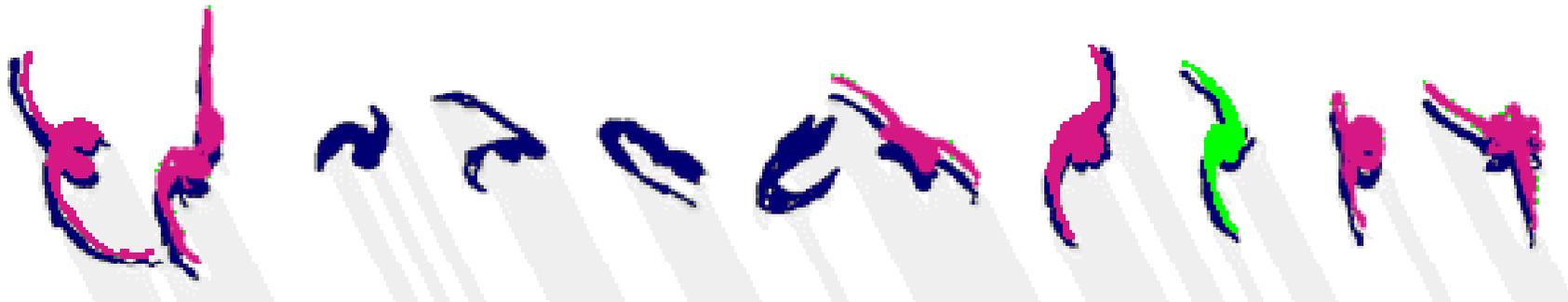




COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Interactions entre Galaxies



**Françoise Combes**



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

# NGC 2207 et IC 2163– image Hubble



Beaucoup plus d'interactions que prévu avec un univers homogène  
→ Les galaxies sont grégaires, **se forment dans les filaments**

# Arp 188

Les interactions de galaxies  
sont accompagnées de  
longues queues de marée

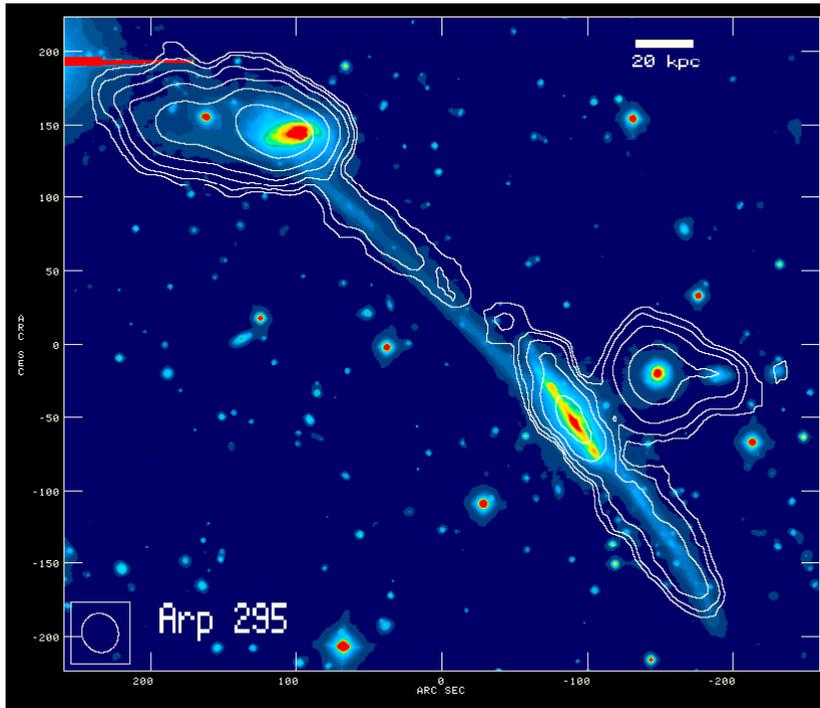
en plus de perturbations des  
disques

Dans les **étoiles** et encore  
plus **dans le gaz HI**, connu  
pour ses grandes  
étendues en rayon



# Arp 295

Le catalogue de Arp des 338 galaxies particulières est paru en 1966  
l'Atlas des Galaxies normales en 1961



Contours en blanc:  
**Gaz HI 21cm**



# Nature de l'interaction

Beaucoup de propositions, et notamment interactions magnétiques (tube de force)



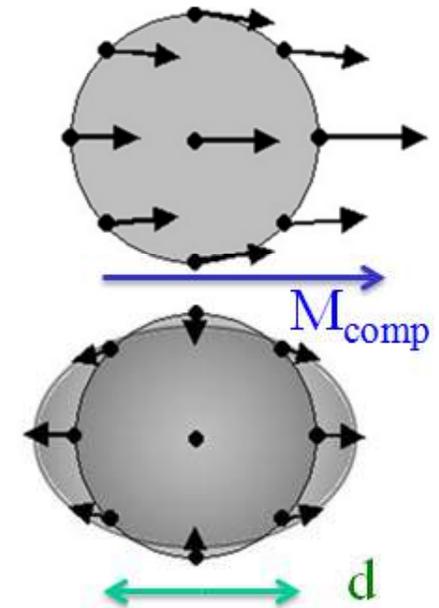
En 1972, **Toomre & Toomre**: simulations à 3 corps restreint (après Pfleiderer and Siedentopf, qq années auparavant)

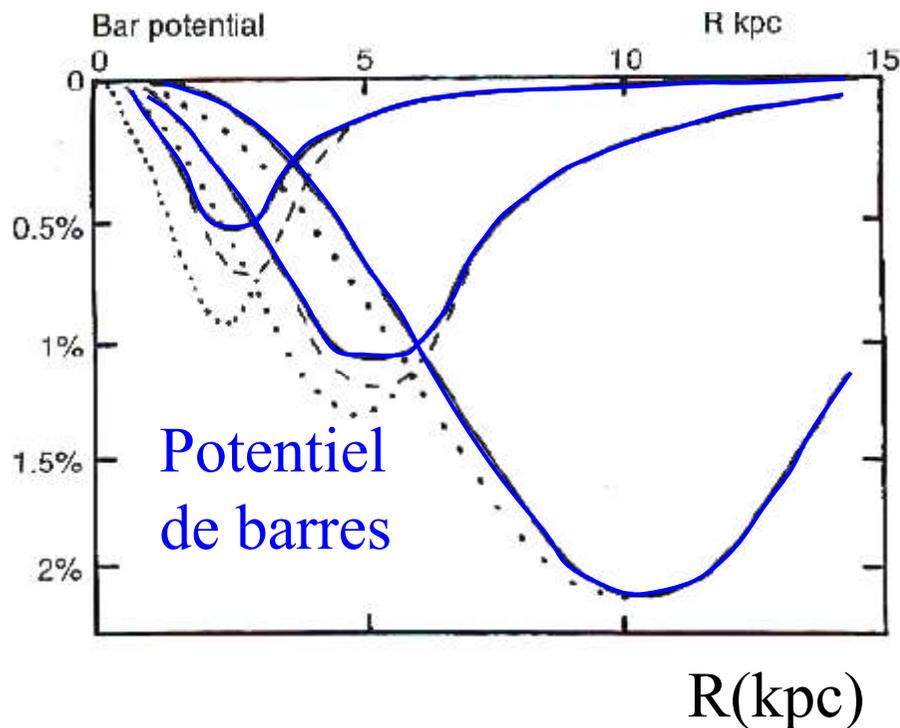
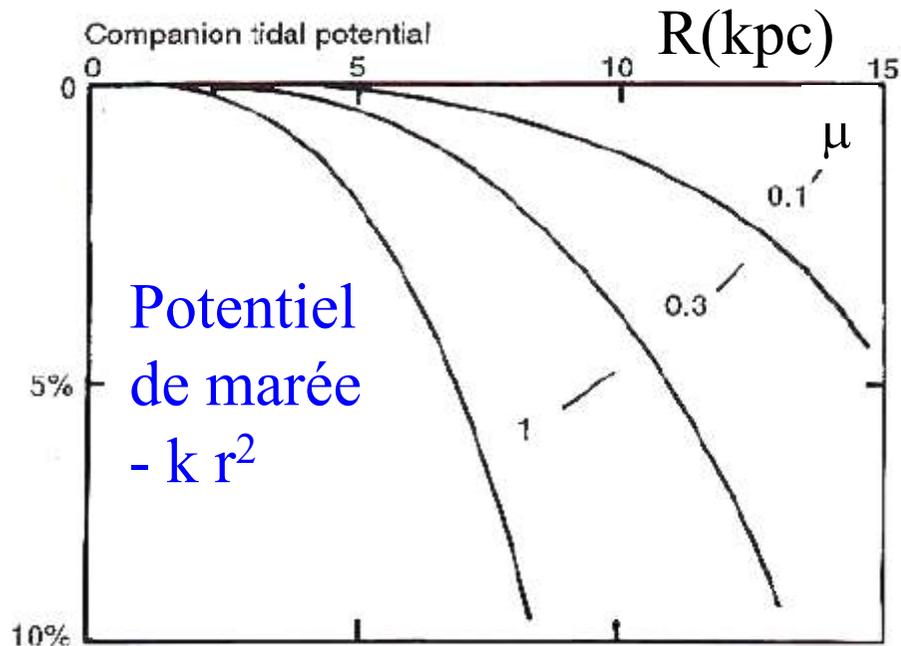
→ Interactions purement gravitationnelles  
Bisymétrie  $m=2$  (en  $\cos 2\theta$ )  
Similarité avec les barres



Génération de deux bras spiraux

La self-gravité et son **amplification** permet aux parties Internes de développer des ondes de densité contrastées





