocks at the epoch of the Reionization (Cen 2001), or stripping of nucleated dwarf galaxies (Freeman 1990; Gao et al. 2007). Nevertheless, that an important population of GCs formed in galaxy mergers is still challenged by some observations (Spitler et al. 2008). Whether or not YMCs formed during mergers contribute to the present-day GC populations is still an open question also because the long-term evolution of such YMCs is uncertain (see de Grijs 2007). A requirement for YMCs to become long-lived GCs is that they should be gravitationally bound, which is difficult to assess observationally, as the velocity dispersion of a cluster does not directly trace its mass because of mass segregation (Fleck et al. 2006). The survival issue is further complicated by the the mass-loss of clusters if their IMF is too shallow, and by the tidal field of the parent galaxy which may progressively disrupt these clusters (Miocchi et al. 2006).

Numerical simulations are a powerful tool to study galaxy mergers, but resolving the formation of star clusters in self-consistent models requires a huge dynamical range, because structures smaller than 100 pc should be resolved in a simulated volume larger than 100 kpc. Models by Bekki et al. (2002) and Kravtsov & Gnedin (2005) have shown that the pressure and density required to form massive bound star clusters could be reached in galaxy mergers. They could

\* E-mail: frederic.bournaud@cea.fr

## 2.2 Critères de formation, destruction et survie

Maintenant qu'un scénario probable de formation des TDGs se dessine, nous pouvons aborder le problème épineux de la détermination de leur importance cosmologique. Déterminer la fraction de galaxies naines d'origine de marée dans le bestiaire extragalactique revient à s'interroger sur (1) la spécificité et fréquence des circonstances requises pour leur formation (2) les conditions nécessaires à leur survie à long terme. Ces questions sont traitées dans ce chapitre à l'aide de simulations numériques, avant d'être appréhendées dans le suivant avec des moyens observationnels.

Nous avons réalisé une centaine de simulations numériques de collisions (Bournaud et Duc 2006, [article ci-dessous](#)) pour lesquelles nous avons fait varier les paramètres de la collision : vitesse relative des galaxies parents, paramètre d'impact, inclinaison et orientation des orbites, rapport de masse. Pour chacune des réalisations, nous avons compté le nombre de TDGs formés puis survivants au bout de 200, 500 et 2 milliards d'années.

### 2.2.1 Pré-requis

Les paramètres favorables à la formation des TDGs sont les suivants :

- des vitesses de rencontre modérées (de 50 à 250 km s<sup>-1</sup>)
- une plage de paramètres d'impact assez vaste, de 30 à 200 kpc
- des orbites moyennement inclinées (jusqu'à 40 degrés) et des rencontres progrades (l'orientation de l'orbite correspond au sens de rotation)
- des rapports de masse compris entre 4 :1 et 1 :8. Plus explicitement, une TDG pourra se former à partir de la matière arrachée à la galaxie la plus massive à condition que sa masse excède au moins 4 fois celle de son compagnon. Quant à ce dernier, il pourra lui-même engendrer une TDG si sa masse n'est pas inférieure à un huitième de celle de la galaxie principale. Ainsi, ce ne sont pas seulement des fusions majeures, avec des rapports de masse 1 :1 qui sont susceptibles de former des TDGs.

Ces critères favorisent en effet la formation de longues queues de marée, au bout desquelles peuvent se développer des objets massifs sans être immédiatement détruits par effet de marée. A ceux-ci se rajoutent des paramètres concernant les conditions initiales dans les galaxies parents :

- un disque de gaz suffisamment étendu, typiquement au moins deux fois le disque stellaire. Des galaxies parents dépourvues de gaz en particulier dans les régions externes seraient bien sûr incapables d'alimenter en gaz leur progéniture. Il semble exister d'ailleurs une corrélation entre le nombre de TDGs formés et la fraction de gaz dans les galaxies parents.
- un halo de matière noire lui aussi étendu, d'une taille au moins égale à dix fois celle du disque stellaire. Nous reviendrons au chapitre 4.2.2 sur cette condition nécessaire à la préservation de la densité du gaz expulsé.

### 2.2.2 Survie

La survie des structures formées lors de fusions galactiques dépend de divers facteurs :

- Leur état dynamique initial : elles doivent naturellement être virialisées, gravitationnellement liées pour que leurs composantes ne soient pas dispersées. Nous avons vérifié que c'était bien le cas dans nos simulations.
- Leur capacité à survivre à une forte "mortalité infantile". Des pertes de gaz importantes consécutives aux vents stellaires et supernovae se produisant dans les amas stellaires jeunes leur font perdre leur équilibre du viriel, entraînant leur destruction en moins de 30 millions d'année. Jusqu'à 90% des amas peuvent disparaître dans ce laps de temps (de Grijs et Parmentier 2007). Ce processus qui dépend de l'efficacité de formation stellaire devrait affecter dans une moindre mesure des objets aussi massifs que les TDGs. La résolution insuffisante des simulations, ainsi que leurs recettes de formation stellaire encore sommaires, ne permettent pour l'instant pas de vérifier cette assertion.
- Leur capacité à résister aux effets à plus long terme : ségrégation en masse des étoiles et évaporation des plus légères, effets de marée causés par leurs galaxies parents. Contrairement aux amas stellaires, les TDGs de par leur densité ne sont pas affectées par la relaxation à deux corps interne.
- Leur résistance à la friction dynamique qui irrémédiablement provoquera leur ralentissement et leur retombée sur leurs galaxies parents.

Déchirement par effet de marée et friction dynamique ont pu être en particulier testés par nos simulations pour des objets de masse supérieure à 10<sup>8</sup> M<sub>⊙</sub>. Nous avons ainsi montré que les objets susceptibles de survivre plus

d'un milliard d'années se sont formés en bout de queue de marée. En fin de simulations, ils orbitent autour de leur galaxie parent, comme les galaxies satellites classiques. La plupart des objets détruits l'ont été dans les 500 premiers millions d'années et se trouvaient initialement sur des orbites plus excentriques. [Kroupa \(1997\)](#) a étudié la survie d'objets équivalents à des TDGs de plus faible masse (qu'il n'avait toutefois pas formé ab-nihilo). Il conclut que la masse des survivants est d'environ un pourcent de leur masse initiale.

---

### 2.2.3 Article : *From tidal dwarf galaxies to satellite galaxies*

L'article [Bournaud et Duc \(2006\)](#) explicite les conditions de formation et de survie des TDGs. Il exploite les données de 96 simulations numériques de collisions galactiques. Le nombre et la distribution en masse de TDGs de masse supérieure à  $10^8 M_{\odot}$  a été suivi au cours du temps sur une durée de 2 milliards d'années. Ces travaux montrent que les survivants orbitent autour de leurs galaxies parents comme nombre de galaxies satellites.

#### Abstract

*The current popular cosmological models have granted the population of dwarf satellite galaxies a key role : their number, location, and masses constrain both the distribution of dark matter and the physical evolution of their hosts. In the past years, there has been increasing observational evidence that objects with masses of dwarf galaxies can form in the tidal tails of colliding galaxies, as well as speculations that they could become satellite-like galaxies orbiting around their progenitors and thus be cosmologically important. Yet, whether the so-called "Tidal Dwarf Galaxy" (TDG) candidates are really long-lived objects and not transient features only present in young interacting systems is still largely an open question to which numerical simulations may give precise answers. We present here a set of 96 N-body simulations of colliding galaxies with various mass ratios and encounter geometries, including gas dynamics and star formation. We study the formation and long-term evolution of their TDG candidates. Among the 593 substructures initially identified in tidal tails, about 75% fall back onto their progenitor or are disrupted in a few 108 years. The remaining 25% become long-lived bound objects that typically survive more than 2 Gyr with masses above  $10^8 M_{\odot}$ . These long-lived, satellite-like objects, are found to form in massive gaseous accumulations originally located in the outermost regions of the tidal tails. Studying the statistical properties of the simulated TDGs, we infer several basic properties that dwarf galaxies should meet to have a possible tidal origin and apply these criteria to the Local Group dwarfs. We further found that the presence of TDGs would foster the anisotropy observed in the distribution of classical satellite galaxies around their host. Identifying the conditions fulfilled by interacting systems that were able to form long-lived tidal dwarfs - a spiral merging with a galaxy between 1/4 and 8 times its mass, on a prograde orbit, with an orbital plane inclined up to 40 degrees to the disk plane - and estimating their fraction as a function of redshift, we roughly estimate their contribution to the overall population of dwarfs. We conclude that a small but significant fraction of them - a few percent - could be of tidal origin. This number may be underestimated in particular environments such as the vicinity of early-type galaxies or in groups.*

A&A 456, 481–492 (2006)  
 DOI: 10.1051/0004-6361:20065248  
 © ESO 2006

**Astronomy  
&  
Astrophysics**

## From tidal dwarf galaxies to satellite galaxies<sup>★</sup>

F. Bournaud<sup>1</sup> and P.-A. Duc<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Observatoire de Paris, LERMA, 61 Av. de l'Observatoire, 75014 Paris, France  
 e-mail: Frederic.Bournaud@obspm.fr

<sup>2</sup> CNRS UMR 7158, AIM, & CEA/DSM/DAPNIA, Service d'Astrophysique, Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

Received 22 March 2006 / Accepted 10 May 2006

### ABSTRACT

The current popular cosmological models have granted the population of dwarf satellite galaxies a key role: their number, location, and masses constrain both the distribution of dark matter and the physical evolution of their hosts. In the past years, there has been increasing observational evidence that objects with masses of dwarf galaxies can form in the tidal tails of colliding galaxies, as well as speculations that they could become satellite-like galaxies orbiting around their progenitors and thus be cosmologically important. Yet, whether the so-called “Tidal Dwarf Galaxy” (TDG) candidates are really long-lived objects and not transient features only present in young interacting systems is still largely an open question to which numerical simulations may give precise answers. We present here a set of 96 *N*-body simulations of colliding galaxies with various mass ratios and encounter geometries, including gas dynamics and star formation. We study the formation and long-term evolution of their TDG candidates. Among the 593 substructures initially identified in tidal tails, about 75% fall back onto their progenitor or are disrupted in a few  $10^8$  years. The remaining 25% become long-lived bound objects that typically survive more than 2 Gyr with masses above  $10^8 M_{\odot}$ . These long-lived, satellite-like objects, are found to form in massive gaseous accumulations originally located in the outermost regions of the tidal tails. Studying the statistical properties of the simulated TDGs, we infer several basic properties that dwarf galaxies should meet to have a possible tidal origin and apply these criteria to the Local Group dwarfs. We further found that the presence of TDGs would foster the anisotropy observed in the distribution of classical satellite galaxies around their host. Identifying the conditions fulfilled by interacting systems that were able to form long-lived tidal dwarfs – a spiral merging with a galaxy between 1/4 and 8 times its mass, on a prograde orbit, with an orbital plane inclined up to 40 degrees to the disk plane – and estimating their fraction as a function of redshift, we roughly estimate their contribution to the overall population of dwarfs. We conclude that a small but significant fraction of them – a few percent – could be of tidal origin. This number may be underestimated in particular environments such as the vicinity of early-type galaxies or in groups.

**Key words.** galaxies: interactions – galaxies: kinematics and dynamics – galaxies: formation – galaxies: evolution – galaxies: structure

### 1. Introduction

The properties of dwarf satellite galaxies that surround spirals and ellipticals are often used to constrain cosmological models. Their number has been actively debated since cosmological simulations have shown that the low-mass dark halos are much more numerous around their massive hosts than the dwarf galaxies identified around the Milky Way (e.g., Klypin et al. 1999; Moore et al. 1999). Moreover, the spatial distribution of satellites can provide information on the mass and shape of dark haloes (Zaritsky et al. 1997; Brainerd 2005; Lee & Kang 2006). Finally, as building blocks, they play a major role on the physical evolution of massive galaxies with which they will eventually merge. It is generally assumed in such studies that dwarf galaxies have a cosmological primordial origin and were not formed recently. However, there is growing evidence that objects with masses typical of dwarf galaxies form in the tidal tails that surround colliding and merging spiral galaxies (e.g., Duc & Mirabel 1994, 1998; Hibbard et al. 2001; Mendes de Oliveira et al. 2001; Temporin et al. 2003; Knierman et al. 2003). Many of these so-called Tidal Dwarf Galaxies (TDGs) appear to be self-gravitating objects (Braine et al. 2000; Bournaud et al. 2004). If these tidal objects are long-lived, they could contribute to

the total population of dwarf satellites in addition to primordial dwarfs. Their statistical properties would then be modified and the possible constraints on cosmological models would have to be updated.

Dwarf galaxies presently observed to form in tidal tails could, however, be short-lived. Indeed, dynamical friction may cause a rapid orbital decay. Hibbard & Mihos (1995) have shown that a large part of the once expelled tidal material falls back onto the parent spiral galaxies in a few hundreds of Myr, but the timescale increases to Gyr in the outer regions; thus, the tidal dwarfs formed there may have a significant lifetime. Also, dwarf galaxies may be disrupted by the tidal field of their progenitor even if the internal orbits of their stars are not resonant with their orbital period (e.g., Fleck & Kuhn 2003); this disruption process can take a few billion years depending on their mass, orbit, and concentration. Thus, the lifetime of tidal dwarfs is a priori rather uncertain and their cosmological importance far from being proven.

Actually, no real old TDGs, still surviving after the merger of their progenitors and the vanishing of the umbilical cord linking them to their parents, has yet been unambiguously found, although candidates were discussed in the literature (Hunter et al. 2000; Duc et al. 2004b, and references therein). Because of the difficulties in identifying a tidal origin in evolved galaxies, numerical simulations appear to be unavoidable in

\* The appendix is only available in electronic form at <http://www.edpsciences.org>

## 2.3 Remarques numériques

On voit l'importance des simulations numériques pour comprendre l'origine et la survie des sous-structures présentes dans les restes de galaxies en fusion. On peut alors naturellement s'interroger sur l'influence des codes sur les résultats obtenus. C'est d'autant plus légitime que, comme nous l'avons vu précédemment, différentes équipes utilisant des codes variés sont parvenues à des conclusions sur le mécanisme de formation des TDGs en apparence opposées. Il ne s'agit pas ici d'entrer dans les aspects techniques des simulations numériques, que je ne maîtrise d'ailleurs pas, mais de livrer quelques remarques générales sur la robustesse de nos travaux numériques.

### 2.3.1 Types de code : Sticky particles vs SPH

Des simulations numériques réalistes doivent décrire le comportement des composantes principales des galaxies, à savoir les étoiles, le gaz et la matière noire. Les divergences entre codes proviennent essentiellement de la manière dont la composante dissipative (gazeuse) est traitée. Celui développé par Frédéric Bournaud (à partir du code créé par Françoise Combes) utilise des "sticky particles" pour modéliser des collisions inélastiques entre particules de gaz. Leur traitement est effectué à l'aide de grilles aussi utilisées pour la manipulation des particules stellaires. Le code concurrent, type "Tree-SPH" (Smoothed Particle Hydrodynamics), approxime, de manière locale, autour de chaque particule, le comportement hydrodynamique du gaz et effectue les calculs à l'aide de structures en arbre. En apparence plus réaliste, le SPH souffre d'importants problèmes de viscosité artificielle. Parmi les avantages d'un code "sticky particles", l'augmentation facile du nombre de particules en fonction du problème considéré. La plupart des simulations de collisions relatées dans la littérature ont été réalisées à l'aide de codes type SPH (e.g. Barnes et Hernquist 1996; Springel et al. 2005). Or celles-ci ne semblent pas montrer la variété de sous-structures présente dans les queues de marée produites par le code de Bournaud et al. La structuration des débris de collision dépend-elle donc du code utilisé ?

Probablement pas. Les simulations réalisées par Cox et al. (2006) avec le code SPH GADGET produisent des condensations gazeuses similaires en bout de queues à celles que nous avons obtenues avec un code "sticky particles" (voir en particulier la figure 6 dans Cox et al., 2006). Nous avons toutefois voulu nous en rendre compte par nous-même en demandant à Benoît Semelin de l'Observatoire de Paris de réaliser avec GADGET une simulation avec des conditions initiales identiques aux nôtres. Le résultat présenté dans la Figure 2.3 nous a rassuré sur la robustesse de notre scénario de formation des TDGs.

### 2.3.2 Effets de la résolution

Le travail récent de Wetzstein et al. (2007), mentionné plus haut, soulignait le danger à utiliser des simulations avec une résolution numérique insuffisante. En passant de simulations comportant cent mille particules (Bournaud et al. 2003) à un million (Duc et al. 2004a), nous n'avions toutefois pas constaté de différences notables dans la structure des queues de marée gazeuses. Il fallait encore vérifier qu'en augmentant encore la résolution, les TDGs ne se fragmentent pas. Frédéric Bournaud a adapté son code pour raffiner les grilles de calcul sur les régions d'intérêt, en l'occurrence dans les embryons de TDGs. Il a pu ainsi obtenir des résolutions spatiales atteignant la dizaine de parsec (voir Figure 2.4). De fait, la condensation initiale de gaz, formée d'un "nuage" unique à basse résolution, a tendance à se morceler partiellement. Toutefois, les fragments gazeux restent gravitationnellement liés entre eux. La TDG subsiste comme objet unique, indépendant.

La résolution n'est donc pas un facteur prohibitif pour former des TDGs dans les collisions. Pour preuve, le nombre de TDGs visibles dans les simulations SPH rassemblées dans la base de données GalMer qui ne comportent que 120000 particules (Di Matteo et al. 2007).

Disposer d'un nombre de particules suffisamment important dans les débris de collision est toutefois indispensable pour étudier certains paramètres gouvernant leur survie comme la friction dynamique et autres effets de marée – les TDGs orbitent dans le halo de leurs galaxies parents et subissent donc leur influence –, ainsi que leur résistance face aux vents provoqués par la flambée de formation stellaire interne. Cet effet de "feedback" reste particulièrement mal étudié (voir toutefois les travaux récents de Recchi et al. 2007, sur la question). Les codes de simulations numériques comportent des recettes simples de formation stellaire, basées sur la loi de Schmidt, qui devront être affinées. Bien sûr, l'augmentation de la résolution permet aussi la production d'objets de plus faible masse que les TDGs, comme les amas globulaires qui ont pu être résolus par Bournaud et al. (2008).

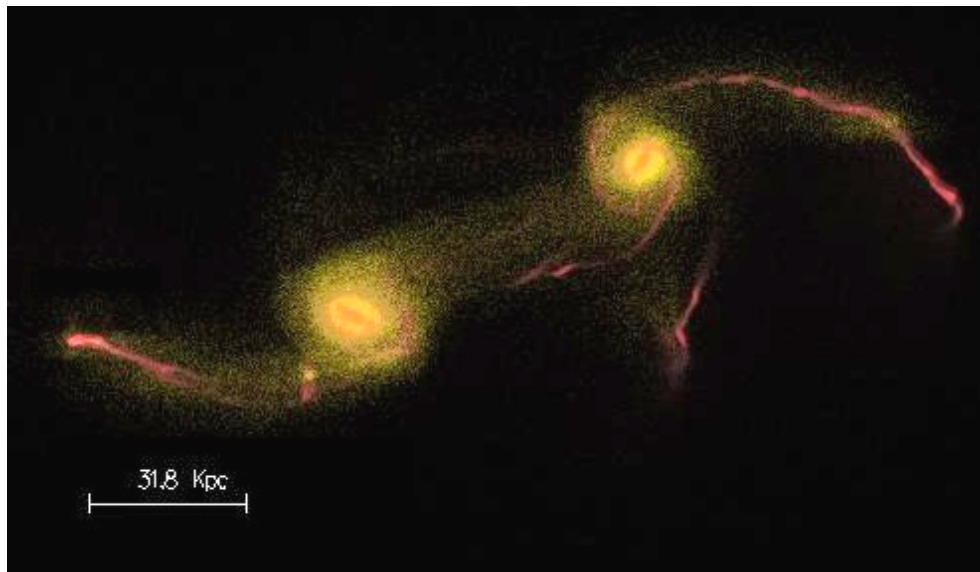


Fig. 2.3 – Numerical simulation of a galaxy-galaxy merger with an SPH code. TDGs are still produced. Courtesy of Benoit Semelin.

### 2.3.3 Des conditions initiales réalistes

Ainsi ni la nature du code utilisé, ni dans une moindre mesure la résolution adoptée, n'expliquent pourquoi des simulations en apparence similaire de collisions entre galaxies de même masse, qui produisent toutes de longues queues de marée, créent ou non des TDGs en leur sein. En fait, ces modèles diffèrent de par les conditions initiales choisies pour les galaxies parents. Comme nous l'avons noté auparavant, un disque de gaz peu étendu (souvent choisi dans le passé avec la même extension que le disque stellaire), un halo de matière noire volontairement tronqué pour alléger les simulations, sont des paramètres réducteurs pour former des TDGs.

## 2.4 Evolution des TDGs : BCD, dIrr, dSph ou UCDs ?

Ainsi, les simulations numériques suggèrent qu'une fraction des TDGs pourrait survivre, soit comme galaxies satellites, soit même comme galaxies de champ si sous l'action de collisions et interactions ultérieures, elles se libèrent et quittent le champ de gravité de leurs galaxies parents. A quel type de galaxies naines s'apparenteront alors ces vieilles naines de marée ? A des naines irrégulières ou bleues compactes, formant encore des étoiles ? A des naines sphéroïdales anémiques, telles les galaxies satellites de la Voie Lactée (Metz et Kroupa 2007) ? Voire aux galaxies naines ultracompactes (UCDs pour Ultra Compact Dwarf Galaxies), cette nouvelle classe d'objets mise à jour dans les amas de galaxies proches (Hilker et al. 1999; Drinkwater et al. 2003), et dont les propriétés sont intermédiaires entre celles des amas globulaires (par leur compacité) et celles des galaxies naines (par leur masse) ? UCDs et TDGs partagent leur contenu modéré voire faible en matière noire (Chilingarian et al. 2008) et pourraient avoir des liens de parenté : sont elles des cousins, formés simultanément lors de fusions galactiques ? Fellhauer et Kroupa (2002) envisagent que des SSCs massifs fusionnent pour donner naissance à des UCDs – scénario aussi retenu par leur équipe pour la formation des TDGs qui est une alternative à l'hypothèse Top-Down que nous préférons mettre en avant –. Ou présentent-elles un lien de filiation ? Des TDGs qui auraient réussi à rapidement former un coeur dense pourraient évoluer en UCDs si elles se voient par effet d'environnement dépouillées de leur disque stellaire. C'est d'ailleurs un scénario de même nature qui initialement avait été envisagé pour la formation des UCDs (Bekki et al. 2001; Chilingarian et Mamon 2008) à partir de naines sphéroïdales dénoyautées. Si les UCDs, ou une fraction d'entre elles, s'avèrent être de vieilles TDGs, il faudrait conclure à la grande espérance de vie de ces dernières.

L'évolution des TDGs reste pour l'instant méconnue et les modèles numériques encore insuffisamment performants pour l'appréhender. Le recensement de candidats TDGs de divers âges dans l'Univers proche et lointain s'avère indispensable. Nous retournons donc dans le prochain chapitre au monde réel et à la quête des vieilles



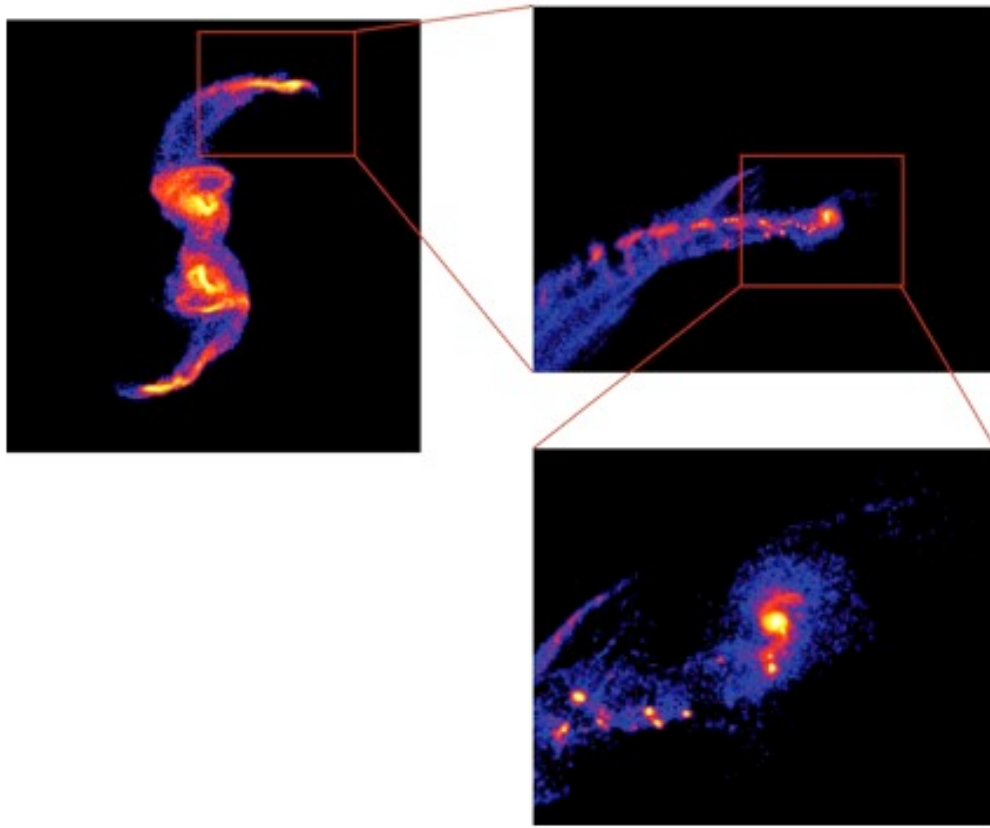


FIG. 2.4 – Numerical simulation of a galaxy-galaxy merger. Several zoom levels and merger ages are shown, with the highest resolution in the lower-right panel. Each snapshot is separated by 100 Mpc. The final resolution on the TDG is about 10 pc. The gaseous component is shown here. The initial gas condensation near the tip of the tail partly breaks into several fragments that are however gravitationally bound. A mini-spiral structure has formed in the TGD progenitor.

naines de marée.



## Chapitre 3

# Recensement des galaxies naines de marée

### Sommaire

<b>3.1 Critères d'identification</b>	<b>103</b>
3.1.1 Définition des TDGs	103
3.1.2 Propriétés cinématiques : effets instrumentaux, de projection	104
3.1.3 <i>Article : Kinematics of tidal tails in interacting galaxies : Tidal dwarf galaxies and projection effects</i>	106
3.1.4 <i>Article : Tidal debris from high-velocity collisions as fake dark galaxies</i>	108
3.1.5 Propriétés structurelles : contenu en matière noire	110
3.1.6 Propriétés chimiques : pré-enrichissement et histoire de formation stellaire	110
3.1.7 Propriétés statistiques : localisation	110
3.1.8 <i>Article : Tidal dwarf candidates in a sample of interacting galaxies : Properties and kinematics of the ionized gas</i>	113
3.1.9 <i>Article : Identifying old Tidal Dwarf Galaxies in Simulations and in the nearby Universe</i>	115
<b>3.2 Dépistage des vieilles TDGs</b>	<b>117</b>
3.2.1 Dans le Groupe Local	117
3.2.2 Dans les groupes proches	118
3.2.3 Dans les amas de galaxies	120
3.2.4 Dans l'Univers proche : apport du SDSS	120
3.2.5 Dans l'Univers lointain	121
3.2.6 <i>Article : VCC 2062 : an old Tidal Dwarf Galaxy in the Virgo Cluster ?</i>	122
3.2.7 <i>Article : HI-rich dwarf galaxies in the Hydra I cluster</i>	124
3.2.8 <i>Article : A study of HI-selected galaxies in the Hercules cluster</i>	126

## 3.1 Critères d'identification

### 3.1.1 Définition des TDGs

Des structures de diverses masse et taille peuvent se former lors des fusions galactiques. La littérature les confond souvent sous le vocable unique de "Galaxies Naines de marée", ou par prudence de "candidat TDG", du moment où leur luminosité optique est celle d'une galaxie naine. On voit les limites d'une telle définition observationnelle : en particulier, le rapport masse sur luminosité dépend de leur âge, plus encore que pour des naines classiques déjà évoluées ; des effets de projection peuvent contribuer à sur-estimer la luminosité, etc... Une définition plus physique s'impose.

Nous avons vu au cours du chapitre précédent qu'à la variété des objets formés lors de collisions répondait une multiplicité de mécanismes physiques : instabilités locales, fusions d'amas massifs, effondrement global. Chacun d'entre eux a pu donner naissance à une classe d'objets spécifique. Nous préférons réserver le terme de "Galaxies

Naines de Marée" aux systèmes formés à partir de l'effondrement de nuages de gaz massifs expulsés par effet de marée. En effet, c'est pour l'instant le seul mécanisme avéré capable d'engendrer des objets de la *masse* de galaxies naines, et dont l'espérance de vie dépasse le milliard d'années – durée suffisamment longue pour mériter le terme de "galaxies". En pratique cependant, on ne connaît pas le mode de naissance d'un candidat TDG.

Une définition plus pragmatique est la suivante : *"une naine de marée est un objet initialement étendu, gravitationnellement lié, formé à partir de matière galactique expulsée par effet de marée, dont la masse dynamique est au moins équivalente à celle d'une galaxie naine"*. Ceci permet d'exclure les super-amas stellaires, qui pour la plupart n'ont pas la masse et la taille requise. Compact, le temps de relaxation à deux corps de leurs étoiles (i.e. le temps nécessaire à leur première déflexion gravitationnelle) est court, alors que pour une galaxie stable, digne de ce nom, il doit dépasser le temps de Hubble (Kroupa 1998; Dabringhausen et al. 2008).

De fait, les TDGs connues répondant à la définition précédente ont des tailles bien supérieures à 100 pc, des masses dépassant  $10^8 M_{\odot}$ , et montrent des signes de rotation. Elles ont une composante gazeuse proéminente qui domine d'ailleurs leur masse, et un disque stellaire sous-jacent dont l'importance relative varie fortement d'un objet à l'autre et qui présente des régions de formation d'étoiles. Le plus souvent, elles se situent en bout de queues de marée.

Notre définition s'applique à des objets encore jeunes. Nous ignorons encore comment les TDGs évoluent, et à quoi ressembleraient de vieilles TDGs et à vrai dire s'il en existe vraiment. Du coup, disposer d'une définition pour des objets âgés ne s'impose pas encore. On parlera donc, par exemple, de naine sphéroïdale "d'origine de marée", si l'on découvre un très bon candidat parmi cette classe d'objets. Dernière précision, notre définition exclut a priori d'autres objets formés dans des débris de collision qui ne seraient pas le résultat de forces de marée stricto sensu. On peut penser aux condensations massives présentes dans les anneaux collisionnels. Pour ne pas grever une nomenclature déjà foisonnante, nous les qualifierons aussi de TDGs.

### 3.1.2 Propriétés cinématiques : effets instrumentaux, de projection

"Être gravitationnellement lié" est donc une des toutes premières conditions à vérifier pour un candidat TDG. Parce qu'ils sont riches en gaz et forment des étoiles, leur état dynamique peut être facilement évalué à l'aide de la cinématique du gaz d'hydrogène neutre, ionisé ou moléculaire. Lorsqu'ils sont suffisamment étendus, des courbes de vitesse peuvent être mesurées. Toutefois, plusieurs interprétations peuvent en rendre compte :

- Un gradient de vitesse traduit un mouvement de rotation interne – attestant ainsi que le candidat TDG est vraiment lié. La masse dynamique peut être déduite de la courbe de rotation.
- Le gradient de vitesse correspond à des mouvements globaux le long des queues de marée. Ces écoulements de matière ("Streaming motions") résultent des forces de marée. Ils sont uniformes, mais observés sous un certain angle, ils présentent des gradients locaux dus à de simples effets de projection. En effet, les queues de marée sont des structures incurvées, voire non coplanaires, dont la cinématique, projetée sur le plan du ciel, devient difficile à interpréter. Nous avons fait appel aux simulations numériques pour déterminer la signature cinématique de tels effets de projection (Bournaud et al. 2004, [article ci-dessous](#)). Cette étude nous a permis de rejeter certains candidats TDGs ou plus exactement de conclure que, si ils existent, leur luminosité a été très largement sur-estimée. Une mesure de la masse à partir des données cinématiques devient alors difficile, voire donne des résultats aberrants.

C'est très probablement le cas pour les galaxies dites "noires", ces nuages HI de faible masse, dont la cinématique suggère qu'ils sont mus par un halo de matière noire sous-jacent extrêmement massif (Davies et al. 2006). Ils sont toutefois dépourvus d'étoiles, d'où leur nom. Selon une interprétation bien moins exotique, il s'agirait de simples débris de collision : des nuages arrachés par effet de marée et donc pourvus d'une vitesse d'expansion. Sensibilisés au problème des effets de projection par nos études sur les queues de marée, nous avons cherché à reproduire à l'aide de simulations de collision les caractéristiques principales du prototype des galaxies noires : [VirgoHI21](#), situé dans l'amas de la Vierge (Minchin et al. 2005, 2007). Notre modèle numérique indique que selon toute vraisemblance VirgoHI21 est une structure de marée arrachée à une galaxie spirale proche, lors de son survol à très haute vitesse par un compagnon désormais éloigné (Duc et Bournaud 2008, [article ci-dessous](#)).

- Le gradient de vitesse n'est pas réel. Il est causé par des effets instrumentaux. Ceux-ci peuvent être critiques pour des courbes de vitesse obtenues à partir de données de spectroscopie 1D à fente. Ainsi le saut de vitesse dépassant  $300 \text{ km s}^{-1}$  que nous avons mesuré dans une condensations du système AM1353-272, "La chaise de dentiste", (Weilbacher et al. 2002), n'a pu être confirmé par des observations spectroscopiques à 2D (Weilbacher et Duc 2007). Une inadéquation entre la taille des objets (trop petite) et la largeur de la fente (trop grande) peut causer des gradients de vitesse artificiels. Cet effet toutefois est insuffisant pour expliquer les courbes de vitesse aberrantes mesurées dans les queues de marée de ce système. Elles demeurent mystérieuses.
-

### 3.1.3 Article : *Kinematics of tidal tails in interacting galaxies : Tidal dwarf galaxies and projection effects*

L'article [Bournaud et al. \(2004\)](#) présente des cartes de vitesse du gaz ionisé H $\alpha$  le long de plusieurs queues de marée. Elles ont été déterminées à l'aide d'instruments Fabry-Perot installés sur le CFHT et le télescope de 3.6m de La Silla. Elles ont été interprétées au moyen de simulations numériques qui ont permis de discerner les gradients de vitesse dus à la présence de structures auto-gravitantes, telles les TDGs, de ceux causés par des mouvements d'expansion le long des queues, projetés dans le plan du ciel. Un changement de signe du gradient de vitesse avant la fin de la queue est une signature cinématique d'un effet de projection.

