

Chaire Galaxies et Cosmologie

# Interactions et fusions de galaxies au cours du temps



#### **Françoise Combes**



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

# Principales clefs de la formation hiérarchique

- → Fréquence des interactions localement à z=0 Influence de l'environnement
- ➔ Méthodes pour retrouver le destin des galaxies, leur passé de fusion
- →Quelle évolution: interactions et fusions tout au long de l'âge de l'Univers?
  Observations JWST et simulations





# Interactions à z=0

Les interactions de galaxies sont fréquentes (qq%), car la grande majorité appartient à des groupes

L'interaction crée des marées:

Formation de ponts de matière entre les galaxies
Burst de formation d'étoiles
Perturbations externes, queues de marée, rides, coquilles
Crée des barres internes et des flots de gaz vers le centre
AGN



#### Simulations





# Ultra-lumineuses à z=0

Dans les années1990, le satellite IRAS découvre des galaxies ultra-lumineuses à  $\lambda = 100 \mu m$  (infra-rouge lointain)



Sanders & Mirabel 1996



# ULIRG= Starbursts, dominent les quasars

Starburst, LIR/Lopt >> 1

Lumière des étoiles jeunes obscurcie par la poussière

Les galaxies les plus lumineuses sont les plus obscurcies

LIRG:  $L > 10^{11} L_{\odot}$ ULIRG:  $L > 10^{12} L_{\odot}$ 





Pour  $L > 10^{11} L_{\odot}$  les galaxies dominent la population z<0.3 plus abondantes que les QSOs Energie des starbursts à L>  $10^{12}L_{\odot}$ , tous des mergers

Dans certains cas, un AGN est aussi présent

# ARP 220, NGC 6240, fusions majeures

Les ULIRG possèdent d'énormes quantités de gaz  $H_2$  et de poussières Gas dense et chaud 10<sup>5</sup> to 10<sup>7</sup> cm<sup>-3</sup>, 60-80K Cumulent des nuages géants de formation d'étoiles comme Orion Emission compacte: Arp200, 300pc une grande épaisseur optique  $\rightarrow$  corps noir  $_0$  20  $T_{B}(R-J)[K]_{60}$ 

Normalement émission 100 $\mu$  est mince  $\tau \sim v^{\beta}$ avec  $\beta \sim 2$ , ici  $\tau >>1$  commence à 60 $\mu$ 



2 AGN





# NGC 6240 fusion majeure

Deux AGN, radio et X deux trous noirs SMBH →Outflow 11% du gaz V> 500km/s







#### $M(H_2)=9 \ 10^9 M_{\odot}$ entre les 2 noyaux

## Déclencher la formation d'étoiles

Les simulations utilisent des recettes, pour la physique sous-grille Loi de Schmidt avec seuil, où le taux de SF est proportionnel à la **densité de gaz** 

*e.g. Mihos & Hernquist (1994, 96)* 





#### Résultat dépend de la stabilité du disque

Sans bulbe, le disque est plus instable A la fin, le même taux final de formation Stellaire

Dépend aussi des recettes pour le feedback Vents stellaires, chauffage, énergie cinétique



Hibbard's website HI 21cm

NGC 7252: prototype De la fusion majeure

→ Forme une elliptique



Formation de naines de marées (tidal dwarfs)

En fin du filament de marée

#### Formation de naines de marées

Différentes des naines

Jeunes étoiles Grande métallicité

Pas de matière noire ?

Durée de vie



Braine et al 2000, 01

#### HI in FIR selected mergers

#### HI in optically selected mergers



Ensemble de fusions de galaxies, contours HI-21cm (*Hibbard's website*)

Blue: HI Green: optical Red : H $\alpha$ 



La cinématique peut-elle diagnostiquer les fusions?

Hibbard & Yun, in preparation

Hibbard & van Gorkom 1996, Hibbard et al. 1999, English et al. 1999

#### HI contours on HI velocity field

Champs de vitesse perturbés, mais pas toujours..