Comparaison des potentiels des barres et des interactions de marée

Différentes forces à grande distance du centre, où la barre est faible

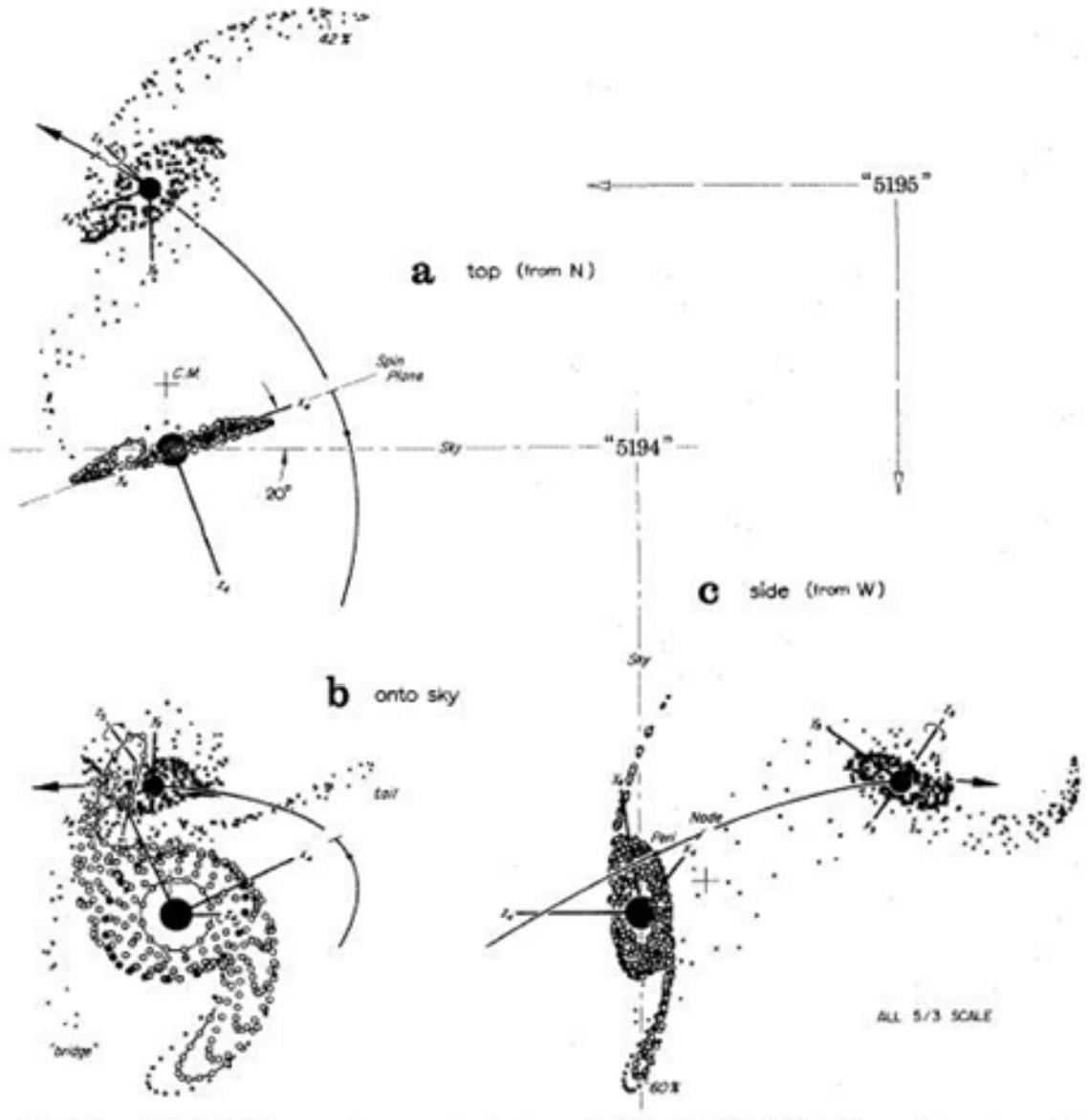
Les interactions sont, elles, dominantes aux bords

$\mu$  est le rapport de masse entre les deux galaxies

→ Une interaction peut engendrer la formation d'une barre

Messier 51  
et son compagnon  
NGC 5195

Toomre & Toomre  
1972

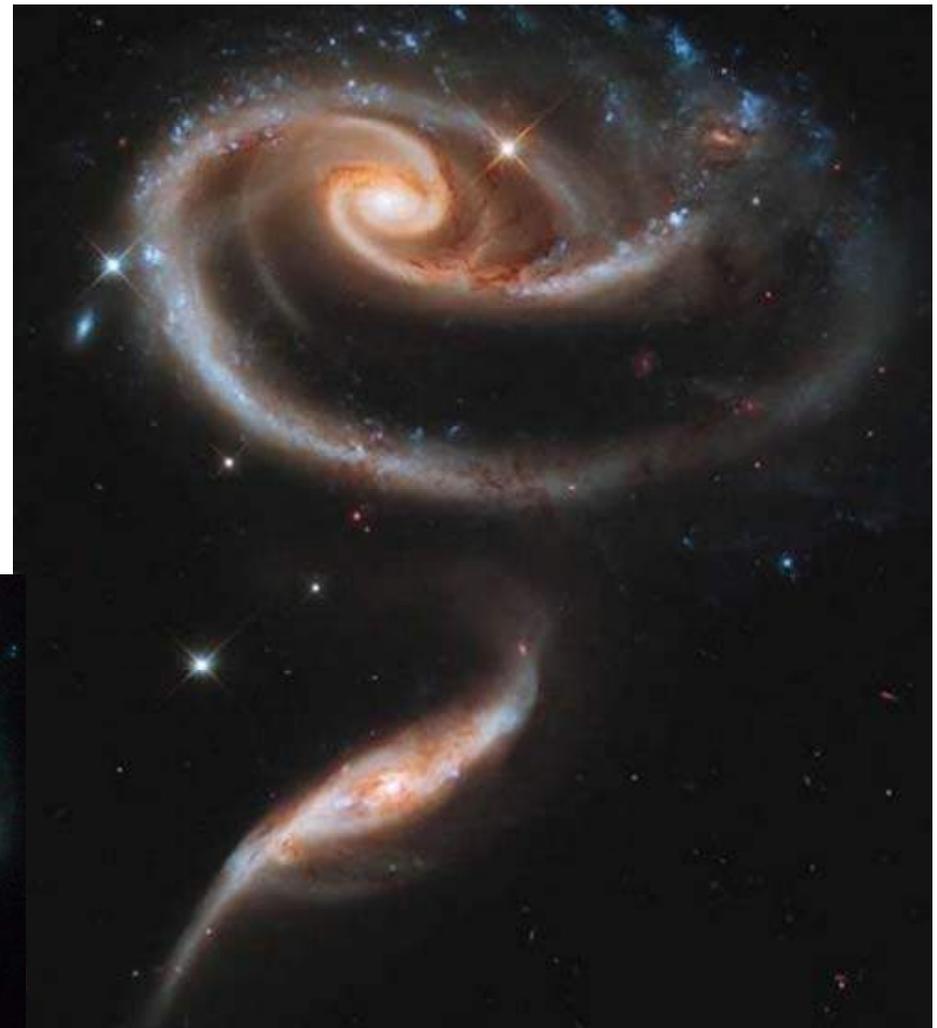
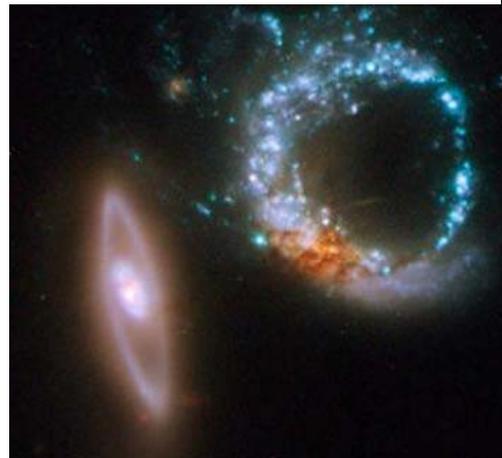


3-cors restraint =  
2 corps + particule test



# Interactions entre galaxies

- Phénomènes de marée très fréquents
- Formation de ponts de matière entre les galaxies
- **Burst de formation d'étoiles**
- Les galaxies en anneau
- Les coquilles