#### Abstract

*The kinematics of tidal tails in colliding galaxies has been studied via Fabry-Pérot observations of the H $\alpha$  emission. With their large field of view and high spatial resolution, the Fabry-Pérot data allow us to probe simultaneously, in 2D, two kinematical features of the tidal ionized gas : large-scale velocity gradients due to streaming motions along the tails, and small-scale motions related to the internal dynamics of giant HII regions within the tails. In several interacting systems, massive ( $10^9$  Msun) condensations of HI, CO and stars are observed in the outer regions of tails. Whether they are genuine accumulations of matter or not is still debated. Indeed a part of the tidal tail may be aligned with the line-of-sight, and the associated projection effect may result in apparent accumulations of matter that does not exist in the 3D space. Using numerical simulations, we show that studying the large-scale kinematics of tails, it is possible to know whether these accumulations of matter are the result of projection effects or not. We conclude that several ones (Arp 105-South, Arp 242, NGC 7252, and NGC 5291-North) are genuine accumulations of matter. We also study the small-scale motions inside these regions : several small-scale velocity gradients are identified with projected values as large as 50-100 km s $^{-1}$  accross the observed HII regions. In the case of NGC 5291-North, the spatial resolution of our observations is sufficient to detail the velocity field ; we show that this system is rotating and self-gravitating, and discuss its dark matter content. The Fabry-Pérot observations have thus enabled us to prove that some  $10^9$  Msun condensations of matter are real structures, and are kinematically decoupled from the rest of the tail. Such massive and self-gravitating objects are the progenitors of the so-called "Tidal Dwarf Galaxies".*

A&A 425, 813–823 (2004)  
 DOI: 10.1051/0004-6361:20040394  
 © ESO 2004

## Kinematics of tidal tails in interacting galaxies: Tidal dwarf galaxies and projection effects<sup>★,★★</sup>

F. Bournaud<sup>1,2,3</sup>, P.-A. Duc<sup>1,4</sup>, P. Amram<sup>5</sup>, F. Combes<sup>2</sup>, and J.-L. Gach<sup>5</sup>

<sup>1</sup> CEA/DSM/DAPNIA, Service d'Astrophysique, Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France  
 e-mail: Frederic.Bournaud@obspm.fr

<sup>2</sup> Observatoire de Paris, LERMA, 61 Av. de l'Observatoire, 75014, Paris, France

<sup>3</sup> École Normale Supérieure, 45 rue d'Ulm, 75005, Paris, France

<sup>4</sup> CNRS FRE 2591

<sup>5</sup> Observatoire Astronomique Marseille-Provence & Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, 2 place Le Verrier, 13248 Marseille Cedex 04, France

Received 5 March 2004 / Accepted 4 June 2004

**Abstract.** The kinematics of tidal tails in colliding galaxies has been studied via Fabry-Pérot observations of the H $\alpha$  emission. With their large field of view and high spatial resolution, the Fabry-Pérot data allow us to probe simultaneously, in 2D, two kinematical features of the tidal ionized gas: large-scale velocity gradients due to streaming motions along the tails, and small-scale motions related to the internal dynamics of giant HII regions within the tails. In several interacting systems, massive ( $10^9 M_{\odot}$ ) condensations of HI, CO and stars are observed in the outer regions of tails. Whether they are genuine accumulations of matter or not is still debated. Indeed a part of the tidal tail may be aligned with the line-of-sight, and the associated projection effect may result in apparent accumulations of matter that does not exist in the 3D space. Using numerical simulations, we show that studying the large-scale kinematics of tails, it is possible to know whether these accumulations of matter are the result of projection effects or not. We conclude that several ones (Arp 105–South, Arp 242, NGC 7252, and NGC 5291–North) are genuine accumulations of matter. We also study the small-scale motions inside these regions: several small-scale velocity gradients are identified with projected values as large as 50–100 km s<sup>-1</sup> across the observed HII regions. In the case of NGC 5291–North, the spatial resolution of our observations is sufficient to detail the velocity field; we show that this system is rotating and self-gravitating, and discuss its dark matter content. The Fabry-Pérot observations have thus enabled us to prove that some  $10^9 M_{\odot}$  condensations of matter are real structures, and are kinematically decoupled from the rest of the tail. Such massive and self-gravitating objects are the progenitors of the so-called “Tidal Dwarf Galaxies”.

**Key words.** galaxies: interaction – galaxies: formation – galaxies: evolution – galaxies: kinematics and dynamics

### 1. Introduction

One of the most prominent features shown by interacting galaxies is their long tails made of gas, dust and stars that were shaped by tidal forces. Their morphology has largely been studied in association with numerical simulations to obtain constraints on the age of the galactic encounter and on its initial conditions. Some properties of the tails, in particular their length, may also provide indirect information on the distribution of the surrounding dark matter (Mihos et al. 1998; Dubinski et al. 1999; Bournaud et al. 2003).

In many interacting systems, gravitational clumps are observed along tidal tails (Mirabel et al. 1992; Weibacher et al. 2000, 2002, 2003; Iglesias-Páramo & Vílchez 2001;

Knierman et al. 2003). In fewer systems, very massive condensations of matter were discovered in the external regions, often near the extremity of the tails. They have apparent masses typical of dwarf galaxies, i.e. about  $10^9 M_{\odot}$  (Duc & Mirabel 1994, 1998; Hibbard et al. 1994, 2001; Nordgren et al. 1997; Duc et al. 2000; Braine et al. 2001). Their high metallicities indicate that they are formed of pre-enriched gas and hence cannot be dwarf galaxies pre-existing to the galaxy interaction (Duc & Mirabel 1994, 1998; Duc et al. 2000). The formation of such massive objects in the outer parts of tails can be reproduced by numerical simulations (Bournaud et al. 2003). They are usually considered as the progenitors of the so-called “Tidal Dwarf Galaxies” (TDGs); yet whether they are real objects is still debated. Indeed tidal tails are not linear (see Figs. 3 and 4 in Sect. 3), so that when a tidal tail is seen edge-on, a part of it may be aligned with the line-of-sight, and an apparent mass condensation of  $10^9 M_{\odot}$  may result of projection effects (Hibbard & Barnes 2004).

\* Based on observations collected at the European Southern Observatory, La Silla, Chile and at the Canada-France-Hawaii Observatory, Hawaii, USA.

\*\* Appendix is only available in electronic form at <http://www.edpsciences.org>

### 3.1.4 Article : *Tidal debris from high-velocity collisions as fake dark galaxies*

L'article [Duc et Bournaud \(2008\)](#) présente un modèle numérique du candidat "galaxie noire" VirgoHI21 selon lequel il s'agirait en fait d'un débris de collision. Nos simulations numériques indiquent que, contrairement aux idées reçues, les collisions à haute vitesse sont capables d'arracher aux galaxies du gaz d'hydrogène atomique (en faible quantité toutefois) si ce dernier était initialement suffisamment étendu. La composante stellaire est quand à elle très peu perturbée par cette interaction qui ne débouche pas sur une fusion. Les collisions à haute vitesse – typiquement de  $1000 \text{ km s}^{-1}$  – sont fréquentes dans les amas. Elles expliqueraient la présence en leur sein de nuages HI isolés sans contre-partie optique<sup>1</sup>

#### Abstract

*High-speed collisions, although current in clusters of galaxies, have long been neglected, as they are believed to cause little damages to galaxies except when they are repeated, a process called "harassment." In fact, they are able to produce faint but extended gaseous tails. Such low-mass, starless, tidal debris may become detached and appear as free-floating clouds in the very deep H I surveys that are currently being carried out. We show in this paper that these debris possess the same apparent properties as the so-called dark galaxies, objects originally detected in H I, with no optical counterpart, and presumably dark matter-dominated. We present a numerical model of the prototype of such dark galaxies-VIRGOHI 21-that is able to reproduce its main characteristics : the one-sided tail linking it to the spiral galaxy NGC 4254, the absence of stars, and above all the reversal of the velocity gradient along the tail originally attributed to rotation motions caused by a massive dark matter halo, which we find to be consistent with simple streaming motions plus projection effects. According to our numerical simulations, this tidal debris was expelled 750 Myr ago during a flyby at  $1100 \text{ km s}^{-1}$  of NGC 4254 by a massive companion that should now lie at a projected distance of about 400 kpc. A candidate for the intruder is discussed. The existence of galaxies that have never been able to form stars had already been challenged on the basis of theoretical and observational grounds. Tidal collisions, in particular those occurring at high speed, provide a much more simple explanation for the origin of such putative dark galaxies.*

---

<sup>1</sup>La densité de colonne du gaz est trop faible pour déclencher la formation stellaire, et l'interaction est trop courte pour chasser de vieilles étoiles.



## TIDAL DEBRIS FROM HIGH-VELOCITY COLLISIONS AS FAKE DARK GALAXIES: A NUMERICAL MODEL OF VIRGOHI 21

PIERRE-ALAIN DUC AND FREDERIC BOURNAUD

Laboratoire AIM, CEA/DSM-CNRS-Université Paris Diderot, Dapnia/Service d'Astrophysique,  
 CEA-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

Received 2007 July 19; accepted 2007 October 17

### ABSTRACT

High-speed collisions, although current in clusters of galaxies, have long been neglected, as they are believed to cause little damages to galaxies except when they are repeated, a process called “harassment.” In fact, they are able to produce faint but extended gaseous tails. Such low-mass, starless, tidal debris may become detached and appear as free-floating clouds in the very deep H I surveys that are currently being carried out. We show in this paper that these debris possess the same apparent properties as the so-called dark galaxies, objects originally detected in H I, with no optical counterpart, and presumably dark matter–dominated. We present a numerical model of the prototype of such dark galaxies—VIRGOHI 21—that is able to reproduce its main characteristics: the one-sided tail linking it to the spiral galaxy NGC 4254, the absence of stars, and above all the reversal of the velocity gradient along the tail originally attributed to rotation motions caused by a massive dark matter halo, which we find to be consistent with simple streaming motions plus projection effects. According to our numerical simulations, this tidal debris was expelled 750 Myr ago during a flyby at  $1100 \text{ km s}^{-1}$  of NGC 4254 by a massive companion that should now lie at a projected distance of about 400 kpc. A candidate for the intruder is discussed. The existence of galaxies that have never been able to form stars had already been challenged on the basis of theoretical and observational grounds. Tidal collisions, in particular those occurring at high speed, provide a much more simple explanation for the origin of such putative dark galaxies.

*Subject headings:* galaxies: individual (NGC 4254, VIRGOHI 21) — galaxies: interactions —  
 galaxies: kinematics and dynamics

*Online material:* color figures

### 1. INTRODUCTION

With the availability of unprecedented deep H I blind surveys, a population of apparently free-floating H I clouds without any detected stellar counterpart has become apparent (Meyer et al. 2004; Davies et al. 2004; de Blok et al. 2005; Giovanelli et al. 2007; Kent et al. 2007). It has been suggested that a fraction of them could be “dark galaxies,” a putative family of objects that would consist of a baryonic disk rotating in a dark matter halo, but that would differ from normal galaxies by being free of stars, having all their baryons in the form of gas. They would thus be “dark” in the optical and most other wavelengths but visible through their H I emission, contrary to pure “dark matter” halos. Such dark galaxies would be extreme cases of low surface brightness galaxies, a class of objects that have a particularly faint stellar content compared to their gaseous and dynamical masses (e.g., Carignan & Freeman 1988). The formation of low-mass dark galaxies is actually predicted by  $\Lambda$ CDM models (e.g., van den Bosch et al. 2003; Tully 2005). Taylor & Webster (2005) provided theoretical arguments against the existence of galaxies that would have remained indefinitely stable against star formation, unless they are of very low mass, at least a factor of 10 below that of classical dwarf galaxies.

If they exist, the dark galaxies are predicted to have a low dynamical mass and H I content. In the Local Group, some possibly rotating, high-velocity clouds were speculated to be dark galaxies (Simon et al. 2004, 2006). Furthermore, Davies et al. (2006) argued that most previous H I blind surveys were not sensitive enough to rule out the existence of dark galaxies. And indeed, while the HIPASS survey failed at detecting H I clouds without optical counterparts (Doyle et al. 2005), deeper recent H I observations, in particular with the Arecibo telescope, have re-

vealed a number of dark galaxy candidates (Kent et al. 2007). Among these free-floating low-mass H I clouds, one object located in the outer skirts of the Virgo Cluster has attracted much attention and discussion: VIRGOHI 21 (Davies et al. 2004; Minchin et al. 2005; see Fig. 1). Despite a H I mass of only  $\sim 10^8 M_{\odot}$ , this elongated gaseous structure, mapped with the Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) by Minchin et al. (2007, hereafter M07), exhibits a velocity gradient as large as  $220 \text{ km s}^{-1}$  (see Fig. 2). Assuming that the observed H I velocities trace rotation, the inferred dynamical mass would be as large as  $\sim 10^{11} M_{\odot}$ . The object shows no optical counterpart, even on deep *Hubble Space Telescope* (HST) images (M07). With such extreme properties, VIRGOHI 21 has become the prototype for dark galaxies, although its high dynamical mass is atypical even in models predicting the existence of dark galaxies. If real, an object like VIRGOHI 21 could tidally disturb the galaxies in their neighborhood, as investigated by Karachentsev et al. (2006). Actually, VIRGOHI 21 itself lies at  $\sim 150$  kpc from the massive spiral galaxy NGC 4254 (M99), to which it is connected by a faint H I filament. This structure could, in principle, be a bridge linking the two galaxies and would then appear as a sign of a tidal interaction between them (M07).

However, starless, isolated gas clouds showing a large velocity spread are not necessarily genuine dark galaxies. Ram pressure can strip gas away from spirals in the vicinity of clusters, a process that does not affect stars. Interaction with an external field, for instance, that of another galaxy, can expulse large amounts of material from the disk in the form of gas-rich tidal tails and debris. In that vein, Bekki et al. (2005a, hereafter B05) have suggested that interactions among flyby (i.e., interacting without merging) galaxies orbiting in a potential well similar to the one produced by the Virgo Cluster form tidal tails that after some

### 3.1.5 Propriétés structurelles : contenu en matière noire

Une fois la présence d'une structure auto-gravitante confirmée, sa masse dynamique peut être estimée à partir de courbes de rotation, et comparée à sa masse lumineuse, méthode classique pour déterminer le contenu en matière noire. Une des propriétés a priori les plus robustes des TDGs est la faible contribution de la matière noire à leur masse totale, contrairement aux galaxies naines classiques (Barnes et Hernquist 1992; Duc et al. 2004a). En effet les débris de marée proviennent des disques des spirales et non de leur halo. Nous verrons dans le chapitre suivant que, contre toute attente, les TDGs possèdent une masse manquante. Néanmoins elle n'excède pas deux à trois fois la masse lumineuse, alors que des facteurs dépassant 10 sont courants pour les galaxies naines. Une pénurie de matière noire reste donc un critère essentiel, car structurel et non ambigu, pour l'identification des TDGs. Il est d'autant plus important qu'il reste valable quelle que soit leur évolution future. Conséquence de cette propriété, un écart à la loi de Tully-Fischer : les TDGs ont des vitesses de rotation trop faibles par rapport à leur luminosité (Hunter et al. 2000). Malheureusement, la mesure de la masse dynamique de galaxies naines est délicate, même dans l'Univers proche. Il existe toutefois d'autres indices plus commodes, mais moins univoques. Ils sont présentés ci-dessous.

### 3.1.6 Propriétés chimiques : pré-enrichissement et histoire de formation stellaire

Les galaxies naines de marée procèdent d'un recyclage de la matière galactique. Formées à partir de matière pré-enrichie dans le disque de leur galaxie parent, elles ont reçu en héritage une teneur en éléments lourds anormalement élevée. Elle reflète l'histoire chimique de leurs parents et non la leur, du moins pour les TDGs jeunes. Placées sur un diagramme abondance en oxygène – luminosité (voir figure 3.1), elles se démarquent des naines classiques qui suivent une relation métallicité–luminosité bien établie. Cette méthode est désormais couramment utilisée pour identifier une possible origine de marée (e.g. Weillbacher et al. 2003, [article ci-dessous](#)).

L'identité génétique des TDGs devrait perdurer : la sur-métallicité sera conservée, à moins que les TDGs perdent leurs éléments lourds plus facilement que leurs consœurs classiques, enveloppées dans un halo de matière noire. Bien sûr, des naines nées lors de collisions à haut redshift, à une époque où les galaxies étaient globalement plus pauvres en métaux ne posséderont pas cette propriété et seront, du point de vue de leur métallicité, difficilement discernables des naines primordiales.

La métallicité anormalement élevée des TDGs facilite l'émission de la raie millimétrique CO(1-0), notoirement faible dans les naines classiques. Aussi une détection CO fournit un autre critère d'identification des TDGs.

De manière générale, les galaxies naines de marée ont connu une histoire de formation stellaire complexe qui se répercute sur leur évolution chimique. Leurs populations stellaires sont composées d'étoiles jeunes formées in situ mais aussi d'étoiles plus vieilles issues du disque de leurs galaxies parents. Un diagramme spectral d'énergie (SED) composite, ou, pour les galaxies résolues en étoiles, un diagramme couleur-magnitude hybride (voir Figure 3.2) en découle. Selon la proportion relative de chaque composante, ils se rapprocheront plus de ceux observés pour des disques spiraux ou des galaxies dont la luminosité est dominée par la formation stellaire récente telles les galaxies bleues compactes (avec des différences de couleur car les métallicités diffèrent). Cette variété d'histoire de formation stellaire ne permet pas pour l'instant de fournir des critères précis pour identifier une origine collisionnelle. Toutefois une histoire de formation stellaire marquée par une brutale flambée produisant une fraction substantielle de nouvelles étoiles est un indice probant, surtout si l'âge estimé du sursaut stellaire correspond à un événement particulier survenu dans l'environnement du candidat TDG, comme bien sûr une collision.

### 3.1.7 Propriétés statistiques : localisation

Un candidat TDG jeune peut facilement être repéré grâce à la structure de marée qui le lie à son parent. Au bout de quelques centaines de millions d'années, les queues et ponts s'estompent. Les TDGs devenues indépendantes se confondent avec les galaxies satellites classiques. Comme discerner alors des candidats TDGs qui pourront faire ensuite l'objet d'un examen plus attentif ? Cette question est examinée par Duc et al. (2004b) ([article ci-dessous](#)).

La distribution des vieilles TDGs n'est pas aléatoire. Nous avons montré (Bournaud et Duc 2006) qu'elle est fortement anisotrope. Pour des raisons facilement compréhensibles, elles se concentrent dans le plan principal de leur parent, c.a.d. le disque stellaire pour une galaxie qui aurait suite à la collision ou la fusion réussi à le conserver ou le reformer. Projetés sur le ciel, les candidats TDGs se retrouveront de manière préférentielle le long de l'axe principal de la galaxie hôte de référence, à des distances typiques de 50-250 kpc. Leur vitesse radiale relative n'excède guère  $300 \text{ km s}^{-1}$ . Enfin leur masse est inférieure à 1% de celle de leur hôte. Ces quelques indices

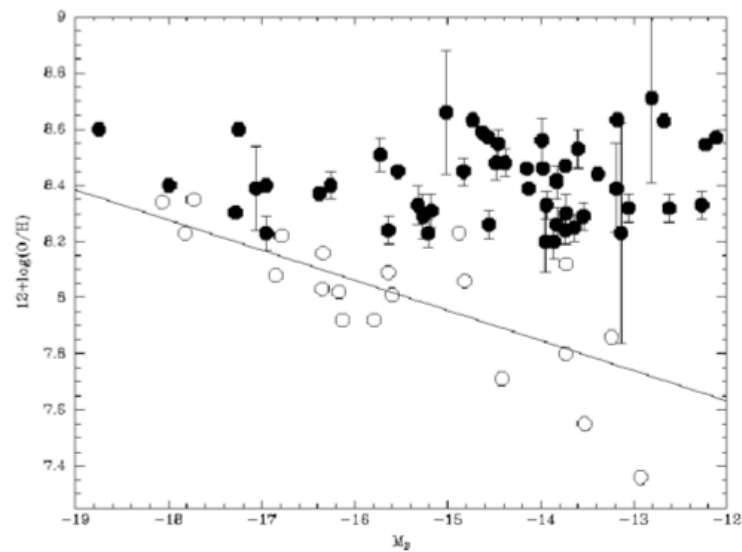


Fig. 3.1 – Luminosity-metallicity relation for a sample of isolated nearby galaxies (open circles) and in the HII regions of young tidal objects (black circle). The oxygen abundances versus absolute blue magnitudes are plotted.

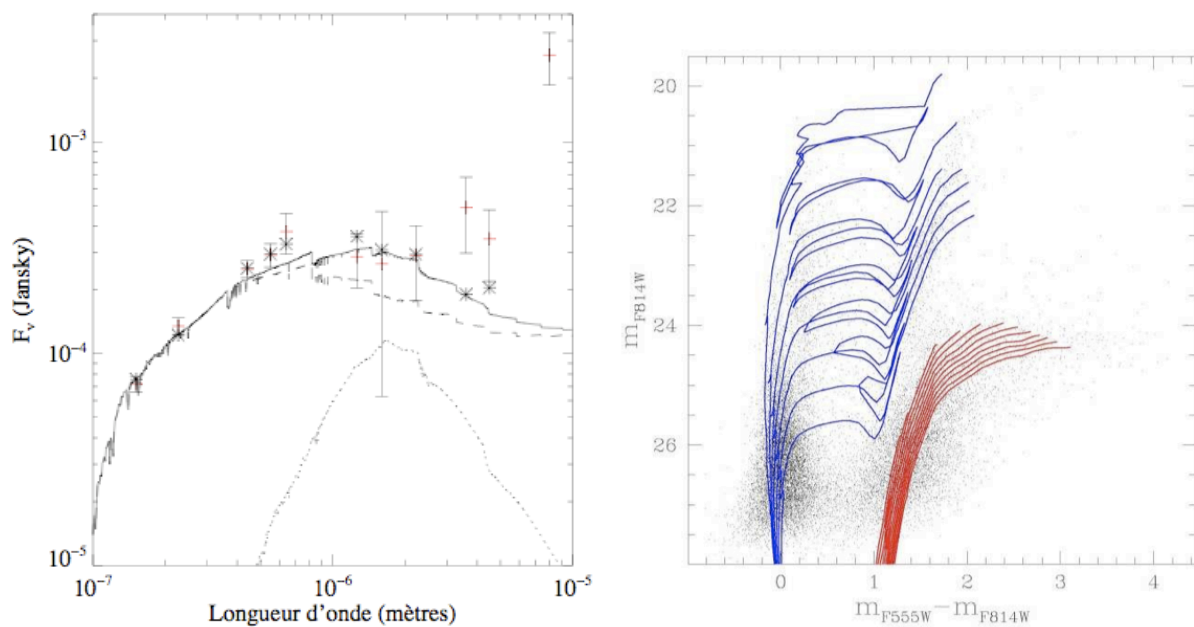


Fig. 3.2 – (left) Spectral energy distribution of the TDG candidate Arp 105 South. It is fitted by a composite model of young and old stellar populations (Boquien 2007). (Right) Color-magnitude diagram of the TDG candidate Holmberg IX. Evolutionary isochrones for a young (10-200 Myr) and old (1-12 Gyr) stellar components are overlaid. Courtesy of Sabbi et al., (2008).

statistiques suffisent pour effectuer une pré-sélection, et en particulier exclure des objets d'avant ou d'arrière plan, voire des galaxies impliquées dans la collision mais qui pré-existaient à celle-ci.

Le repérage des vieilles TDGs se complique dans les groupes et amas de galaxies. Dans cet environnement, des collisions ultérieures ont pu éjecter loin de leurs parents des naines formées lors de fusions. Explusées dans l'espace intra-groupe/amas, elles se fondront dans la myriade de galaxies naines qui peuplent les régions denses de l'Univers. Un ciblage particulier devient difficile et seules des études statistiques à grande échelle permettent de déterminer la fraction d'objets formée par un recyclage.

---

### 3.1.8 Article : *Tidal dwarf candidates in a sample of interacting galaxies : Properties and kinematics of the ionized gas*

L'article [Weilbacher et al. \(2003\)](#) présente un échantillon de *candidats* TDGs jeunes situés dans 14 systèmes en interaction. Il utilise quelques uns des critères présentés ci-dessus (cinématique, métallicité) pour vérifier s'ils répondent à notre définition des TDGs et sont en particulier gravitationnellement liés.

#### **Abstract**

*We present low-resolution spectroscopy of the ionized gas in a sample of optical knots located along the tidal features of 14 interacting galaxies previously selected as candidate Tidal Dwarf Galaxies (TDGs). From redshift measurements, we are able to confirm their physical association with the interacting system in almost all cases. For most knots, the oxygen abundance does not depend on the blue luminosity. The average,  $12+\log(O/H) = 8.34 \pm 0.20$ , is typical of TDGs and is comparable to that measured in the outer stellar disk of spirals from which they were formed. A few knots showing low metallicities are probably pre-existing low-mass companions. The estimated H $\alpha$  luminosity of the TDG candidates is higher than that of typical individual HII regions in spiral disks and is comparable to the global H $\alpha$  luminosity of dwarf galaxies. We find several instances of velocity gradients with amplitudes apparently larger than 100 km s $^{-1}$  in the ionized gas in the tidal knots and discuss various possible origins for the large velocity amplitudes. While we can exclude tidal streaming motions and outflows, we cannot rule out projection effects with the current resolution. The velocity gradients could be indicative of the internal kinematic characteristic of self-gravitating objects. Higher resolution spectra are required to confirm whether the tidal knots in our sample have already acquired their dynamical independence and are therefore genuine Tidal Dwarf Galaxies.*

---

## Tidal dwarf candidates in a sample of interacting galaxies

### II. Properties and kinematics of the ionized gas<sup>\*,\*\*</sup>

P. M. Weilbacher<sup>1</sup>, P.-A. Duc<sup>2</sup>, and U. Fritze-v. Alvensleben<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitäts-Sternwarte, Geismarlandstr. 11, 37083 Göttingen, Germany,  
 e-mail: {weilbach,ufritze}@uni-sw.gwdg.de

<sup>2</sup> CNRS URA 2052 and CEA, DSM, DAPNIA, Service d'Astrophysique, Centre d'Études de Saclay,  
 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France  
 e-mail: paduc@cea.fr

Received 3 May 2002 / Accepted 16 October 2002

**Abstract.** We present low-resolution spectroscopy of the ionized gas in a sample of optical knots located along the tidal features of 14 interacting galaxies previously selected as candidate Tidal Dwarf Galaxies (TDGs). From redshift measurements, we are able to confirm their physical association with the interacting system in almost all cases. For most knots, the oxygen abundance does not depend on the blue luminosity. The average,  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.34 \pm 0.20$ , is typical of TDGs and is comparable to that measured in the outer stellar disk of spirals from which they were formed. A few knots showing low metallicities are probably pre-existing low-mass companions. The estimated  $\text{H}\alpha$  luminosity of the TDG candidates is higher than that of typical individual  $\text{H}\text{II}$  regions in spiral disks and is comparable to the global  $\text{H}\alpha$  luminosity of dwarf galaxies. We find several instances of velocity gradients with amplitudes apparently larger than  $100 \text{ km s}^{-1}$  in the ionized gas in the tidal knots and discuss various possible origins for the large velocity amplitudes. While we can exclude tidal streaming motions and outflows, we cannot rule out projection effects with the current resolution. The velocity gradients could be indicative of the internal kinematic characteristic of self-gravitating objects. Higher resolution spectra are required to confirm whether the tidal knots in our sample have already acquired their dynamical independence and are therefore genuine Tidal Dwarf Galaxies.

**Key words.** galaxies: formation – galaxies: interactions – techniques: spectroscopic – galaxies: photometry

### 1. Introduction

The formation of Tidal Dwarf Galaxies (TDGs) in interacting galaxies is by now a well recognized phenomenon. Previous work on the subject has mostly focused on detailed, multi-wavelength analyses of individual systems (e.g. Hibbard et al. 1994; Duc et al. 1997, etc.). The first attempt to create a large sample of TDGs was presented by Weilbacher et al. (2000, hereafter Paper I), describing how we selected TDG candidates among optical knots in the tidal features of 10 interacting systems situated at different redshifts below  $z = 0.1$ . The parent galaxies were selected from the catalog of Arp & Madore (1987) to resemble the perturbed systems observed in deep surveys of the distant universe. Evolutionary synthesis modeling was used to rule out background objects by their broad-band colors.

Send offprint requests to: P. Weilbacher,  
 e-mail: weilbach@uni-sw.gwdg.de

\* Based on observations collected at the European Southern Observatory, La Silla, Chile (ESO No 64.N-0361).

\*\* Figures 8 to 20, Table 5 and Appendices A and B are only available in electronic form at <http://www.edpsciences.org>

What makes an optical clump in tidal features a Tidal Dwarf Galaxy is still not well-defined. In several studies, the most luminous knots in or near tidal tails were classified as TDGs. However, contamination by background galaxies is not unlikely. For instance, the blue object of apparent dwarf galaxy luminosity positioned at the tip of one of the long tidal tails in the Superantennae, presented by Mirabel et al. (1991) as a TDG candidate, was found to be a background galaxy (F. Mirabel, priv. comm.). Another example is the study of Hunsberger et al. (1996), who found numerous TDG candidates in the eastern tidal tail of NGC 7319, a member of the Stephan's Quintet (HCG 92). Other studies could only confirm the association of one of these with the compact group (Xu et al. 1999; Iglesias-Páramo & Vílchez 2001). Projection effects within a bent tidal tail could also mimic dwarf galaxy-sized accumulations of material. As normal dwarf galaxies are stable entities with their own dynamics, the best definition of a TDG is that it be a self-gravitating entity (Duc et al. 2000; Weilbacher & Duc 2001). Thus, to confirm a knot in a tail as a genuine TDG, the velocity distribution within the knot has to be measured, to determine if it is decoupled from the expanding motion of the tidal tail, and possibly rotating, obviously a difficult task.

### 3.1.9 Article : *Identifying old Tidal Dwarf Galaxies in Simulations and in the nearby Universe*

L'article [Duc et al. \(2004b\)](#) résume les principaux critères d'identification des TDGs âgées. Il dresse un inventaire des différents sondages réalisés jusqu'en 2004 visant à les recenser. Le chapitre suivant présente les recensements les plus récents.

#### **Abstract**

*Most Tidal Dwarf Galaxies (TDGs) so-far discussed in the literature may be considered as young ones or even newborns, as they are still physically linked to their parent galaxies by an umbilical cord : the tidal tail at the tip of which they are usually observed. Old Tidal Dwarf Galaxies, completely detached from their progenitors, are still to be found. Using N-body numerical simulations, we have shown that tidal objects as massive as  $10^9$  solar masses may be formed in interacting systems and survive for more than one Gyr. Old TDGs should hence exist in the Universe. They may be identified looking at a peculiarity of their "genetic identity card" : a relatively high abundance in heavy elements, inherited from their parent galaxies. Finally, using this technique, we revisit the dwarf galaxies in the local Universe trying to find arguments pro and con a tidal origin.*

*Recycling Intergalactic and Interstellar Matter*  
*IAU Symposium Series, Vol. 217, 2004*  
*Pierre-Alain Duc, Jonathan Braine and Elias Brinks, eds.*

## Identifying old Tidal Dwarf Galaxies in Simulations and in the Nearby Universe

Pierre-Alain Duc<sup>1</sup>, Frédéric Bournaud<sup>1,2</sup>, Frédéric Masset<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *CNRS FRE 2591 and Service d'astrophysique, CEA-Saclay, France*

<sup>2</sup> *LERMA, Observatoire de Paris, France*

**Abstract.** Most Tidal Dwarf Galaxies (TDGs) so-far discussed in the literature may be considered as young ones or even newborns, as they are still physically linked to their parent galaxies by an umbilical cord: the tidal tail at the tip of which they are usually observed. Old Tidal Dwarf Galaxies, completely detached from their progenitors, are still to be found. Using N-body numerical simulations, we have shown that tidal objects as massive as  $10^9$  solar masses may be formed in interacting systems and survive for more than one Gyr. Old TDGs should hence exist in the Universe. They may be identified looking at a peculiarity of their “genetic identity card”: a relatively high abundance in heavy elements, inherited from their parent galaxies. Finally, using this technique, we revisit the dwarf galaxies in the local Universe trying to find arguments pro and con a tidal origin.

### 1. Introduction

The presence of compact star-forming regions in the tidal tails of colliding galaxies is commonly observed. The formation, in that environment, of super-star clusters with masses up to those of globular clusters has also often been reported (e.g., Knierman et al., 2003). The existence of even more massive tidal objects, with global properties characteristics of dwarf galaxies, has been claimed for more than a decade (see the review by Duc & Mirabel, 1999). But whether such “Tidal Dwarf Galaxies” are genuine galaxies – i.e. they are gravitationally bound entities – is still strongly debated (see in this volume the contribution by Hibbard & Barnes and that of Amram et al. and Braine et al. for an alternative view). But perhaps the more important issue of whether TDGs survive, escape from their parent galaxies, and significantly contribute to the overall population of dwarf galaxies, is a matter of speculation. Indeed, a more plausible fate is their tidal destruction or their falling back onto their progenitors. There are two ways to tackle the problem: using numerical simulations of interacting galaxies and following in them the buildup and evolution of tidal objects, or trying to identify in catalogs of dwarf galaxies those which might have a tidal origin. We have explored both approaches.



## 3.2 Dépistage des vieilles TDGs

### 3.2.1 Dans le Groupe Local

Le Groupe Local est composé de trois galaxies spirales ainsi que de galaxies naines dont le nombre sans cesse croissant dépasse désormais la cinquantaine. Il a été le théâtre d'interactions gravitationnelles à priori susceptibles d'avoir produit des TDGs. La galaxie d'Andromède présente dans ces régions les plus externes de nombreux reliquats de collisions passées (e.g. [Ibata et al. 2005](#)) tandis qu'un anneau collisionnel a été décelé dans ses régions centrales ([Block et al. 2006](#)). Le courant magellanique fournit un exemple, proche de la Voie Lactée, d'une possible queue de marée, résultat de la collision récente entre les deux Nuages de Magellan, à l'origine également du pont HI qui les relie. Ces structures gazeuses ne possèdent pas de contreparties optiques diffuses, associée à une composante stellaire vieille ([Harris 2007](#)). Si les nuages HI qui dessinent le Courant Magellanique n'ont pas la densité requise pour former des étoiles, des régions de formation stellaire ont été identifiées dans le pont magellanique ([Irwin et al. 1985](#)) et du gaz moléculaire y a d'ailleurs été détecté ([Muller et al. 2003](#)). [Mizuno et al. \(2006\)](#) évoquent l'hypothèse d'une évolution possible de ces régions en TDG. Elle reste à prouver car les taux de formation stellaire qui y sont mesurés (au total  $4 \times 10^{-4} M_{\odot}/yr$ ) sont bien inférieurs à ceux mesurés dans les TDGs ([Braine et al. 2001](#)).

Il y a plus de trente ans, [Lynden-Bell \(1976\)](#) s'interrogeait sur une connexion possible entre le courant Magellanique et un certain nombre de galaxies naines satellites de la Voie Lactée, et d'amas globulaires. Elle semble aujourd'hui fortuite, mais leur distribution particulière le long d'un grand cercle a alimenté bon nombre de spéculations, parmi elles, l'origine collisionnelle des naines sphéroidales du Groupe Local, en particulier celles proches de la Voie Lactée ([Metz et Kroupa 2007](#)). Mais quelle collision aurait ensemencé le Groupe Local ? La Voie Lactée semble avoir eu une histoire plutôt calme, sans événement de fusion majeure depuis 10 milliards d'années ([Hammer et al. 2007](#)). De toute manière, ses satellites se situent dans un plan perpendiculaire à son disque alors que les TDGs qu'elle aurait pu enfanter devraient se trouver proche de ce dernier ([Bournaud et Duc 2006](#)). S'agit-il alors d'une collision datant de plus de 10 milliards d'années, comme le suggèrent [Sawa et Fujimoto \(2005\)](#) ?

Si l'alignement des satellites de la Voie Lactée, et d'Andromède ([Koch et Grebel 2006](#); [Metz et al. 2007](#)) le long de grands cercles est troublant <sup>2</sup>, elle ne signifie pas pour autant qu'ils ont tous la même origine. Leur histoire de formation stellaire diffère d'ailleurs énormément d'un objet à l'autre. Plus gênant pour le scénario "de marée" : la plupart des naines sphéroidales, y compris – surtout – les moins massives semblent posséder un halo de matière noire dont la masse excède la masse lumineuse d'un facteur 10 à 100 ([Mateo 1998](#)). [Kroupa \(1997\)](#) a remis en question la mesure de la masse dynamique des dSph, à partir de la dispersion de vitesse de leurs étoiles, car ces dernières pourraient être agitées par les forces de marée exercées par la Voie Lactée. Mais d'autres études ont montré que cet effet est insuffisant. Autre problème pour une formation – récente – des naines du Groupe Local par recyclage : leur très faible métallicité.