# Evolution jusqu'à z=1

2600 sources Spitzer MIPS 24 $\mu$ m 0.03 < z < 1 55% du flux total

La population 0.5<z<1 est dominée par les LIRGs

→ seule une combinaison d'évolution  $_{C}^{\underline{H}}$  des luminosités et des nombres

 $L_{IR} \propto (1+z)^{3.2}$ , N(L)  $\propto (1+z)^{0.7}$ 

La densité d'énergie croît comme  $(1+z)^{3.9}$ 



Le Floc'h et al 2005

# Evolution jusqu'à z=2

30 000 sources Spitzer MIPS 24μm 0.03 < z < 2 50% du flux total jusqu'à z=1 80% du flux total jusqu'à z=2

La population z > 2 ne contribue que marginalement  $\rightarrow$  moins d'obscuration

→les modèles semi-analytiques
(Lacey et al 2008) ne prédisent pas
les observations
Sous-estimations d'objets brillants/ et massifs à grand z?
Sur estimation de sources a z~2 de faible brillance



Le Floc'h et al 2008

# Evolution jusqu'à z=3

 $\begin{array}{l} 1500 \; sources \; Spitzer \; 24 \mu m \; > 83 mJy \\ 0.01 < z < 3.5 \\ 10^8 \; L_{\odot} < L < 10^{14} L_{\odot} \end{array}$ 

Très bonne corrélation entre  $L_{IR}$  et fraction de fusions Pour L> 10<sup>12</sup> L<sub> $\odot$ </sub>, 50%

Pour z> 1, la fraction de fusions majeures descend, ~30%–40% pour ULIRG → Difficile de reconnaître?

→ Comme la phase ULIRG est brève, ils se peut que toutes les elliptiques ( $<10^{12}M_{\odot}$ ) soient formées par fusion majeures avec gaz

Kartaltepe et al 2010



# Identification des paires à grand z

**Fusions majeures**: le rapport de masse entre les deux galaxies n'est pas plus grand que 4

En dessous, c'est une **fusion mineure** 

L'identification des paires ne suffit pas Il faut trouver une évidence d'interaction

➔ Perturbations de marée plus difficiles à voir à grand z Exemples de paires de galaxies, devant conduire à des fusions majeures





## Influence de la sensibilité

Magnitude limite des images → Principal obstacle pour identifier les perturbations

Image observée en bande g

« Observations » des simulations numériques



Different color scale

Mancillas et al 2019

# Perturbations: queues de marée

Définition des queues de marée (flèche blanche) dans des simulations cosmologiques

Différentes orientations, Projections





## Perturbations: courants stellaires

Définition des courants stellaires (flèche blanche) dans des simulations cosmologiques

Différentes orientations, Projections





# Perturbations: coquilles stellaires

- Définition des coquilles stellaires (flèche blanche) dans des simulations cosmologiques
- Différentes orientations, Projections







Mancillas et al 2019



#### Comparaison images MAtlas, CFHT

#### **Evolution des perturbations**

**Courants stellaires**: les plus difficiles à détecter



# Fraction de paires vs z selon la masse

 $9.7 < \log M_{*} < 10.3$  ou  $10.3 < \log M_{*}$ Et comparaison avec les simulations EAGLE





Nbre de fusions  $\propto (1+z)^m$ 

Avec m = 0.8 galaxies massives m=1.8 faibles masses Paires entre 5 et 30kpc

Taux de fusions 0.07/Gyr à z<1  $\rightarrow$ 7 /Gyr à z=6 Duncan et al 2019

# Identification des interactions par les perturbations



#### Nombre de fusions dépend de l'environnement

Fusions fréquentes dans les groupes: Échelle de temps  $t_{friction} \propto \sigma^3 - - \sigma$  bien plus faible (~100km/s) que dans les amas (1000km/s)