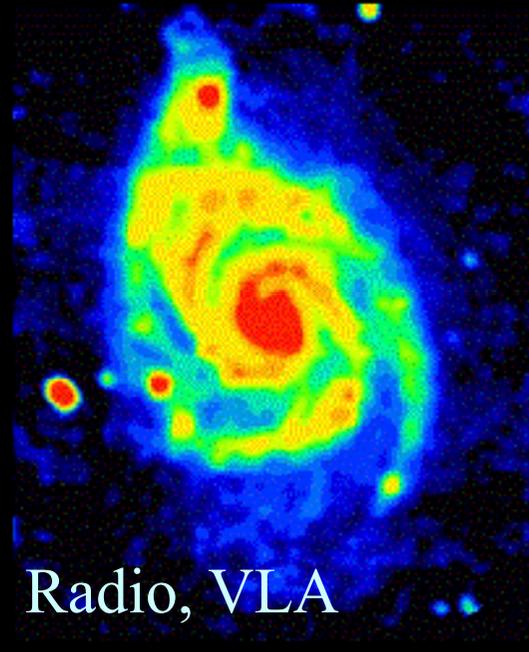
**Messier 51**  
HI-21cm, VLA

Extensions  
d'étoiles  
+ rayons X



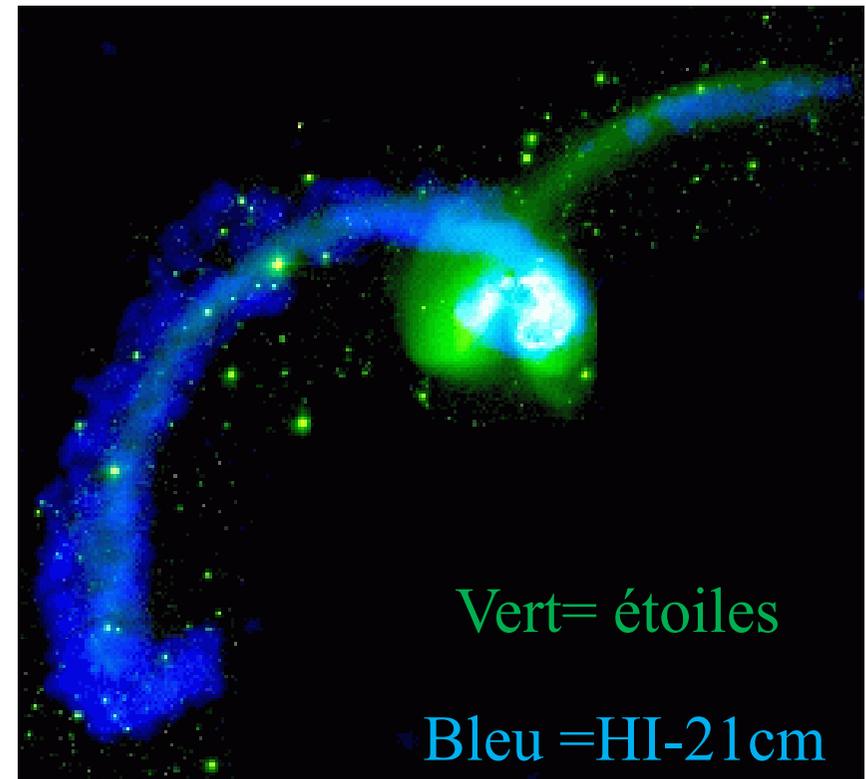
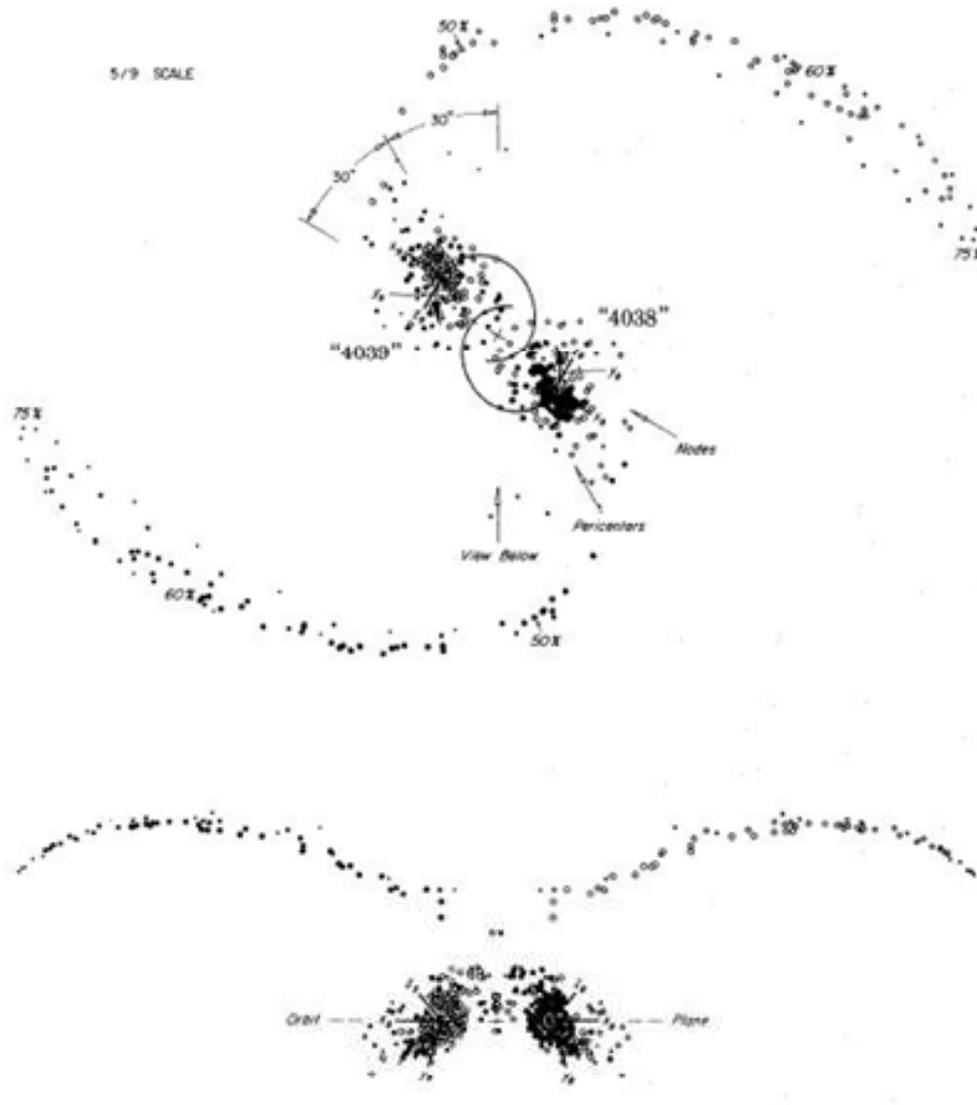
Infrarouge  
Spitzer