Subsistent toutefois quelques candidats TDGs possibles à défaut d'être vraiment prometteurs : les naines sphéroidales Sculptor, Leo1 et Fornax, avec des rapports masse sur luminosité  $M_{dyn}/L_{star}$  d'environ 10, ont un contenu en matière noire modéré, mais compatible avec leur luminosité assez élevée. Les étoiles de Fornax présentent une plage de métallicité étonnément importante (jusqu'à  $[Fe/H]=-0.4$ ), ainsi que des étoiles de tout âge – les plus jeunes ayant 200 millions d'années – ([Pont et al. 2004](#)), ce qui permet d'envisager un mélange d'étoiles formées dans une spirale et dans le milieu entregalactique. Fornax a subi un enrichissement rapide il y a deux milliards d'années. La galaxie naine la plus proche de la Voie Lactée, en cours de destruction par effet de marée, la naine sphéroidale du Sagittaire, présente une métallicité anormalement élevée, du moins dans les étoiles jeunes de son corps principal pour lesquelles celle-ci a pu être mesurée ([Sbordone et al. 2007](#)). La valeur moyenne est  $[Fe/H]=-0.36$ . Certaines étoiles ont même des métallicité sur-solaires. L'évolution chimique de cette galaxie naine, totalement atypique, est encore inconnue. Le recyclage galactique ne constitue pas pour autant une solution de secours, du moins à partir de matière provenant du disque de la Voie Lactée. En effet, le rapport éléments  $\alpha$  sur Fer y est largement inférieur à celui des étoiles de même teneur en Fer présentes dans le disque de la Voie Lactée ([Sbordone et al. 2007](#)). Enfin, son contenu en matière noire, qui peut être déterminé soit à partir de la dispersion de vitesse de ses étoiles (mais qui est fortement affectée par les effets de marée) soit par la mesure de la largeur des courants stellaires engendrés par ces derniers ([Gómez-Flechoso et al. 1999](#)), reste fortement débattu.

Pour résumer, le Groupe Local ne présente pour l'instant aucun candidat TDG évident, probablement parce qu'il n'a été affecté, du moins récemment, par aucune fusion entre galaxies massives. Toutefois, un événement

<sup>2</sup>Propos à nuancer d'ailleurs car les satellites de la Voie Lactée de faible masse découverts ces dernières années ont une distribution différente.

majeur se profile : la fusion entre la Voie Lactée et Andromède attendue d'ici 3 à 5 milliards d'année sera, elle, susceptible de former de longues queues de marée et donc d'y engendrer des TDGs (Cox et Loeb 2008). De là à dire que le Soleil se retrouvera un jour dans une naine de marée, il n'y a qu'un pas ... que je ne franchirai pas encore !

### 3.2.2 Dans les groupes proches

#### Le Groupe de M81

En dehors du groupe de IC 342, obscurci par La Voie Lactée, le système en interaction le plus proche se situe dans le **groupe de M81**. Une collision tripartite impliquant M81, M82 et NGC 3077 a généré d'importantes structures de marée HI, avec des contreparties stellaires de très faible brillance de surface. Le groupe possède de nombreuses galaxies naines, dont plusieurs candidats TDGs recensés entre autres par Makarova et al. (2002). Ils présentent des âges divers :

- naine en gestation, n'ayant pas encore formé des étoiles mais ayant le contenu gazeux pour potentiellement le faire : le nuage moléculaire intergalactique découvert par Brouillet et al. (1992) à l'est de M81. De masse  $2.7 \times 10^6 M_{\odot}$ , il ne présente pas de signe de rotation (Boone et al. 2005).
- naine en cours de formation, ayant déclenché de la formation stellaire : l'objet de Garland, au Sud-Est de NGC 3077, étudié pour la première fois par Karachentsev et al. (1985). Il présente de nombreuses régions HII localisées au niveau de pics locaux de gaz d'hydrogène atomique et moléculaire (Walter et Heithausen 1999; Heithausen et Walter 2000; Walter et al. 2006). La masse de  $H_2$  dépasse  $10^7 M_{\odot}$  pour  $3 \times 10^8 M_{\odot}$  de HI.
- naine évoluée ayant déjà construit un disque stellaire : Holmberg IX. La galaxie apparaît de manière spectaculaire sur les images ultraviolettes du groupe de M81 produites par GALEX. Très bleue, elle ne possède toutefois que quelques régions HII de faible luminosité (Miller et Hodge 1994). Elles ont permis toutefois à Makarova et al. (2002) d'y mesurer une abondance en oxygène de  $12 + \log(O/H) = 8.5$ , compatible avec une origine de marée. Autre indice d'une formation stellaire *actuelle* très faible : la galaxie n'a pas été détectée dans les bandes de l'infrarouge moyen. Une émission UV couplée à l'absence d'émission  $H\alpha$  et IR indique une activité de formation stellaire qui a cessé il y a 10 à 100 millions d'années, comme nous le verrons au chapitre suivant. A la distance de M81 (3.6 Mpc), Holmberg IX est résolu en étoiles. L'analyse de son diagramme couleur-magnitude permet de reconstruire de manière précise son histoire de formation stellaire. Sabbi et al. (2008) ont révélé l'existence d'un sursaut de formation stellaire survenu il y a 200 millions d'années – coïncident avec le début de la collision entre M81, M82 et NGC 3077 – et qui serait responsable d'au moins 20% de la masse en étoiles de la galaxie. A cette population relativement jeune s'ajoute une composante âgée probablement issue du disque externe de M81 et arrachée, comme le gaz HI qui a alimenté la dernière flambée de formation stellaire.
- Enfin, des étoiles jeunes ont été détectées tout le long des ponts et filaments HI, par exemple dans la concentration dénommée 'Arp's loop' (de Mello et al. 2008). Elles ne constituent toutefois pas (encore ?) des objets gravitationnellement liés et donc des candidats TDGs.

#### Le Groupe de Centaurus A

A une distance de 3.7 Mpc, Centaurus A est la galaxie de type précoce la plus proche de la Voie Lactée, en dehors de Maffei 1 cachée car située à basse latitude galactique. Elle appartient à un groupe composé de près d'une centaine de membres. Elle présente de nombreux signes de fusion passée, telles des bandes de poussières (Mirabel et al. 1999) ou des anneaux externes, mais contrairement à M81 ne possède pas ou plus de longues queues de marée : elle est à ce titre une cible idéale pour y chercher des TDG âgées. Toutefois elle abrite dans ses anneaux externes des régions de formation stellaire entregalactiques associées à des nuages d'hydrogène atomique et moléculaire (Charmandaris et al. 2000; Oosterloo et Morganti 2005). Elles ont probablement été allumées par un processus différent de celui qui prévaut dans les TDGs : un jet radio issu de son noyau actif. Certains satellites de Cen A présentent des propriétés compatibles avec une origine de marée. La distribution spatiale des satellites confirmés de Cen A, alignés le long de son axe principal (Woodley 2006), est statistiquement compatible avec celle des TDGs (voir 3.1.7) ... ou une accréation de naines primordiales le long d'un filament cosmologique. En 2001, nous avons obtenu avec l'instrument EFOSC2 sur le télescope de 3.6m de La Silla des spectres longues-fente sur un échantillon de satellites (encore) riches en gaz et possédant des régions de formation stellaire actives. Certaines de leurs régions HII présentent une sur abondance en oxygène qui pourrait témoigner d'un pré-enrichissement (voir Figure 3.3).

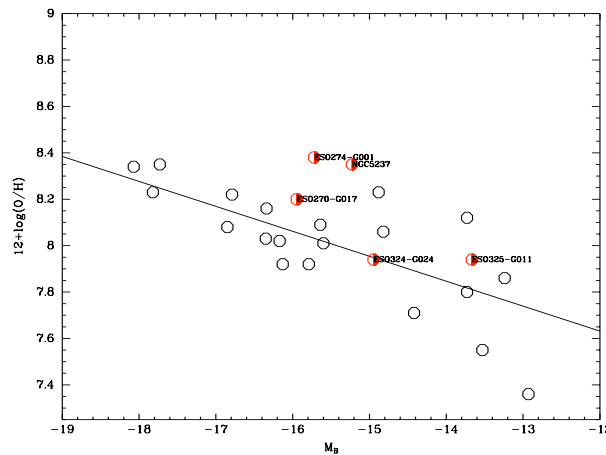


Fig. 3.3 – Oxygen abundance, as derived in HII regions of several dwarf galaxies close to Cen A, versus their absolute blue magnitude. Data from the 2001 spectroscopic run at La Silla observatory, combined with those presented by [Lee et al. \(2007\)](#).

TAB. 3.1 – Dwarf galaxies of the Cen A group with deviant metallicities

Name	D (Mpc)	$\Delta(V)$	$12+\log(\text{O}/\text{H})$	[Fe/H]	Remarks
Cen A	3.77	301 - 301	-	-	-
NGC 5237	3.4	131-301	8.35	-1.33	Believed to be a remnant of a spiral which collided with Centaurus A ( <a href="#">Thomson 1992</a> )
ESO 270-G017	4.3	583-301	8.2	-	Believed to be a remnant of a spiral which collided with Centaurus A ( <a href="#">Thomson 1992</a> )
KK98 197	3.87	?	-	-1.19	Vigorous high-Z burst 0.4-1 Gyr ago ; undetected in HI
ESO 274-G001	3.09	335-301	8.38	-1.217	far from Cen A ( <a href="#">Lee et al. 2007</a> )
ESO 269-G66	3.82	528-301	-	-1.22	close to CenA ; unusual CMD

[Karachentsev et al. \(2007\)](#) ont obtenu avec le HST des images ACS de quelques naines du groupe de Centaurus A, résolues en étoiles. Ils ont pu ainsi apporter des contraintes précises sur leurs distances, sur la métallicité moyenne de leurs étoiles, ainsi que sur leur histoire de formation stellaire ([Makarova et Makarov 2008](#)). Parmi les galaxies qui se démarquent en présentant des sursauts de formation stellaire à haute teneur en fer figurent justement trois pour lesquelles des sur-abondances en oxygène avaient été notées. [Thomson \(1992\)](#) remarque que deux d'entre elles pourraient être les restes d'une galaxie spirale détruite par une collision avec Centaurus A. La table 3.1 recense les candidats TDGs dans le groupe de Cen A.

### Les groupes compacts

En étudiant les galaxies naines dans un grand nombre de groupes compacts, [Hunsberger et al. \(1996\)](#) sont parvenus à la conclusion que dans cet environnement particulier plus de la moitié d'entre elles serait d'origine de marée. Il s'agissait toutefois là de travaux purement photométriques. Plusieurs groupes se sont ensuite attelés à vérifier cette affirmation, en exploitant en particulier des données 3D sur le gaz ionisé ([Mendes de Oliveira et al. 2001, 2004; Amram et al. 2007](#)). Le spectaculaire **Quintette de Stephan** a été l'objet d'une attention toute particulière. Nous y avons confirmé la présence d'une TDG jeune, SQ-B ([Lisenfeld et al. 2002, 2004](#)), tandis qu'une myriade de régions HII intergalactiques, dont certaines en apparence en rotation ([Mendes de Oliveira et al. 2001](#)) attendent d'être confirmées en tant que TDGs. Aucun candidat TDG évolué n'y a été encore recensé. Enfin, dans un travail récent qui a exploité nos critères d'identification des TDGs, [Amram et al. \(2007\)](#) a émis des doutes sur les candidats d'un autre groupe compact particulièrement étudié dans ce contexte : HCG 31.

### 3.2.3 Dans les amas de galaxies

Le milieu entregalactique a tout naturellement été particulièrement étudié dans les amas de galaxies proches où il devient “intra-amas”. Nous avons relaté dans le chapitre 1.2 l’existence de régions de formation stellaire situées en dehors de tout disque galactique. Nous nous intéressons ici à la recherche d’objets plus évolués, en commençant par l’amas de la Vierge. La seule galaxie recyclée formellement identifiée à ce jour dans cet amas est [VCC 2062](#) ([Duc et al. 2007](#), [article ci-dessous](#)). Plusieurs autres candidats, présentant des anomalies chimiques, ont toutefois été recensés, en particulier grâce aux travaux de [Vilchez \(1995\)](#) et [Vilchez et Iglesias-Páramo \(2003\)](#).

Les sondages systématiques que nous avons menés dans deux amas, l’Hydre ([Duc et al. 2001](#), [article ci-dessous](#)) et Hercule ([Iglesias-Páramo et al. 2003](#), [article ci-dessous](#)), en pré-sélectionnant une population de naines riches en gaz, aboutissent à la conclusion qu’environ un tiers des naines dans ces amas sont plus métalliques que ne le laissent prévoir leur luminosité (voir articles ci-dessous). Ce résultat a été corroboré par ceux obtenus avec une population de naines elliptiques de Coma et Fornax dépourvues de gaz et pour lesquelles des abondances en Fer ont pu être estimées à partir d’indices de Lick ([Poggianti et al. 2001](#)) ou de la mesure du triplet du Calcium ([Pont et al. 2004](#)). Plusieurs interprétations en ont été données : effet de confinement par le milieu-intra-amas qui ralentirait la perte d’éléments lourds, restes de galaxies plus massives partiellement détruites dans l’amas ([Conselice et al. 2003](#)), ou naines de marée. Les mêmes hypothèses ont d’ailleurs été formulées pour les galaxies naines ultracompactes abordées dans le chapitre 2.4, toutes découvertes dans des amas de galaxies proches. Seules des données complémentaires (dynamique, diagrammes couleur-magnitude) malheureusement encore inaccessibles même à la distance des amas proches, ainsi que des simulations numériques dédiées aux amas (type [Kronberger et al. 2008](#)) permettraient de trancher.

### 3.2.4 Dans l’Univers proche : apport du SDSS

Les études présentées dans ce chapitre ont fournis un certain nombre de candidats naines de marée situés dans une variété d’environnements, des groupes lâches aux amas les plus denses. Faute d’être réalisées de manière systématique, elles ne nous ont pas permis de quantifier la fraction de TDGs parmi les naines classiques. Un sondage évite cet écueil : le Sloan Digital Sky Survey par sa couverture du ciel, son homogénéité, la qualité de ses données spectroscopiques, et son accessibilité offre une base de données précieuse, exploitée pour nombres d’études, mais pas encore pour les naines de marée. Quelques papiers récents basés sur le SDSS apportent toutefois des éléments prometteurs.

- [Michel-Dansac et al. \(2008\)](#) ont mesuré la différence de métallicité entre les galaxies satellites et celles de leurs galaxies hôtes. Ils ont montré que pour des hôtes présentant des signes d’interactions mineures, les satellites sont moins métalliques tandis que pour des interactions majeures, les différences s’estompent. Or ce sont précisément les fusions majeures qui produisent le plus de TDGs (dont la métallicité est par essence proche de celle de leurs galaxies parents).
- [Peeples et al. \(2008\)](#) ont recensé *toutes* les galaxies naines se démarquant de la relation masse–métallicité en présentant une abondance en oxygène anormalement élevée. Parce-que nombre d’entre elles présentent un noyau compact et bleu (formant des étoiles) se détachant d’un disque stellaire sous-jacent âgé, ces auteurs ont conclu que les objets déviants connaissent leur dernier sursaut de formation stellaire avant extinction des feux et épuisement de leurs réserves de gaz. Le manque de diluant expliquerait la sur-abondance. Or, j’ai entrepris de regarder de manière systématique l’environnement à grande échelle de ces cas pathologiques et identifié dans *nombre d’entre eux* une galaxie compagnon massive et de type précoce. Une origine de marée apparaît une nouvelle fois comme une explication alternative. Il convient désormais de quantifier ce *nombre de* et de comprendre les critères de sélection derrière ce *toutes* pour enfin disposer d’une estimation du nombre de TDGs.
- [Yang et al. \(2006\)](#) ont montré que les galaxies satellites du SDSS avaient une distribution anisotrope : elles se distribuent de manière préférentielle le long du grand axe de leurs galaxies hôtes, et ce de manière d’autant plus marquée que ces dernières sont rouges, de type précoce, et donc probablement le résultat de fusion. Or comme nous l’avons montré dans le paragraphe 3.1.7, la présence de TDGs autour d’elliptiques devrait accentuer une telle anisotropie. Depuis la constatation par [Holmberg \(1969\)](#) d’une anomalie dans la répartition des galaxies satellites <sup>3</sup> des études ont tour à tour montré qu’elle était compatible ou non avec le modèle hiérarchique du CDM.

<sup>3</sup>l’effet Holmberg, qui correspondait alors à une sur-population le long de l’axe mineur, démentie depuis par des analyses statistiques de plus grande envergure qui indiquent désormais une tendance opposée

### 3.2.5 Dans l'Univers lointain

Bien naturellement, si les spéculations sur le nombre de TDGs à grand  $z$  fourmillent (des plus optimistes tablant sur une augmentation sensible du nombre de collisions, aux plus pessimistes arguant sur l'absence de longues queues de marée pour des galaxies alors moins massives), les observations manquent. A noter toutefois les images profondes obtenues par le télescope spatial Hubble sur les champs GEMS et GOODS montrant des candidats TDGs jusqu'à  $z=1.4$  ([Elmegreen et al. 2007](#)). Des suivis spectroscopiques, en cours, permettront de distinguer de vrais candidats à des "clumps" formés dans les disques de galaxies en chaîne.

---

### 3.2.6 Article : VCC 2062 : an old Tidal Dwarf Galaxy in the Virgo Cluster ?

L'article [Duc et al. \(2007\)](#) détaille les propriétés de VCC 2062, une galaxie naine de l'amas de la Vierge, de faible brillance de surface. Sa teneur élevée en éléments lourds et une forte émission CO indiquent qu'elle a été formée à partir de matière arrachée à une galaxie massive, probablement NGC 4694 ou l'un de ses précurseurs. VCC 2062 se situe dans un nuage d'hydrogène atomique, cinématiquement découplé du reste de la structure de marée qui l'abrite. Il s'agit de la première galaxie naine de marée identifiée dans cet amas proche.

#### Abstract

**Context** : Numerical simulations predict the existence of old Tidal Dwarf Galaxies (TDGs) that would have survived several Gyr after the collision lying at their origin. Such survivors, which would by now have become independent relaxed galaxies, would be ideal laboratories, if nearby enough, to tackle a number of topical issues, including the distribution of Dark Matter in and around galaxies. However finding old dwarf galaxies with a confirmed tidal origin is an observational challenge. **Aims** : A dwarf galaxy in the nearby Virgo Cluster, VCC 2062, exhibits several unusual properties that are typical of a galaxy made out of recycled material. We discuss whether it may indeed be a TDG. **Methods** : We analysed multi-wavelength observations of VCC 2062, including a CO map acquired with the IRAM 30 m dish, an optical spectrum of its HII regions, GALEX ultraviolet and archival broad-band and narrow-band optical images as well as a VLA HI datacube, originally obtained as part of the VIVA project. **Results** : VCC 2062 appears to be the optical, low surface brightness counterpart of a kinematically detached, rotating condensation that formed within an HI tail apparently physically linked to the disturbed galaxy NGC 4694. In contrast to its faint optical luminosity, VCC 2062 is characterised by strong CO emission and a high oxygen abundance more typical of spiral disks. Its dynamical mass however, is that of a dwarf galaxy. **Conclusions** : VCC 2062 was most likely formed within a pre-enriched gaseous structure expelled from a larger galaxy as a result of a tidal interaction. The natural provider for the gaseous tail is NGC 4694 or rather a former companion which subsequently has been accreted by the massive galaxy. According to that scenario, VCC 2062 has been formed by a past tidal encounter. Since its parent galaxies have most probably already totally merged, it qualifies as an old Tidal Dwarf Galaxy.

## VCC 2062: an old tidal dwarf galaxy in the Virgo cluster?

P.-A. Duc<sup>1</sup>, J. Braine<sup>2</sup>, U. Lisenfeld<sup>3</sup>, E. Brinks<sup>4</sup>, and M. Boquien<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire AIM, CEA/DSM – CNRS – Université Paris Diderot, DAPNIA/Service d’Astrophysique, CEA-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France  
 e-mail: paduc@cea.fr

<sup>2</sup> Observatoire de Bordeaux, UMR 5804, CNRS/INSU, BP 89, 33270 Floirac, France

<sup>3</sup> Dept. de Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada, Granada, Spain

<sup>4</sup> Centre for Astrophysics Research, University of Hertfordshire, College Lane, Hatfield AL10 9AB, UK

Accepted 23 July 2007 / Accepted 31 August 2007

### ABSTRACT

**Context.** Numerical simulations predict the existence of old Tidal Dwarf Galaxies (TDGs) that would have survived several Gyr after the collision lying at their origin. Such survivors, which would by now have become independent relaxed galaxies, would be ideal laboratories, if nearby enough, to tackle a number of topical issues, including the distribution of Dark Matter in and around galaxies. However finding old dwarf galaxies with a confirmed tidal origin is an observational challenge.

**Aims.** A dwarf galaxy in the nearby Virgo Cluster, VCC 2062, exhibits several unusual properties that are typical of a galaxy made out of recycled material. We discuss whether it may indeed be a TDG.

**Methods.** We analysed multi-wavelength observations of VCC 2062, including a CO map acquired with the IRAM 30 m dish, an optical spectrum of its HII regions, GALEX ultraviolet and archival broad-band and narrow-band optical images as well as a VLA HI datacube, originally obtained as part of the VIVA project.

**Results.** VCC 2062 appears to be the optical, low surface brightness counterpart of a kinematically detached, rotating condensation that formed within an HI tail apparently physically linked to the disturbed galaxy NGC 4694. In contrast to its faint optical luminosity, VCC 2062 is characterised by strong CO emission and a high oxygen abundance more typical of spiral disks. Its dynamical mass however, is that of a dwarf galaxy.

**Conclusions.** VCC 2062 was most likely formed within a pre-enriched gaseous structure expelled from a larger galaxy as a result of a tidal interaction. The natural provider for the gaseous tail is NGC 4694 or rather a former companion which subsequently has been accreted by the massive galaxy. According to that scenario, VCC 2062 has been formed by a past tidal encounter. Since its parent galaxies have most probably already totally merged, it qualifies as an old Tidal Dwarf Galaxy.

**Key words.** galaxies: interactions – galaxies: peculiar – galaxies: dwarf – galaxies: clusters: individual: VCC 2062 – galaxies: individual: NGC 4694 – ISM: molecules

### 1. Introduction

The origin and properties of the satellites surrounding massive galaxies has recently been the subject of an active debate, triggered by its cosmological implications, new constraints from numerical simulations (e.g. Mayer et al. 2007) as well as prolific observations. In particular, optical surveys with cameras offering large fields of view allowed a deeper census of the faint dwarf satellite population around the Milky Way and Andromeda to be made (e.g. Belokurov et al. 2007). Although the number of known satellites keeps increasing with time, it is still lower than the number of primordial satellites predicted by standard cosmological hierarchical scenarios. The situation could even be worse, as claimed by Bournaud & Duc (2006). These authors have pointed out that the cosmological models do not take into account the fact that second-generation (or recycled) galaxies may be formed during collisions. According to the numerical simulations by Bournaud & Duc (2006), a fraction of the so-called Tidal Dwarf Galaxies (TDGs), made out of tidal material expelled from parent colliding galaxies, survives long enough to contribute significantly to the population of satellites around massive hosts (see also Metz & Kroupa 2007).

The formation in tidal tails of massive gravitationally bound objects has been known now for over a decade from

observations of interacting systems (see Duc et al. 2007, and references therein). However, so far only young TDGs have been unambiguously identified thanks to tidal arms and bridges linking them to their parent galaxies. As these features disappear in the course of time (typically of order 0.5–1 Gyr), galaxies of tidal origin become more difficult to distinguish from classical ones. Observing an old TDG existing as an independent entity several hundred Myr after the beginning of the collision lying at its origin, is a real challenge. This is because two defining characteristics – a relative high metallicity inherited from their parent galaxies, and the absence of a prominent dark matter halo surrounding them (Hunter et al. 2000) – can only be determined for nearby objects. Indeed, a good sensitivity is required to get the spectrophotometric data that allows a precise measurement of the oxygen abundances, while a high spatial resolution is indispensable to measure their dynamical mass and thus their dark matter content. The first TDG candidates so far studied in detail are the ones in the Antennae system (NGC 4038/39) at a distance of about 20 Mpc (Mirabel et al. 1992). However doubts were raised whether they are self-gravitating objects (Hibbard et al. 2001). The nearby M81/M82/NGC 3077 group, at a distance of about 4 Mpc, shows instances of extra-planar, inter-galactic star-forming regions along or close to the HI tidal tails that link the three main colliding galaxies (e.g. Walter et al. 2006). Some of

### 3.2.7 Article : *HI-rich dwarf galaxies in the Hydra I cluster*

L'article [Duc et al. \(2001\)](#) ainsi que le premier de la série ([Duc et al. 1999](#)) présentent un échantillon de 15 galaxies naines riches en gaz d'hydrogène atomique sélectionnées à partir d'un sondage HI aveugle de l'amas de l'Hydre. Nous avons déterminé de manière systématique l'abondance en oxygène de leurs régions HII. Cette étude a révélé qu'une fraction des naines ne suit pas la relation luminosité-métallicité. Cette déviation s'explique par des effets d'environnement. Par leur fragilité, les galaxies naines d'amas devraient rapidement réagir à leur environnement (pression dynamique, collisions) et présenter des propriétés différentes de celles des galaxies naines de champ.

Résultat aussi surprenant (non publié) : nous avons trouvé que les galaxies naines de l'Hydre avaient systématiquement une vitesse HI plus élevée que celle de leur plus proche compagnon massif (voir Figure 3.4). Les biais statistiques ne rendent pas facilement compte de cette asymétrie dans la distribution des vitesses aussi constatée par [Arp et Sulentic \(1985\)](#) et dans une moindre mesure par [Zaritsky et al. \(1997\)](#).

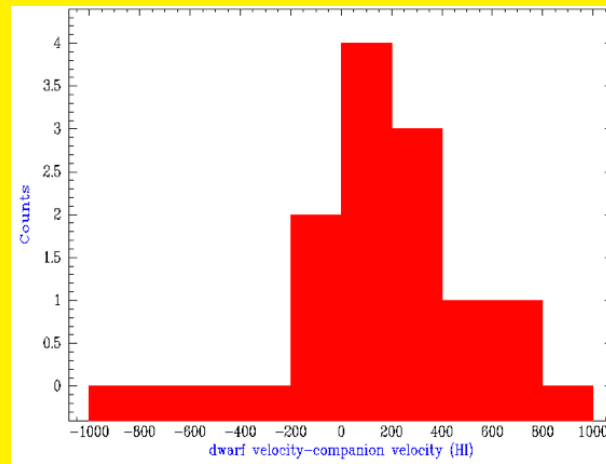


FIG. 3.4 – Histogram of the velocity difference between the dwarf galaxies in Hydra and their primary companion (the closest most massive galaxy).

#### Abstract

*We present spectrophotometric data for a sample of 15 HI-selected dwarf galaxies in the Hydra I cluster (see Duc et al. 1999, Paper I). Long-slit spectra were obtained along an axis including the nucleus and the brightest H II region in each galaxy. The oxygen abundance was estimated from the emission lines using various methods. All dwarfs host one or several star-forming regions that are, for the most part, located outside the nucleus. We did not find in this survey any extremely metal-deficient objects, but we did observe some galaxies with a surprisingly high metallicity for their luminosity. In a following paper in this series, we will discuss the global properties of the HI-rich dwarfs in the Hydra I cluster and focus on their dependence on the environment.*



A&A 369, 763–777 (2001)  
 DOI: 10.1051/0004-6361:20010188  
 © ESO 2001

**Astronomy  
&  
Astrophysics**

## H I-rich dwarf galaxies in the Hydra I cluster

### II. Spectroscopic data\*

P.-A. Duc<sup>1</sup>, V. Cayatte<sup>2</sup>, C. Balkowski<sup>2</sup>, T. X. Thuan<sup>3</sup>, P. Papaderos<sup>4</sup>, and W. van Driel<sup>5</sup>

<sup>1</sup> CNRS URA 2052 and CEA, DSM, DAPNIA, Service d'astrophysique, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

<sup>2</sup> Observatoire de Paris, DAEC, UMR 8631, CNRS and Université Paris 7, 92195 Meudon Cedex, France

<sup>3</sup> Astronomy Department, University of Virginia, Charlottesville, VA 22903, USA

<sup>4</sup> Universitäts-Sternwarte, Geismarlandstr. 11, 37083 Göttingen, Germany

<sup>5</sup> Unité Scientifique Nançay, CNRS USR B704, Observatoire de Paris, 92195 Meudon Cedex, France

Received 8 December 2000 / Accepted 18 January 2001

**Abstract.** We present spectrophotometric data for a sample of 15 H I-selected dwarf galaxies in the Hydra I cluster (see Duc et al. 1999, Paper I). Long-slit spectra were obtained along an axis including the nucleus and the brightest H II region in each galaxy. The oxygen abundance was estimated from the emission lines using various methods. All dwarfs host one or several star-forming regions that are, for the most part, located outside the nucleus. We did not find in this survey any extremely metal-deficient objects, but we did observe some galaxies with a surprisingly high metallicity for their luminosity. In a following paper in this series, we will discuss the global properties of the H I-rich dwarfs in the Hydra I cluster and focus on their dependence on the environment.

**Key words.** galaxies: abundances – galaxies: dwarf – galaxies: clusters: general

### 1. Introduction

Because of their low mass, dwarf galaxies in clusters should be very sensitive to their environment. They appear as ideal laboratories to probe environmental effects such as gravitational interactions (see review by Struck 1999) and ram pressure by the intracluster medium (see review by Kenney 1990). Gas rich dwarfs are particularly attractive since their gas, which usually extends far beyond the optical radius, should be easily stripped in clusters. In this respect, the discovery of H I-rich dwarf galaxies in H I surveys of nearby clusters (e.g. Cayatte et al. 1990; McMahon 1993; Dickey 1997; Bravo-Alfaro et al. 2000; Valluri et al. 2001) is puzzling. Their survival puts constraints on their distribution in the clusters and/or on the properties of the intracluster medium.

We have collected multi-wavelength data of a complete sample of fifteen gas-rich dwarf galaxies in the Hydra I cluster. All of these have been detected in H I in a VLA survey that covered seventy percent of the cluster core volume (McMahon 1993; Valluri et al. 2001). Most detections were confirmed using the Nançay single-dish radio telescope. For one H I source, we did not find any optical counterpart. Our selection criteria, Nançay H I data

and optical/near-infrared imaging results were presented in Duc et al. (1999) (hereafter Paper I). We found that the H I-selected dwarfs in Hydra show a large diversity in their colour, morphology and structural parameters. They range from blue compact objects to red low surface brightness galaxies. All of them, however, host extended or more compact blue regions where star-formation is probably taking place. In this paper, we present spectrophotometric data on all of the 15 galaxies.

The observations at the ESO 3.6 m telescope and data-reduction are described in Sect. 1. The derived spectroscopic properties, distribution of H II regions, star-formation rate, and metallicity are presented in Sect. 2. The overall properties of the galaxies in the Hydra cluster and their link with the environment, including their Tully-Fisher relation, will be discussed in an associated paper (Paper III).

### 2. Observations and data reduction

Long-slit spectroscopic observations were carried out in 1998 March 4–5 and April 24, with the ESO-3.6 m telescope at the La Silla observatory. The EFOSC 2 instrument was used with the B300 grism and a Loral 2k CCD detector. Its pixel size was  $0''.314/\text{px}$  and the spectral resolution was  $3.3 \text{ \AA}/\text{px}$ . A movable slit with a width of  $1''.2$  was selected and positioned on the CCD to ensure a wavelength

Send offprint requests to: P.-A. Duc, e-mail: paduc@cea.fr

\* Based on observations collected at the European Southern Observatory, La Silla, Chile (ESO No 60.A-0791).

### 3.2.8 Article : *A study of HI-selected galaxies in the Hercules cluster*

L'article [Iglesias-Páramo et al. \(2003\)](#) présente un catalogue de 22 galaxies naines riches en gaz d'hydrogène atomique sélectionnées à partir d'un sondage HI aveugle de l'amas d'Hercule. Nous avons déterminé de manière systématique leurs propriétés optiques, en particulier l'abondance en oxygène de leurs régions HII. L'échantillon comprend une galaxie naine de marée, ce-061 dont la galaxie parent est IC 1182.

#### **Abstract**

*The present study focuses on a sample of 22 galaxies detected in the blind VLA H I survey of the Hercules cluster by [Dickey \(1997\)](#), 18 of which were selected on an H I line width smaller than 270 km s<sup>-1</sup> and 4 others with only tentative optical counterparts in the Palomar Sky Survey. Sensitive single-dish H I line spectra were obtained for 20 of them, and for one the VLA detection was not confirmed. Optical surface photometry has been carried out for 10 objects, for 8 of which optical spectroscopy was obtained as well. Based on various criteria, we classify two sample galaxies (ce-143 and ne-204) as genuine dwarfs whereas the remaining sample objects are found to be intrinsically luminous galaxies. For those objects investigated in optical wavelengths we determine properties similar to those of actively star-forming galaxies, and find that approximately one half of them has properties intermediate between those of dwarf galaxies and low-luminosity disc galaxies. No optical redshifts could be determined for two of the galaxies (sw-103 and sw-194) and their physical association with the H I clouds detected at their positions therefore remains uncertain. A particularly interesting object in our sample is the Tidal Dwarf Galaxy candidate ce-061 in the galaxy merger IC 1182.*

A&A 406, 453–469 (2003)  
DOI: 10.1051/0004-6361:20030626  
© ESO 2003

## A study of H I-selected galaxies in the Hercules cluster<sup>★</sup>

J. Iglesias-Páramo<sup>1</sup>, W. van Driel<sup>2</sup>, P.-A. Duc<sup>3</sup>, P. Papaderos<sup>4</sup>, J. M. Vílchez<sup>5</sup>, V. Cayatte<sup>2</sup>, C. Balkowski<sup>2</sup>,  
K. O’Neil<sup>6</sup>, J. Dickey<sup>7</sup>, H. Hernández<sup>6</sup>, and T. X. Thuan<sup>8</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d’Astrophysique de Marseille, Traverse du Siphon – Les Trois Lucs, 13376 Marseille, France  
e-mail: jorge.iglesias@oamp.fr

<sup>2</sup> Observatoire de Paris, GEPI, CNRS-UMR 8111 and Université Paris 7, 92195 Meudon Cedex, France  
e-mail: wim.vandriel@obspm.fr; veronique.cayatte@obspm.fr; chantal.balkowski@obspm.fr

<sup>3</sup> CNRS URA 2052 and CEA, DSM, DAPNIA, Service d’Astrophysique, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France  
e-mail: paduc@cea.fr

<sup>4</sup> Universitäts-Sternwarte, Geismarlandstrasse 11, 37083 Göttingen, Germany  
e-mail: papade@uni-sw.gwdg.de

<sup>5</sup> Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), Granada, Spain  
e-mail: jvm@iaa.es

<sup>6</sup> Arecibo Observatory, HC3 Box 53995, Arecibo, Puerto Rico 00612, USA  
e-mail: koneil@naic.edu, hhernand@naic.edu

<sup>7</sup> Department of Astronomy, University of Minnesota, 116 Church Street SE, Minneapolis, MN 55455, USA  
e-mail: john@astro.umn.edu

<sup>8</sup> Astronomy Department, University of Virginia, Charlottesville, VA 22903, USA  
e-mail: txt@astro.virginia.edu

Received 26 April 2002 / Accepted 9 April 2003

**Abstract.** The present study focuses on a sample of 22 galaxies detected in the blind VLA H I survey of the Hercules cluster by Dickey (1997), 18 of which were selected on an H I line width smaller than  $270 \text{ km s}^{-1}$  and 4 others with only tentative optical counterparts in the Palomar Sky Survey. Sensitive single-dish H I line spectra were obtained for 20 of them, and for one the VLA detection was not confirmed. Optical surface photometry has been carried out for 10 objects, for 8 of which optical spectroscopy was obtained as well. Based on various criteria, we classify two sample galaxies (ce-143 and ne-204) as genuine dwarfs whereas the remaining sample objects are found to be intrinsically luminous galaxies. For those objects investigated in optical wavelengths we determine properties similar to those of actively star-forming galaxies, and find that approximately one half of them has properties intermediate between those of dwarf galaxies and low-luminosity disc galaxies. No optical redshifts could be determined for two of the galaxies (sw-103 and sw-194) and their physical association with the H I clouds detected at their positions therefore remains uncertain. A particularly interesting object in our sample is the Tidal Dwarf Galaxy candidate ce-061 in the galaxy merger IC 1182.

**Key words.** galaxies: abundances – galaxies: dwarf – galaxies: clusters: general – galaxies: clusters: individual: Hercules cluster

### 1. Introduction

It is well known from numerous studies based on observations and simulations that the environment plays a fundamental role in the evolution of bright galaxies, via galaxy-galaxy interactions and/or interactions of galaxies with the intergalactic medium. The present work is part of an ongoing study of the properties of H I-selected galaxies in clusters, for which the results on dwarfs in the Hydra cluster have already been

published (Duc et al. 1999, 2001a; hereafter Papers I and II, respectively). The reasons for studying H I-selected objects are the sensitivity of H I to the environment and the selection of star-forming objects hosting H II regions, for which direct measurements of the metallicity are fairly easy. The most remarkable result is the existence of dwarfs with an oxygen abundance significantly higher than expected from the luminosity-metallicity relation for field dwarf galaxies.