Pour déplacer les galaxies vers le centre en  $t_H v \sim 250 \text{km/s}$ 

2% des galaxies en groupe fusionnent par Gyr

A grand z,  $\rho \propto (1+z)^3$ , taux de fusion plus élevé,  $t_{dyn} \propto (1+z)^{-1.5}$ 



Les fusions se font dans les groupes Les groupes fusionnent en amas

## Starbursts et fusions



Les fusions croissent plus vite avec z que les starbursts

 $\rightarrow$ Les galaxies assemblent leur masse par accrétion des filaments cosmiques, à grand z



62000 galaxies dans CANDELS + Herschel stacking  $\rightarrow$  70% des étoiles se forment dans la MS *Schreiber et al 2015* 

# Disques sur la séquence principale

Couleur bleue, indice de Sersic  $n=1 \rightarrow$  disques

Confirmation: l'essentiel des étoiles se forment dans les disques sur la MS





#### Starbursts en rouge, au dessus de la MS Grande densité de surface de SFR

Wuyts et al 2011

## Rôle des fusions et de l'évolution séculaire

Simulation semi-analytique GALFORM Taux relatif de croissance →dépend de la masse des galaxies

Fusions dominent pour  $M_* > 10^{11}~M_{\odot}$  Aussi pour  $M_* < 10^{8.5}~M_{\odot}$ 





Les sphéroides se forment essentiellement par évolution séculaire (pseudo-ulbes)

Husko et al 2023

## Contribution à la masse des sphéroides



tandis que starbursts dûs à la fusion sont relativement négligeables, sauf à très grand z *Husko et al 2023* 

# Recherche de fusion par paires: dépend du modèle cosmologique

Du nombre de paires par unité de volume, et en supposant la durée d'une fusion  $\rightarrow$ Il est possible de déduire le nombre de fusions

Durée de la fusion: dépend de la friction dynamique

ACDM: les deux galaxies perdent leur énergie orbitale par friction sur le halo de matière noire qui prend le moment angulaire



#### Temps de fusion: 200-300Myr



# Interactions de galaxies: les Antennes: MOND versus CDM

MOND

La friction dynamique est bien plus faible avec MOND: les fusions durent plus longtemps

CDM



Que ce soit avec ou sans gaz, l'échelle de temps d'une fusion avec MOND est de quelques Gyr

#### Fréquence des starbursts induits

CDM: la friction dynamique sur les particules de matière noire est très efficace → Fusion en un seul passage (200 Myr)

**MOND**: avec le même moment angulaire, la fusion demande plusieurs passages

Starburst à chaque passage, aux péricentres

➔ Nombre de starbursts peut
 être expliqué de 2 façons
 Non équivalent au nombre de fusions



# Séparation des starbursts des fusions

Avec l'aide du « machine learning », on peut apprendre à des algorithmes de trier parmi les galaxies Apprentissage sur des simulations numériques Illustris-TNG 0.5 < z < 3, SFR et M<sub>\*</sub> donnés avec les images

Post-mergers		Star forming	
z = 2.1 F125W SFR = 23.15	z = 2.58 F160W SFR = 26.15	z = 0.62 F814W SFR = 27.94	z = 1.07 F814W SFR = 24.27
		1	•
$T_m = 0.15, \mu = 0.29$ $log(M_*) = 10.16$	$T_m = 0.39, \mu = 0.50$ $log(M_*) = 10.57$	<i>log(M</i> *) = 10.53	$log(M_{*}) = 10.64$
z = 2.21 F125W SFR = 47.12	z = 2.58 F160W SFR = 56.14	z = 1.07 F814W SFR = 41.60	z = 1.07 F814W SFR = 42.02
$T_m = 0.30, \mu = 0.33$ $log(M_*) = 10.57$	$T_m = 0.30, \mu = 0.65$ log(M*) = 10.53	<i>log</i> ( <i>M</i> * ) = 10.51	<i>log</i> ( <i>M</i> * ) = 10.51



160 000 images TNG100 80% succès (25% pour CAS)