Bleu: vieilles  
étoiles  
Rose: poussière



Radio, VLA

Les Antennes  
Toomre & Toomre  
1972



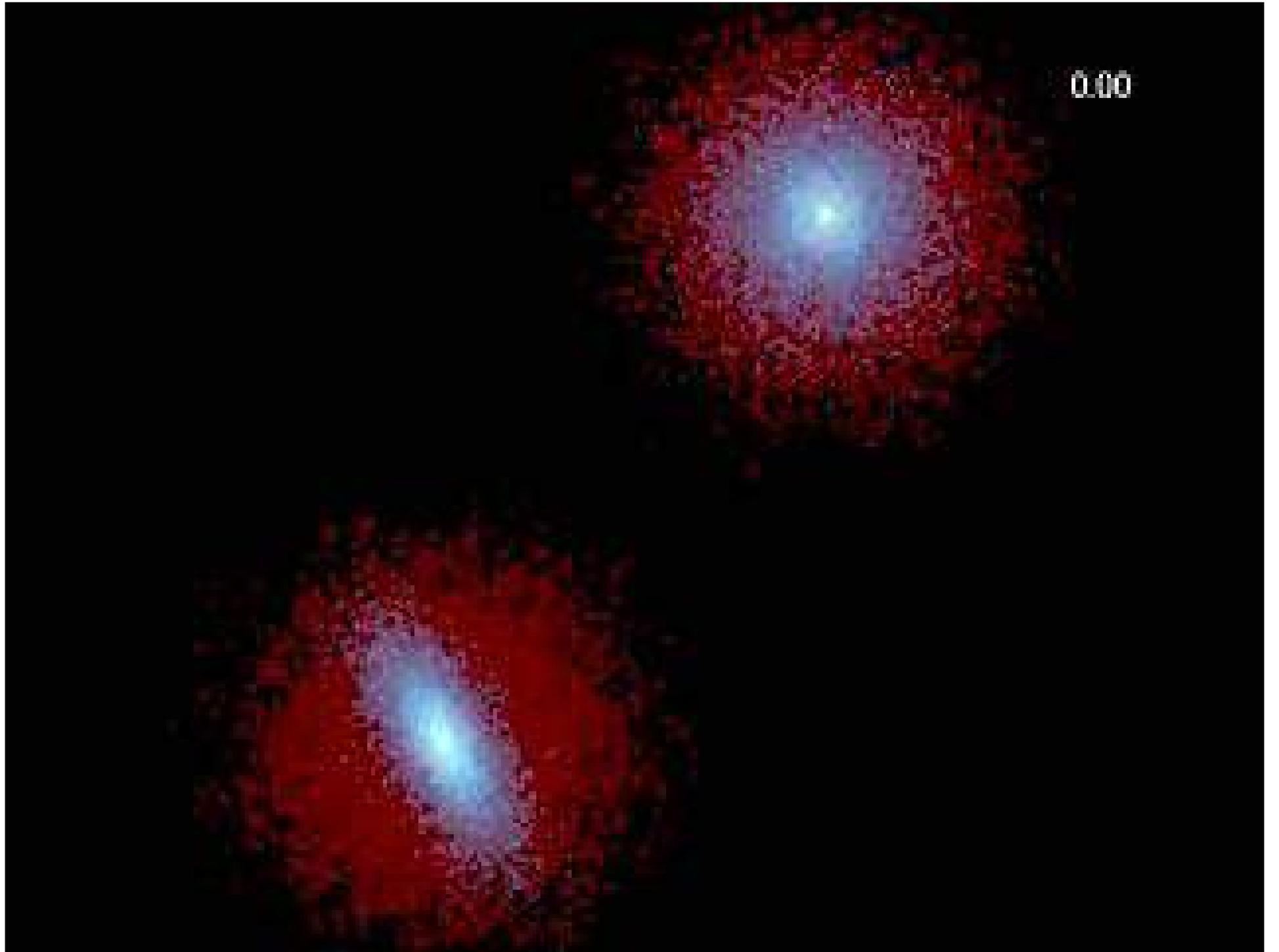
Vert= étoiles

Bleu =HI-21cm

Simulations 3-corps restreint  
Symétrie totale, rapport de masse =1

Hibbard's website

0.00

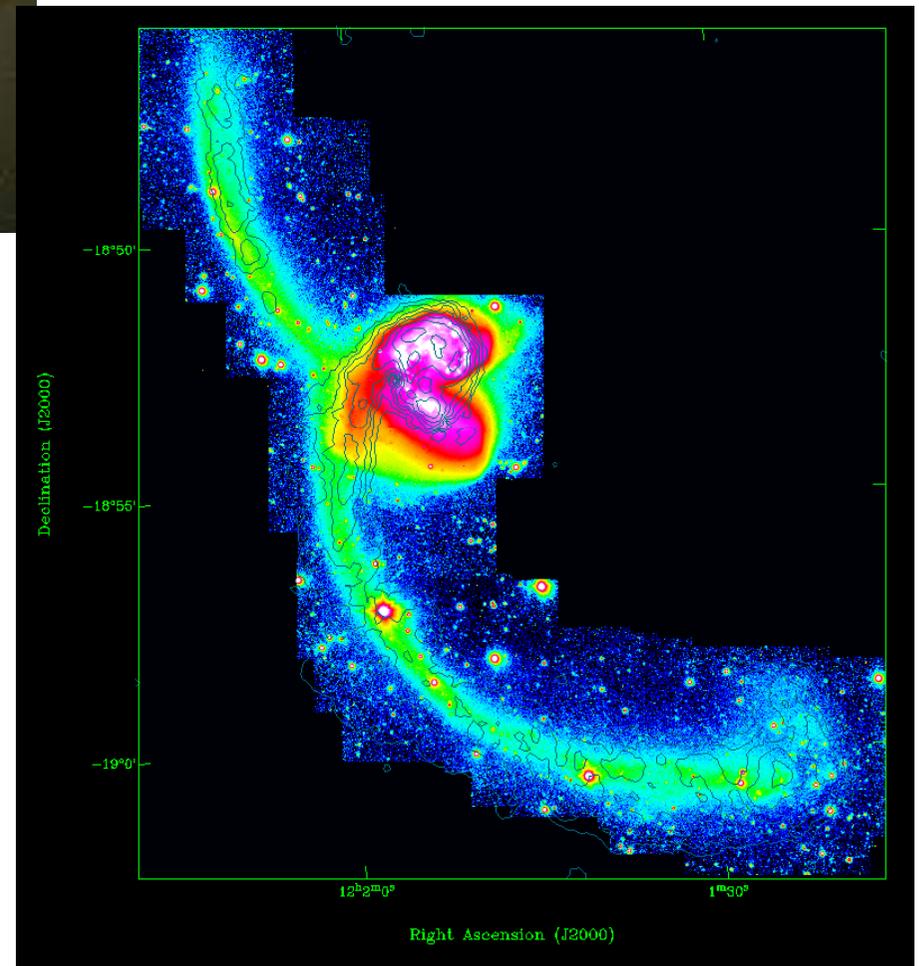




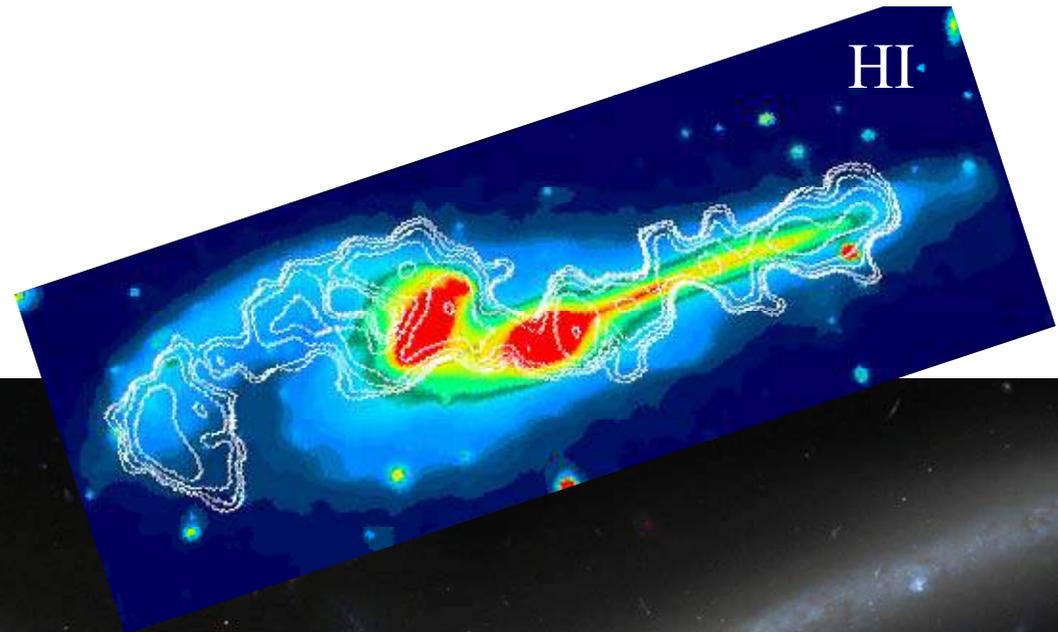
Les Antennes avec HST  
formation de SSC  
(Super Star Clusters)  
→ Amas globulaires

Pourrait expliquer l'abondance  
des amas globulaires dans les  
elliptiques

Les Antennes en HI  
*Hibbard et al 2001*  
Contours obtenus au VLA  
+BVR colors