In this paper we present single-dish 21 cm H I-line as well as optical imaging and spectroscopy observations of a sample of galaxies in the Hercules cluster, selected from the objects detected in the blind VLA H I line survey of the cluster by Dickey (1997). Our main aims are to study the structural

Send offprint requests to: J. Iglesias-Páramo,  
e-mail: jorge.iglesias@oamp.fr

★ Appendix A and Figs. 5 to 12 are only available in electronic form at <http://www.edpsciences.org>



## Chapitre 4

# Les galaxies naines de marée comme laboratoires

### Sommaire

<b>4.1 Formation stellaire entregalactique</b>	<b>129</b>
4.1.1 Déclenchement de la formation stellaire	130
4.1.2 Histoire de la formation stellaire	130
4.1.3 Article : <i>Abundant molecular gas in tidal dwarf galaxies : On-going galaxy formation</i>	132
4.1.4 Article : <i>Polychromatic view of intergalactic star formation in NGC 5291</i>	134
4.1.5 Article : <i>Tidal dwarf galaxies in a sample of interacting galaxies</i>	138
4.1.6 Travaux de thèse : <i>P. Weilbacher et M. Boquien</i>	140
<b>4.2 Sondes cosmologiques</b>	<b>141</b>
4.2.1 Dénombrement des TDGs : le problème des galaxies satellites manquant accentué	141
4.2.2 Formation des TDGs : la nécessité de halos cosmologiques étendus	141
4.2.3 Article : <i>The large extent of dark matter halos probed by the formation of tidal dwarf galaxies</i>	143
4.2.4 Pesée des TDGs : prospection de(s) baryons manquants	145
4.2.5 Cinématique des TDGs : contraintes sur les théories alternatives de la gravité	147
4.2.6 Article : <i>Missing mass in collisional debris from galaxies</i>	149

Si, comme nous le verrons un peu plus loin, les naines de marée contribuent probablement peu au bestiaire extragalactique, elles restent des cibles de choix pour appréhender des questions aussi diverses que le déclenchement de flambées stellaires ou la nature et la distribution de la matière noire dans et autour des galaxies. Nos travaux ont ainsi montré que de manière plus générale les débris de collision peuvent tout à la fois servir de sonde cosmologique et de laboratoire pour étudier la formation des étoiles (dans un environnement peu considéré jusqu'à présent), des amas stellaires, globulaires voire des galaxies.

### 4.1 Formation stellaire entregalactique

Avec des taux de formation stellaire atteignant  $0.5 M_{\odot}$  par an, les naines de marée possèdent les régions de formation stellaire les plus actives hors disques galactiques. Des étoiles peuvent toutefois naître dans des débris de collision de manière plus sporadique, en dehors ou en l'absence de TDGs. La plupart des queues de marée contiennent ainsi des régions HII plus ou moins lumineuses. Ces pouponnières stellaires présentent un environnement à grande échelle différent de celui qui prévaut dans les disques de galaxies spirales ou dans les galaxies naines : contingent moindre de populations stellaires vieilles, absence de bras spiraux, d'un halo de matière noire proéminent, etc... On s'attendrait donc à des disparités notables dans leurs propriétés locales. Comprendre comment la formation stellaire évolue des disques galactiques aux régions les plus éloignées des galaxies a été l'objectif du travail de thèse de Médéric Boquien (Boquien 2007). Il a nécessité la compilation de données multi-longueur

d'ondes obtenues dans les archives (Spitzer/IR moyen) ou via du temps PI (HI, GALEX/UV, optique). Auparavant, Peter Weilbacher avait durant sa thèse de maîtrise puis de doctorat (Weilbacher 2002) confronté des données d'imagerie optiques à des modèles évolutifs pour déjà essayer de contraindre l'histoire de la formation stellaire dans les débris de collision.

#### 4.1.1 Déclenchement de la formation stellaire

Les forces de marée arrachent de manière plus efficace le gaz que les étoiles plus liées gravitationnellement à leur galaxie parent. Les systèmes en interaction qui ont été l'objet de notre étude présentent des débris de collision pourvus d'une fraction de gaz particulièrement importante : de 50 à 90% alors qu'elle ne dépasse guère 10-20% dans les spirales, du moins dans l'Univers proche. Les nuages d'hydrogène atomique entregalactiques les plus denses s'effondrent pour former des étoiles, via probablement une phase moléculaire. A notre résolution spatiale (au mieux 0.1 kpc), on note une très bonne correspondance spatiale entre condensations HI et régions de formation stellaire jalonnées par leur émission  $H\alpha$ , ultraviolette ou infrarouge (e.g. Duc et Mirabel 1998; Boquien et al. 2007). Presque partout où le HI atteint une densité de colonne critique, nous avons pu détecter avec l'antenne de 30 mètres de l'IRAM une émission CO(1-0) et CO(2-1), divulguant la présence de  $H_2$  (Braine et al. 2001). La valeur de cette densité de colonne au delà de laquelle la formation stellaire est déclenchée est typiquement de  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$  dans nos queues de marée. Toutefois une comparaison avec la densité critique prédite par le paramètre de Toomre  $Q$  ou observée dans les disques de spirales reste délicate à cause des problèmes de résolution spatiale des observations HI. On note quelques exceptions où malgré leur densité de colonne en apparence élevée, des nuages HI n'ont pu former des étoiles (voir par exemple la région située juste au nord de NGC 5291). Dépasser le seuil  $N(HI)$  n'est donc pas une condition suffisante, souligne Maybhate et al. (2007). Il faut prendre en compte, entre autres, la pression du gaz, et, comme l'ont montré Duc et al. (2007) et Lisenfeld et al. (2008), son état dynamique. Ainsi, dans la naine de marée VCC 2062, les régions de formation stellaire se concentrent dans une sous-condensation du gaz HI cinématiquement froide (apparemment en rotation) et non dans le pic local HI qui présente une dispersion de vitesse bien plus élevée (et en direction duquel pourtant du gaz moléculaire CO a été détecté). Il convient désormais d'explicitier les mécanismes précis qui amorcent les flambées stellaires : chocs entre nuages (Struck 1997; Barnes 2004), instabilités gravitationnelles locales et cisaillement (Elmegreen et Efremov 1996), processus plus stochastiques (Smith et al. 2008), etc... Le manque de résolution spatiale des cartes HI et CO pour ces débris de collision relativement distants est un handicap pour trancher. Les simulations numériques donnent toutefois quelques prédictions, même si les recettes pour l'implémentation de la formation stellaire restent sommaires et si les résultats dépendent largement du code utilisé pour décrire le gaz (sticky, SPH, hydro).

#### 4.1.2 Histoire de la formation stellaire

L'histoire de la formation stellaire dans les naines de marée est irrémédiablement marquée par un évènement majeur : la flambée de formation stellaire consécutive à l'effondrement des nuages de gaz expulsés par effet de marée, dont on peut contraindre l'ancienneté avec des modèles numériques de la collision. Cet âge "dynamique" peut se comparer avec celui estimé à partir de données spectroscopiques et photométriques (largeur équivalente de la raie de  $H\beta$ , forme du diagramme spectral d'énergie, etc ...). La précision des mesures dépend de la bonne évaluation d'une contamination éventuelle des points de mesure par l'émission de populations stellaires plus vieilles arrachées en même temps que le gaz, ou d'un halo stellaire très étendu autour des galaxies parents.

#### Formation stellaire in situ : taux et efficacité

Nous avons collecté de multiples traceurs de la formation stellaire récente qui a été déclenchée *in situ* dans le milieu entregalactique : couleurs optiques avec le NTT (Weilbacher et al. 2000), photométrie dans l'ultraviolet et l'infrarouge moyen (Boquien et al. 2007) obtenue grâce respectivement aux satellites GALEX et Spitzer, imagerie  $H\alpha$  à partir de données Perot-Fabry (Bournaud et al. 2004), spectroscopie optique (Weilbacher et al. 2003) et dans l'infrarouge moyen (Higdon et al. 2006; Boquien et al. 2008). Si les cartes de régions de formation stellaire dressées grâce à chacun de ces indicateurs se superposent moyennant les différences de résolution – les systèmes que nous avons étudié ne présentent pas des régions totalement obscurcies, visibles simplement dans l'IR où à contrario des régions sans poussières –, on observe d'une région à l'autre des variations de flux relatifs, UV/IR ou  $H\alpha$ /UV importantes qui à priori correspondent à des différences notables dans les propriétés chimiques locales, dans le niveau d'extinction, où l'âge de la flambée. Or nous n'avons pas mesuré de gradients de métallicité le

long des queues de marée qui pourraient influencer sur les caractéristiques des poussières, en particulier des PAHs, responsables d'une fraction importante de l'émission dans l'infrarouge moyen, utilisée comme traceur de formation d'étoiles. Nous n'avons pas non plus, à l'échelle de nos observations, des évidences de changements drastiques de l'extinction locale qui affecteraient en particulier l'émission ultraviolette. Reste l'hypothèse de fluctuations de l'âge des flambées : autrement dit, le déclenchement de la formation stellaire n'est pas simultanée, même au sein d'une même structure dynamique, comme dans le cas de **NGC 5291** (Boquien et al. 2007, [article ci-dessous](#)).

Comment transformer les luminosités UV/H $\alpha$ /IR mesurées en taux de formation d'étoiles ? Les taux de conversions ont été estimés jusqu'à présent à partir de mesures faites dans les disques galactiques. En effectuant des comparaisons systématiques entre régions de formation stellaire intra et extra galactiques, Boquien (2007) a montré que ces étalonnages restaient aussi valables dans le milieu entregalactique, alors qu'elles marchent moins bien pour les galaxies naines classiques. En effet, naines de marée et régions de formation stellaires galactiques possèdent un milieu interstellaire relativement semblable, plutôt riche en éléments lourds et en PAHs (Higdon et al. 2006; Boquien et al. 2008). Boquien et al. (2007) détaillent comment combiner les indicateurs UV/H $\alpha$ /IR pour estimer un taux de formation total dans les débris de collision. Il s'élève pour **NGC 5291** à  $1.2 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  soit 80 % du SFR total mesuré sur l'ensemble du système, y compris dans la galaxie parent. Dans l'ensemble, pour l'échantillon que nous avons sélectionné, la fraction d'étoiles se formant dans le milieu entregalactique est importante, voire majoritaire. Il convient toutefois de noter que nos systèmes sont extrêmes de ce point de vue. Sur un catalogue moins biaisé, Smith et al. (2007) ont déterminé que les queues de marée contribuent à moins de 10% à l'émission IR totale et donc au SFR total.

Pour les régions entregalactiques les plus actives, i.e. dans les naines de marée, nous avons mesuré l'efficacité de la formation stellaire, *SFE*, rapport entre le taux de formation d'étoiles et la quantité de gaz moléculaire estimée à partir d'observations CO. Elle s'avère sans surprise assez faible, plus proche de celle déterminée pour les galaxies spirales que pour les galaxies naines (Braine et al. 2001, [article ci-dessous](#)). Les TDGs disposent de grandes réserves de gaz et donc d'une propension à maintenir une activité de formation stellaire pendant au moins un milliard d'années.

Ainsi, les TDGs ont reçu de leurs parents les mêmes dispositions à former des étoiles, malgré un environnement à grande échelle très dissemblable. Elles se démarquent des galaxies naines classiques, bien qu'elles en aient la masse. Du point de vue chimique et stellaire, les TDGs sont de mini-spirales. Mais structurellement plus simples, elles constituent comme nous allons le voir des laboratoires privilégiés.

### 4.1.3 Article : *Abundant molecular gas in tidal dwarf galaxies : On-going galaxy formation*

L'article Braine et al. (2001) détaille la recherche de gaz moléculaire dans une dizaine de galaxies naines de marée. Avec l'antenne de 30 mètres de l'IRAM, nous avons détecté une émission CO(1-0) et CO(2-1) dans 80% d'entre elles. Ces données sont utilisées pour comparer l'efficacité de la formation stellaire dans les queues de marée à celle des galaxies naines et des galaxies spirales dont finalement elles se rapprochent le plus. L'article présente un scénario évolutif pour la formation des TDGs : expulsion de HI, effondrement et transformation locale en H<sub>2</sub> formation stellaire.

#### Abstract

*We investigate the process of galaxy formation as can be observed in the only currently forming galaxies - the so-called Tidal Dwarf Galaxies, hereafter TDGs - through observations of the molecular gas detected via its CO (Carbon Monoxide) emission. These objects are formed of material torn off of the outer parts of a spiral disk due to tidal forces in a collision between two massive galaxies. Molecular gas is a key element in the galaxy formation process, providing the link between a cloud of gas and a bona fide galaxy. We have detected CO in 8 TDGs (two of them have already been published in Braine et al. 2000, hereafter Paper I), with an overall detection rate of 80%, showing that molecular gas is abundant in TDGs, up to a few 10<sup>8</sup> M<sub>sun</sub>. The CO emission coincides both spatially and kinematically with the HI emission, indicating that the molecular gas forms from the atomic hydrogen where the HI column density is high. A possible trend of more evolved TDGs having greater molecular gas masses is observed, in accord with the transformation of HI into H<sub>2</sub>. Although TDGs share many of the properties of small irregulars, their CO luminosity is much greater (factor 100) than that of standard dwarf galaxies of comparable luminosity. This is most likely a consequence of the higher metallicity (gtrsim 1/3 solar) of TDGs which makes CO a good tracer of molecular gas. This allows us to study star formation in environments ordinarily inaccessible due to the extreme difficulty of measuring the molecular gas mass. The star formation efficiency, measured by the CO luminosity per H $\alpha$  flux, is the same in TDGs and full-sized spirals. CO is likely the best tracer of the dynamics of these objects because some fraction of the HI near the TDGs may be part of the tidal tail and not bound to the TDG. Although uncertainties are large for individual objects, as the geometry is unknown, our sample is now of eight detected objects and we find that the "dynamical" masses of TDGs, estimated from the CO line widths, seem not to be greater than the "visible" masses (HI + H<sub>2</sub> + a stellar component). Although higher spatial resolution CO (and HI) observations would help reduce the uncertainties, we find that TDGs require no dark matter, which would make them the only galaxy-sized systems where this is the case. Dark matter in spirals should then be in a halo and not a rotating disk. Most dwarf galaxies are dark matter-rich, implying that they are not of tidal origin. We provide strong evidence that TDGs are self-gravitating entities, implying that we are witnessing the ensemble of processes in galaxy formation : concentration of large amounts of gas in a bound object, condensation of the gas, which is atomic at this point, to form molecular gas and the subsequent star formation from the dense molecular component.*



## Abundant molecular gas in tidal dwarf galaxies: On-going galaxy formation

J. Braine<sup>1</sup>, P.-A. Duc<sup>2</sup>, U. Lisenfeld<sup>3</sup>, V. Charmandaris<sup>4</sup>, O. Vallejo<sup>1</sup>, S. Leon<sup>5</sup>, and E. Brinks<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Observatoire de Bordeaux, UMR 5804, CNRS/INSU, BP 89, 33270 Floirac, France

<sup>2</sup> CNRS URA 2052 and CEA/DSM/DAPNIA, Service d'astrophysique, Saclay, 91191 Gif sur Yvette Cedex, France

<sup>3</sup> Institut de Radioastronomie Millimétrique, Avenida Divina Pastora 7, NC 18012 Granada, Spain

<sup>4</sup> Cornell University, Astronomy Department, Ithaca, NY 14853, USA

<sup>5</sup> ASIAA, Academia Sinica, PO Box 1-87, Nanking, Taipei 115, Taiwan

<sup>6</sup> Departamento de Astronomía, Universidad de Guanajuato, Apdo. Postal 144, Guanajuato, Mexico

Received 15 February 2001 / Accepted 6 August 2001

**Abstract.** We investigate the process of galaxy formation as can be observed in the only currently forming galaxies – the so-called Tidal Dwarf Galaxies, hereafter TDGs – through observations of the molecular gas detected via its CO (Carbon Monoxide) emission. These objects are formed of material torn off of the outer parts of a spiral disk due to tidal forces in a collision between two massive galaxies. Molecular gas is a key element in the galaxy formation process, providing the link between a cloud of gas and a bona fide galaxy. We have detected CO in 8 TDGs (two of them have already been published in Braine et al. 2000, hereafter Paper I), with an overall detection rate of 80%, showing that molecular gas is abundant in TDGs, up to a few  $10^8 M_{\odot}$ . The CO emission coincides both spatially and kinematically with the HI emission, indicating that the molecular gas forms from the atomic hydrogen where the HI column density is high. A possible trend of more evolved TDGs having greater molecular gas masses is observed, in accord with the transformation of HI into H<sub>2</sub>. Although TDGs share many of the properties of small irregulars, their CO luminosity is much greater (factor  $\sim 100$ ) than that of standard dwarf galaxies of comparable luminosity. This is most likely a consequence of the higher metallicity ( $\gtrsim 1/3$  solar) of TDGs which makes CO a good tracer of molecular gas. This allows us to study star formation in environments ordinarily inaccessible due to the extreme difficulty of measuring the molecular gas mass. The star formation efficiency, measured by the CO luminosity per H $\alpha$  flux, is the same in TDGs and full-sized spirals. CO is likely the best tracer of the dynamics of these objects because some fraction of the HI near the TDGs may be part of the tidal tail and not bound to the TDG. Although uncertainties are large for individual objects, as the geometry is unknown, our sample is now of eight detected objects and we find that the “dynamical” masses of TDGs, estimated from the CO line widths, seem not to be greater than the “visible” masses (HI + H<sub>2</sub> + a stellar component). Although higher spatial resolution CO (and HI) observations would help reduce the uncertainties, we find that TDGs require no dark matter, which would make them the only galaxy-sized systems where this is the case. Dark matter in spirals should then be in a halo and not a rotating disk. Most dwarf galaxies are dark matter-rich, implying that they are *not* of tidal origin. We provide strong evidence that TDGs are self-gravitating entities, implying that we are witnessing the ensemble of processes in galaxy formation: concentration of large amounts of gas in a bound object, condensation of the gas, which is atomic at this point, to form molecular gas and the subsequent star formation from the dense molecular component.

**Key words.** stars: formation – galaxies: evolution – galaxies: formation – galaxies: interactions – galaxies: ISM – cosmology: dark matter

### 1. Introduction

Tidal Dwarf Galaxies (TDGs) are small galaxies which are currently forming from material ejected from the disks of spiral galaxies through collisions. They allow us to ob-

serve processes – galaxy formation and evolution – similar to what occurred in the very early universe but in very local objects. As a consequence, they can be studied with a sensitivity and a resolution unimaginable for high-redshift sources. Because galactic collisions can be well reproduced through numerical simulations, it is possible to obtain good age estimates for the individual systems (e.g.

Send offprint requests to: J. Braine,  
 e-mail: braine@observ.u-bordeaux.fr

#### 4.1.4 Article : *Polychromatic view of intergalactic star formation in NGC 5291*

L'article [Boquien et al. \(2007\)](#) s'intéresse aux régions de formation stellaire dans l'anneau collisionnel géant autour de [NGC 5291](#). Il compare pour une trentaine de régions HII, les taux de formation stellaire déterminés à partir de l'émission UV, H $\alpha$  et IR. Si ces régions entregalactiques possèdent de nombreuses caractéristiques qui les rapprochent des régions de formation stellaire galactiques, elles semblent toutefois présenter un inattendu excès de luminosité ultraviolette. Cette sur-luminosité n'est observée que dans NGC 5291. [Boquien et al. \(2007\)](#) expliquent que pour des flambées très jeunes mais sur le déclin, comme observées pour ce système particulier, le rapport UV/H $\alpha$  augmente très rapidement avec le temps.

##### Abstract

**Context** : Star formation (SF) takes place in unusual places such as way out in the intergalactic medium out of material expelled from parent galaxies. **Aims** : Whether SF proceeds in this specific environment in a similar way than in galactic disks is the question we wish to answer. Particularly, we address the reliability of ultraviolet, H $\alpha$  and mid-infrared as tracers of SF in the intergalactic medium. **Methods** : We have carried out a multi-wavelength analysis of the interacting system NGC 5291, which is remarkable for its extended HI ring hosting numerous intergalactic HII regions. We combined new ultraviolet (GALEX) observations with archival H $\alpha$ , 8 m (Spitzer Space Telescope) and HI (VLA B-array) images of the system. **Results** : We have found that the morphology of the star forming regions, as traced by the ultraviolet, H $\alpha$  and 8 m emission is similar. The 8.0 m infrared emission, normalised to emission from dust at 4.5 m, which is known to be dominated by PAH bands, is comparable to the integrated emission of dwarf galaxies of the same metallicity and to the emission of individual HII regions in spirals. The 8.0 m in the intergalactic environment is therefore an estimator of the star formation rate which is as reliable in that extreme environment as it is for spirals. There is a clear excess of ultraviolet emission compared to individual HII regions in spirals, i.e. the  $[8.0]/[NUV]$  and  $[H\alpha]/[NUV]$  SFR ratios are on average low although there are some large variations from one region to another, which cannot be explained by variations of the metallicity or the dust extinction along the HI structure. Comparing the observed SFR with a model of the evolution of  $[H\alpha]/[NUV]$  with time favours young, quasi-instantaneous though already fading starbursts. The total star formation rate measured in the intergalactic medium (which accounts for 80% of the total) surrounding NGC 5291 is up to  $1.3 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  - a value typical for spirals - assuming the standard SFR calibrations are valid. The SFR drops by a factor of 2 to 4 in case the star formation is indeed quasi-instantaneous.

## Polychromatic view of intergalactic star formation in NGC 5291

M. Boquien<sup>1,2</sup>, P.-A. Duc<sup>1</sup>, J. Braine<sup>3</sup>, E. Brinks<sup>4</sup>, U. Lisenfeld<sup>5</sup>, and V. Charmandaris<sup>6,7,8</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire AIM, CEA, CNRS et Université Paris Diderot

<sup>2</sup> CEA-Saclay, DSM/DAPNIA/Service d'Astrophysique, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France  
 e-mail: mederic.boquien@cea.fr

<sup>3</sup> Observatoire de Bordeaux, UMR 5804, CNRS/INSU, BP 89, 33270 Floirac, France

<sup>4</sup> Centre for Astrophysics Research, University of Hertfordshire, College Lane, Hatfield AL10 9AB, UK

<sup>5</sup> Dept. de Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada, Granada, Spain

<sup>6</sup> Department of Physics, University of Crete, 71003 Heraklion, Greece

<sup>7</sup> IESL/Foundation for Research and Technology, Hellas, 71110 Heraklion, Greece

<sup>8</sup> Chercheur Associé, Observatoire de Paris, 75014 Paris, France

Received 3 November 2006 / Accepted 18 February 2007

### ABSTRACT

**Context.** Star formation (SF) takes place in unusual places such as way out in the intergalactic medium out of material expelled from parent galaxies.

**Aims.** Whether SF proceeds in this specific environment in a similar way than in galactic disks is the question we wish to answer. Particularly, we address the reliability of ultraviolet, H $\alpha$  and mid-infrared as tracers of SF in the intergalactic medium.

**Methods.** We have carried out a multiwavelength analysis of the interacting system NGC 5291, which is remarkable for its extended HI ring hosting numerous intergalactic HII regions. We combined new ultraviolet (GALEX) observations with archival H $\alpha$ , 8  $\mu$ m (*Spitzer Space Telescope*) and HI (VLA B-array) images of the system.

**Results.** We have found that the morphology of the star forming regions, as traced by the ultraviolet, H $\alpha$ , and 8  $\mu$ m emission is similar. The 8.0  $\mu$ m infrared emission, normalised to emission from dust at 4.5  $\mu$ m, which is known to be dominated by PAH bands, is comparable to the integrated emission of dwarf galaxies of the same metallicity and to the emission of individual HII regions in spirals. The 8.0  $\mu$ m in the intergalactic environment is therefore an estimator of the star formation rate which is as reliable in that extreme environment as it is for spirals. There is a clear excess of ultraviolet emission compared to individual HII regions in spirals, i.e. the [8.0] / [NUV] and [H $\alpha$ ] / [NUV] SFR ratios are on average low although there are some large variations from one region to another, which cannot be explained by variations of the metallicity or the dust extinction along the HI structure. Comparing the observed SFR with a model of the evolution of [H $\alpha$ ] / [NUV] with time favours young, quasi-instantaneous though already fading starbursts. The total star formation rate measured in the intergalactic medium (which accounts for 80% of the total) surrounding NGC 5291 is up to 1.3  $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  – a value typical for spirals – assuming the standard SFR calibrations are valid. The SFR drops by a factor of 2 to 4 in case the star formation is indeed quasi-instantaneous.

**Key words.** galaxies: individual: NGC 5291 – stars: formation – HII regions – intergalactic medium

### 1. Introduction

It has long been known that “vast and often very irregular swarms of stars and other matter exist in the spaces between the conventional spiral, elliptical, and irregular galaxies” (Zwicky 1951). Those stars have been stripped off from their host galaxies during interactions, the intergalactic medium being too diffuse and hot to allow in situ star formation. However a fraction of the stellar population could nevertheless have been formed locally out of the gas which has been pulled out from peripheral regions of gas rich galaxies. This has been shown to occur in simulations of tidal encounters (Hibbard & Mihos 1995; Duc et al. 2004) as well as in the case of collisional rings (Appleton & Struck-Marcell 1996; Horellou & Combes 2001). This gas which has the metallicity of the parent galaxy (roughly solar metallicity in the case of normal star forming spirals<sup>1</sup>, lower for dwarf galaxies, see Mendes de Oliveira et al. (2006) for instance) can then be reprocessed to form new stars and even new dwarf-like galaxies if the expelled gas reservoir was massive enough. How star formation (SF) proceeds in collisional debris between galaxies,

in an environment which is isolated from the direct influence of the galactic disks, and how it compares with more conventional galactic star formation has so far not been studied in detail.

The number of reported “intergalactic” star forming regions has grown rapidly in the last few years, especially in groups (Mendes de Oliveira et al. 2004) and clusters of galaxies (Cortese et al. 2006). The area around NGC 5291 – an interacting system located at the edge of the Abell 3574 cluster – is one of the most spectacular objects where numerous instances of intergalactic HII regions are found.

The system is composed of an early-type galaxy, NGC 5291, and a highly disturbed companion galaxy, “the Seashell”. The first detailed observation of the system was carried out by Longmore et al. (1979) who detected on each side of NGC 5291 blue clumps identified as giant extragalactic HII regions. The spectra of some of them were obtained thanks to an object prism survey of HII galaxies (Maza et al. 1991; Peña et al. 1991). Malphrus et al. (1997) used the Very Large Array to map the neutral gas of the system. They discovered a huge asymmetrical ring-like structure connected to NGC 5291. It turned out to be one of the two most gas rich objects in the Southern hemisphere (Koribalski et al. 2004). The HI structure consists of a series of

<sup>1</sup> Taking  $12 + \log(O/H) = 8.66$  for the solar metallicity (Asplund et al. 2005).

### Populations stellaires vieilles : quelle contamination ?

Si les TDGs possèdent un milieu interstellaire typique de galaxies spirales et des conditions de formation stellaire proches de celles-ci, elles s'en démarquent toutefois par le contenu de leurs populations stellaires. Selon nos modèles numériques, les TDGs ont une fraction initiale de gaz élevée et une population stellaire âgée sous-jacente peu importante. Comment le vérifier à l'aide d'observations ?

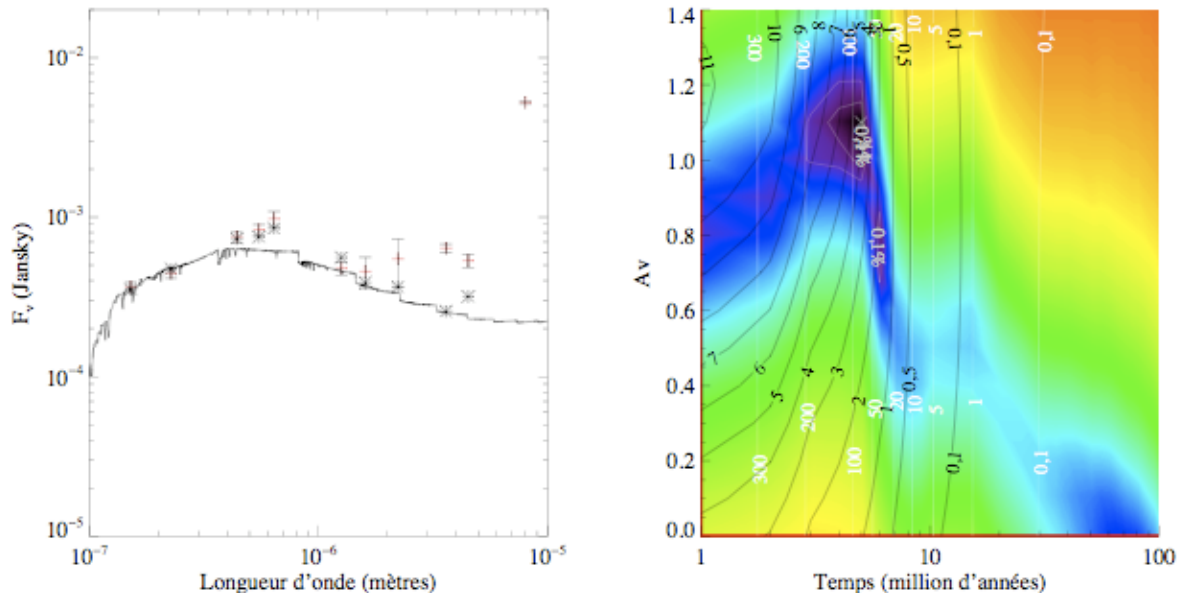


FIG. 4.1 – *Left* Modelisation of the region NGC 5291N with a stellar evolutionary synthesis model (PegaseII) for which the secondary starburst largely dominates the primary (with a mass ratio of 100), as suggested by the numerical model of the collision. The observed values are shown in red. The stars correspond to the values of the model taking into account the line emission. Note the mismatch between the observations and the model beyond  $2 \mu\text{m}$ . Including a larger proportion of old stars might fill the gap, but would spoil the fit in the UV to optical regime. The IR excess at  $2 \mu\text{m}$  is most probably caused by a contamination by very hot dust and at longer wavelength by the well known (and observed) emission of PAHs. A dust model would be useful to solve this issue. *Right* Probability that the population synthesis model is correct, as judged by the  $\chi^2$  indicator, as a function of extinction and time since the secondary starburst.

Weilbacher et al. (2000) (article ci-dessous) puis Boquien (2007) ont confronté les données photométriques d'un échantillon d'objets de marée à des codes de synthèse spectrale évolutive pour tenter d'estimer la fraction d'étoiles issues du disque de leurs galaxies parents à celle née in situ dans les débris de collision. Les modèles reproduisaient une flambée de formation stellaire secondaire, quasi instantanée, superposée à une histoire de formation stellaire plus calme, avec un taux décroissant lentement avec le temps typique de galaxie spirale. Plus spécifiquement Weilbacher (2002) a tracé les courbes produites par le modèle Galev pour des flambées secondaires de différentes intensités sur des diagrammes couleur-couleur optiques. Boquien (2007) a quant à lui ajusté les modèles PegaseII (Fioc et Rocca-Volmerange 1999) sur des diagrammes de distribution spectral d'énergie allant de l'ultraviolet lointain à l'infrarouge proche, tout en essayant de reproduire la largeur équivalente de la raie  $H\beta$  mesurée dans les régions HII, ainsi que leur extinction et leur métallicité. Les paramètres ajustables étaient la fonction de masse initiale des étoiles, la métallicité, l'âge, l'intensité relative et le taux de décroissance des flambées primaires et secondaires, ainsi que l'extinction.

Malgré les progrès notables qu'elle apporte, cette dernière méthode reste insuffisante pour déterminer avec précision l'importance de la population stellaire âgée. En effet, de l'UV à l'optique, les populations jeunes occultent par leur luminosité les populations vieilles. Ces dernières commencent à se signaler dans l'infrarouge proche, domaine pour lequel les erreurs sur notre photométrie d'ouverture (mesurée sur Terre) demeurent trop importantes pour être contraignantes. De plus, nous avons pu mettre en évidence un excès de luminosité dans la bande K (à  $2.2 \mu\text{m}$ ) par rapport à tous les modèles réalistes considérés que nous avons attribué à une contamination par de l'émission par des poussières très chaudes (voir Figure 4.1). Jusqu'à présent, l'émission des poussières n'était prise

en compte qu'au delà de  $3 \mu\text{m}$ . Un ajustement correct de la SED des débris de collision présentant des sursauts de formation stellaire importants passe donc par l'adoption en plus des codes stellaires de modèles sophistiqués de poussières.

#### **Perspectives : contraintes sur la fonction de masse initiale**

Les TDGs pour lesquelles la contribution en masse des étoiles vieilles est peu importante voire négligeable peuvent être considérées comme les seules galaxies *jeunes* de l'Univers proche. Parce-qu'elles se composent pour l'essentiel d'une population stellaire unique (SSP pour Single Star Population), la forme de leur diagramme spectral d'énergie (SED) est particulièrement sensible à la fonction de masse initiale (IMF, pour Initial Mass Function). Ainsi en théorie, un ajustement de la SED devrait contraindre l'IMF, comme c'est le cas pour les amas globulaires. On obtiendrait ainsi une contrainte à l'échelle d'une galaxie. Cette technique passe toutefois par une collecte de données à haute précision qui s'avère plus problématique pour des objets étendus tels les TDGs que pour des amas stellaires compacts.

#### **Formation des amas globulaires dans les débris de collision**

Si les naines de marée, comme définies dans le chapitre 3.1.1, forment des étoiles de manière aussi (peu) efficaces que dans les disques de galaxies spirales, localement dans les débris de collision ont pu naître des amas stellaires denses avec une efficacité très élevée. La littérature spécialisée abonde d'articles relatant la présence de super amas stellaires jeunes dans les résidus de fusion galactiques (voir références dans le chapitre 1.4), y compris dans les débris de collision. La galaxie dite du têtard (Tadpole Galaxy), étudiée entre autres par [de Grijs et al. \(2003b\)](#), en fournit un exemple spectaculaire. La naissance de tels amas, dont une fraction d'entre eux évolueront en amas globulaires, a pu être reproduite grâce aux simulations à très haute résolution ([Bournaud et al. 2008](#)), présentées dans le chapitre 2.1.2. Malheureusement, nous ne disposons pas encore des observations ad-hoc (en particulier de la composante gazeuse) qui permettraient d'explicitier le mécanisme de formation stellaire dans cet environnement particulier. Diffère-t'il de celui qui prévaut dans les régions plus centrales de systèmes en interaction où les SSCs abondent ? Les amas se forment-ils là où la pression locale, la vitesse turbulente ou des chocs augmente ?

#### 4.1.5 Article : *Tidal dwarf galaxies in a sample of interacting galaxies*

Weilbacher et al. (2000) utilisent des diagrammes couleur-couleur optiques pour essayer de contraindre, à l'aide d'un modèle de synthèse stellaire évolutif, l'histoire de la formation stellaire dans des candidats naines de marée. L'échantillon provient d'une dizaine de systèmes en interaction présentant pour la plupart des queues stellaires optiques proéminentes, dominées par les étoiles arrachées des disques des galaxies parents. Pour ces objets, la composante stellaire jeune ne correspond qu'à 18% de la masse totale. Ils diffèrent de ce point de vue des TDGs plus massives étudiées par Boquien (2007), situées en bout de queues de marées et probablement bien plus riches en gaz.