Ferreira et al 2022

# Séparation des fusions

Plusieurs algorithmes utilisés, tous sont meilleurs que le critère d'asymétrie A Plus difficile d'éviter les fausses identifications à grand redshift

→Résultat dépend de la masse





Ferreira et al 2022

# Les fusions augmentent bien avec z

Une fois les fusions identifiées, même  $\Delta MS$ , → Les restes de fusions sont des sphéroïdes (indice de Sersic)



1.0 < z < 1.5

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0.5 < z < 1.0

-•- Star Forming -•- Post-Mergers

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

Ams

# Diagnostic de Température

En fonction du redshift, la température du gaz et de la poussière augmente, avec SFR **Poussière**: FIR et sub-mm Herschel, **gaz:** survey photométriques (SED)



Steinhardt et al 2023

# Evolution en trois étapes

Diagramme T<sub>SF</sub> température des nuages moléculaires Et sSFR: efficacité de transformer le gaz en étoiles

Première étape: formation d'un cœur, puis MS, enfin passive

![](_page_36_Figure_3.jpeg)

Steinhardt et al 2023

# Différents processus de feedback

Formation d'un cœur bleu et compact Puis évolution « Inside out » Croissance du centre au bord

Séquence morphologique Il existe du gaz même à grand rayon, Mais qui ne forme pas d'étoile

La première étape correspond à un starburst Sans interaction de galaxies Toute galaxie passerait pas ce stade

![](_page_37_Figure_4.jpeg)

Feedback moins efficace dans le cœur?
Puits de potentiel profond
Chauffage des CR absent?
Faible Z → étoiles massives
Fort influx de gaz

# Galaxies z>7: époque de reionisation JWST

SW: 1.15, 1.5, 2μm LW: 2.8, 3.6, 4.4μm

Boîtes de 2.4" Pixel 31, 63mas

Fréquence des interactions 21%

![](_page_38_Figure_4.jpeg)

Bandes individuelles

Treu et al 2023

![](_page_38_Figure_7.jpeg)

## Scénario d'accrétion/interaction

Les index CAS ne varient pas avec la longueur d'onde

Pas de distinction bulbe-disque

Temps de formation trop court Trop peu de vieilles étoiles

![](_page_39_Figure_4.jpeg)

Galaxies LBG, âge 400-800 Myr Forment des étoiles rapidement, à la fois par accrétion de clumps d'étoiles Et d'interactions de galaxies

Treu et al 2023

# Fusion de galaxies naines à z=5

 $M_* \sim 10^7 M_{\odot}$  starburst 100Myr Amplification x 12-15 devant MACS 0417 Métallicité Z = 0.2 Z\_{\odot} Séparation 1.2kpc Gardent l'

Gardent l'univers ionisé!

 $[OIII] + H\beta$ 

(from F410M - F356W) (from F277W - F356W)

0.2 kpc

Hα

0.2 kpc

![](_page_40_Figure_3.jpeg)

Asada et al 2023

## Formation de bulbes à z=2

SMG, ULIRG  $L_{IR} \sim 10^{12} L_{\odot}$ 

Galaxies sub-mm z=2, Bulbe en formation, à 4.4µm (bande H) Image plus compacte (0.7kpc) Mais le disque spiral domine encore signes d'interactions → starbursts

![](_page_41_Figure_3.jpeg)

![](_page_41_Figure_4.jpeg)

# **Fusions/interactions**

Fréquence des structures spirales, barres, annulaires (résonantes)
Gradient de couleur centre-bord
→ Bulbe rouge

![](_page_42_Figure_2.jpeg)

Data

Model

Residual

Chen et al 2022

## Quasars, galaxies passives z=3-5, avec JWST

Plutôt isolées, 1-2 interactions,  $M_*=10^{11}M_{\odot}$  AGN puissants Lx ~10<sup>44</sup> erg/s 3/5 sphéroides  $\rightarrow$  Fort feedback AGN pour stopper la formation d'étoiles

RGB 1.5, 2, 2.8 µm

![](_page_43_Figure_3.jpeg)

Galaxies en dessous de la MS  $\rightarrow$  passives Pourtant, alimentées par du gaz au centre pour l'AGN

Kocevski et al 2023

# **Contributions relatives galaxie-AGN**

Le SED permet de distinguer galaxie et AGN

Le diagramme UVJ montre que les galaxies sont quiescentes (symbole plein: AGN soustrait)

![](_page_44_Figure_3.jpeg)

→Plus long cycle d'activité?