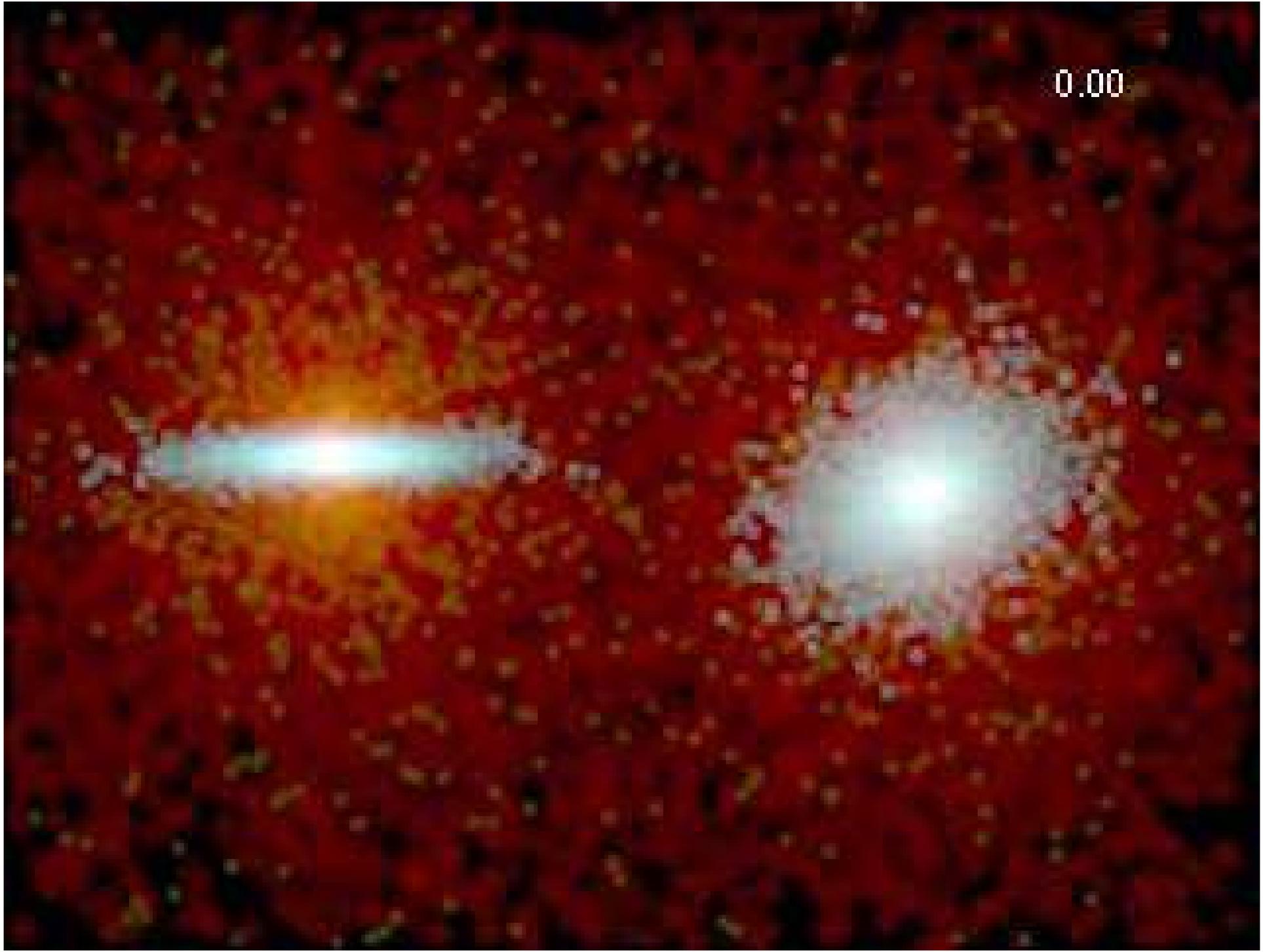


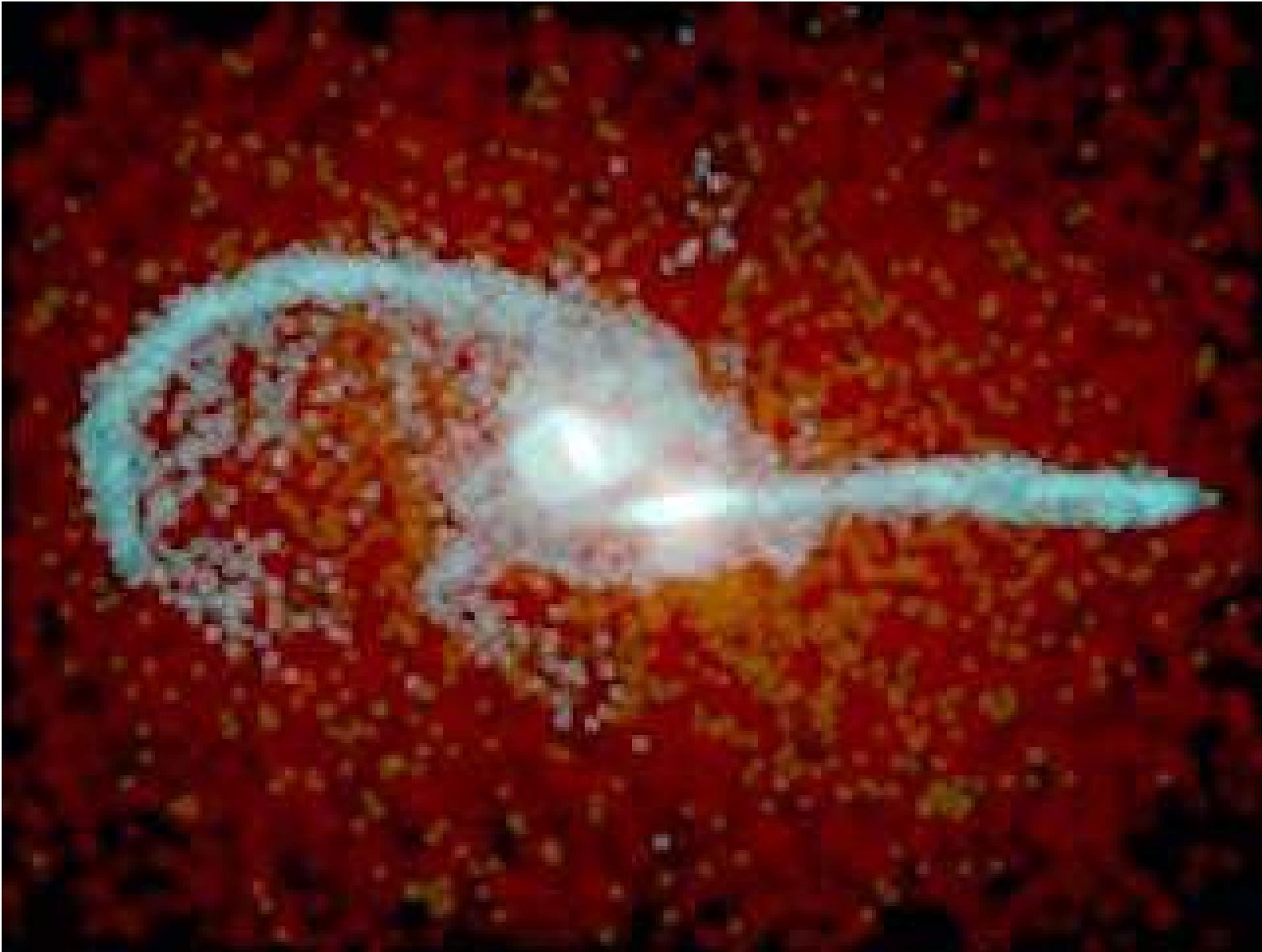
# Les Souris

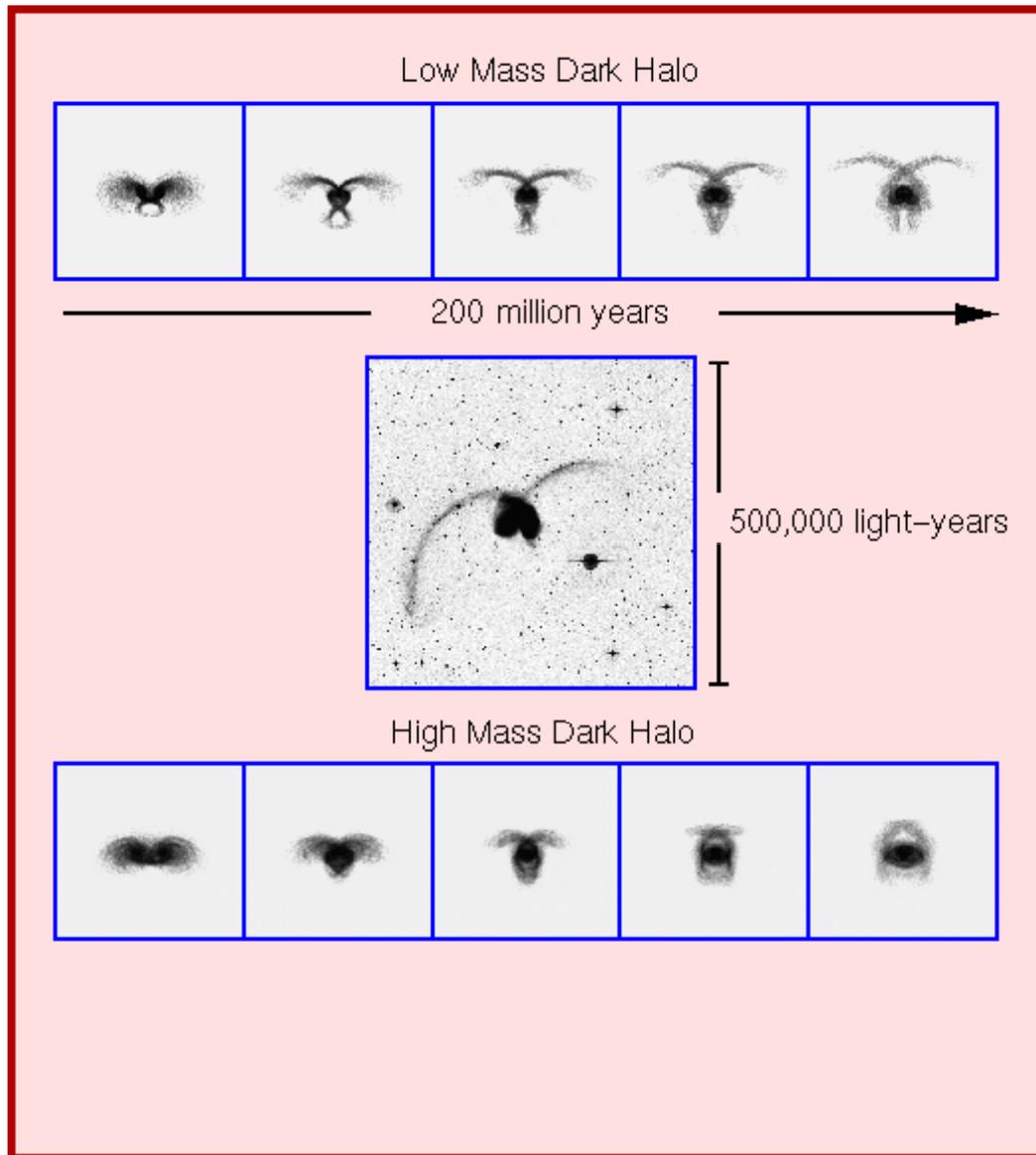


NGC4676, amas de Coma, à 100 Mpc, 160Myr après la rencontre  
Grumeaux de SF, parfois aussi gros qu'une galaxie naine

0.00







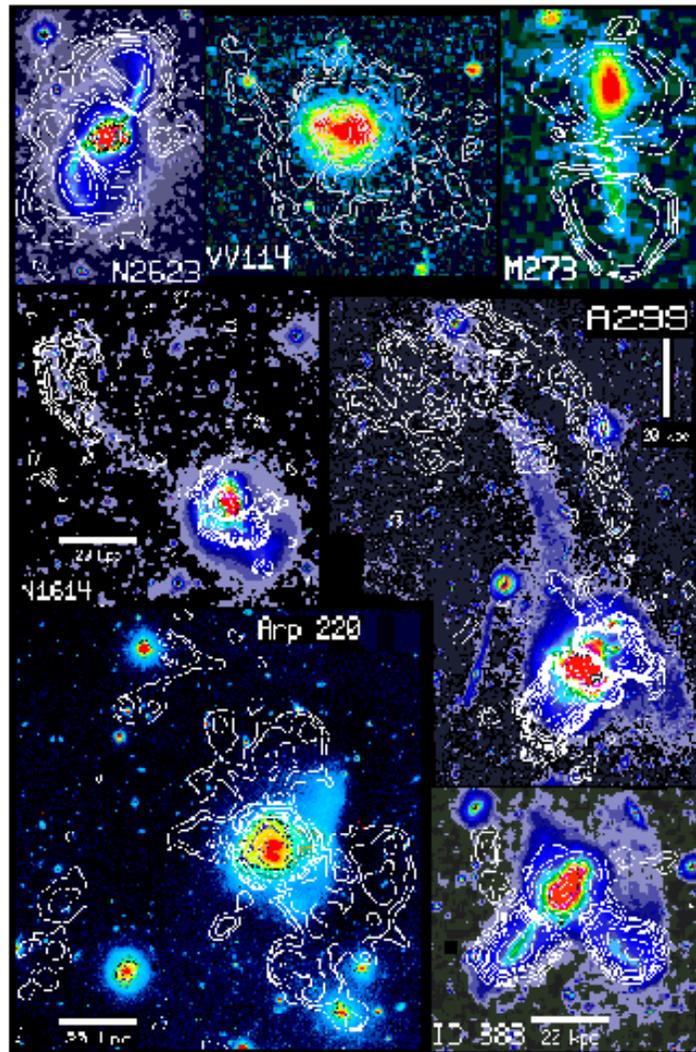
Simulations numériques, pour tester la nature de la matière noire