#### Abstract

*We present deep optical B,V,R images of a sample of 10 interacting systems which were selected for their resemblance to disturbed galaxies at high redshift. Photometry is performed on knots in the tidal features of the galaxies. We calculate a grid of evolutionary synthesis models with two metallicities and various burst strengths for systems consisting of some fraction of the stellar population of a progenitor spiral plus starburst. By comparison with two-color diagrams we interpret the photometric data, select from a total of about 100 condensations 36 star-forming objects that are located in the tidal features and predict their further evolution. Being more luminous by 4 mag than normal H II regions we argue that these objects could be tidal dwarf galaxies or their progenitors, although they differ in number and mean luminosity from the already known tidal dwarf galaxies typically located at the end of tidal tails in nearby giant interacting systems. From comparison with our models we note that all objects show young burst ages. The young stellar component formed in these tidal dwarf candidates contributes up to 18% to the total stellar mass at the end of the starburst and dominates the optical luminosity. This may result in fading by up to 2.5 mag in B during the next 200 Myrs after the burst.*

## Tidal dwarf candidates in a sample of interacting galaxies<sup>\*,\*\*</sup>

P.M. Weilbacher<sup>1</sup>, P.-A. Duc<sup>2,3</sup>, U. Fritze von Alvensleben<sup>1</sup>, P. Martin<sup>4</sup>, and K.J. Fricke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitätssternwarte, Geismarlandstrasse 11, 37083 Göttingen, Germany

<sup>2</sup> CNRS URA 2052 and CEA, DSM, DAPNIA, Service d'Astrophysique, Centre d'Etudes de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

<sup>3</sup> Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge, CB3 0HA, UK

<sup>4</sup> Canada-France-Hawaii Telescope, P.O. Box 1597, Kamuela, HI 96743, USA

Received 30 July 1999 / Accepted 28 March 2000

**Abstract.** We present deep optical  $B, V, R$  images of a sample of 10 interacting systems which were selected for their resemblance to disturbed galaxies at high redshift. Photometry is performed on knots in the tidal features of the galaxies. We calculate a grid of evolutionary synthesis models with two metallicities and various burst strengths for systems consisting of some fraction of the stellar population of a progenitor spiral plus starburst. By comparison with two-color diagrams we interpret the photometric data, select from a total of about 100 condensations 36 star-forming objects that are located in the tidal features and predict their further evolution. Being more luminous by 4 mag than normal H II regions we argue that these objects could be tidal dwarf galaxies or their progenitors, although they differ in number and mean luminosity from the already known tidal dwarf galaxies typically located at the end of tidal tails in nearby giant interacting systems. From comparison with our models we note that all objects show young burst ages. The young stellar component formed in these tidal dwarf candidates contributes up to 18% to the total stellar mass at the end of the starburst and dominates the optical luminosity. This may result in fading by up to 2.5 mag in  $B$  during the next 200 Myrs after the burst.

**Key words:** galaxies: formation – galaxies: interactions – galaxies: photometry – galaxies: evolution

### 1. Introduction

Most investigations of interacting and merging galaxies have essentially focussed on the phenomena occurring in their inner regions. However, for a few spectacular cases like the Antennae (Mirabel et al. 1991), Arp 105 (Duc & Mirabel 1994; Duc et al. 1997) and NGC 7252 (Hibbard & Mihos 1995) the enormous tidal tails were investigated in some detail. Massive condensations of stars and H I were found in these tails, the so called Tidal Dwarf Galaxies (TDGs).

*Send offprint requests to:* P. Weilbacher (weilbach@uni-sw.gwdg.de)

\* Based on observations collected at the European Southern Observatory, La Silla, Chile (ESO No 058.A-0260).

\*\* Tables 5–14 are only available in electronic form at the CDS via anonymous ftp to 130.79.128.5 or via <http://cds.u-strasbg.fr/Abstract.html>

TDGs are characterized by a luminosity comparable with that of typical dwarf galaxies, but which span a range in oxygen abundance of  $8.3 \lesssim 12 + \log(O/H) \lesssim 8.6$  equivalent to metallicities of  $4 \cdot 10^{-3} \lesssim Z_{\text{TDG}} \lesssim 8 \cdot 10^{-3}$  with a mean of  $Z \approx 7 \cdot 10^{-3} \approx Z_{\odot}/2.6$ .<sup>1</sup> Metallicities of TDGs are therefore higher than those of other dwarf galaxies with comparable luminosity (Duc & Mirabel 1997, 1998). TDGs have blue colors as a result of an active starburst. Most known TDGs have high H I masses from which total masses of the order of  $10^9 M_{\odot}$  have been estimated. They are gravitationally bound and in a few interacting systems evidence for their kinematical independence has been found (e.g. Duc et al. 1997; Duc & Mirabel 1998). These systems together with the strong increase of the galaxy merger rate with redshift gave rise to speculations about a possible contribution of TDGs to the faint blue galaxy excess at high redshift (Fritze-v. Alvensleben et al. 1998). Barnes & Hernquist (1992) observed the formation of TDGs in their numerical simulations. Their 3D N-body/SPH-code created several massive bound condensations along the tidal tails. At first, their mass is dominated by the stellar component. Later on, gas from the tail might fall into these condensations. Elmegreen et al. (1993) proposed a different scenario. They have used a 2D N-body code including dissipation for the gas component in which gaseous condensations form first.

Observations in most cases show both components, neutral gas and stars, along the tails as well as in their condensations. In an optically identified condensation, determination of the relative fraction of young stars – born in situ from the collapse of tidally extracted H I – to old stars – pulled out from the progenitor disk(s) – might constrain the above mentioned numerical models. Because the systems studied here are too distant to be resolved into stars, estimating these relative stellar fractions can only be done from multi-band integrated photometric measurements in comparison with an evolutionary synthesis model. Photometric work on the tidal features of several classical interacting systems has been carried out by Schombert et al. (1990). Studies by

<sup>1</sup> For metallicity we use the notation of  $Z$  (as the proportion of heavy elements given in the Geneva stellar tracks which our models are based on) throughout this paper and give a comparison with the solar value  $Z_{\odot} = 0.018$  where appropriate.

#### 4.1.6 Travaux de thèse : P. Weilbacher et M. Boquien

Ci-dessous les résumés des deux thèses que j'ai (co-)encadrées sur les populations stellaires dans les queues de marée.

##### **P. Weilbacher (2002) : On the Formation and Evolution of Dwarf Galaxies in Tidal Tails**

*Tidal Dwarf Galaxies (TDGs) are a class of dwarf galaxies that form in tidal tails of interacting giant galaxies during close encounters or merging. As such they offer the possibility of observing galaxy formation in the local universe. Previously, only a few objects of this kind were known observationally. The objective of this thesis is to combine, for the first time, photometric and spectroscopic observations with evolutionary synthesis models in the wavelength range from the optical to the near-infrared to analyze the stellar populations seen in the first reasonably large sample of Tidal Dwarfs compiled in the course of this work. For this purpose, we selected 14 interacting and merging galaxies. From optical imaging and comparison with models specifically adapted to the star formation history of TDGs, a total of 44 knots in the tidal features were selected as good candidates for TDGs. Subsequently, we employed optical spectroscopy to confirm the association of the knots with the main galaxies and to derive important properties of the objects, like oxygen abundance, Balmer line luminosity and equivalent width, needed as input for further modeling. Additionally, we could show with the spectroscopic data that 13 TDG candidates have velocity fields which suggest that they are dynamically decoupled from their surrounding tidal tail and therefore true Tidal Dwarf Galaxies. Finally, we combined new near-infrared imaging with the optical data for the comparison with new, refined evolutionary synthesis models and showed that the TDG candidates have stellar masses of dwarf galaxies and star formation rates showing them to be experiencing considerable starbursts. While they have strong contributions of young stars to their stellar mass we conclude that most of them have been formed as stellar clumps rather than by the collapse of giant gas clouds.*

##### **M. Boquien (2007) : Formation stellaire intergalactique**

*The work presented here is about star formation in the unusual environment of collisional debris studied for the first time as such. These peculiar regions have an interstellar medium, and in particular a metallicity, similar to that of star forming regions in galactic discs while not undergoing similar environment effects such as density waves in the spiral arms for instance. This study has been conducted with a selection of exceptional systems that have ejected large quantities of gas into the intergalactic medium while also showing some intergalactic star forming regions. Principal Investigator as well as archive spectroscopy and imaging from multi-wavelength observations ranging from far ultraviolet to mid-infrared have been used. Withal a model has been built in order to reproduce the spectral energy distributions of intergalactic star forming regions and constrain the star formation histories, their extinctions and their fraction of stars coming from the parent galaxies' discs. Comparisons have been performed on the estimation of star formation rates between infrared, H $\alpha$  and ultraviolet wavelengths. This thesis has brought the following main new results :*

- \* some regions seem to be deprived of any old stellar population, and these are ideal laboratories in which to study star formation*
- \* the mid-infrared star formation rate estimator is as reliable as it is in spiral galaxies*
- \* the scatter in the estimation of star formation rates in various bands is similar to that of spiral galaxies and is mainly due to age effects*
- \* the combination of the extinction uncorrected H $\alpha$  line with mid-infrared yields a good estimation of the actual star formation rate*
- \* an important part of star formation, which can be as high as 85%, takes place in the intergalactic medium showing that in a young universe, in which this type of system is much more common than in the nearby universe, star formation from collisional debris can be an important factor of enrichment of the intergalactic.*



## 4.2 Sondes cosmologiques

L'un des progrès majeurs de mes recherches d'entre-thèse a été de réaliser que les naines de marée pouvaient servir de sondes cosmologiques malgré leur petit nombre dans l'Univers local. Une nouvelle fois, les simulations numériques ont largement concouru à cette prise de conscience.

### 4.2.1 Dénombrement des TDGs : le problème des galaxies satellites manquant accentué

Si le modèle cosmologique du Cold Dark Matter (CDM) a connu cette dernière décennie un engouement certain, conforté entre autres par le succès du modèle de concordance, il présente néanmoins quelques pierres d'achoppement. Parmi elles, le problème dit des "satellites manquants" a suscité de nombreux débats. L'Univers qui découle des simulations cosmologiques type CDM foisonne de halos de matière noire de la masse de galaxies naines qui orbitent autour de galaxies massives. Leur nombre excèderait de plusieurs ordres de magnitude celui des galaxies satellites autour de notre référence locale, la Voie Lactée. Depuis que cette difficulté a été portée en exergue (Kauffmann et al. 1993), de nombreuses solutions ont été proposées, tant du côté des modèles - prise en compte en particulier du "feedback" qui réduit le contenu en baryons des halos -, que des observations - découvertes régulières de nouveaux satellites ultra-légers dans la banlieue proche de la Galaxie -. Toutefois ces remèdes ne prennent pas en compte la formation possible de naines de marée lors des fusions galactiques, qui sont inhérentes au scénario hiérarchique du CDM.

En estimant le taux de production et de destruction des TDGs, et en faisant une hypothèse sur l'évolution du taux de fusion galactique avec le redshift, on peut évaluer grossièrement la fraction attendue de TDGs dans le bestiaire extragalactique. Okazaki et Taniguchi (2000) sont ainsi parvenus à la conclusion surprenante que compte tenu de la fréquence élevée des collisions dans le passé, la grande majorité des naines devrait être de marée. Constatant cette prédiction, on pourrait conclure à l'instar de P. Kroupa que le modèle du CDM ne marche pas, car même si, selon ses affirmations, de nombreuses naines locales sont dépourvues de matière noire et donc recyclées, il y a dans l'Univers des galaxies naines qui ne sont pas de marée ! Les divers recensements de TDGs présentés au chapitre 3.2 ne laissent aucun doute la dessus.

En fait, Okazaki et Taniguchi (2000) ont pour cela fait l'hypothèse d'un taux de production et survie à long terme de une à deux TDGs par paire de galaxie. Or nos simulations (Bournaud et Duc 2006) indiquent que cette valeur a largement été sur-évaluée. Nous obtenons un taux de seulement 0.8 TDG vivant 1 milliard d'années par paire, soit par extrapolation 0.1-0.2 TDG pour 10 milliard d'années. En supposant que toutes les fusions permettent la formation de TDGs (majeures ou mineures), nous estimons qu'au maximum 10% des naines pourraient être nées dans des débris de collision. En réalité, toutes les collisions n'offrent pas des conditions favorables, et la fraction de TDGs ne devrait pas dépasser quelques pourcents. Ces nombres sont toutefois globaux ; dans des environnements particuliers - groupes, amas riches en elliptiques - où les collisions galactiques ont été particulièrement fréquentes, la fraction plus élevée de TDGs devrait expliquer en partie la forte anisotropie constatée pour les galaxies satellites (voir chapitre 3.2.4).

### 4.2.2 Formation des TDGs : la nécessité de halos cosmologiques étendus

Le CDM affirme que chaque "galaxie", i.e. la matière baryonique constituée par le gaz et les étoiles, est englobée dans un halo de matière noire étendu, à moins que celle-ci ait fusionné dans une structure plus grande, auquel cas elle ne possède plus un halo individualisé. La taille exacte de ce halo est particulièrement difficile à mesurer à l'aide d'observations. Si les courbes de rotation, obtenues notamment avec le HI, permettent de déterminer la masse totale des halos - à condition que l'on atteigne des rayons galactocentrique où elles deviennent plates - elles ne peuvent contraindre leur forme et leur taille. Il faudrait disposer pour cela de traceurs à très grande distance - au delà de 100 kpc où les baryons manquent. La cinématique des galaxies satellites (e.g. Zaritsky et al. 1997) peut apporter quelques contraintes mais la statistique est un facteur limitant. Autre piste : utiliser les effets de lentille entre galaxies (voir Brainerd et al. 1996, et références à cet article), sensibles à la taille des halos.

Or avec une taille dépassant parfois 100 kpc, les queues de marée sont en principe à même de sonder les parties externes des halos de matière noire : l'absence/présence d'un halo étendu autour des galaxies parents devraient faciliter/resterindre la formation de longues structures. Les études menées par Springel et White (1999) et Dubinski et al. (1999) ont toutefois montré que cette hypothèse était simpliste. Des queues de marée peuvent se former avec des disques massifs englobés dans des halos étendus faiblement concentrés.

Nos travaux sur les TDGs ravivent toutefois l'intérêt des queues de marée pour ce type d'études : si leur taille ne découle pas directement de l'extension du halo, leur structure interne en dépend largement. Le désaccord entre les premières simulations de collision cherchant à produire des naines de marée et qui formaient des condensations de matière tout au long des queues et les observations de TDG massives et gazeuses en bout de queue a pu être levé lorsque des halos de matière noire étendus ont été introduits dans les modèles. Impossible d'obtenir des TDGs réalistes pour des halos de taille inférieure à dix fois celle du disque stellaire, même si cette dernière condition n'est pas suffisante (Bournaud et al. 2003, [article ci-dessous](#)).

En fait, une naine de marée pourra se former si la courbe de rotation de la galaxie parent est plate au delà d'une certaine distance. C'est donc la forme du puits de potentiel qui importe, keplerienne pour un halo tronqué, isotherme autrement. [Duc et al. \(2004a\)](#) présente un modèle simpliste de la réponse du disque externe d'une spirale aux forces de marée, et en donne une explication analytique. Nous avons plus particulièrement mesuré les excursions radiales d'anneaux concentriques de gaz et établi comment elles variaient en fonction de la distance au centre de la galaxie selon le type de potentiel gravitationnel auquel ils étaient confrontés. Pour un halo tronqué, il y a dilution de la matière quel que soit le rayon initial, tandis que pour un halo étendu, elle intervient seulement en deça d'une distance critique, créant ainsi un contraste de densité le long de la queue. Le gaz paraît s'accumuler à son extrémité, avant de s'effondrer pour former une TDG.

---

### 4.2.3 Article : *The large extent of dark matter halos probed by the formation of tidal dwarf galaxies*

L'article [Bournaud et al. \(2003\)](#) examine la propension d'un système en interaction à former ou non des naines de marée massives en bout de queue selon que les galaxies parents sont englobées ou non dans un halo de matière noire massif. Deux simulations numériques quasi-identiques ont été exécutées. Pour une, le halo de matière noire était tronqué. Les deux modèles forment de longues queues, mais dans le cas avec un halo étendu, on observe l'accumulation en bout de queues de grandes quantités de gaz – à l'origine des TDGs massives – tandis que dans le second cas, c'est un chapelet de petites condensations que se forme le long des queues.

#### **Abstract**

*In several interacting systems, gas accumulations as massive as  $10^9 M_{\text{sun}}$  are observed near the tip of tidal tails, and are thought to be possible progenitors of Tidal Dwarf Galaxies. Using N-body simulations of galaxy interactions, we show that the existence of such features requires that dark matter haloes around spiral galaxies extend at least ten times further than the stellar disks. The massive gas clouds formed in our simulations have a kinematical origin and gravitationally collapse into dwarf galaxies that often survive for a few billion years.*

A&A 411, L469–L472 (2003)  
 DOI: 10.1051/0004-6361:20031520  
 © ESO 2003

**Astronomy  
&  
Astrophysics**

Letter to the Editor

## The large extent of dark matter haloes probed by the formation of tidal dwarf galaxies

F. Bournaud<sup>1,2</sup>, P.-A. Duc<sup>1,3</sup>, and F. Masset<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEA/DSM/DAPNIA, Service d'Astrophysique, Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

<sup>2</sup> École Normale Supérieure, 45 rue d'Ulm, 75005 Paris, France

<sup>3</sup> CNRS FRE 2591

Received 4 July 2003 / Accepted 27 September 2003

**Abstract.** In several interacting systems, gas accumulations as massive as  $10^9 M_{\odot}$  are observed near the tip of tidal tails, and are thought to be possible progenitors of Tidal Dwarf Galaxies. Using  $N$ -body simulations of galaxy interactions, we show that the existence of such features requires that dark matter haloes around spiral galaxies extend at least ten times further than the stellar disks. The massive gas clouds formed in our simulations have a kinematical origin and gravitationally collapse into dwarf galaxies that often survive for a few billion years.

**Key words.** galaxies: formation, evolution, interactions, haloes

### 1. Introduction

Dark matter haloes are known to surround galaxies, but whether they extend much further than visible matter is still debated. Standard cosmological models based on Cold Dark Matter theories predict that the dark halo of a galaxy should extend and maintain large circular velocities up to its virial radius, that is about 200 kpc for a galaxy of the mass of the Milky Way (Navarro et al. 1996). This result is yet difficult to check by observations. Rotation curves of spiral galaxies can shed light on dark matter (DM) only at small radii and in the disk plane. At larger distances, one may however take advantage of the special location or morphology of some peculiar systems to probe the dark matter distribution. The kinematics of polar rings can give information on the flattening of dark haloes (Iodice et al. 2003). The morphology of the long tidal tails (Springel & White 1999; Dubinski et al. 1999) and the distribution and kinematics of satellite galaxies (Zaritsky & White 1994; Erickson et al. 1999; Ibata et al. 2001) can be used to constrain the shape of dark haloes. Finally one may study the internal dynamics of Tidal Dwarf Galaxies (TDG) – gravitationally bound objects formed out of tidal material (Duc et al. 2000) – to probe their baryonic DM content and learn whether part of the latter could originally have been located in a galactic disk (Braine et al. 2001).

In this letter, we show how the very existence of large accumulations of gaseous tidal material, progenitors of massive TDGs, can put some constraints on the large-scale extent of dark matter haloes. HI gas clouds with masses higher than  $10^9 M_{\odot}$  are observed in the outer parts of the long tidal tails

emanating from several nearby interacting systems (e.g. Hibbard & van Gorkom 1996; Duc et al. 1997, 2000; Nordgren et al. 1997; Braine et al. 2001)<sup>1</sup>. These clouds are usually real entities and not the results of projection effects. Indeed, they are able to convert their neutral hydrogen into molecular gas (Braine et al. 2001), form stars and may evolve into objects that have the apparent properties of dwarf galaxies.

The formation of TDGs has been studied in numerical simulations showing the gravitational collapse of stellar clumps in tidal tails (Barnes & Hernquist 1992), or the ejection of gas clouds from the parent galaxy (Elmegreen et al. 1993). These objects have masses of  $10^7$  to  $10^8 M_{\odot}$  and are distributed all along the tails like the TDG candidates found in numerous interacting systems (Weilbacher et al. 2000). However, the most massive TDG progenitors located near the tip of the tidal filaments have not yet been reproduced in these simulations.

We present here new numerical simulations that aim at exploring two issues: (1) how do HI clouds as massive as  $10^9 M_{\odot}$  form in tidal tails? (2) are such clouds transient features that quickly fall back into their parent galaxy, or are they the progenitors of long-lived objects able to contribute significantly to the overall population of dwarf galaxies and have a cosmological importance (Hunter et al. 2000; Okazaki & Taniguchi 2000)? We will show that the answers to these questions also shed some light on the DM haloes of galaxies.

Send offprint requests to: F. Bournaud,  
 e-mail: Frederic.Bournaud@obspm.fr

<sup>1</sup> See also in the HI Rogues Gallery (Hibbard et al. 2001) the collection of interacting doubles (available at <http://www.nrao.edu/astrores/HIrogues/>).

#### 4.2.4 Pesée des TDGs : prospection de(s) baryons manquants

La matière noire exotique dont la nature nous échappe encore n'est pas la seule à se dissimuler : une fraction de la matière ordinaire, c'est à dire des baryons, peut être considérée comme noire. Les recensements locaux de ses différentes composantes (étoiles, gaz, poussières) n'ont pas permis de retrouver l'ensemble des baryons formés lors du Big Bang et observés à grand redshift dans la forêt de Lyman (Rauch 1998). Environ 50% manquent à l'appel. L'hypothèse la plus couramment mis en avant est que les baryons sombres résident dans du gaz diffus chaud (warm-hot intergalactic medium, WHIM), très difficilement observable, dans lequel, selon les modèles cosmologiques, baignent les galaxies (Nicastro et al. 2005).

Nous avons utilisé les naines de marée pour montrer qu'une fraction des baryons manquant se trouverait en fait dans les disques stellaires et gazeux des spirales.

##### Masse manquante dans les débris de collision

Si l'essentiel de la matière noire des galaxies se situe dans un halo, et non dans le disque, comme le prévoient les modèles type CDM, les débris de collision ne devraient quasiment pas en contenir. Ils sont en effet exclusivement issus du disque en rotation de leurs galaxies parents. Cette prédiction peut être vérifiée pour des débris qui seraient gravitationnellement liés, et dont la masse dynamique - totale - peut être mesurée et comparée à la masse lumineuse. C'est le cas des naines de marée pour lesquelles des courbes de rotation ont pu être obtenues.

Nos premières estimations de la masse dynamique de quelques TDGs l'ont été grâce à la cinématique du gaz ionisé déterminée dans un premier temps à l'aide de spectroscopie 1D longue fente (Duc et Mirabel 1998), puis à l'aide de données 2D, Fabry-Parot (Bournaud et al. 2004). Elles étaient compatibles avec celles de la masse lumineuse – dominée par le gaz d'hydrogène atomique HI –, prouvant l'absence de matière noire en quantité importante dans les débris de collision.

Toutefois en utilisant le gaz ionisé, les mesures de vitesse sont cantonnées aux régions de formation stellaire, ce qui est insuffisant pour déterminer la masse totale. Pour pallier ce problème, Braine et al. (2000) et Braine et al. (2001) ont estimé la masse dynamique de plusieurs TDGs à partir de la largeur de la raie de monoxyde de carbone CO(1-0) détectée avec l'antenne de 30 mètres de l'IRAM. Autre avantage du gaz moléculaire mis en avant à l'époque par notre groupe : il ne serait présent que dans les régions les plus denses du gaz d'hydrogène atomique puisqu'il résulterait de sa transformation et délimiterait donc parfaitement les frontières de la TDG. On s'affranchit ainsi des effets de projection qui pourraient fausser les mesures (voir chapitre 3.1.2). Une nouvelle fois, avec cette méthode, masse dynamique et lumineuse sont en accord. Pour affiner ces résultats, il conviendrait de disposer de données CO de meilleure qualité. La mesure de la largeur à mi-hauteur des raies souffre du faible rapport signal sur bruit de la raie dont la détection a d'ailleurs été un challenge. Plusieurs équipes dont celle de Smith et Higdon (1994) n'y étaient pas parvenu auparavant. Par ailleurs, depuis nos premières observations pointées de la raie de CO dans les TDGs, des cartographies du gaz moléculaire ont pu être obtenues le long de plusieurs queues de marée (Lisenfeld et al. 2002; Duc et al. 2007; Lisenfeld et al. 2008). Elles ont montré la présence d'émission diffuse de CO en dehors des TDGs et des pics de densité locaux du HI, de sorte que le CO n'est pas le traceur de naine de marée idéal que nous avions un temps espéré.

Aussi Bournaud et al. (2007) (article ci-dessous) ont préféré exploiter des cartes HI obtenues avec le Very Large Array en configuration B. Elles offrent l'avantage d'une résolution spatiale relativement élevée (5 arcsec) qui permet, avec éventuellement l'aide de modèles numériques, de corriger les mesures des effets de projection et surtout de disposer d'une estimation précise de la masse HI associée à la TDG. De plus, les cartes HI fournissent des points de mesure sur les courbes de rotation à des rayons suffisamment grands pour qu'il soit possible de déterminer une masse dynamique. Les premiers résultats significatifs ont été obtenus avec l'anneau collisionnel de NGC 5291. Nous avons pu déterminer des courbes de vitesse dans trois condensations HI montrant des signes de rotation. Elles présentent une forme inattendue : plates alors que les vitesses devraient retomber à grand rayon. Cet écart avec la courbe théorique révèle la présence d'une masse manquante<sup>1</sup>. Toutefois compte tenu de l'échantillonnage limité des courbes de rotation et de certaines incertitudes sur l'orientation et l'état dynamique du système, il convenait d'estimer aussi correctement que possible les barres d'erreur des points de mesure. Cela a été possible grâce à l'utilisation conjointe de données d'observation complémentaires, en particulier des cubes de données Fabry-Perot dans la raie H $\alpha$  et de simulations sur ordinateur. Ainsi, Bournaud et al. (2007) ont construit un modèle numérique à même de reproduire la forme globale et la structure interne de l'anneau collisionnel, en

<sup>1</sup>C'est un procédé similaire qui avait d'ailleurs permis de mettre en évidence la matière noire dans les galaxies spirales

montrant qu'il trouvait son origine dans une collision frontale et à haute vitesse avec un compagnon massif qui se serait produite il y a environ 400 millions d'années. Un [film de la collision](#) montre ainsi comment naissent, se développent et entrent en rotation au sein de l'anneau des objets de la masse de galaxies naines. Sur ces objets virtuels, nous avons pu construire, à différentes époques de la collision, des diagrammes position-vitesse puis des courbes de rotation, avant d'estimer à partir de ces dernières des masses dynamiques, tout comme nous l'avons fait pour les objets réels. Nous avons alors été capables de déterminer dans quelle mesure et à partir de quand cette méthode cinématique permettait de recouvrer la masse totale constituée de tous les ingrédients (gaz, étoiles et matière noire) mis dans les simulations. Nous avons ainsi pu jauger la confiance à donner à nos résultats : pour les trois objets de l'anneau les plus proéminents, la masse dynamique excède d'un facteur 3 la masse lumineuse, somme de la masse HI, H<sub>2</sub> (estimée à partir de l'émission de la raie CO - voir plus loin) et de la masse des populations stellaires (déterminée à partir de données de photométrie optique et infrarouge avec une incertitude élevée, mais non gênante dans la mesure où, dans ces objets encore essentiellement gazeux, elle reste modique). Ce différentiel reste modeste par rapport à celui présent dans les naines classiques pour lesquelles la matière noire est très largement prédominante avec des rapports masse sur luminosité dépassant la centaine. Il est néanmoins significatif et implique la présence dans les débris de collision d'une masse manquante.

Des résultats similaires à [NGC 5291](#) ont été obtenus depuis sur le candidat naine de marée [VCC 2062](#) ([Duc et al. 2007](#)) et possiblement dans la queue de marée des [Antennes](#) ([Saviane et al. 2008](#)) même si pour ce dernier système la présence d'une naine de marée gravitationnellement liée a été remise en question ([Hibbard et al. 2001](#); [Bournaud et al. 2004](#)). Nous disposerons bientôt d'autres cartes HI de galaxies en interaction pour lesquels les données déjà acquises sont en cours de traitement.

### L'hypothèse du gaz moléculaire froid

De quoi est donc constitué la masse manquante trouvée dans les débris de collision et d'où provient-elle ? Rappelons qu'elle ne saurait provenir des halos de matière noire tels que décrits par les modèles cosmologiques classiques. Indubitablement, cette matière sombre et pesante provient des disques des galaxies parents. Les modèles conventionnels de la structure des galaxies impliquent qu'elle est faite de baryons.

Une hypothèse naturelle est qu'il s'agit de gaz moléculaire classique H<sub>2</sub> dont la masse aurait été sous-évaluée par les mesures de l'émission millimétrique CO. Une erreur d'un facteur 10 est nécessaire pour réconcilier masses lumineuse et dynamique. Le facteur de conversion CO-H<sub>2</sub> est très incertain et dépendrait entre autres de la métallicité. Dans les galaxies naines sous métalliques du Groupe Local (avec des métallicités d'au plus un dixième de celle du Soleil), le rapport  $N(\text{H}_2)/I(\text{CO})$  est au moins 10 fois, jusqu'à 100 fois, celui mesuré dans la Voie Lactée ([Leroy et al. 2007](#)). Toutefois [Bolatto et al. \(2008\)](#) ont montré que ces différences ne viennent que de la composante diffuse du gaz moléculaire. De toute manière, les débris de collision considérés dans notre étude ont un milieu interstellaire similaire à celui présent dans les disques galactiques, avec une métallicité quasi-solaire (cf paragraphe [4.1.2](#)) : c'est donc le facteur de conversion galactique qui devrait a priori s'appliquer. Dans ces conditions, si la masse manquante est constituée de gaz moléculaire, elle se présente sous une autre forme que celle habituellement tracée par le CO.

Du gaz moléculaire chaud, décelable dans l'infrarouge moyen à travers ses transitions rotationnelles H<sub>2</sub>S, a d'ailleurs été trouvé avec une certaine abondance dans des régions entregalactiques subissant des chocs violents, comme dans le [Quintette de Stephan](#) ([Appleton et al. 2006](#)) ou dans une moindre mesure dans l'anneau collisionnel de [NGC 5291](#) ([Higdon et al. 2006](#)). Les quantités mises à jour sont toutefois bien trop faibles pour rendre compte de la masse manquante. Dans notre Galaxie, [Grenier et al. \(2005\)](#) avaient déjà montré la présence de nuages de gaz "noirs" dans la banlieue solaire, indirectement dévoilés par l'émission  $\gamma$  résultant de leur interaction avec les rayons cosmiques. Dans un environnement plus semblable à celui des débris de collision, [Miville-Deschênes et al. \(2005\)](#) ont mis en évidence dans les nuages HI à haute vitesse du Groupe Local de la poussière qu'ils attribuent à de petites condensations de gaz moléculaire avec de très faibles facteurs de remplissage mais qui ponctuellement auraient une densité de colonne 5 fois celle mesurée pour la composante HI.

C'est à une forme semblable de H<sub>2</sub> que [Bournaud et al. \(2007\)](#) font appel pour rendre compte de la masse manquante dans les débris de collision : du gaz moléculaire extrêmement froid et grumeleux dont l'existence a été spéculée par [Pfenninger et al. \(1994\)](#)<sup>2</sup>. Un tel gaz est par nature moins dissipatif que le gaz d'hydrogène traditionnel et donc moins susceptible de se concentrer comme ce dernier dans les naines de marée. Cette propriété donnerait

<sup>2</sup>Il s'agissait à l'époque de trouver un succédané à la matière noire exotique, mais nous nous plaçons ici dans le cadre conventionnel où le halo de matière noire est le facteur déterminant de la forme des courbes de rotation des galaxies parents.

une explication naturelle aux courbes de rotation plates telles que nous les avons observées. Ce gaz ne participe pas directement à la formation stellaire, mais il peut se transformer en gaz plus chaud "utilisable" avec un taux de conversion qui dépend du flux UV ambiant. Selon [Revaz et al. \(2008\)](#), l'ajout de baryons sombres sous forme de  $H_2$  froid, mais dynamiquement "chaud", c'est à dire avec une dispersion de vitesse plus importante que le HI et  $H_2$  visibles, ne pose pas de problème de stabilité du disque, même lorsque la masse gazeuse totale est multipliée par un facteur 5. Cette composante pourrait d'ailleurs apporter une explication à la présence d'une structure spirale dans le disque HI de la galaxies bleue compacte NGC 2915 ([Masset et Bureau 2003](#)) ou au fait que les courbes de rotation du HI suivent celles de la matière noire, excepté dans les régions les plus externes des galaxies ([Hoekstra et al. 2001](#)).

[Revaz et al. \(2008\)](#) ont inclus pour la première fois le gaz moléculaire froid, sombre, dans une collision de galaxies similaire à celle à l'origine de l'anneau de NGC 5291. Avec une fraction de gaz sombre égale à 70 % de la masse de gaz visible, ils sont parvenus à obtenir dans les naines de marée des courbes de rotation similaires à celles observées, en particulier leur aplatissement à grand rayon (voir figure 4.2).

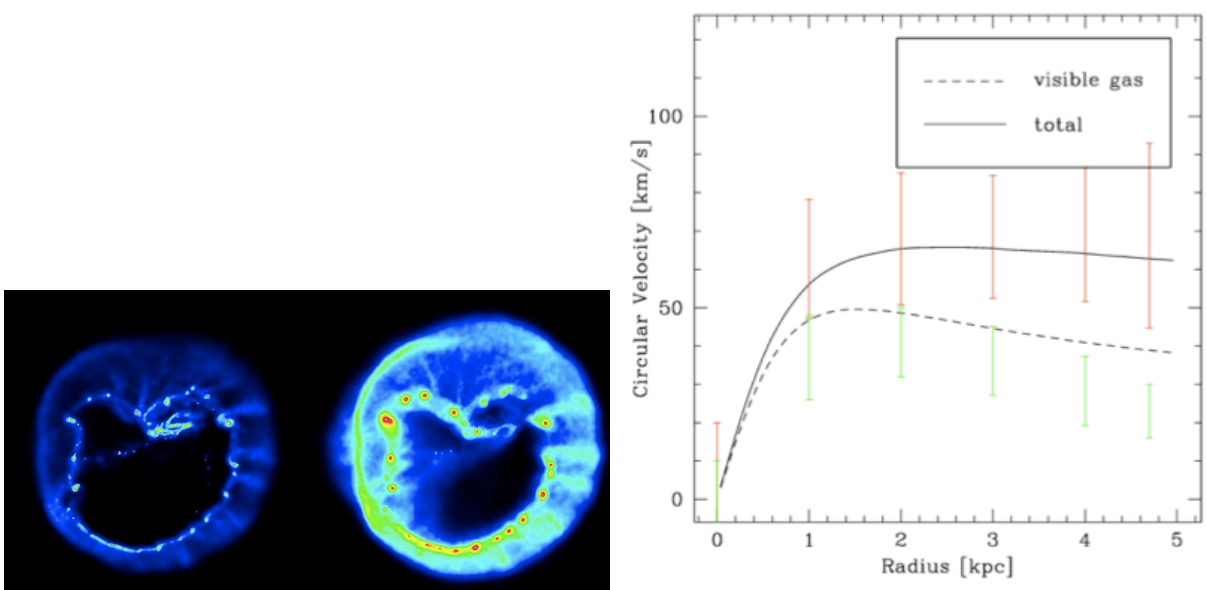


FIG. 4.2 – *Left panel* : Response of the simulated visible (left) and dark (right) gas about 50 Myr after an head-on collision which formed a clumpy collisional ring similar to that of NGC 5291. *Right panel* : Velocity curve of one condensation in the ring. Note how thanks to the dark component, the curve flattens at high radius, instead of decreasing (Courtesy of Yves Revaz).

Ainsi compte tenu du succès du modèle de Y. Revaz ainsi que des évidences observationnelles annexes, l'hypothèse du gaz moléculaire froid et donc sombre est celle que nous privilégions pour expliquer la masse manquante constatée dans les TDGs. Toutefois, suite à la publication de [Bournaud et al. \(2007\)](#), des modèles alternatifs, bien moins conventionnels, ont été proposés. Ils sont relatés ci-dessous pour information.

#### 4.2.5 Cinématique des TDGs : contraintes sur les théories alternatives de la gravité

##### Matière noire exotique dans les disques stellaires

Nous avons exclu dans le paragraphe précédent la présence de matière noire exotique dans les TDGs en s'appuyant sur les simulations qui indiquent que les débris de collision n'accrètent que très peu de particules du halo. Mais naturellement, si le disque des galaxies en contient, ce sera aussi le cas pour les TDGs. Or plusieurs publications récentes avancent cette hypothèse jusque là considérée comme exotique. Ainsi, selon [Read et al. \(2008\)](#), les disques pourraient acquérir de la matière noire issue de galaxies naines satellites orbitant à faible inclinaison et qu'elles auraient absorbées. Au niveau du soleil, la densité du disque noir serait comprise entre 0.2 et 1 fois celle du halo, ce qui reste toutefois insuffisant pour que cette composante joue un rôle cinématique dans le disque stellaire ... comme dans les débris de collision.