![](_page_44_Figure_5.jpeg)

![](_page_44_Figure_6.jpeg)

Kocevski et al 2023

# Simulations à grand z

Galaxies riches en gaz Instabilité du disque de gaz Galaxies fragmentées « clumpy »

Grande turbulence Dispersion de vitesses

Galaxies isolées  $\triangle$ Fusions +

Perret et al 2014

![](_page_45_Figure_5.jpeg)

# Fusion ou accrétion à grand redshift

La coalescence des galaxies ne produit pas de starburst → Phénomène de saturation Dépend des processus de feedback

![](_page_46_Figure_2.jpeg)

Perret et al 2014

t(peri) = 250Myr, t(fusion) indiqués Rouge: SFR des 2 galaxies isolées t=640 Myr, 280Myr après fusion

![](_page_46_Figure_6.jpeg)

# Influence de la fraction de gaz

Nombre de clumps denses

→ Nombre de sites de formation d'étoiles

![](_page_47_Figure_3.jpeg)

Pas d'accrétion de gaz froid

Fensch et al 2017

Fgas = 10%

![](_page_47_Figure_7.jpeg)

60%

# Saturation de la formation d'étoiles

#### Quantifier l'importance des starbursts

![](_page_48_Figure_2.jpeg)

Importance du feedback EOS chauffe le gaz dense

Vents stellaires, effet fontaine, recycle le gas disponible pour plus de formation d'étoiles

![](_page_48_Figure_5.jpeg)

# Influence de la morphologie

Starburst toujours visible, Primaire: sur tout le disque Secondaire: surtout au centre

![](_page_49_Figure_2.jpeg)

![](_page_49_Figure_3.jpeg)

Moreno et al 2021

## Simulations d'interactions et starburst

A z=0, les starbursts les plus remarquables sont tous des galaxies en interaction/fusion ULIRG  $L > 10^{12} L_{\odot}$ 

A grand z, le taux de formation SFR croît, car la fraction de gaz croît Les galaxies peuvent être ULIRG tout en étant sur la MS

Décalage possible entre interaction et starburst, dû à la compression dans le coeur

Renaud et al 2022

![](_page_50_Figure_5.jpeg)

[kpc]

0

[kpc]

10

20

# Force de marée compressives

En général les forces de marée étirent, parfois elles compressent, si la densité centrale est plate (core)

![](_page_51_Figure_2.jpeg)

Au cours de l'interaction compression → SFR, formation d'amas stellaires, GC Naines de marée

![](_page_51_Figure_4.jpeg)

![](_page_51_Figure_5.jpeg)

# Compression du gaz et starbursts

La fraction de gaz dense, formant des étoiles, est très amplifiée par la compression Mais pas à chaque fusion

Pas de compression dans la première Phase (pas de disque?) → Pas de starburst

Renaud et al 2022

![](_page_52_Figure_4.jpeg)

#### Résumé

→Importance des interactions localement à z=0 Engendrent des starbursts (ULIRG) Influence de l'environnement – Suppression du gaz

➔ Méthodes pour retrouver le destin des galaxies, leur passé de fusion – Structures a faible brillance de Surface, fusions mineures

→Quelle évolution: interactions et fusions tout au long de l'âge de l'Univers?
Starburst plus difficile à voir à grand z
Nécessité d'un disque

![](_page_53_Picture_4.jpeg)