*(Dubinski et al 1996)*

La longueur des queues de marée contraint la quantité de matière noire et surtout sa concentration

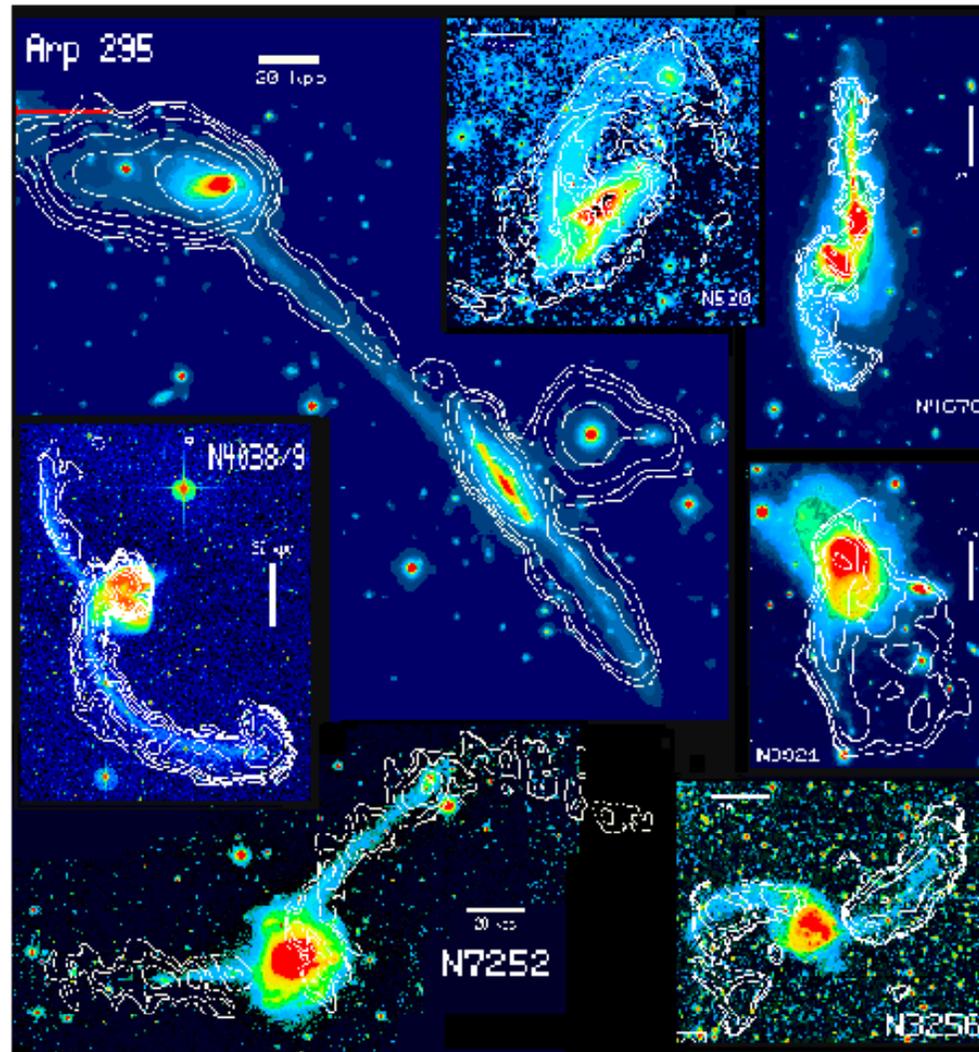
**Important: la profondeur du puits de potentiel**

## HI in IR Luminous Mergers



Hibbard & Yun, in preparation

## HI in Optically Selected Mergers

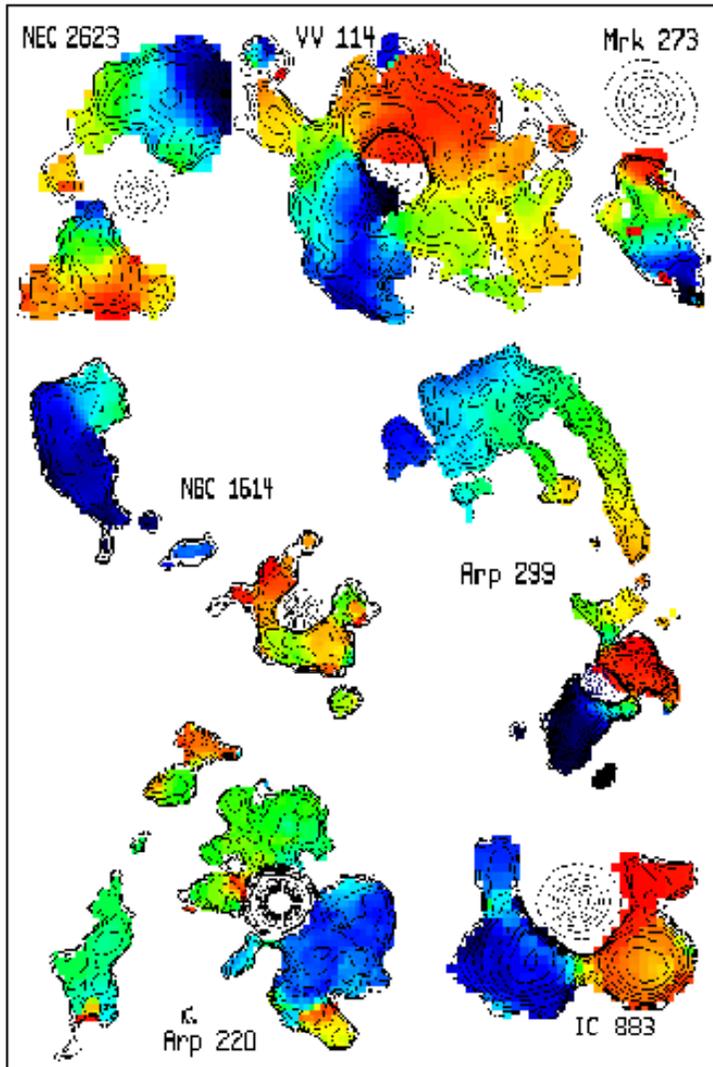


Hibbard & van Gorkom 1996, Hibbard et al. 1999, English et al. 1999

## HI contours on Optical

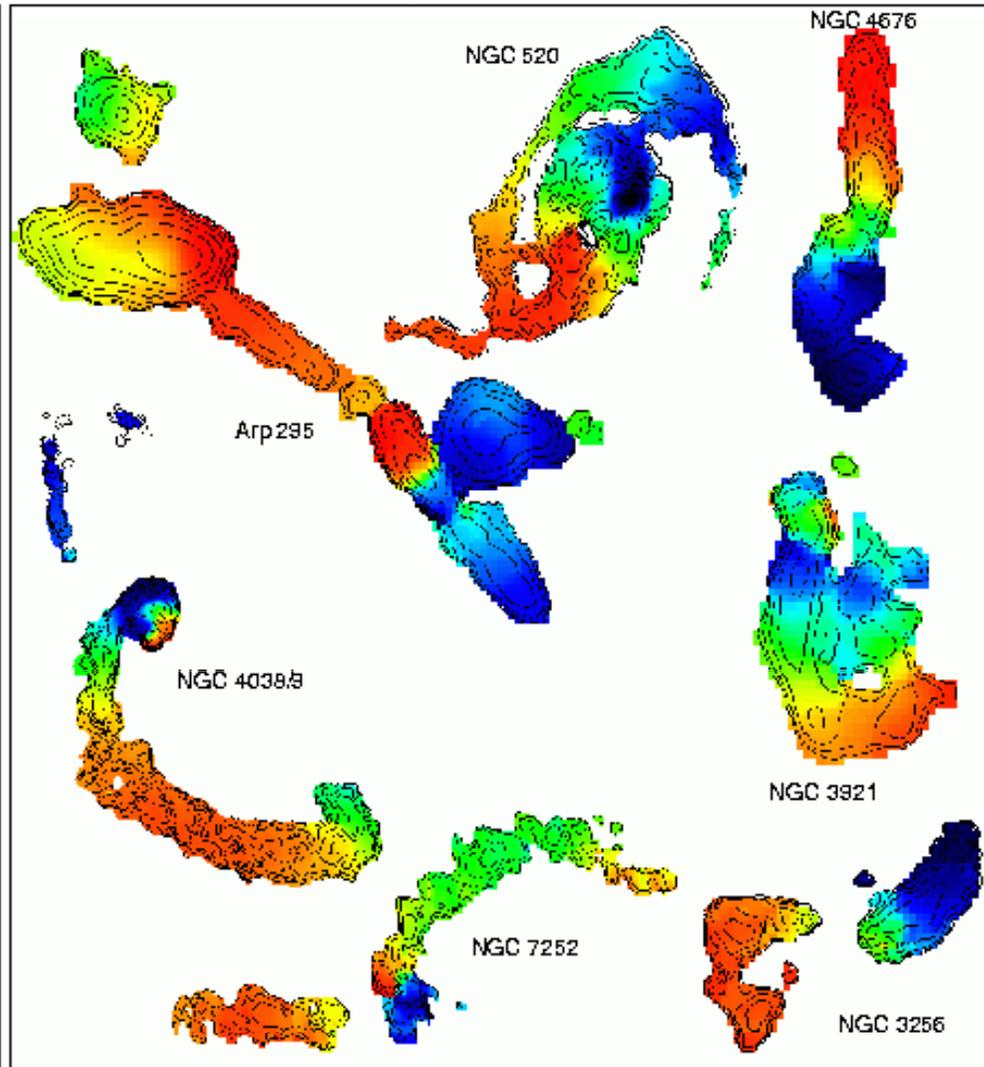
Ensemble de fusions de galaxies, contours HI-21cm  
(Hibbard's website)