### Gravité modifiée : MOND

Dernière hypothèse que nous envisagerons ici à l'instar de [Milgrom \(2007\)](#) et [Gentile et al. \(2007\)](#) : il n'y aurait pas de masse manquante dans les naines de marée. L'écart constaté avec la dynamique newtonienne résulterait "simplement" d'une modification de la gravité pour des paramètres d'accélération typiques de galaxies naines. Ainsi ces auteurs sont parvenus à reproduire les courbes de vitesse mesurées dans les naines de NGC 5291 dans le cadre de MOND ("MODified Newtonian Dynamics"), sans avoir à changer le principal paramètre libre de cette théorie, la constante d'accélération  $a$ , établie pour rendre compte des courbes de rotation aplaties des galaxies spirales. Dans la mesure où les TDGs avaient jusqu'alors été ignorées dans l'établissement de cette théorie, on pourrait considérer que leurs courbes de rotation anormales étaient une prédiction de MOND.

Il convient toutefois de nuancer ces propos. En effet, même si elles permettent d'exclure un simple potentiel keplerien (avec retombée des vitesses à grand rayon), les barres d'erreur observationnelles sont importantes et sont probablement compatibles avec une large plage de valeurs de la constante d'accélération. A contrario, si nous parvenons à diminuer les incertitudes sur les mesures des vitesses, nous pourrions apporter de plus fortes contraintes sur la validité de MOND. Il n'est ainsi pas exclu que dans le futur, plutôt que d'accréditer cette théorie de la gravité modifiée, les TDGs fournissent des contre-exemples, tels il y a quelques années le "Bullet's Cluster" ([Clowe et al. 2004](#)).

Les travaux relatés plus hauts étaient purement théoriques et reposaient sur les paramètres observationnels fournis par [Bournaud et al. \(2007\)](#). Depuis leur publication, [Tiret et Combes \(2007\)](#) ont réalisé les premières simulations numériques en régime MONDien. Si plusieurs différences apparaissent avec le régime newtonien – notamment les temps caractéristiques de fusion qui sont sensiblement augmentés –, les interactions MONDiennes produisent aussi de grosses condensations dans les queues de marées très similaires aux TDGs observées (voir figure 4.3). A vrai dire, un tel résultat était attendu. Nous avons indiqué plus tôt qu'une condition nécessaire à la formation des naines de marée dans les queues était que celles-ci ressentent un potentiel isotherme ou équivalent, se traduisant par une courbe de rotation plate pour leurs galaxies parents. Or MOND a précisément été construit pour reproduire une telle propriété. Ainsi, d'une certaine mesure, les simulations en régime MONDien de O. Tiret confortent nos résultats sur l'origine cinématique des TDGs.

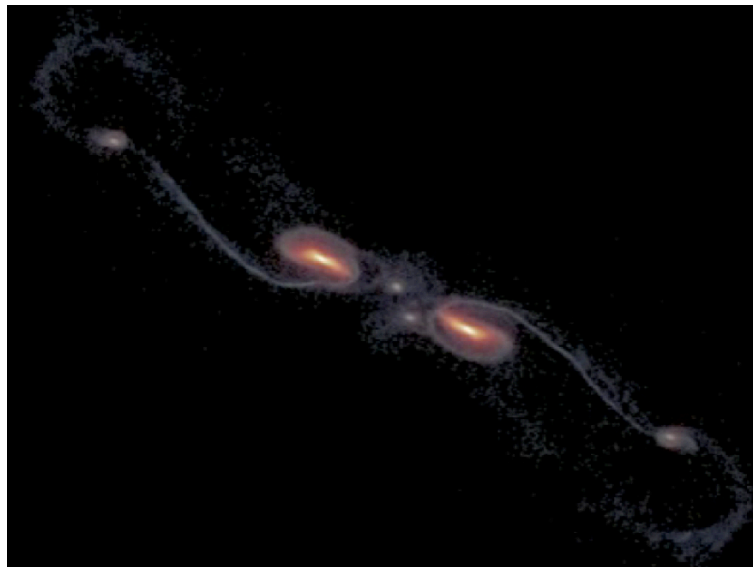


FIG. 4.3 – The formation of Tidal Dwarf Galaxies within the MOND framework. Simulations of a collision between two massive spirals with a code implementing the MOND theory. Courtesy of Olivier Tiret.



#### 4.2.6 Article : *Missing mass in collisional debris from galaxies*

L'article [Bournaud et al. \(2007\)](#) présente pour la première fois des observations suggérant la présence dans des débris de collision d'une masse cachée dont on ignore encore la nature, mais qui devait se trouver dans le disque de la galaxie parent. Ce résultat a été obtenu en étudiant l'anneau gazeux géant de NGC 5291, reste d'une collision à haute vitesse avec un compagnon massif.

##### **Abstract**

Recycled dwarf galaxies can form in the collisional debris of massive galaxies. Theoretical models predict that, contrary to classical galaxies, these recycled galaxies should be free of nonbaryonic dark matter. By analyzing the observed gas kinematics of such recycled galaxies with the help of a numerical model, we demonstrate that they do contain a massive dark component amounting to about twice the visible matter. Staying within the standard cosmological framework, this result most likely indicates the presence of large amounts of unseen, presumably cold, molecular gas. This additional mass should be present in the disks of their progenitor spiral galaxies, accounting for a substantial part of the so-called missing baryons.

## References and Notes

- B. B. Zhou, S. J. Elledge, *Nature* **408**, 433 (2000).
- M. B. Kastan, J. Bartek, *Nature* **432**, 316 (2004).
- Y. Shiloh, *Trends Biochem. Sci.* **31**, 402 (2006).
- J. Ptacek *et al.*, *Nature* **438**, 679 (2005).
- N. Dephoure, R. W. Howson, J. D. Blethrow, K. M. Shokat, E. K. O'Shea, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **102**, 17940 (2005).
- A. R. Salomon *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **100**, 443 (2003).
- J. Rush *et al.*, *Nat. Biotechnol.* **23**, 94 (2005).
- S. T. Kim, D. S. Lim, C. E. Canman, M. B. Kastan, *J. Biol. Chem.* **274**, 37538 (1999).
- T. O'Neill *et al.*, *J. Biol. Chem.* **275**, 22719 (2000).
- D. Cortez, G. Glick, S. J. Elledge, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **101**, 10078 (2004).
- Y. Ziv *et al.*, *Nat. Cell Biol.* **8**, 870 (2006).
- M. Mann, *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* **7**, 952 (2006).
- S. V. Kozlov *et al.*, *EMBO J.* **25**, 3504 (2006).
- G. P. Ho, S. Margossian, T. Taniguchi, A. D. D'Andrea, *Mol. Cell. Biol.* **26**, 7005 (2006).
- K. C. Thome *et al.*, *J. Biol. Chem.* **275**, 35233 (2000).
- A. Smogorzewska *et al.*, *Cell* **129**, 289 (2007).
- C. M. Azzalin, J. Lingner, *Curr. Biol.* **16**, 433 (2006).
- H. Huang, K. M. Regan, Z. Lou, J. Chen, D. J. Tindall, *Science* **314**, 294 (2006).
- N. Yoshizawa-Sugata, H. Masai, *J. Biol. Chem.* **282**, 2729 (2006).
- H. Y. Yoo, A. Shevchenko, W. G. Dunphy, *J. Biol. Chem.* **279**, 53353 (2004).
- B. Xia *et al.*, *Mol. Cell* **22**, 719 (2006).
- R. Groisman *et al.*, *Cell* **113**, 357 (2003).
- A. Hirao *et al.*, *Science* **287**, 1824 (2000).
- P. T. Yazdi *et al.*, *Genes Dev.* **16**, 571 (2002).
- S. T. Kim, B. Xu, M. B. Kastan, *Genes Dev.* **16**, 560 (2002).
- D. Q. Yang, M. B. Kastan, *Nat. Cell Biol.* **2**, 893 (2000).
- L. J. Niedernhofer *et al.*, *Nature* **444**, 1038 (2006).
- K. M. Brumbaugh *et al.*, *Mol. Cell* **14**, 585 (2004).
- B. Wang *et al.*, *Science* **316**, 1194 (2007).
- Single-letter abbreviations for the amino acid residues are as follows: A, Ala; C, Cys; D, Asp; E, Glu; F, Phe; G, Gly; H, His; I, Ile; K, Lys; L, Leu; M, Met; N, Asn; P, Pro; Q, Gln; R, Arg; S, Ser; T, Thr; V, Val; W, Trp; and Y, Tyr.
- B. A. Ballif, Z. Cao, D. Schwartz, K. L. Carraway III, S. P. Gygi, *J. Proteome Res.* **5**, 2372 (2006).
- B. DeLaBarre, A. T. Brunger, *Nat. Struct. Biol.* **10**, 856 (2003).
- We thank T. de Lange, A. D'Andrea, A. Carr, K. Nakanishi, M. Jasin, H. Takai, F. Graham, D. Zhang, D. Chou, B. Wang, M. Naylor, J.-M. Li, D. Lee, C. Zhou, and C. Cotta-Ramusino for reagents and advice; J. Qin for antibodies and sharing unpublished data; K. Matsuoka for helping with preparation of figures; and P. Park and Q. Xu for help with the bioinformatic analysis. A.S. is supported by T32CA09216 to the Pathology Department at the Massachusetts General Hospital. K.E.H. is a Leukemia and Lymphoma Society Special Fellow. This work was supported by grants from NIH, including National Institute of Allergy and Infectious Diseases 1U19A1067751 (S.J.E.), and Department of Defense (S.J.E. and S.P.G.) and by the A-T (Ataxia-Telangiectasia) Medical Research Foundation, the A-T Children's Project, the Israel Science Foundation, the A-T Medical Research Trust, the Israel-Germany Joint Program on Cancer Research, the German Cancer Center DKFZ (Deutsches Krebsforschungszentrum), and the A-T Ease Foundation (Y.S.). S.J.E. is an investigator with the Howard Hughes Medical Institute.

## Supporting Online Material

www.sciencemag.org/cgi/content/full/316/5828/1160/DC1  
Materials and Methods

Figs. S1 to S7  
Tables S1 to S10  
References

24 January 2007; accepted 6 April 2007  
10.1126/science.1140321

## REPORTS

## Missing Mass in Collisional Debris from Galaxies

Frédéric Bournaud,<sup>1\*</sup> Pierre-Alain Duc,<sup>1</sup> Elias Brinks,<sup>2</sup> Médéric Boquien,<sup>1</sup> Philippe Amram,<sup>3</sup> Ute Lisenfeld,<sup>4,5</sup> Bärbel S. Koribalski,<sup>6</sup> Fabian Walter,<sup>7</sup> Vassilis Charmandaris<sup>8,9,10</sup>

Recycled dwarf galaxies can form in the collisional debris of massive galaxies. Theoretical models predict that, contrary to classical galaxies, these recycled galaxies should be free of nonbaryonic dark matter. By analyzing the observed gas kinematics of such recycled galaxies with the help of a numerical model, we demonstrate that they do contain a massive dark component amounting to about twice the visible matter. Staying within the standard cosmological framework, this result most likely indicates the presence of large amounts of unseen, presumably cold, molecular gas. This additional mass should be present in the disks of their progenitor spiral galaxies, accounting for a substantial part of the so-called missing baryons.

When galaxies collide, gravitational forces cause the expulsion of material from their disks into the intergalactic medium. In this debris, dense self-gravitating structures form. Because they can reach masses typical of those of dwarf galaxies and they show ordered rotation and active star formation (1–8), they deserve to be considered galaxies in their own right, albeit “recycled” ones. Whether these recycled dwarf galaxies contain dark matter can put strong constraints on the nature and distribution of this enigmatic constituent of the Universe. Indeed, standard theory (9–11) predicts that they differ from classical galaxies by being nearly free of nonbaryonic dark matter (5, 7, 12). According to the widely accepted  $\Lambda$ CDM (cold dark matter with cosmological constant) model (13), the matter density of the Universe is dominated by nonbaryonic dark matter. This matter is expected to surround galaxies in the form of large halos supported by random motions (9). Recycled galaxies are expected to have little, if any, dark

matter of this type, because only material from rotating disks is involved in the galactic recycling process. In addition to nonbaryonic dark matter, part of the baryonic component is “dark” as well [i.e., it is known to have existed in the early Universe (14), but it is hard or impossible to detect locally today]. It has been speculated to be cold gas (15, 16) but is most widely thought to reside in a diffuse warm-hot intergalactic medium (WHIM) that surrounds galaxies (10, 11) and that cannot be substantially accumulated in collisional debris. Hence, recycled dwarf galaxies are predicted by conventional views to be mostly free of both baryonic and nonbaryonic dark matter. We put these views to the test, measuring the mass of three galaxies formed in the collisional debris around galaxy NGC5291 (17, 18).

The galaxy NGC5291 is surrounded by a large, gas-rich ring of collisional debris (17). In several places, gas has gathered into self-gravitating, rotating dwarf galaxies where new stars form (Fig. 1). We studied the kinematics of atomic

hydrogen in the ring through its 21-cm emission line, using the National Radio Astronomy Observatory (19) Very Large Array (VLA) interferometer in a high-resolution configuration. We estimated the mass actually present in the dwarf galaxies and compared this to their visible mass (6, 18, 20, 21). We used  $N$ -body simulations that model the gravitational dynamics of stars, gas, and dark matter halos, with 1 million particles for each component. The model also accounts for energy dissipation in the interstellar gas, and the onset of star formation (22), reproducing both the global morphology of the NGC5291 system and the formation of recycled dwarf galaxies in it. These simulations enable us to date the formation of the system and to study its three-dimensional morphology. According to our model (23), the ring formed during a galaxy collision 360 million years ago and is seen inclined by 45° from the line of sight (Fig. 1 and figs. S1 and S2).

<sup>1</sup>Laboratoire Astrophysique des Interactions Multi-Echelles, Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) Direction des Sciences de la Matière—CNRS—Université Paris Diderot, Laboratoire de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers (Dapnia)/Service d'Astrophysique, CEA/Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France. <sup>2</sup>Centre for Astrophysics Research, University of Hertfordshire, College Lane, Hatfield, AL10 9AB, UK. <sup>3</sup>Observatoire Astronomique Marseille-Provence, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille UMR 6110, 2 place Le Verrier, F-13248 Marseille Cedex 4, France. <sup>4</sup>Departamento Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada, Spain. <sup>5</sup>Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), Post Office Box 3004, 18080 Granada, Spain. <sup>6</sup>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia Telescope National Facility (ATNF), Post Office Box 76, Epping NSW 1710, Australia. <sup>7</sup>Max Planck Institut für Astronomie, Königstuhl 17, 69117 Heidelberg, Germany. <sup>8</sup>Department of Physics, University of Crete, GR-71003 Heraklion, Greece. <sup>9</sup>Foundation for Research and Technology (IESL), Hellas, GR-71110, Heraklion, Greece. <sup>10</sup>Observatoire de Paris, F-75014, Paris, France.

\*To whom correspondence should be addressed. E-mail: frederic.bournaud@cea.fr





---

## Chapitre 5

# Conclusions et perspectives

Les galaxies naines de marée méritaient-elles une seconde thèse après mon travail de doctorat qui leur avait déjà été consacré en 2005 ?

On peut tenter de jauger l'intérêt pour ces objets de manière quantitative à l'aide des indicateurs suivants : L'entrée "Tidal Dwarf" dans le moteur de recherche Google donne 8600 références. Les TDGs sont mentionnées dans les résumés de près de 200 articles listés dans la base de données ADS, dont l'immense majorité publiés après 2005. Il y en a seulement 3 pour la période 1990–2005 alors que l'article qui a attiré l'attention sur ces objets (Mirabel et al. 1992) date de 1992. Les naines de marée ont fait l'objet à ma connaissance de 6 thèses de doctorat, ainsi que de plusieurs ateliers internationaux, sans compter un [symposium IAU](#) qui leur a largement été consacré. Nombre de [communiqués de presse](#) et d'articles dans des journaux de vulgarisation ont fait écho de leur existence. Ces quelques données chiffrées témoignent de la popularité grandissante des TDGs.

Toutefois, les études que j'ai relatées dans cette HDR montrent qu'il convient de relativiser leur importance, ou plus exactement de traiter de cette question au bon niveau. En nombre, les naines de marée sont selon toute vraisemblance insignifiantes, même si cette affirmation ne fait pas l'unanimité. En effet, selon nos travaux, la formation de TDGs, et surtout leur survie, requièrent des conditions très spécifiques – en particulier un disque HI initialement étendu et une rencontre prograde, favorisant le développement de longues queues de marée gazeuses –, que ne présente qu'une minorité de collisions galactiques. A l'aide de nos modèles numériques, nous prédisons une fraction moyenne de TDGs parmi les galaxies naines classiques de seulement quelques pourcents. Elle devrait être toutefois plus élevée dans les milieux denses comme les groupes ou les amas. Plus nombreuses, les TDGs auraient du d'ailleurs avoir été repérées depuis longtemps malgré les difficultés à discerner de manière fiable une origine de marée. J'ai présenté dans ce mémoire un certain nombre de critères pour pouvoir le faire et dressé une liste de candidats TDGs prometteurs dans l'Univers proche.

Si l'on doit trouver un intérêt aux TDGs, il n'est probablement pas à chercher dans leur poids numérique, ni même peut-être dans l'aura de leurs galaxies parents ! La formation d'objets dans les queues de marée apparaît comme l'un des multiples phénomènes qui se produisent dans les systèmes en interaction, à qui on a depuis une trentaine d'années accordé une importance tangible. En effet, les fusions galactiques jouent un rôle fondamental dans le scénario le plus populaire de formation et d'évolution des galaxies, celui de la formation hiérarchique des structures. Or ces deux dernières années ont émergé des hypothèses alternatives qui restreignent l'impact des collisions entre galaxies, en mettant plus en avant des transformations internes ou séculaires (instabilités locales du disque gazeux, accréation plus ou moins lente de gaz primordial). Le rayonnement moindre des fusions va-t-il se répercuter sur celui des TDGs ?

L'un des mérites imputables aux naines de marée est en fait d'avoir porté l'attention des chercheurs sur un environnement jusqu'alors relativement délaissé : ce milieu que j'ai qualifié d'entregalactique. Les instruments modernes commencent à le sonder et à y mettre en évidence des matériaux d'origine galactiques dont la présence était insoupçonnée : gaz moléculaire, poussières, étoiles vieilles et jeunes, amas globulaires vagabonds, etc... Ils peuvent participer à un recyclage galactique dont la formation des TDGs n'est que l'aspect le plus spectaculaire.

---

Autre vertu des TDGs dont nous avons pris conscience et exploitée que tardivement : leur capacité à apporter des réponses à des questions aussi fondamentales que la nature et la distribution de la matière dans et autour des galaxies. Les naines de marée peuvent servir de sondes cosmologiques, comme le sont d'ailleurs déjà les galaxies satellites classiques. J'espère ainsi avoir montré qu'elles constituent des laboratoires de choix pour aborder nombre de problèmes astrophysiques, de la formation des étoiles à celle des galaxies.

Dans la manière dont nous appréhendons désormais ces objets, les simulations numériques ont apporté une contribution essentielle. Les principaux résultats obtenus depuis 2000 sur le sujet soit en découlent directement (détermination du mécanisme de formation des TDGs, estimation de leur importance numérique), soit en sont largement tributaires (détection d'une masse manquante dans les débris de collision). L'étude des TDGs a réciproquement motivé des améliorations dans les codes numériques et permis de les valider : mise en place de techniques de zoom, augmentation drastique de la résolution, vérification du comportement du gaz dans les modèles, etc...

Par leur précision et leur pouvoir prédictif, les simulations mettent au défi les observateurs.

- Premier challenge observationnel : découvrir une vraie TDG adulte, qui aurait survécu quelques milliards d'années à la collision qui lui a donné naissance et serait désormais éloignée de sa galaxie parent. Toutes les TDGs connues à ce jour sont observées dans leur prime enfance, encore reliées à leur géniteur par un cordon stellaire ou gazeux.
- Autre tâche incontournable : effectuer un sondage systématique et à grande échelle de galaxies naines possédant les propriétés attendues pour des candidats TDGs. Les données du SDSS permettent d'effectuer un recensement préliminaire.
- Des études cinématiques complémentaires de débris de collision seraient utiles pour asseoir nos résultats sur l'existence de baryons sombres dans les disques des galaxies spirales.

Deux expériences dans lesquelles je suis fortement impliqué vont dans un proche avenir apporter des contraintes utiles :

- le **NGVS** (New Generation Virgo Survey) : sondage extrêmement profond de l'amas de la Vierge par la caméra MegaCam sur le CFHT, à même de révéler les reliquats des multiples collisions qui ont du se produire dans cet amas.
- le **3D-NTT**, instrument en cours de construction pour le NTT à La Silla qui offre à la fois un mode Fabry Perot (pour les études cinématiques sur de grands champs) et un filtre ajustable (permettant des études chimiques des régions HII, en particulier le long des queues de marée).

La modélisation n'est pas en reste. Aucun modèle purement stellaire ne parvient à présent à reproduire le diagramme spectral d'énergie des naines de marée présentant de la formation stellaire. L'ajustement qui devrait à terme permettre de contraindre la fonction de masse initiale de leurs étoiles passe par l'introduction dans les modèles d'une composante de poussières chaudes.

Les simulations de leur côté pèchent par le simplisme de leurs recettes de formation stellaire et d'évolution chimique, qui ne permettent pas pour l'instant d'appréhender des problèmes tels l'effet du feedback sur la stabilité des TDGs ou des super-vents sur leur enrichissement et celui du milieu intergalactique.

Autant dire que le sujet des galaxies naines de marée est loin d'être épuisé et mériterait sans doute d'autres thèses<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Toutefois, l'Habilitation à Diriger des Recherches étant le dernier diplôme universitaire, je ne lui consacrerai pas moi-même un autre mémoire !

---

# Bibliographie

- P. Amram, C. Mendes de Oliveira, H. Plana, C. Balkowski et O. Hernandez. HCG 31 : a multiple merger in progress. *A&A* , 471:753–764, septembre 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007A&A...471..753A>. 119
- P. N. Appleton, K. C. Xu, W. Reach, M. A. Dopita, Y. Gao, N. Lu, C. C. Popescu, J. W. Sulentic, R. J. Tuffs et M. S. Yun. Powerful High-Velocity Dispersion Molecular Hydrogen Associated with an Intergalactic Shock Wave in Stephan’s Quintet. *ApJ* , 639:L51–L54, mars 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006ApJ...639L..51A>. 146
- M. Arnaboldi, O. Gerhard, J. A. L. Aguerri, K. C. Freeman, N. R. Napolitano, S. Okamura et N. Yasuda. The Line-of-Sight Velocity Distributions of Intracuster Planetary Nebulae in the Virgo Cluster Core. *ApJ* , 614:L33–L36, octobre 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004ApJ...614L..33A>. 68
- H. Arp et J. W. Sulentic. Analysis of groups of galaxies with accurate redshifts. *ApJ* , 291:88–111, avril 1985. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1985ApJ...291...88A>. 124
- J. E. Barnes. Shock-induced star formation in a model of the Mice. *MNRAS* , 350:798–808, mai 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004MNRAS.350..798B>. 130
- J. E. Barnes et L. Hernquist. Formation of dwarf galaxies in tidal tails. *Nature* , 360:715–717, décembre 1992. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1992Natur.360..715B>. 88, 90, 110
- J. E. Barnes et L. Hernquist. Transformations of Galaxies. II. Gasdynamics in Merging Disk Galaxies. *ApJ* , 471:115, novembre 1996. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1996ApJ...471..115B>. 99
- N. Bastian, M. Hempel, M. Kissler-Patig et G. Homeier, N. L. Tranco. The star cluster population in the tidal tails of NGC 6872. *A&A* , 435:65–75, mai 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005A&A...435...65B>. 80
- K. Bekki, W. J. Couch et M. J. Drinkwater. Galaxy Threshing and the Formation of Ultracompact Dwarf Galaxies. *ApJ* , 552:L105–L108, mai 2001. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...552L.105B>. 100
- V. Belokurov, D. B. Zucker, N. W. Evans, J. T. Kleyna, S. Koposov, S. T. Hodgkin, M. J. Irwin, G. Gilmore, M. I. Wilkinson, M. Fellhauer, D. M. Bramich, P. C. Hewett, S. Vidrih, J. T. A. De Jong, J. A. Smith, H.-W. Rix, E. F. Bell, R. F. G. Wyse, H. J. Newberg, P. A. Mayeur, B. Yanny, C. M. Rockosi, O. Y. Gnedin, D. P. Schneider, T. C. Beers, J. C. Barentine, H. Brewington, J. Brinkmann, M. Harvanek, S. J. Kleinman, J. Krzesinski, D. Long, A. Nitta et S. A. Snedden. Cats and Dogs, Hair and a Hero : A Quintet of New Milky Way Companions. *ApJ* , 654:897–906, janvier 2007. URL [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib\\_query?bibcode=2007ApJ...654..897B&db\\_key=AST](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=2007ApJ...654..897B&db_key=AST). 81
- D. L. Block, F. Bournaud, F. Combes, R. Groess, P. Barmby, M. L. N. Ashby, G. G. Fazio, M. A. Pahre et S. P. Willner. An almost head-on collision as the origin of two off-centre rings in the Andromeda galaxy. *Nature* , 443:832–834, octobre 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006Natur.443..832B>. 117
- A. D. Bolatto, A. K. Leroy, E. Rosolowsky, F. Walter et L. Blitz. The Resolved Properties of Extragalactic Giant Molecular Clouds. *ArXiv e-prints*, 807, juin 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008arXiv0807.0009B>. 146
- F. Boone, N. Brouillet, S. Hüttemeister, C. Henkel, J. Braine, D. J. Bomans, F. Herpin, Z. Banhidi et M. Albrecht. Properties and environment of the molecular complex near Holmberg IX. *A&A* , pages 129–140, janvier 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005A&A...429..129B>. 118
- M. Boquien. *Formation stellaire intergalactique*. Thèse de doctorat, PhD thesis. Univ. Paris Diderot, 2007. 111, 129, 131, 136, 138
-

- M. Boquien, P.-A. Duc, J. Braine, E. Brinks, U. Lisenfeld et V. Charmandaris. Polychromatic view of intergalactic star formation in NGC 5291. *A&A*, 467:93–106, mai 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007A&A...467...93B>. 78, 130, 131, 134
- M. Boquien, P.-A. Duc, Y. Wu, J. Braine, E. Brinks, U. Lisenfeld et V. Charmandaris. Collisional debris as laboratories to study star formation. *AJ in preparation*, 2008. 130, 131
- F. Bournaud et P.-A. Duc. From tidal dwarf galaxies to satellite galaxies. *A&A*, 456:481–492, septembre 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006A&A...456...481B>. 90, 95, 97, 110, 117, 141
- F. Bournaud, P.-A. Duc, P. Amram, F. Combes et J.-L. Gach. Kinematics of tidal tails in interacting galaxies : Tidal dwarf galaxies and projection effects. *A&A*, 425:813–823, octobre 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004A&A...425...813B>. 80, 104, 106, 130, 145, 146
- F. Bournaud, P.-A. Duc, E. Brinks, M. Boquien, P. Amram, U. Lisenfeld, B. S. Koribalski, F. Walter et V. Charmandaris. Missing Mass in Collisional Debris from Galaxies. *Science*, 316:1166–, mai 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007Sci...316.1166B>. 80, 145, 146, 147, 148, 149
- F. Bournaud, P.-A. Duc et E. Emsellem. High-resolution simulations of galaxy mergers : resolving globular cluster formation. *MNRAS*, 389:L8–L12, septembre 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.389L...8B>. 88, 89, 90, 93, 99, 137
- F. Bournaud, P.-A. Duc et F. Masset. The large extent of dark matter haloes probed by the formation of tidal dwarf galaxies. *A&A*, 411:L469–L472, décembre 2003. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003A&A...411L.469B>. 99, 142, 143
- J. Braine, P.-A. Duc, U. Lisenfeld, V. Charmandaris, O. Vallejo, S. Leon et E. Brinks. Abundant molecular gas in tidal dwarf galaxies : On-going galaxy formation. *A&A*, 378:51–69, octobre 2001. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001A&A...378...51B>. 68, 80, 117, 130, 131, 132, 145
- J. Braine, U. Lisenfeld, P.-A. Duc et S. Leon. Detection of molecular gas in tidal dwarf galaxies. *Nature*, 403:6772, 2000. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000Natur.403...867B>. 68, 73, 145
- T. G. Brainerd, R. D. Blandford et I. Smail. Weak Gravitational Lensing by Galaxies. *ApJ*, 466:623–+, août 1996. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1996ApJ...466...623B>. 141
- N. Brouillet, C. Henkel et A. Baudry. Detection of an intergalactic molecular complex ? *A&A*, 262:L5–L8, août 1992. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1992A&A...262L...5B>. 118
- C. Calcáneo-Roldán, B. Moore, J. Bland-Hawthorn, D. Malin et E. M. Sadler. Galaxy destruction and diffuse light in clusters. *MNRAS*, 314:324–333, mai 2000. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000MNRAS.314...324C>. 77
- S. B. Cenko, D. B. Fox, B. E. Penprase, A. Cucchiara, P. A. Price, E. Berger, S. R. Kulkarni, F. A. Harrison, A. Gal-Yam, E. O. Ofek, A. Rau, P. Chandra, D. A. Frail, M. M. Kasliwal, B. P. Schmidt, A. M. Soderberg, P. B. Cameron et K. C. Roth. GRB 070125 : The First Long-Duration Gamma-Ray Burst in a Halo Environment. *ApJ*, 677:441–447, avril 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...677...441C>. 68
- V. Charmandaris, F. Combes et J. M. van der Hulst. First detection of molecular gas in the shells of CenA. *A&A*, 356:L1–L4, avril 2000. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000A&A...356L...1C>. 118
- I. Chilingarian, V. Cayatte et G. Bergond. Stellar Population Constraints on the Dark Matter Content and Origin of Ultra-Compact Dwarf Galaxies. *ArXiv e-prints*, 808, août 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008arXiv0808.0320C>. 100
- I. V. Chilingarian et G. A. Mamon. SDSSJ124155.33+114003.7 - a missing link between compact elliptical and ultracompact dwarf galaxies. *MNRAS*, 385:L83–L87, mars 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.385L...83C>. 100
- D. Clowe, A. Gonzalez et M. Markevitch. Weak-Lensing Mass Reconstruction of the Interacting Cluster 1E 0657-558 : Direct Evidence for the Existence of Dark Matter. *ApJ*, 604:596–603, avril 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004ApJ...604...596C>. 148
- C. J. Conselice, K. O’Neil, J. S. Gallagher et R. F. G. Wyse. Galaxy Populations and Evolution in Clusters. IV. Deep H I Observations of Dwarf Elliptical Galaxies in the Virgo Cluster. *ApJ*, 591:167–184, juillet 2003. URL <http://dx.doi.org/10.1086/375216>. 120



- L. Cortese, G. Gavazzi, A. Boselli et J. Iglesias-Paramo. An extragalactic HII region in the Virgo cluster. *A&A* , 416:119–123, mars 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004A&A...416..119C>. 78
- T. J. Cox, P. Jonsson, J. R. Primack et R. S. Somerville. Feedback in simulations of disc-galaxy major mergers. *MNRAS* , 373: 1013–1038, décembre 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006MNRAS.373.1013C>. 99
- T. J. Cox et A. Loeb. The collision between the Milky Way and Andromeda. *MNRAS* , 386:461–474, mai 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.386..461C>. 118
- J. Dabringhausen, M. Hilker et P. Kroupa. From star clusters to dwarf galaxies : the properties of dynamically hot stellar systems. *MNRAS* , 386:864–886, mai 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.386..864D>. 104
- J. I. Davies, M. J. Disney, R. F. Minchin, R. Auld et R. Smith. The existence and detection of optically dark galaxies by 21-cm surveys. *MNRAS* , 368:1479–1488, mai 2006. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10247.x>. 104
- R. de Grijs, P. Anders, N. Bastian, R. Lynds, H. J. G. L. M. Lamers et E. J. O’Neil. Star cluster formation and evolution in nearby starburst galaxies - II. Initial conditions. *MNRAS* , 343:1285–1300, août 2003a. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003MNRAS.343.1285D>. 88
- R. de Grijs, J. T. Lee, M. Clemencia Mora Herrera, U. Fritze-v. Alvensleben et P. Anders. Stellar populations and star cluster formation in interacting galaxies with the Advanced Camera for Surveys. *New Astronomy*, 8:155–171, février 2003b. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003NewA....8..155D>. 80, 137
- R. de Grijs et G. Parmentier. The Long-term Survival Chances of Young Massive Star Clusters. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 7:155–186, avril 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ChJAA...7..155D>. 80, 95
- D. F. de Mello, L. J. Smith, E. Sabbi, J. S. Gallagher, M. Mountain et D. R. Harbeck. Star Formation in the H I Bridge Between M81 and M82. *AJ* , 135:548–554, février 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AJ...135..548D>. 118
- H. J. Deeg, C. Munoz-Tunon, G. Tenorio-Tagle, E. Telles, J. M. Vilchez, J. M. Rodriguez-Espinoza, P. A. Duc et I. F. Mirabel. A catalogue of dwarf galaxy candidates around interacting galaxies. *A&AS* , 129:455–462, mai 1998. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998A&AS...129..455D>. 80
- E. J. Delgado-Donate, C. Muñoz-Tuñón, H. J. Deeg et J. Iglesias-Paramo. Dwarfs after mergers ? The case of NGC 520, NGC 772, Arp 141, NGC 3226/7, NGC 3656 and Arp 299. *A&A* , 402:921–928, mai 2003. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003A&A...402..921D>. 80
- P. Di Matteo, F. Combes, A.-L. Melchior et B. Semelin. Star formation efficiency in galaxy interactions and mergers : a statistical study. *A&A* , 468:61–81, juin 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007A&A...468...61D>. 99
- J. M. Dickey. A VLA Survey of the Hercules Cluster.I.The HI Data. *AJ* , 113:1939–+, juin 1997. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1997AJ...113.1939D>. 126
- M. J. Drinkwater, M. D. Gregg, M. Hilker, K. Bekki, W. J. Couch, H. C. Ferguson, J. B. Jones et S. Phillipps. A class of compact dwarf galaxies from disruptive processes in galaxy clusters. *Nature* , 423:519–521, mai 2003. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003Natur.423..519D>. 81, 100
- J. Dubinski, J. C. Mihos et L. Hernquist. Constraining Dark Halo Potentials with Tidal Tails. *ApJ* , 526:607–622, décembre 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999ApJ...526..607D>. 141
- P. A. Duc. *Genèse de galaxies naines dans les systèmes en interaction* . Thèse de doctorat, PhD thesis. Univ. Paris, 1995. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1995PhDT.....137D>. 80
- P.-A. Duc. Visible and invisible molecular gas in collisional debris of galaxies. Dans C. Charbonnel J. Bouvier, A. Chalabaev, éditeur, *SF2A (arXiv :0710.0668)*, octobre 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007arXiv0710.0668D>. 71
- P.-A. Duc et F. Bournaud. Tidal Debris from High-Velocity Collisions as Fake Dark Galaxies : A Numerical Model of VIRGOHI 21. *ApJ* , 673:787–797, février 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...673..787D>. 104, 108
- P.-A. Duc, F. Bournaud et F. Masset. A top-down scenario for the formation of massive Tidal Dwarf Galaxies. *A&A* , 427: 803–814, décembre 2004a. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004A&A...427..803D>. 90, 91, 99, 110, 142
- P.-A. Duc, F. Bournaud et F. Masset. Identifying old Tidal Dwarf Galaxies in Simulations and in the Nearby Universe. Dans P. A. Duc, J. Braine et E. Brinks, éditeurs, *IAU Symposium 217, Recycling intergalactic and interstellar matter*, pages 550 (astro-ph/0402252). ASP, 2004b. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004IAUS..217..550D>. 110, 115
-