## HI in IR Luminous Mergers



Hibbard & Yun, in preparation

## HI in Optically Selected Mergers



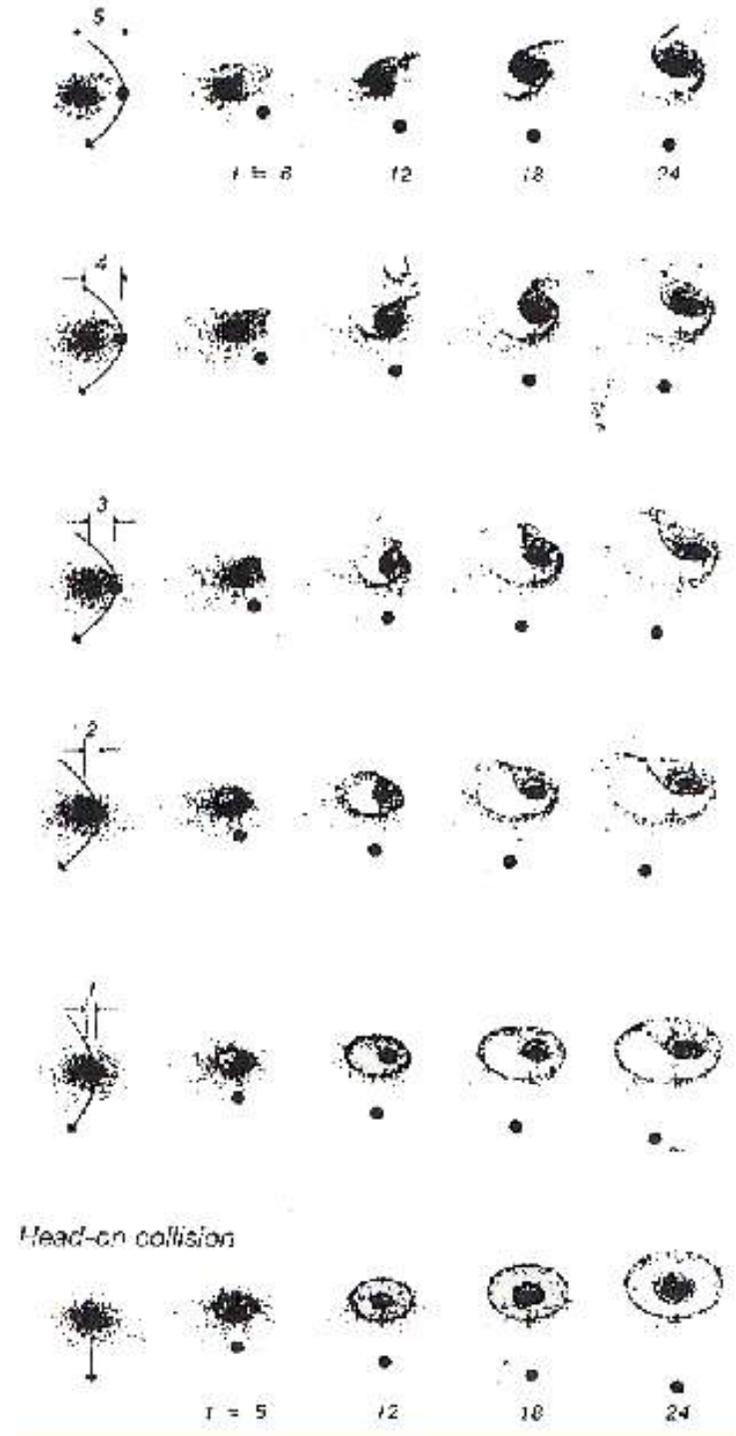
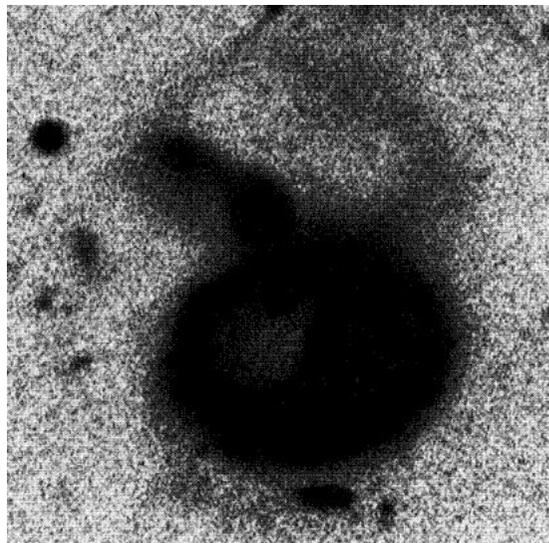
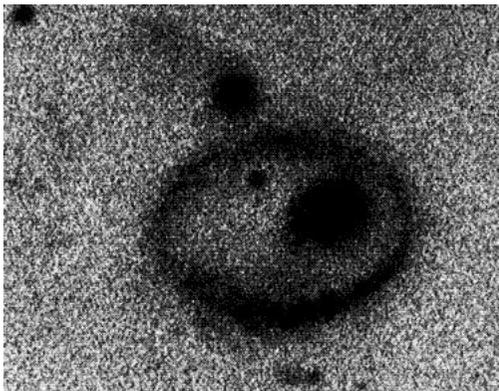
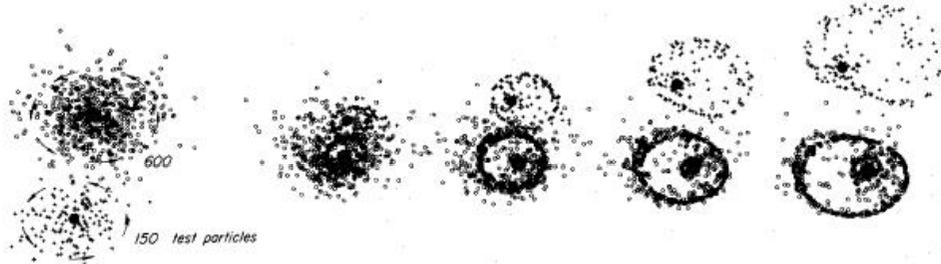
Hibbard & van Gorkom 1996, Hibbard et al. 1999, English et al. 1999

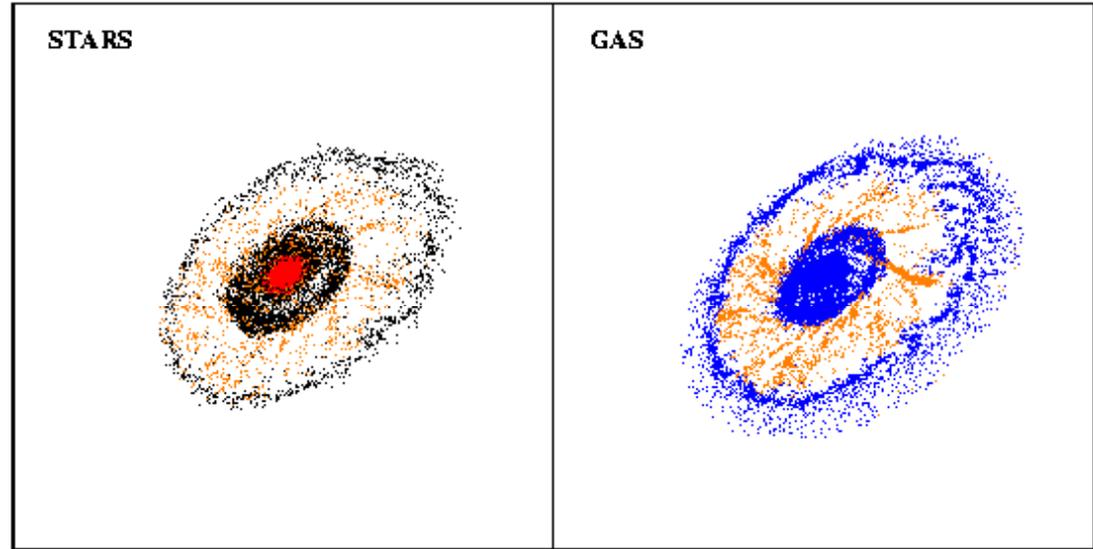
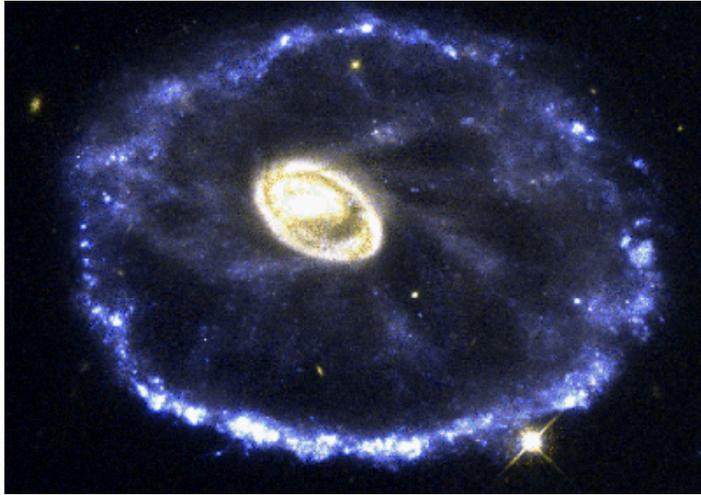
## HI contours on HI velocity field

Champs de vitesse perturbés, mais pas toujours..