- P.-A. Duc, J. Braine, U. Lisenfeld, E. Brinks et M. Boquien. VCC 2062 : an old tidal dwarf galaxy in the Virgo cluster? *A&A* , 475:187–197, novembre 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007A&A...475..187D>. 120, 122, 130, 145, 146
- P.-A. Duc, E. Brinks, V. Springel, B. Pichardo, P. Weilbacher et I. F. Mirabel. Formation of a Tidal Dwarf Galaxy in the Interacting System Arp 245 (NGC 2992/93). *AJ* , 120:1238–1264, septembre 2000. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000AJ....120.1238D>. 80, 84
- P.-A. Duc, E. Brinks, J. E. Wink et I. F. Mirabel. Gas segregation in the interacting system ARP 105. *A&A* , 326:537–553, octobre 1997. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1997A&A...326..537D>. 80, 82
- P.-A. Duc, V. Cayatte, C. Balkowski, T. X. Thuan, P. Papaderos et W. van Driel. H I-rich dwarf galaxies in the Hydra I cluster. II. Spectroscopic data. *A&A* , 369:763–777, avril 2001. URL <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20010188>. 120, 124
- P.-A. Duc et I. F. Mirabel. Young tidal dwarf galaxies around the gas-rich disturbed lenticular ngc 5291. *A&A* , 333:813–826, mai 1998. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998A&A...333..813D>. 80, 130, 145
- P.-A. Duc, P. Papaderos, C. Balkowski, V. Cayatte, T. X. Thuan et W. van Driel. H i-rich dwarf galaxies in the Hydra I cluster. I. Photometric and H i data. *A&AS* , 136:539–569, mai 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999A&A...136..539D>. 124
- B. G. Elmegreen et Y. N. Efremov. An Extension of Hierarchical Star Formation to Galactic Scales. *ApJ* , 466:802–+, août 1996. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1996ApJ...466..802E>. 130
- B. G. Elmegreen, M. Kaufman et M. Thomasson. An interaction model for the formation of dwarf galaxies and 10 exp 8 solar mass clouds in spiral disks. *ApJ* , 412:90, 1993. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1993ApJ...412...90E>. 88
- D. M. Elmegreen, B. G. Elmegreen, T. Ferguson et B. Mullan. Smooth and Starburst Tidal Tails in the GEMS and GOODS Fields. *ApJ* , 663:734–751, juillet 2007. URL <http://dx.doi.org/10.1086/518715>. 121
- J. English et K. C. Freeman. Giant H II Regions in the Merging System NGC 3256 : Are They the Birthplaces of Globular Clusters? *AJ* , 125:1124–1133, mars 2003. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003AJ....125.1124E>. 78
- S. M. Fall, R. Chandar et B. C. Whitmore. The Age Distribution of Massive Star Clusters in the Antennae Galaxies. *ApJ* , 631:L133–L136, octobre 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005ApJ...631L.133F>. 80
- J. J. Feldmeier, R. Ciardullo, G. H. Jacoby et P. R. Durrell. Intracluster Planetary Nebulae in the Virgo Cluster. III. Luminosity of the Intracluster Light and Tests of the Spatial Distribution. *ApJ* , 615:196–208, novembre 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004ApJ...615..196F>. 68
- M. Fellhauer et P. Kroupa. The formation of ultracompact dwarf galaxies. *MNRAS* , 330:642–650, mars 2002. URL <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2002MNRAS.330..642F>. 100
- M. Fioc et B. Rocca-Volmerange. PEGASE.2, a metallicity-consistent spectral evolution model of galaxies : the documentation and the code. *ArXiv Astrophysics e-prints*, décembre 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999astro.ph.12179F>. 136
- G. Gentile, B. Famaey, F. Combes, P. Kroupa, H. S. Zhao et O. Tirit. Tidal dwarf galaxies as a test of fundamental physics. *A&A* , 472:L25–L28, septembre 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007A&A...472L..25G>. 148
- O. Gerhard, M. Arnaboldi, K. C. Freeman et S. Okamura. Isolated Star Formation : A Compact H II Region in the Virgo Cluster. *ApJ* , 580:L121–L124, décembre 2002. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002ApJ...580L.121G>. 78
- M. Gieles, S. S. Larsen, N. Bastian et I. T. Stein. The luminosity function of young star clusters : implications for the maximum mass and luminosity of clusters. *A&A* , 450:129–145, avril 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006A&A...450..129G>. 88
- M. A. Gómez-Flechoso, R. Fux et L. Martinet. Sagittarius, a dwarf spheroidal galaxy without dark matter? *A&A* , 347:77–91, juillet 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999A&A...347...77G>. 117
- I. A. Grenier, J.-M. Casandjian et R. Terrier. Unveiling Extensive Clouds of Dark Gas in the Solar Neighborhood. *Science* , 307:1292–1295, février 2005. URL <http://dx.doi.org/10.1126/science.1106924>. 146
-

- F. Hammer, M. Puech, L. Chemin, H. Flores et M. D. Lehnert. The Milky Way, an Exceptionally Quiet Galaxy : Implications for the Formation of Spiral Galaxies. *ApJ* , 662:322–334, juin 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...662..322H>. 117
- J. Harris. The Magellanic Bridge : The Nearest Purely Tidal Stellar Population. *ApJ* , 658:345–357, mars 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...658..345H>. 117
- A. Heithausen et F. Walter. Extensive molecular gas in the tidal arms near NGC 3077 - birth of a dwarf galaxy ? *A&A* , 361:500–506, septembre 2000. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000A&A...361..500H>. 118
- A. Helmi, S. D. M. White, P. T. de Zeeuw et H. Zhao. Debris streams in the solar neighbourhood as relicts from the formation of the Milky Way. *Nature* , 402:53–55, novembre 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999Natur.402...53H>. 77
- J. E. Hibbard, J. M. van der Hulst, J. E. Barnes et R. M. Rich. High-Resolution H I Mapping of NGC 4038/39 (“The Antennae”) and Its Tidal Dwarf Galaxy Candidates. *AJ* , 122:2969–2992, décembre 2001. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001AJ...122.2969H>. 80, 146
- S. J. Higdon, J. L. Higdon et J. Marshall. First Detection of PAHs and Warm Molecular Hydrogen in Tidal Dwarf Galaxies. *ApJ* , 640:768–783, avril 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006ApJ...640..768H>. 130, 131, 146
- M. Hilker, H. Baumgardt, L. Infante, M. Drinkwater, E. Evstigneeva, E. Gregg, M. Evstigneeva et M. Gregg. Dynamical masses of ultra-compact dwarf galaxies in Fornax. *A&A* , 463:119–130, février 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007A&A...463..119H>. 81
- M. Hilker, L. Infante, G. Vieira, M. Kissler-Patig et T. Richtler. The central region of the Fornax cluster. II. Spectroscopy and radial velocities of member and background galaxies. *A&AS* , 134:75–86, janvier 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999A&AS..134...75H>. 100
- H. Hoekstra, T. S. van Albada et R. Sancisi. On the apparent coupling of neutral hydrogen and dark matter in spiral galaxies. *MNRAS* , 323:453–459, mai 2001. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001MNRAS.323..453H>. 147
- E. Holmberg. A study of physical groups of galaxies. *Ark. Astron.*, 5:305, 1969. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1969ArA....5..305H>. 120
- S. D. Hunsberger, J. C. Charlton et D. Zaritsky. The Formation of Dwarf Galaxies in Tidal Debris : A Study of the Compact Group Environment. *ApJ* , 462:50, mai 1996. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1996ApJ...462...50H>. 119
- D. A. Hunter, S. D. Hunsberger et E. W. Roye. Identifying Old Tidal Dwarf Irregulars. *ApJ* , 542:137–142, octobre 2000. URL <http://dx.doi.org/10.1086/309542>. 110
- R. Ibata, S. Chapman, A. M. N. Ferguson, G. Lewis, M. Irwin et N. Tanvir. On the Accretion Origin of a Vast Extended Stellar Disk around the Andromeda Galaxy. *ApJ* , 634:287–313, novembre 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005ApJ...634..287I>. 68, 117
- R. Ibata, G. F. Lewis, M. Irwin, E. Totten et T. Quinn. Great Circle Tidal Streams : Evidence for a Nearly Spherical Massive Dark Halo around the Milky Way. *ApJ* , 551:294–311, avril 2001. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...551..294I>. 77
- J. Iglesias-Páramo, W. van Driel, P.-A. Duc, P. Papaderos, J. M. Vílchez, V. Cayatte, C. Balkowski, K. O’Neil, J. Dickey, H. Hernández et T. X. Thuan. A study of H I-selected galaxies in the Hercules cluster. *A&A* , 406:453–469, août 2003. URL <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2003A&A...406..453I>. 120, 126
- M. J. Irwin, W. E. Kunkel et S. Demers. A blue stellar population in the H I bridge between the two Magellanic Clouds. *Nature* , 318:160–+, novembre 1985. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1985Natur.318..160I>. 117
- I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva et F. Boerngen. ‘garland’ - an unusual object near ngc 3077. *MNRAS*, 217:731, 1985. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1985MNRAS.217..731K>. 118
- I. D. Karachentsev, R. B. Tully, A. Dolphin, M. Sharina, L. Makarova, D. Makarov, S. Sakai, E. J. Shaya, O. G. Kashibadze, V. Karachentseva et L. Rizzi. The Hubble Flow around the Centaurus A/M83 Galaxy Complex. *AJ* , 133:504–517, février 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007AJ...133..504K>. 118
- G. Kauffmann, S. D. M. White et B. Guiderdoni. The Formation and Evolution of Galaxies Within Merging Dark Matter Haloes. *MNRAS* , 264:201, septembre 1993. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1993MNRAS.264..201K>. 141
-

- K. A. Knierman, S. C. Gallagher, J. C. Charlton, S. D. Hunsberger, B. Whitmore, A. Kundu, J. E. Hibbard et D. Zaritsky. From Globular Clusters to Tidal Dwarfs : Structure Formation in the Tidal Tails of Merging Galaxies. *AJ* , 126:1227–1244, septembre 2003. URL [http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib\\_query?bibcode=2003AJ...126.1227K&db\\_key=AST](http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=2003AJ...126.1227K&db_key=AST). 80, 88
- A. Koch et E. K. Grebel. The Anisotropic Distribution of M31 Satellite Galaxies : A Polar Great Plane of Early-type Companions. *AJ* , 131:1405–1415, mars 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006AJ...131.1405K>. 117
- T. Kronberger, W. Kapferer, S. Unterguggenberger, S. Schindler et B. L. Ziegler. The effects of ram-pressure stripping on the internal kinematics of simulated spiral galaxies. *A&A* , 483:783–791, juin 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008A&A...483..783K>. 120
- P. Kroupa. Dwarf spheroidal satellite galaxies without dark matter. *New Astronomy*, 2:139–164, juillet 1997. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S1384-1076\(97\)00012-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1384-1076(97)00012-2). 96, 117
- P. Kroupa. The dynamical evolution of stellar superclusters. *MNRAS* , 300:200–204, octobre 1998. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998MNRAS.300..200K>. 90, 104
- H. Lee, D. B. Zucker et E. K. Grebel. Interstellar medium oxygen abundances of dwarf irregular galaxies in Centaurus A and nearby groups. *MNRAS* , 376:820–840, avril 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007MNRAS.376..820L>. 119
- A. Leroy, J. Cannon, F. Walter, A. Bolatto et A. Weiss. The Low CO Content of the Extremely Metal-poor Galaxy I Zw 18. *ApJ* , 663:990–994, juillet 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...663..990L>. 146
- U. Lisenfeld, J. Braine, P.-A. Duc, E. Brinks, V. Charmandaris et S. Leon. Molecular and ionized gas in the tidal tail in Stephan’s Quintet. *A&A* , 426:471–479, novembre 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004A&A...426..471L>. 69, 75, 119
- U. Lisenfeld, J. Braine, P.-A. Duc, S. Leon, V. Charmandaris et E. Brinks. Abundant molecular gas in the intergalactic medium of Stephan’s Quintet. *A&A* , 394:823–833, novembre 2002. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002A&A...394..823L>. 69, 119, 145
- U. Lisenfeld, C. G. Mundell, E. Schinnerer, P. N. Appleton et J. Allsopp. Molecular Gas and Dust in Arp 94 : The Formation of a Recycled Galaxy in an Interacting System. *ApJ* , 685:181–193, septembre 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...685..181L>. 130, 145
- D. Lynden-Bell. Dwarf galaxies and globular clusters in high velocity hydrogen streams. *MNRAS* , 174:695–710, mars 1976. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1976MNRAS.174..695L>. 117
- L. Makarova et D. Makarov. Evolution of Dwarf Galaxies in the Centaurus A Group. Dans J. Davies et M. Disney, éditeurs, *IAU Symposium*, volume 244 de *IAU Symposium*, pages 326–330, mai 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008IAUS...244..326M>. 119
- L. N. Makarova, E. K. Grebel, I. D. Karachentsev, A. E. Dolphin, V. E. Karachentseva, M. E. Sharina, D. Geisler, P. Guhathakurta, P. W. Hodge, A. Sarajedini et P. Seitzer. Tidal dwarfs in the M81 group : The second generation ? *A&A* , 396:473–487, décembre 2002. URL <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20021426>. 118
- C. Maraston, N. Bastian, R. P. Saglia, M. Kissler-Patig, F. Schweizer et P. Goudfrooij. The dynamical mass of the young cluster W3 in NGC 7252. Heavy-weight globular cluster or ultra compact dwarf galaxy ? *A&A* , 416:467–473, mars 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004A&A...416..467M>. 80
- F. S. Masset et M. Bureau. On the Spiral Structure of NGC 2915 and Dark Matter. *ApJ* , 586:152–169, mars 2003. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003ApJ...586..152M>. 147
- M. L. Mateo. Dwarf Galaxies of the Local Group. *ARA&A* , 36:435–506, 1998. URL <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.astro.36.1.435>. 117
- A. Maybhate, J. Masiero, J. E. Hibbard, J. C. Charlton, C. Palma, K. A. Knierman et J. English. An HI threshold for star cluster formation in tidal debris. *MNRAS* , 381:59–67, octobre 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007MNRAS.381..59M>. 130
- L. Mayer, F. Governato, M. Colpi, B. Moore, T. Quinn, J. Wadsley, J. Stadel et G. Lake. The Metamorphosis of Tidally Stirred Dwarf Galaxies. *ApJ* , 559:754–784, octobre 2001. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...559..754M>. 77
-

- C. Mendes de Oliveira, E. S. Cypriano, L. Sodré et C. Balkowski. A Nursery of Young Objects : Intergalactic H II Regions in Stephan's Quintet. *ApJ*, 605:L17–L20, avril 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004ApJ...605L..17M>. 78, 119
- C. Mendes de Oliveira, H. Plana, P. Amram, C. Balkowski et M. Bolte. Candidate Tidal Dwarf Galaxies Associated with Stephan's Quintet. *AJ*, 121:2524–2539, mai 2001. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001AJ...121.2524M>. 119
- M. Metz et P. Kroupa. Dwarf spheroidal satellites : are they of tidal origin? *MNRAS*, 376:387–392, mars 2007. URL [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib\\_query?bibcode=2007MNRAS.376..387M&db\\_key=AST](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=2007MNRAS.376..387M&db_key=AST). 100, 117
- M. Metz, P. Kroupa et H. Jerjen. The spatial distribution of the Milky Way and Andromeda satellite galaxies. *MNRAS*, 374:1125–1145, janvier 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007MNRAS.374.1125M>. 117
- L. Michel-Dansac, D. G. Lambas, M. S. Alonso et P. Tissera. The mass-metallicity relation of interacting galaxies. *MNRAS*, pages L46+, mars 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.tmpL..46M>. 120
- M. Milgrom. MOND and the Mass Discrepancies in Tidal Dwarf Galaxies. *ApJ*, 667:L45–L48, septembre 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...667L..45M>. 148
- B. W. Miller et P. Hodge. H II regions in M81 group dwarf galaxies. *ApJ*, 427:656–675, juin 1994. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1994ApJ...427..656M>. 118
- B. W. Miller, B. C. Whitmore, F. Schweizer et S. M. Fall. The Star Cluster System of the Merger Remnant NGC 7252. *AJ*, 114:2381–+, décembre 1997. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1997AJ...114.2381M>. 79
- R. Minchin, J. Davies, M. Disney, P. Boyce, D. Garcia, C. Jordan, V. Kilborn, R. Lang, S. Roberts, S. Sabatini et W. van Driel. A Dark Hydrogen Cloud in the Virgo Cluster. *ApJ*, 622:L21–L24, mars 2005. URL <http://dx.doi.org/10.1086/429538>. 104
- R. Minchin, J. Davies, M. Disney, M. Grossi, S. Sabatini, P. Boyce, D. Garcia, C. Impey, C. Jordan, R. Lang, A. Marble, S. Roberts et W. van Driel. 21 cm Synthesis Observations of VIRGOHI 21-A Possible Dark Galaxy in the Virgo Cluster. *ApJ*, 670:1056–1064, décembre 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...670.1056M>. 104
- I. F. Mirabel, H. Dottori et D. Lutz. Genesis of a dwarf galaxy from the debris of the Antennae. *A&A*, 256:L19–L22, mars 1992. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1992A&A...256L..19M>. 80, 88, 153
- I. F. Mirabel, O. Laurent, D. B. Sanders, M. Sauvage, M. Tagger, V. Charmandaris, L. Vigroux, P. Gallais, C. Cesarsky et D. L. Block. A barred spiral at the centre of the giant elliptical radio galaxy Centaurus A. *A&A*, 341:667–674, janvier 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999A&A...341..667M>. 118
- I. F. Mirabel, D. Lutz et J. Maza. The Superantennae. *A&A*, 243:367–372, mars 1991. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1991A&A...243..367M>. 80
- I. F. Mirabel, L. Vigroux, V. Charmandaris, M. Sauvage, P. Gallais, D. Tran, C. Cesarsky, S. C. Madden et P.-A. Duc. The dark side of star formation in the antennae galaxies. *A&A*, 333:L1–L4, mai 1998. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998A&A...333L...1M>. 79
- M.-A. Miville-Deschênes, F. Boulanger, W. T. Reach et A. Noriega-Crespo. The First Detection of Dust Emission in a High-Velocity Cloud. *ApJ*, 631:L57–L60, septembre 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005ApJ...631L..57M>. 146
- N. Mizuno, E. Muller, H. Maeda, A. Kawamura, T. Minamidani, T. Onishi, A. Mizuno et Y. Fukui. Detection of Molecular Clouds in the Magellanic Bridge : Candidate Star Formation Sites in a Nearby Low-Metallicity System. *ApJ*, 643:L107–L110, juin 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006ApJ...643L.107M>. 117
- E. Muller, L. Staveley-Smith et W. J. Zealey. Detection of carbon monoxide within the Magellanic Bridge. *MNRAS*, 338:609–615, janvier 2003. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003MNRAS.338..609M>. 117
- F. Nicastro, S. Mathur, M. Elvis, J. Drake, T. Fang, A. Fruscione, Y. Krongold, H. Marshall, R. Williams et A. Zezas. The mass of the missing baryons in the X-ray forest of the warm-hot intergalactic medium. *Nature*, 433:495–498, février 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005Natur.433..495N>. 145
- T. Okazaki et Y. Taniguchi. Dwarf Galaxy Formation Induced by Galaxy Interactions. *ApJ*, 543:149–152, novembre 2000. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000ApJ...543..149O>. 141
-

- T. A. Oosterloo et R. Morganti. Anomalous HI kinematics in Centaurus A : Evidence for jet-induced star formation. *A&A* , 429:469–475, janvier 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005A&A...429..469O>. 118
- M. S. Peeples, R. W. Pogge et K. Z. Stanek. Outliers from the Mass-Metallicity Relation. I. A Sample of Metal-Rich Dwarf Galaxies from SDSS. *ApJ* , 685:904–914, octobre 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...685..904P>. 120
- D. Pfenniger, F. Combes et L. Martinet. Is dark matter in spiral galaxies cold gas ? I. Observational constraints and dynamical clues about galaxy evolution. *A&A* , 285:79–93, mai 1994. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1994A&A...285..79P>. 146
- S. Phillipps, M. J. Drinkwater, M. D. Gregg et J. B. Jones. Ultracompact Dwarf Galaxies in the Fornax Cluster. *ApJ* , 560:201–206, octobre 2001. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...560..201P>. 81
- B. M. Poggianti, T. J. Bridges, B. Mobasher, D. Carter, M. Doi, M. Iye, N. Kashikawa, Y. Komiyama, S. Okamura, M. Sekiguchi, K. Shimasaku, M. Yagi et N. Yasuda. A Photometric and Spectroscopic Study of Dwarf and Giant Galaxies in the Coma Cluster. III. Spectral Ages and Metallicities. *ApJ* , 562:689–712, décembre 2001. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...562..689P>. 120
- F. Pont, R. Zinn, C. Gallart, E. Hardy et R. Winnick. The Chemical Enrichment History of the Fornax Dwarf Spheroidal Galaxy from the Infrared Calcium Triplet. *AJ* , 127:840–860, février 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004AJ...127..840P>. 117, 120
- M. Rauch. The Lyman Alpha Forest in the Spectra of QSOs. *ARA&A* , 36:267–316, 1998. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998ARA&A...36..267R>. 145
- J. I. Read, G. Lake, O. Agertz et V. P. Debattista. Thin, thick and dark discs in  $\Lambda$ CDM. *MNRAS* , 389:1041–1057, septembre 2008. URL <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2008MNRAS...389.1041R>. 147
- S. Recchi, C. Theis, P. Kroupa et G. Hensler. The early evolution of tidal dwarf galaxies. *A&A* , 470:L5–L8, juillet 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007A&A...470L...5R>. 99
- Y. Revaz, D. Pfenniger, F. Combes et F. Bournaud. Simulations of galactic disks including a dark baryonic component. *ArXiv e-prints*, 801, janvier 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008arXiv0801.1180R>. 147
- E. V. Ryan-Weber, G. R. Meurer, K. C. Freeman, M. E. Putman, R. L. Webster, M. J. Drinkwater, H. C. Ferguson, D. Hanish, T. M. Heckman, R. C. Kennicutt, V. A. Kilborn, P. M. Knezek, B. S. Koribalski, M. J. Meyer, M. S. Oey, R. C. Smith, L. Staveley-Smith et M. A. Zwaan. Intergalactic H II Regions Discovered in SINGG. *AJ* , 127:1431–1440, mars 2004. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004AJ...127.1431R>. 78
- E. Sabbi, J. S. Gallagher, L. J. Smith, D. F. de Mello et M. Mountain. Holmberg IX : The Nearest Young Galaxy. *ApJ* , 676:L113–L117, avril 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...676L.113S>. 118
- I. Saviane, Y. Momany, G. S. da Costa, R. M. Rich et J. E. Hibbard. A New Red Giant-based Distance Modulus of 13.3 Mpc to the Antennae Galaxies and Its Consequences. *ApJ* , 678:179–186, mai 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...678..179S>. 146
- T. Sawa et M. Fujimoto. A Dynamical Model for the Orbit of the Andromeda Galaxy M31 and the Origin of the Local Group of Galaxies. *PASJ* , 57:429–446, juin 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005PASJ...57..429S>. 117
- L. Sbordone, P. Bonifacio, R. Buonanno, G. Marconi, L. Monaco et S. Zaggia. The exotic chemical composition of the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy. *A&A* , 465:815–824, avril 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007A&A...465..815S>. 117
- J. M. Schombert, J. F. Wallin et C. Struck-Marcell. A multicolor photometric study of the tidal features in interacting galaxies. *AJ* , 99:497–529, février 1990. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1990AJ...99..497S>. 78
- F. Schweizer. Galaxies with long tails. Dans E. M. Berkhuysen et R. Wielebinski, éditeurs, *Structure and Properties of Nearby Galaxies*, volume 77 de *IAU Symposium*, pages 279–284, 1978. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1978IAUS...77..279S>. 80
- F. Schweizer et P. Seitzer. Ages and Metallicities of Young Globular Clusters in the Merger Remnant NGC 7252. *AJ* , 116:2206–2219, novembre 1998. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998AJ...116.2206S>. 79

- J. D. Simon et M. Geha. The Kinematics of the Ultra-faint Milky Way Satellites : Solving the Missing Satellite Problem. *ApJ* , 670:313–331, novembre 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...670..313S>. 81
- B. J. Smith et J. L. Higdon. A search for CO (1-0) emission from the tidal structures of interacting and merging galaxies. *AJ* , 108:837–843, septembre 1994. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1994AJ....108..837S>. 145
- B. J. Smith, C. Struck, M. Hancock, P. N. Appleton, V. Charmandaris et W. T. Reach. The Spitzer Spirals, Bridges, and Tails Interacting Galaxy Survey : Interaction-Induced Star Formation in the Mid-Infrared. *AJ* , 133:791–817, mars 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007AJ....133..791S>. 131
- B. J. Smith, C. Struck, M. Hancock, M. L. Giroux, P. N. Appleton, V. Charmandaris, W. Reach, S. Hurlock et J.-S. Hwang. Stochastic "beads on a String" in the Accretion Tail of ARP 285. *AJ* , 135:2406–2423, juin 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AJ....135.2406S>. 130
- V. Springel, T. Di Matteo et L. Hernquist. Modelling feedback from stars and black holes in galaxy mergers. *MNRAS* , 361:776–794, août 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005MNRAS.361..776S>. 99
- V. Springel et S. D. M. White. Tidal tails in cold dark matter cosmologies. *MNRAS* , 307:162–178, juillet 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999MNRAS.307..162S>. 141
- C. Struck. Simulations of Collisions between Two Gas-rich Galaxy Disks with Heating and Cooling. *ApJS* , 113:269, décembre 1997. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1997ApJS..113..269S>. 130
- R. C. Thomson. Galaxy shredding. I - Centaurus A, NGC 5237, and the Fourcade-Figueroa shred. *MNRAS* , 257:689–698, août 1992. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1992MNRAS.257..689T>. 119
- O. Turet et F. Combes. Interacting Galaxies with MOND. *ArXiv e-prints* , 712, décembre 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007arXiv0712.1459T>. 148
- H. D. Tran, M. Sirianni, H. C. Ford, G. D. Illingworth, M. Clampin, G. Hartig, R. H. Becker, R. L. White, F. Bartko, N. Benítez, J. P. Blakeslee, R. Bouwens, T. J. Broadhurst, R. Brown, C. Burrows, E. Cheng, N. Cross, P. D. Feldman, M. Franx, D. A. Golimowski, C. Gronwall, L. Infante, R. A. Kimble, J. Krist, M. Lesser, D. Magee, A. R. Martel, W. J. McCann, G. R. Meurer, G. Miley, M. Postman, P. Rosati, W. B. Sparks et Z. Tsvetanov. Advanced Camera for Surveys Observations of Young Star Clusters in the Interacting Galaxy UGC 10214. *ApJ* , 585:750–755, mars 2003. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003ApJ...585..750T>. 80
- G. Trancho, N. Bastian, B. W. Miller et F. Schweizer. Gemini Spectroscopic Survey of Young Star Clusters in Merging/Interacting Galaxies. II. NGC 3256 Clusters. *ApJ* , 664:284–295, juillet 2007a. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...664..284T>. 79
- G. Trancho, N. Bastian, F. Schweizer et B. W. Miller. Gemini Spectroscopic Survey of Young Star Clusters in Merging/Interacting Galaxies. I. NGC 3256 Tidal Tail Clusters. *ApJ* , 658:993–998, avril 2007b. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...658..993T>. 80
- J. M. Vilchez. On the spectroscopic properties of star-forming dwarf galaxies in different environments. *AJ* , 110:1090, septembre 1995. 120
- J. M. Vilchez et J. Iglesias-Páramo. Spectroscopy of Dwarf Galaxies in the Virgo Cluster. I. Data, Chemical Abundances, and Ionization Structure. *ApJS* , 145:225–244, avril 2003. URL <http://dx.doi.org/10.1086/345999>. 120
- J. F. Wallin. Dynamical and photometric models of star formation in tidal tails. *AJ* , 100:1477–1488, novembre 1990. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1990AJ....100.1477W>. 88
- F. Walter et A. Heithausen. The Discovery of a Molecular Complex in the Tidal Arms near NGC 3077. *ApJ* , 519:L69–L72, juillet 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999ApJ...519L..69W>. 118
- F. Walter, C. L. Martin et J. Ott. Extended Star Formation and Molecular Gas in the Tidal Arms near NGC 3077. *AJ* , 132:2289–2295, décembre 2006. URL [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib\\_query?bibcode=2006AJ...132.2289W&db\\_key=AST](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=2006AJ...132.2289W&db_key=AST). 118
- P. M. Weilbacher. *On the Formation and Evolution of Dwarf Galaxies in Tidal Tails*. Thèse de doctorat, Dissertation, Universität Göttingen, 2002. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002PhDT.....3W>. 130, 136
-

- P. M. Weilbacher et P.-A. Duc. News from the “Dentist’s Chair” : Observations of AM1353-272 with the VIMOS IFU. Dans M. Kissler-Patig, J. R. Walsh et M. M. Roth, éditeurs, *Science Perspectives for 3D Spectroscopy*, pages 207–+, 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007spts.conf..207W>. 105
- P. M. Weilbacher, P.-A. Duc et U. Fritze-v. Alvensleben. Tidal dwarf candidates in a sample of interacting galaxies. II. Properties and kinematics of the ionized gas. *A&A* , 397:545–555, janvier 2003. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003A&A...397..545W>. 110, 113, 130
- P. M. Weilbacher, P.-A. Duc, U. Fritze v. Alvensleben, P. Martin et K. J. Fricke. Tidal dwarf candidates in a sample of interacting galaxies. *A&A* , 358:819–834, juin 2000. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000A&A...358..819W>. 130, 136, 138
- P. M. Weilbacher, U. Fritze-v. Alvensleben, P. Duc et K. J. Fricke. Large Velocity Gradients in the Tidal Tails of the Interacting Galaxy AM 1353-272 (“The Dentist’s Chair”). *ApJ* , 579:L79–L82, novembre 2002. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002ApJ...579L..79W>. 105
- M. Wetzstein, T. Naab et A. Burkert. Do dwarf galaxies form in tidal tails? *MNRAS* , 375:805–820, mars 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007MNRAS.375..805W>. 88, 90, 99
- B. C. Whitmore, F. Schweizer, C. Leitherer, K. Borne et C. Robert. Hubble Space Telescope discovery of candidate young globular clusters in the merger remnant NGC 7252. *AJ* , 106:1354–1370, octobre 1993. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1993AJ....106.1354W>. 79
- K. A. Woodley. The Centaurus Group and the Outer Halo of NGC 5128 : Are They Dynamically Connected? *AJ* , 132:2424–2431, décembre 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006AJ....132.2424W>. 118
- X. Yang, F. C. van den Bosch, H. J. Mo, S. Mao, X. Kang, S. M. Weinmann, Y. Guo et Y. P. Jing. The alignment between the distribution of satellites and the orientation of their central galaxy. *MNRAS* , 369:1293–1302, juillet 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006MNRAS.369.1293Y>. 120
- D. Zaritsky, R. Smith, C. Frenk et S. D. M. White. More Satellites of Spiral Galaxies. *ApJ* , 478:39, mars 1997. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1997ApJ...478...39Z>. 124, 141
- Q. Zhang et S. M. Fall. The Mass Function of Young Star Clusters in the “Antennae” Galaxies. *ApJ* , 527:L81–L84, décembre 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999ApJ...527L..81Z>. 88
- F. Zwicky. Multiple Galaxies. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften*, 29:344–385, 1956. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1956ErNW...29..344Z>. 80
-



# Annexes

---

## Résumé

Sonder la matière galactique à l'aide de collisions entre galaxies, comme le font les physiciens des particules dans les accélérateurs géants, telle est la démarche originale je nous mène depuis plusieurs années avec mes étudiants et collaborateurs. Nous combinons pour cela données d'observation et simulations numériques.

Plus spécifiquement nous nous intéressons aux débris de collision présents dans les régions externes de galaxies en cours de fusion: queues de marée, ponts et anneaux de gaz et d'étoiles, arrachés aux galaxies et qui sous certaines conditions peuvent se recondenser dans le milieu intergalactique. La formation de galaxies naines de marée (TDG pour Tidal Dwarf Galaxies) en est la manifestation la plus spectaculaire et constitue le centre d'intérêt principal de ce mémoire de HDR.

Dans une première partie, je présente l'environnement objet de cette étude: les régions les plus externes des galaxies ou espace entre les galaxies, ce milieu que j'ai qualifié d'entregalactique pour le distinguer du plasma chaud généralement associé au Milieu Inter-Galactique (MIG). Dans cet environnement a été mis en évidence la présence de matière stellaire et gazeuse très probablement arrachée à des galaxies massives: vieilles étoiles, étoiles évoluées (Nébuleuses planétaires, Supernovae), poussières, nuages de gaz riches en métaux. Notre principale contribution a été la première détection dans les débris de collision de gaz moléculaire, tracé avec les raies millimétriques CO(1-0) et CO(2-1). Nos mesures d'abondance en oxygène dans le gaz ionisé indiquent une métallicité demi-solaire: elle témoigne d'un pré-enrichissement au sein de disques galactiques. Cette matière expulsée peut être recyclée dans le milieu entregalactique: le gaz s'y effondre et forme une nouvelle génération d'étoiles. Naissent ainsi, selon les conditions, amas stellaires, amas globulaires voire galaxies naines.

La seconde partie du mémoire traite des mécanismes de formation, survie et destruction des galaxies naines de marée. Depuis leur découverte dans les années quatre-vingt dix, plusieurs scénarios ont été proposés: instabilité de la composante stellaire ou gazeuse dans les débris de collision; modèle de type "bottom-up" – formation graduelle par accréation progressive – ou "top-down" – effondrement global –. Nos simulations numériques favorisent cette dernière hypothèse: la genèse des TDGs résulte en premier lieu de l'accumulation de grandes quantités de gaz en bout de queues de marée suite à un processus purement cinématique gouverné par la forme du potentiel gravitationnel de la galaxie parent. Les amas stellaires et globulaires produits lors des fusions galactiques réelles et simulées résulteraient alors d'un processus différent, plus local. Amas stellaires et naines de marée évolueraient aussi de manière différente. Cette constatation m'a amené à proposer une définition précise des galaxies naines de marée, alors que les articles oubliés sur les TDGs sont évasifs sur le sujet.

Les simulations numériques nous ont aussi permis de déterminer les conditions requises à la formation des TDGs – qui au moins dans l'Univers proche sont assez contraignantes – et à leur survie. La présence d'une composante gazeuse étendue dans la galaxie parent, une collision prograde entre galaxies parents de masse semblable (fusion majeure) apparaissent comme des critères fondamentaux à leur genèse. Les TDGs massives (typiquement quelques  $10^8 M_{\odot}$ ) qui naissent en bout de queue ont une espérance de vie dépassant le milliard d'années. En orbitant autour de leurs galaxies parents, elles s'apparentent alors à des galaxies satellites.

En faisant des hypothèses sur l'évolution du nombre de fusions en fonction de l'âge de l'Univers, nous avons pu alors obtenir un ordre de grandeur de la fraction de TDGs parmi la population de galaxies naines, estimée en moyenne à quelques pourcents. Ce nombre peut être bien plus important dans des environnements particuliers comme les groupes et amas de galaxies.

Motivé par ces estimations, je présente dans une troisième partie nos diverses tentatives de recensement des galaxies naines de marée dans l'Univers réel, du Groupe local à l'Univers distant, en passant par les amas de galaxies. Divers critères d'identification de TDGs – métallicité, contenu en matière noire, localisation – ont été exploités.

L'un des apports de cette étude, que je n'avais pas vraiment anticipé lorsque je l'ai entreprise, est la prise de conscience que les naines de marée peuvent servir de sondes d'intérêt cosmologique.

Cet aspect des TDGs est détaillé dans une quatrième partie. Nous avons tout d'abord compris que les TDGs les plus massives ne peuvent se former qu'en présence d'un halo de matière noire étendu autour des galaxies parents. La taille du halo de matière noire dit cosmologique étant peu contrainte par les observations, ce résultat sur la formation des naines de marée est précieux. Par ailleurs, la contamination des galaxies satellites autour de galaxies massives par des objets d'origine de marée doit être prise en compte dans le cadre de la formation hiérarchique des structures – scénario cosmologique le plus communément mis en avant. Par ailleurs, en analysant le contenu des TDGs, on sonde indirectement la matière dans le disque des galaxies parents, en particulier leur contenu en matière noire. Ainsi avons nous mis en évidence la présence inattendue dans cet environnement d'une masse "manquante", non lumineuse, peut-être due à du gaz moléculaire froid et quasi indétectable par des observations directes.

Enfin, les débris de collision constituent des laboratoires intéressants pour étudier le processus de formation stellaire et sa dépendance vis à vis de l'environnement. Ainsi avons nous montré à partir d'observations multi-longueur d'onde que les propriétés des régions de formation d'étoiles sont dans un milieu aussi extrême que le milieu entregalactique remarquablement similaires à celles présentes dans les disques des galaxies spirales. Nous avons conclu que les conditions locales prédominent sur l'environnement à grande échelle.

Les perspectives de cette étude sur les naines de marée sont annoncées dans une cinquième et dernière partie.

---

## Liste exhaustive des publications

### Revue à comité de lecture

1. Mirabel I.F., **Duc P.-A.**, Teyssier R., Paul J., Claret A., Auriere M., Golombek D., & Marti J., 1994: A&A 282, L17-L20  
The Radio/Infrared Counterpart of the Hard X-Ray Transient in Aquila
  2. **Duc P.-A.** & Mirabel I.F., 1994: A&A 289, 83  
Recycled galaxies in the colliding system Arp 105
  3. Chaty S., Mirabel I.F., **Duc P.-A.**, Wink J., & Rodriguez L.F., 1996: A&A 310, 825  
"Millimeter and infrared observations toward GRS 1915+105"
  4. Mirabel I.F., Rodriguez L.F., Chaty S., Sauvage M., Gerard E., **Duc P.-A.**, Castro-Tirado A. & Callanan P., 1996, ApJ 472, L111  
"Infrared Observations of an Energetic Outburst in GRS 1915+105"
  5. Marti J., Mirabel I.F., **Duc P.-A.** & Rodriguez L.F., 1997: A&A 323,158  
"A candidate optical and infrared counterpart for GRS 1739-278"
  6. **Duc P.-A.**, Mirabel I.F. & Maza J., 1997: A&A Sup., 124, 533.  
"Southern Ultraluminous Infrared Galaxies. An optical and infrared database"
  7. **Duc P.-A.**, Brinks E., Wink J. & Mirabel I.F., 1997: A&A 326,537  
"Gas segregation in the interacting system Arp 105"
  8. **Duc P.-A.** & Mirabel I.F., 1998, A&A 333,813  
"Young tidal dwarf galaxies around the gas-rich disturbed lenticular NGC 5291"
  9. Deeg H.J., Munoz-Tunon C. Tenorio-Tagle G., Telles E., Vilchez J.M., Rodriguez-Espinosa J.-M., **Duc P.-A.** & Mirabel I.F., 1998, A&A 129, 455.  
"A catalogue of dwarf galaxy candidates around interacting galaxies"
  10. Mirabel I.F., Vigroux L., Charmandaris V., Sauvage M., Gallais P., Tran D., Cesarsky C., Madden S. & **Duc P.-A.**, 1998, A&A 333,L1  
"The dark side of star formation in the Antennae galaxies"
  11. **Duc P.-A.**, Papaderos P., Balkowski C., Cayatte V., Thuan T.X. & van Driel W., 1999, A&A Sup. 136, 539  
"HI-rich dwarf galaxies in the Hydra I cluster. I. The sample and photometric data"
  12. Weilbacher P., **Duc P.-A.**, Fritze-v.Alvensleben U., Fricke, 2000, A&A 358, 819  
"TDG candidates in a sample of interacting systems"
  13. Braine J., Lisenfeld U., **Duc P.-A.** and S. Leon, 2000, Nature 403, 867  
"Formation of molecular gas in the tidal debris of violent galaxy-galaxy interactions"
  14. **Duc P.-A.**, Brinks E., Springel V., Pichardo B., Weilbacher P., Mirabel I.F., 2000, AJ 120, 1238  
"Formation of a tidal dwarf galaxy in the interacting system Arp 245"
  15. Fadda D., Elbaz D., **Duc P.-A.**, Flores H., Franceschini A. and Cesarsky C., 2000, A&A 361, 827  
"An excess of mid-IR luminous galaxies in Abell 1689 ;"
  16. Fouqué P., et al., 2000, A&AS 141, 313  
"An absolute calibration of DENIS (deep near infrared southern sky survey)"
  17. **Duc P. A.**, Cayatte V., Balkowski C., Thuan T. X., Papaderos P., van Driel W., 2001, A&A 369, 763  
"HI-rich dwarf galaxies in the Hydra cluster. II Spectroscopic data"
  18. Braine J, **Duc P.-A.**, Lisenfeld U., Charmandaris V., Vallejo O., Leon S. and Brinks E., 2001,
-

---

A&A 378, 51

“Abundant Molecular gas in Tidal Dwarf galaxies: On-going Galaxy Formation“

19. Pierre M., Lidman C., Hunstead R., Alloin, D., Casali M., Cesarsky C., Chaniel P., **Duc P.-A.**, Fadda D., Flores H., Madden S., Vigroux L., 2001, A&A 372, L45

“The first ISO ERO: A dusty quasar at  $z = 1.5$ “

20. Elbaz D., Flores H., Chaniel P., Mirabel F., Sanders D., **Duc P.-A.**, Cesarsky C., Aussel H., 2002, A&A 381, L1

“ISOCAM Mid-InfraRed Detection of HR 10: A Distant Clone of Arp 220 at  $z=1.44$ ”

21. **Duc P.-A.**, Poggianti B.M., Fadda D., Elbaz D., Flores H., Chaniel P., Franceschini A., Moorwood A. and Cesarsky C., 2002, A&A 382, 60

“Hidden star-formation in the cluster of galaxies Abell 1689”

22. Chaty S., Mirabel I.F., Goldoni P., Mereghetti S., **Duc P.-A.**, Marti J., Magnani R.P., 2002, MNRAS 331, 1065

“Near infrared observations of galactic black hole candidates”

23. **Duc P.-A.**, Hall P. B., Fadda D., Chaniel P., Elbaz D., Monaco P., Pompei E., Poggianti B.M., Flores H., Franceschini A., Biviano A., Moorwood A., and Cesarsky C., 2002, A&A 389, L47

“An unusual iron Lo-BAL quasar detected by ISOCAM”

24. Lisenfeld U., Braine J., **Duc P.-A.**, Leon S., Charmandaris V., Brinks E., 2002, A&A 394, 823

”Abundant molecular gas in the intergalactic medium of Stephan’s Quintet”

25. Weilbacher P.M., Fritze-v.Alvensleben U., **Duc P.-A.**, Fricke K.J., 2002, ApJ 579, L79

”Large Velocity Gradients in the Tidal Tails of the Interacting Galaxy AM 1353-272 (The Dentist’s Chair)”

26. Weilbacher P.M., **Duc P.-A.**, Fritze-v.Alvensleben U., 2003, A&A 397, 545

”Tidal Dwarf Galaxies in a sample of interacting galaxies II. Properties and kinematics of the ionized gas”

27. Le Floc’h E., **Duc P.-A.**, Mirabel I.F., Sanders D.B., Bosch G., Rodrigues I., Courvoisier T.J-L, Mereghetti S., Melnick J, 2002, ApJ 581, L81

”VLT and HST observations of the host galaxy of GRB 990705”

28. van Driel W., O’Neil K., Cayatte V., **Duc P.-A.**, Dickey J., Balkowski C., Hernandez H., Iglesias-Paramo J., Vilchez J.M., Thuan T.X., 2003, A&A 399, 433

”Non-confirmation of reported HI clouds without optical counterparts in the Hercules Cluster”

29. Le Floc’h E., **Duc P.-A.**, Mirabel I.F., Sanders D.B., Bosch G., et al., 2003, A&A 400, 499

”Are the hosts of Gamma-Ray Bursts sub-luminous and blue galaxies ?”

30. Iglesias-Pàramo J., van Driel W., **Duc P.-A.**, Papaderos P., Vilchez J.M., Balkowski C., Cayatte V. and Thuan T.X., 2003, A&A 399, 433

“A study of HI-detected galaxies in the Hercules cluster”

31. Bournaud F., **Duc P.-A.**, Masset F., 2003, A&A 411, L469

“The large extent of DM haloes probed by the formation of tidal dwarf galaxies”

32. Braine J., Lisenfeld U., **Duc P.-A.**, Brinks E., Charmandaris V., Leon S., 2004, A&A 418, 419

“Colliding molecular clouds in head-on galaxy collisions”

33. Pierre et al., 2004, JCAP 09,011

“The XMM-LSS survey. I. Scientific motivations

34. Valtchanov I. et al., 2004, A&A 423, 65

“The XMM-LSS survey. II. First high redshift galaxy clusters

---

35. Bournaud F., **Duc P.-A.**, Amram P., Combes F. and Gach J.-L., 2004, A&A 425, 813  
“Kinematics of tidal tails in interacting systems: Tidal Dwarf Galaxies and projection effects”
36. Lisenfeld, U., Braine, J., **Duc, P.-A.**, Brinks, E., Charmandaris, V., Leon, S., 2004, A&A 426, 471  
“Molecular and ionized gas in the tidal tail in Stephan’s Quintet ”
37. **Duc, P.-A.**, Bournaud, F. & Masset, F. 2004, A&A 427, 803  
“A top-down scenario for the formation of massive Tidal Dwarf Galaxies”
38. Willis, J., et al., 2005, MNRAS 363, 675  
“The XMM Large-Scale Structure survey: an initial sample of galaxy groups and clusters to a redshift  $z < 0.6^*$ ”
39. Bremer M., et al., 2006, MNRAS 371, 1427  
“XMM-LSS discovery of a  $z=1.22$  galaxy cluster”
40. Pierre, M., Pacaud, F. **Duc P.-A.** et al., 2006, MNRAS 372, 591  
“The XMM-LSS survey: a complete X-ray sample over the D1 CFHTLS area”
41. Bournaud, F. & **Duc, P.-A.**, 2006, A&A 456, 481  
“From tidal dwarf galaxies to satellite galaxies”
42. Pelizza, L., **Duc, P.-A.**, Le Floch, M. et al., 2006, A&A 459, L5  
“GRB 050223: a dark GRB in a dusty starburst galaxy”
43. Boquien, M, **Duc, P.-A.**, Braine, J., et al., 2007, A&A 467, 93  
“Polychromatic view of intergalactic star formation in NGC 5291”
44. Bournaud, F., **Duc, P.-A.**, Brinks, E. et al., 2007, Science 316, 1166  
“Missing Mass in Collisional Debris from Galaxies”
45. Pacaud F., et al., 2007, MNRAS 382, 1289  
“The XMM-LSS survey: the C1 cluster sample over the first 5 deg and its cosmological modelling”
46. Pierre M., et al., 2007, MNRAS 382, 279  
“The XMM-LSS catalogue: X-ray sources and associated optical data. Version I”
47. **Duc, P.-A.**, Braine, J., Lisenfeld, U., Brinks, E. & Boquien, M., 2007, A&A 475, 187  
“VCC 2062: an old Tidal Dwarf Galaxy in the Virgo Cluster?”
48. **Duc, P.-A.** & Bournaud, F., ApJ 673, 787  
“Tidal debris from high-velocity collisions as fake dark galaxies”
49. Mazure, A. et al., 2007, A&A 467, 49  
“Structure detection in the D1 CFHTLS deep field using accurate photometric redshifts”
50. Bournaud F., **Duc, P.-A.** & Emsellem, E., MNRAS 389, L8  
“High-resolution simulations of galaxy mergers: Resolving globular cluster formation”

### Circulaires IAU et GCN

1. Mirabel I.F., Cordier B., Paul J., Lebrun F., **Duc P.-A.**, 1992, IAUC 5655  
“Galactic center”
2. Mirabel I. F., **Duc, P.-A.**, Teyssier R., Paul J., Rodriguez L.F., Marti J., Golombek D., Auriere M., Castro-Tirado A.J., Davies J., Brandt S., Lund N., Everall C., 1993, IAUC 5830  
“GRS 1915+105”
3. Mirabel I.F., Marti J., **Duc P.A.**, Rodriguez L.F., Duerbeck H., Benetti S, 1996, IAUC 6427  
“GRS 1739-278”

- 
4. Pellizza, L. J.; **Duc, P.-A.**; Le Floch, E.; Mirabel, I. F., 2006, GCN 5270  
“GRB050326: host galaxy candidates”
  5. Pellizza, L. J.; **Duc, P.-A.**; Le Floch, E.; Mirabel, I. F., 2006, GCN 5269  
“GRB050326: host galaxy candidates” GRB050124: possible host galaxy.
  5. Pellizza, L. J.; **Duc, P.-A.**; Le Floch, E.; Mirabel, I. F., 2006, GCN 5268  
“GRB050223: host galaxy.”

### Actes de colloques

- p1. **Duc P.-A.** & Mirabel I.F., 1992: third DAEC Meeting - Meudon.  
“Tidal dwarf galaxies”
  - p2. Mirabel I.F. & **Duc P.-A.**, 1993: ESO/EIPC workshop. Cambridge University Press  
“Starbursts in Colliding Galaxies”
  - p3. Mirabel I.F. & **Duc P.-A.**, 1993: The Cold Universe. Rencontres de Moriond  
“Starburst galaxies”
  - p4. Mirabel I.F. & **Duc P.-A.**, 1993: Kentucky conference on Mass Transfer induced activity in galaxies  
“Induced starbursts in mergers”
  - p5. Mirabel I.F. & **Duc P.-A.**, 1994: ESO Conference and Workshop Proceedings No. 49, on  
“Dwarf galaxies“(Meylan, G. and Prugniel, P., eds)  
“Tidal dwarf galaxies”
  - p6. Dottori H., Mirabel I.F. & **Duc P.-A.**, 1994: ESO Conference and Workshop Proceedings No. 49, on  
“Dwarf galaxies“(Meylan and Prugniel, eds)  
“Tidal dwarf galaxies”
  - p7. Brinks E., Mirabel I.F. & **Duc P.-A.**, 1994: BAAS 185  
“Tracing the Gas in the Merger Arp 105”
  - p8. Chaty S., Mirabel I.F., **Duc P.-A.**, Wink J. & Rodriguez L.F., 1996: Proc. ‘Röntgenstrahlung  
from the Universe’, eds. Zimmermann, H.U.  
“Infrared and millimeter observations of the galactic superluminal source GRS 1915+105”
  - p9. Chaty S., Mirabel I.F., Rodriguez L.F., **Duc, P.-A.**, Sauvage M., Castro-Tirado A & Callanan  
P., 1996: proc. of the 2nd INTEGRAL workshop, ESA SP-382  
“Infrared observations and energetic outburst of GRS 1915+105”
  - p10. Loup C., **Duc P.-A.**, Fouqué P., Epchtein N. et al., 1996: IAP conference series  
“DENIS observations of AGB stars in the bar of the Large Magellanic Cloud”
  - p11. Fouqué P., Bertin E., **Duc, P.-A.** & Chevallier L., 1996: 3 Euroconference on NIR sky  
surveys  
“The DENIS operations: evaluation of the DENIS Survey from La Silla”
  - p12. Loup C., Omont A., **Duc P.-A.**, Fouqué F., Bertin E. & Epchtein N., 1996  
“DENIS survey of AGB stars in the LMC west bar and optical center fields”, dans: Proceed-  
ings of the 3rd Euroconference on NIR-surveys
  - p13. **Duc P.-A.**, Fritze-v. Alvensleben U., 1997: XVII Rencontres de Moriond  
“Stellar populations in tidal dwarf galaxies”
  - p14. **Duc P.-A.** & Mirabel I.F., 1997, Contribution invitée au symposium IAU 186 (Kyoto) on  
interacting galaxies  
“Properties of tidal dwarf galaxies“
  - p15. Fritze-v. Alvensleben U, Mller C.S. & **Duc P.-A.**, 1998: XVIII Rencontres de Moriond  
“Dwarf galaxies of tidal origin - relevant for cosmology ¿”
-

- p16. **Duc P.-A.**, Fritze-v. Alvensleben U. & Weilbacher P., 1998: Workshop on the Magellanic Clouds and other Dwarf Galaxies, Bad Honnef  
 “Tidal dwarf galaxies“
- p17. Fritze-v. Alvensleben U. & **Duc P.-A.**, 1998: Workshop on the Magellanic Clouds and other Dwarf Galaxies, Bad Honnef  
 “Tidal Dwarf Galaxies: Their Present State and Future Evolution“
- p18. **Duc P.-A.**, Papaderos P., Balkowski C., Cayatte V. & Thuan T.X., 1998: XVIII Rencontres de Moriond  
 “Environmental effects on dwarf galaxies in clusters“
- p19. Loup C., **Duc P. A.**, Fouqué P., Bertin E., Epchtein N., 1998  
 in ”The Impact of Near-Infrared Sky Surveys on Galactic and Extragalactic Astronomy”, ASP 230, 115  
 ”DENIS Survey of AGB and Tip-Rgb Stars in the LMC Bar West and the Optical Center Fields”
- p20. van Driel, et al., 1998:XVIII Rencontres de Moriond  
 “HI studies of dwarf galaxies at Nançay”
- p21. **Duc P.-A.**, Brinks E., Springel V., Pichardo B., 1999 in ”Building Galaxies: from the Primordial Universe to the Present”, XIXth Moriond meeting  
 “Inflow and outflows in NGC 2992/3”
- p22. **Duc P.-A.**, 1999, in “Chemical Evolution from Zero to High Redshift”, Walsh J., Rosa M.,eds  
 “Metallicity of Dwarf Galaxies in Clusters”
- p23. Brinks E., **Duc P.-A.**, Springel V., Pichardo B., Weilbacher P., Mirabel I.F., 2000 in ”Mapping the Hidden Universe“ASP Conference Proceedings, Vol. 218 Kraan-Korteweg R., Henning P., and Heinz A., eds  
 “Tidal Dwarf Galaxies in the Interacting System NGC 2992/2993”
- p24. **Duc P.-A.**, Brinks E., 2000 in “Gas & Galaxy Evolution“J.E. Hibbard, M.P. Rupen and J.H. van Gorkom, eds,ASP Conference Series  
 “HI Recycling: Formation of Tidal Dwarf Galaxies”
- p25. Fadda D., Elbaz D., **Duc P.-A.** and Flores H., 2000, in ”ASP Conf. Ser. 200: Clustering at High Redshift”, Mazure A., Le Fèvre O., and Le Brun V., eds  
 ”ISOCAM Observations of Distant Galaxy Clusters”
- p26. Weilbacher P., Fritze-von Alvensleben U., **Duc P.-A.**, 2001, in “Extragalactic Star Clusters”, eds. E.K. Grebel, D. Geisler, D. Minniti, IAU Symposium Series Vol. 207  
 “Dwarf Galaxies and Star Clusters in Tidal Tails“
- p27. Weilbacher P., **Duc P.-A.**, 2001, in “Dwarf Galaxies and their Environment”, eds. K.S. de Boer, R.-J. Dettmar, U. Klein  
 “Spectrophotometric Investigation of a Sample of Tidal Dwarf Galaxies“
- p28. Lisenfeld U., Braine J., **Duc P.-A.**, Charmandaris V., Vallejo O., Leon S., Brinks E., 2001 in “Dwarf Galaxies and their Environment”, eds. K.S. de Boer, R.-J. Dettmar, U. Klein  
 “Molecular Gas and Star Formation in Tidal Dwarf Galaxies“
- p29. **Duc P.-A.**, Balkowski C., Cayatte V., van Driel W., Papaderos P., Thuan T. X., Iglesias-Paramo J., Vilchez J., 2001 in  
 “Dwarf Galaxies and their Environment”, eds. K.S. de Boer, R.-J. Dettmar, U. Klein  
 “Environmental effects on HI-rich dwarf galaxies in the Hydra and Hercules clusters”
- p30. Weilbacher P. M., **Duc P.-A.**, Fritze-v. Alvensleben U., 2001, Ap&SS 277, 497  
 “Galaxy Recycling: The first sample of TDG candidates”
-



- 
- p31. Fadda D., **Duc P.-A.**, 2001, in "Sesto 2001-Tracing cosmic evolution with galaxy clusters", PASP Conf. Ser  
"The dark side of star formation in galaxy clusters: spectroscopic follow-up of clusters observed with ISOCAM"
- p32. Brinks E., **Duc P.-A.**, Springel V.; Pichardo B., Weilbacher P., Mirabel F., 2001, Ap&SS 277, 405  
"The Formation of Tidal Dwarf Galaxies in Interacting Systems: the Case of Arp 245"
- p33. Lisenfeld U., Braine J., Vallejo O., **Duc P.-A.**, Leon S., Brinks E., Charmandaris V., 2001, in "Modes of Star Formation and the Origin of Field Population", eds. E.K. Grebel & W. Brandner  
"Star Formation in Tidal Dwarf Galaxies"
- p34. **Duc P.-A.**, Braine J., Lisenfeld U., Amram P., Brinks E., 2001, in "The Evolution of Galaxies.II. Basic Building Blocks", M. Sauvage, G. Stasinska, L. Vigroux, D. Schaerer, S. Madden, eds  
"Mass loss from galaxies: feeding the IGM, recycling in the IGM"
- p35. **Duc P.-A.**, 2002, in "Societe francaise d'astronomie et d'astrophysique; scientific highlights 2002", Combes, D., et al. eds  
"Recycling intergalactic and interstellar matter"
- p36. **Duc P.-A.**, 2002, RMAC 17, 77  
"Recycling interstellar and intergalactic material"
- p37. LeFloc'h E., Mirabel I.F, **Duc P.-A.**, 2002, JApA. 22, 119  
"Preliminary Results on VLT K-band Imaging Observations of GRB Host Galaxies"
- p38. Braine J., **Duc P.-A.**, Lisenfeld U., Charmandaris V., Vallejo O.; Leon S., Brinks E., 2002, Ap&SS 281, 407  
"On-Going Galaxy Formation"
- p39. Weilbacher P., Fritze-vonAlvensleben U., **Duc P.-A.**, 2002, IAUS 207, 648  
"Dwarf Galaxies and Star Clusters in Tidal Tails"
- p40. **Duc P.-A.**, et al., Ap&SS 281, 347  
"Mass loss from galaxies: feeding the IGM, recycling in the IGM"
- p41. Fadda, D., **Duc P.-A.**, 2002, ASPC 268, 297  
"The Dark Side of Star Formation in Galaxy Clusters: Spectroscopic Follow-up of Clusters Observed with ISOCAM"
- p42. Lisenfeld et al., 2002, ASPC 285, 406  
"Star Formation in Tidal Dwarf Galaxies"
- p43. LeFloc'h E, et al. 2002 RMAC 17, 253  
"The blue colors of Gamma-ray burst host galaxies"
- p44. Le Floc'h E. et al., 2002, in "Societe francaise d'astronomie et d'astrophysique; scientific highlights 2002", Combes, D., et al. eds  
"Deriving the redshift of distant galaxies with Gamma-ray Burst transient edges"
- p45. Weilbacher, P. et al., 2003, Ap&SS 284, 639  
"Optical and NIR investigation of a sample of tidal dwarf candidates"
- p46. Lisenfeld et al., 2003, ASPC, 297, 215  
"Molecular Gas in the Intergalactic Medium of Stephan's Quintet"
- p47. Le Floc'h E., **Duc P.-A.**, et al., 2003, IAUS 216, 72  
"Are the Cosmic GRBS Reliable Tracers of Star Formation ?"
- p48. Braine, J. et al. 2004, IAU S217, 420  
"Head-on collisions: how to bring large quantities of gas out of inner disks"
- p49. Braine, J. et al. 2004, IAU S217, 518
-

- “Molecular Gas in Tidal Dwarf Galaxies: On-going Galaxy Formation”
- p50. Amram, P. et al., 2004, IAU S217, 526  
“Kinematics of Tidal Tails in Interacting Systems: Projection Effects and Dark Matter in TDGs”
- p51. Brinks, E., **Duc, P.-A.**, Walter, F., 2004, IAUS217, 532  
“VLA HI and OVRO CO Interferometry of a Tidal Dwarf Galaxy”
- p52. Weilbacher, P., et al., 2004, IAU S217, 540  
“Stellar Populations of a Sample of Tidal Dwarf Galaxies”
- p53. **Duc, P.-A.** et al., 2004, IAU S217, 550  
“Identifying old Tidal Dwarf Galaxies in Simulations and in the Nearby Universe”
- p54. van Driel, W. et al., 2004, IAU S217, 564  
“A Tidal Dwarf Galaxy in the Hercules Cluster?”
- p55. **Duc, P.-A.** et al., 2004, IAUC 195, 347  
“Luminous infrared starbursts in a cluster of galaxies”
- p56. **Duc, P.-A.** et al., 2005, Rencontres de Moriond  
“Star formation in colliding galaxies”
- p57. **Duc, P.-A.**, 2006, invited talk. r in: “Triggered Star Formation in a Turbulent ISM”, IAU Symposium 237, Prague, Czech Republic, August 2006; eds. B.G.Elmegreen & J. Palous  
“Tidal Dwarf Galaxies as Laboratories of Star Formation and Cosmology”
- p58. **Duc, P.-A.**, 2006, in “Studying Galaxy Evolution with Spitzer and Herschel”, eds. V. Charmandaris, D. Rigopoulou & N. Kylafis  
“Intergalactic Star Formation”
- p59. Weilbacher P. and **Duc, P.-A.**, 2006: in “Science Perspectives for 3D Spectroscopy”, eds. M. Kissler-Patig, M. M. Roth and J. R. Walsh, ESO Astrophysics Symposia  
“News from the ”Dentist’s Chair”: Observations of AM 1353-272 with the VIMOS IFU”
- p60. **Duc, P.-A.**, Bournaud, F & Brinks, E., 2007: in IAUS 236  
“Tidal Debris posing as Dark Galaxies”
- p61. **Duc, P.-A.** 2007: in SF2A 2008  
“Visible and invisible molecular gas in collisional debris of galaxies”

## Revues d’observatoire

1. **Duc P.-A.** & Mirabel I.F., 1997, The Messenger 89,14  
“Tidal dwarf galaxies”
2. Epchtein N., et al.,1997: The Messenger, 87, 27  
“The Deep Near-Infrared Southern Sky Survey (DENIS)”

## Revues de vulgarisation

1. Bournaud F. & **Duc P.-A.**, 2007, L’astronomie 121, 214  
“Galaxies naines de marée : des collisions géantes aux galaxies naines”
2. **Duc P.-A.** & Bournaud F., 2007, Dossier Pour la Science 56  
“Les marées matrices de galaxies naines”

## Thèses

1. **Duc, P.-A.**, thèse de l'université Paris 6, soutenue le 9 janvier 1995, devant le jury composé de M. Aubier, C. Balkowski, D. Sanders, T.X. Thuan, L. Vigroux et F. Mirabel  
"Genèse de galaxies naines dans les systèmes en interaction"
-

## Curriculum vitae

<b>Adresse:</b>	Service d'astrophysique CEA Saclay – Orme de Merisiers 91191 Gif sur Yvette cedex, France tel:+33 (0)1 69 08 92 68 e-mail: <a href="mailto:paduc@cea.fr">paduc@cea.fr</a>
<b>Date de naissance:</b>	1er janvier 1969 Nationalité française
<b>Situation familiale:</b>	Marié, 2 enfants nés en 2005 et 2007

### POSTES OCCUPÉS

2002-:	<b>Chargé de recherche au CNRS</b> (1ere classe) Service d'astrophysique - CEA Saclay, France (Adjoint au directeur de l'UMR AIM depuis 2005)
1999-2002:	<b>Chargé de recherche au CNRS</b> (2eme classe) Service d'astrophysique - CEA Saclay, France
1998-1999:	<b>Research Associate</b> Institute of Astronomy - Cambridge, Grande-Bretagne Post-doc du réseau européen TMR "Galaxy Formation and Evolution"
1996-1998:	<b>ESO Fellow</b> (Post-Doc) European Southern Observatory - Garching, Allemagne Tâches de service dans le groupe infrarouge
1995-1996:	<b>Coopérant</b> (Service National) European Southern Observatory - La Silla, Chili Membre de l'équipe opérationnelle du projet DeNIS (Deep Near-Infrared Survey)

### DISTINCTIONS

2003:	<b>Prix Jeune Chercheur</b> de la SF2A
2000:	<b>Récipiendaire bourse ATI</b> de l'INSU

---

 ETUDES ET DIPLÔMES

- 1991-1994: **Thèse de doctorat de l'Université Paris VI**  
 Service d'astrophysique - CEA Centre d'Etudes de Saclay
- Sujet: Genèse de galaxies naines dans les systèmes en interaction  
 sous la direction de F. Mirabel, défendue le 8 janvier 1995  
 (avec félicitations du jury)
- 1990-1991: **DEA** Astrophysique et techniques spatiales (mention B), Université de Paris VI
- 1988-1991: **Diplôme d'ingénieur**  
 Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées (Paris)  
 Spécialisation: Electronique - Imagerie et systèmes de détection
- 1990: Diplôme d'astronomie de l'Université du Mississippi (session d'été)
- 1986-1988: Classes préparatoires aux Grandes Ecoles d'ingénieur (Lycée du Parc, Lyon)
- 1986: Baccalauréat Série C (mention TB)

## THÈMES DE RECHERCHE

**Effets d'environnement sur la formation et l'évolution des galaxies**

- Etude multi-longueur d'onde de systèmes en interaction
- Les galaxies naines de marée comme sondes cosmologiques
- Formation stellaire intergalactique

**Evolution des propriétés des galaxies d'amas et des amas de galaxies**

- Formation stellaire enfouie
- Amas de galaxies comme traceurs de grandes structures

**Evolution des galaxies de champ**

- Propriétés des galaxies hôtes de Gamma Ray Bursts

**Travaux précédents**

- Galaxies naines d'amas comme traceurs de l'environnement
  - Relevés de Galaxies Infrarouges Ultralumineuses
  - Recherches de contreparties optiques/infrarouges de microquasars
  - Relevés infrarouges (membre équipe opérations du projet DENIS)
  - Opacité des galaxies spirales (stage de DEA, sous la responsabilité de F. Mirabel)
  - Contribution des amas de galaxies au fond diffus X (stage d'Ecole d'ingénieur, sous la responsabilité de D. Gerbal)
-

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Nombre d'articles dans des revues de rang A: 50  
 Nombre d'articles dans des actes de colloques: 61  
 Circulaires IAU: 3; Revues d'observatoire: 2; Revues de vulgarisation: 2  
 Communiqués de presse: 6

ADMINISTRATION DE LA RECHERCHE - ENCADREMENT

**Appartenance à des comités scientifiques**

*Programme National Galaxies*

- Membre du bureau (Secrétaire scientifique, 2005–2008)
- Membre du Conseil Scientifique (2001-2008)
- Président du comité d'allocation du temps de télescope OHP/TBL (2001-2004)
- Membre du comité d'allocation du temps de télescope OHP/TBL (2001-2008)

*Télescope Canada-France-Hawaii*

- Président du comité français d'allocation du temps de télescope (FTAC) (2005-2008)
- Membre du Science Advisory Committee (SAC) (2005-2009)
- Vice-président du Science Advisory Committee (SAC) (2006-2007)
- Président du Science Advisory Committee (SAC) (2008-2009)

*Membre du conseil scientifique de l'OSU OAMP (2004–2007)*

*Service d'astrophysique du CEA-Saclay*

- Adjoint au directeur du laboratoire AIM (UMR 7158, 2005–2008)
- Membre du Groupe Stratégie (2001–2003)
- Membre de la cellule communication (2001–2006)

**Organisation de conférences**

- Initiateur et organisateur de plusieurs ateliers sur les galaxies naines de marée (Saclay-Paris, janvier 2001; 20 participants; Paris, décembre 2006; Bordeaux, octobre 2007)
- Co-organisateur de la journée PNG lors de la Semaine de l'Astrophysique (Paris, juin 2002; environ 50 participants)
- Président du Scientific Organizing Committee pour le symposium IAU 217 ("Recycling intergalactic and interstellar matter", Sydney, juillet 2003, 150 participants); Co-éditeur des actes du symposium (publiés en juin 2004)

**Re-lecture**

Relecteur régulier pour les revues 'Astronomy & Astrophysics', 'Astrophysical Journal' et 'Astronomical Journal'

**Encadrement d'étudiants**

- Directeur de thèse d'un étudiant du Service d'astrophysique du CEA-Saclay (soutenue en novembre 2007)
- Co-direction de thèse d'un étudiant de l'Université de Göttingen (Soutenue en octobre 2002)
- Encadrement de stage d'un étudiant de DEA (juin 2003), de M1 (juillet 2008)

---

## Encadrement

Le mémoire de HDR résume les travaux des étudiants que j'ai eu l'occasion d'encadrer. Je donne ici des informations plus factuelle sur le déroulement de ces stages et thèses.

### Stage de DEA: Frédéric Bournaud, mars-juin 2002

Frédéric Bournaud a effectué son stage de DEA sous ma direction sur la cinématique des systèmes en interaction. Il a analysé des données Fabry-Perot d'un échantillon de galaxies en interaction et effectué des modèles numériques pour les interpréter. Ce stage particulièrement fructueux a débouché sur 3 publications.

J'ai continué à collaborer avec F. Bournaud tout au long de son travail de doctorat, effectué sous la direction de Françoise Combes au LERMA (Observatoire de Paris). Depuis sa soutenance, en juin 2006, F. Bournaud travaille au Service d'Astrophysique du CEA-Saclay où il a obtenu un poste permanent en 2007.



### “Diploma thesis” et thèse de doctorat: Peter Weilbacher, 1998-2002

Peter Weilbacher, alors étudiant de l'université de Goettingen (Allemagne), a effectué sous ma co-direction son stage de maîtrise (Diploma thesis, d'une durée de 1 an), puis sa thèse. Sa directrice de thèse en Allemagne était Uta Fritze-von-Alvensleben. Il a travaillé sur les propriétés photométriques et spectroscopiques de candidats naines de marée. Quatre articles dans des journaux à comité de lecture, ainsi que 16 compte rendus de conférences, résultent de cette collaboration.

Suite à sa soutenance de thèse, Peter Weilbacher a effectué un stage post-doctoral à l'université de Durham (Grande-Bretagne). Il a obtenu ensuite un poste permanent à l'Université de Potsdam (Allemagne).



### **Thèse de doctorat: Médéric Boquien, 2004-2007**

Médéric Boquien a effectué sa thèse de doctorat dans le laboratoire AIM (UMR Paris 7 - CEA-Saclay - CNRS). J'avais obtenu de l'université Paris Diderot une dérogation pour pouvoir officiellement diriger ses recherches. Pour le CEA qui a financé sa thèse via une bourse CFR (et qui exige une habilitation pour l'encadrement des thèses), le directeur de thèse était Jonathan Braine, astronome adjoint à l'observatoire de Bordeaux. M. Boquien y a d'ailleurs effectué deux courts séjours. Ses travaux de recherche ont porté sur la "formation stellaire intergalactique", en particulier dans les débris de collision et les naines de marée. Il a combiné pour cela des données de télescope propriétaires et d'archive. Ses résultats ont été présentés dans trois articles à comité de lecture.

Depuis sa soutenance de thèse, en novembre 2007, Médéric Boquien effectue un stage post-doctoral à l'université du Massachusetts (Etats-Unis) sous la direction de Daniela Calzetti.



### **Stage d'école d'ingénieur: Vincent Bouillot, juillet-septembre 2008**

Vincent Bouillot, élève de deuxième année à l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Grenoble, a effectué sous ma tutelle un stage ingénieur de trois mois. Il a construit une base de données de galaxies en interaction repérées à l'oeil dans les données du sondage grand champ CFHTLS.

### **Stage post-doctoral: Giovanna Temporin, 2007-2008**

Giovanna Temporin, chercheuse italienne qui a effectué ses études à l'université de Innsbruck (Autriche), effectue sous ma responsabilité un stage post-doctoral financé par un contrat CTE du CEA. Nous travaillons sur le déclenchement de la formation stellaire dans les galaxies d'amas, dépisté à l'aide de données du satellite infrarouge Spitzer et des données du sondage optique CFHTLS.

### **Encadrements divers**

A plusieurs reprises, j'ai servi de "conseiller scientifique" officieux de plusieurs stagiaires et doctorants. J'ai plus particulièrement "suivi de près" le travail de thèse de Emeric Le Floch (2000-2003, directeur de thèse: Felix Mirabel) qui portait sur les galaxies hôtes de sursauts gamma. Ces études ont été publiées dans trois articles. Emeric Le Floch travaille actuellement à l'université de Hawaii où il a reçu un Spitzer fellowship.

### **Jurys de thèse**

J'ai participé comme examinateur aux jurys de thèse de F. Bournaud, M. Boquien, O. Tiret et de HDR de A. Boselli.