# Galaxies en anneau

Lorsque la collision est de plein fouet, les deux bras spiraux s'enroulent en anneau: **ondes de densité concentriques** cf Lynds & Toomre 76





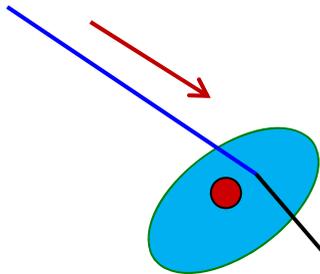
*Horellou & Combes 1999*

Trajectoire hyperbolique, paramètre d'impact faible, mais pas nul

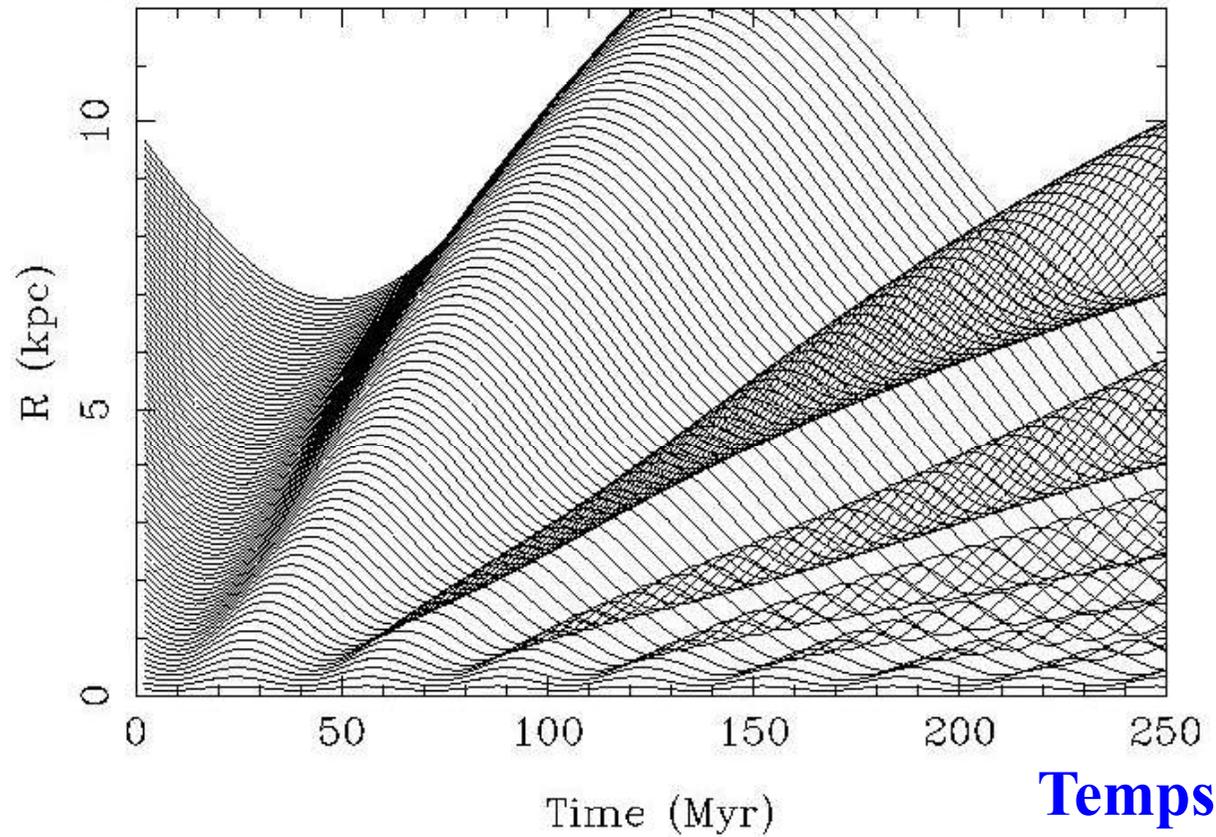
→ Les anneaux **sont décentrés**, et ne peuvent se confondre

avec les anneaux résonants dans les galaxies barrées

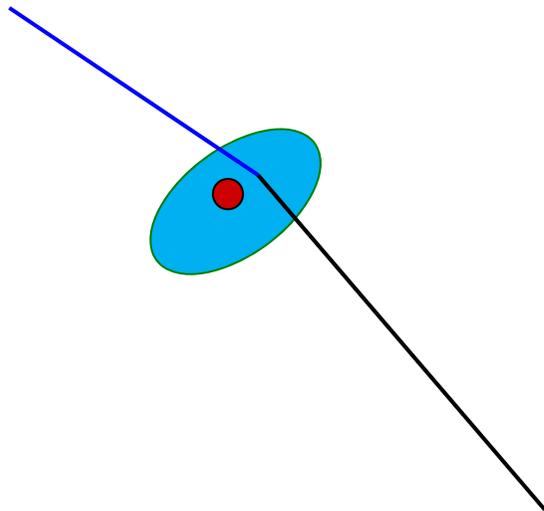
De même, un autre phénomène: les **anneaux polaires** (une fois vus de face..)



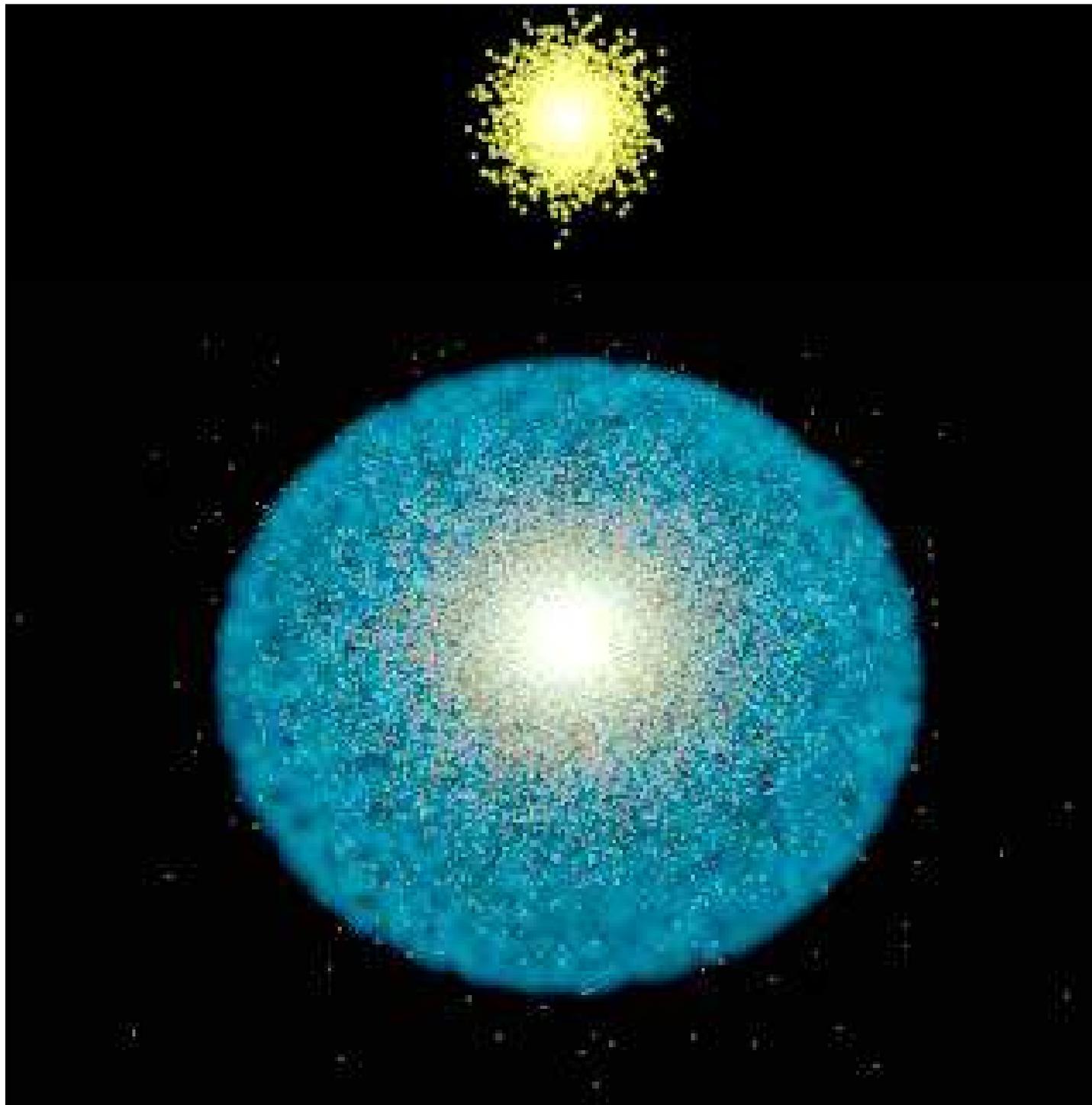
# Rayon



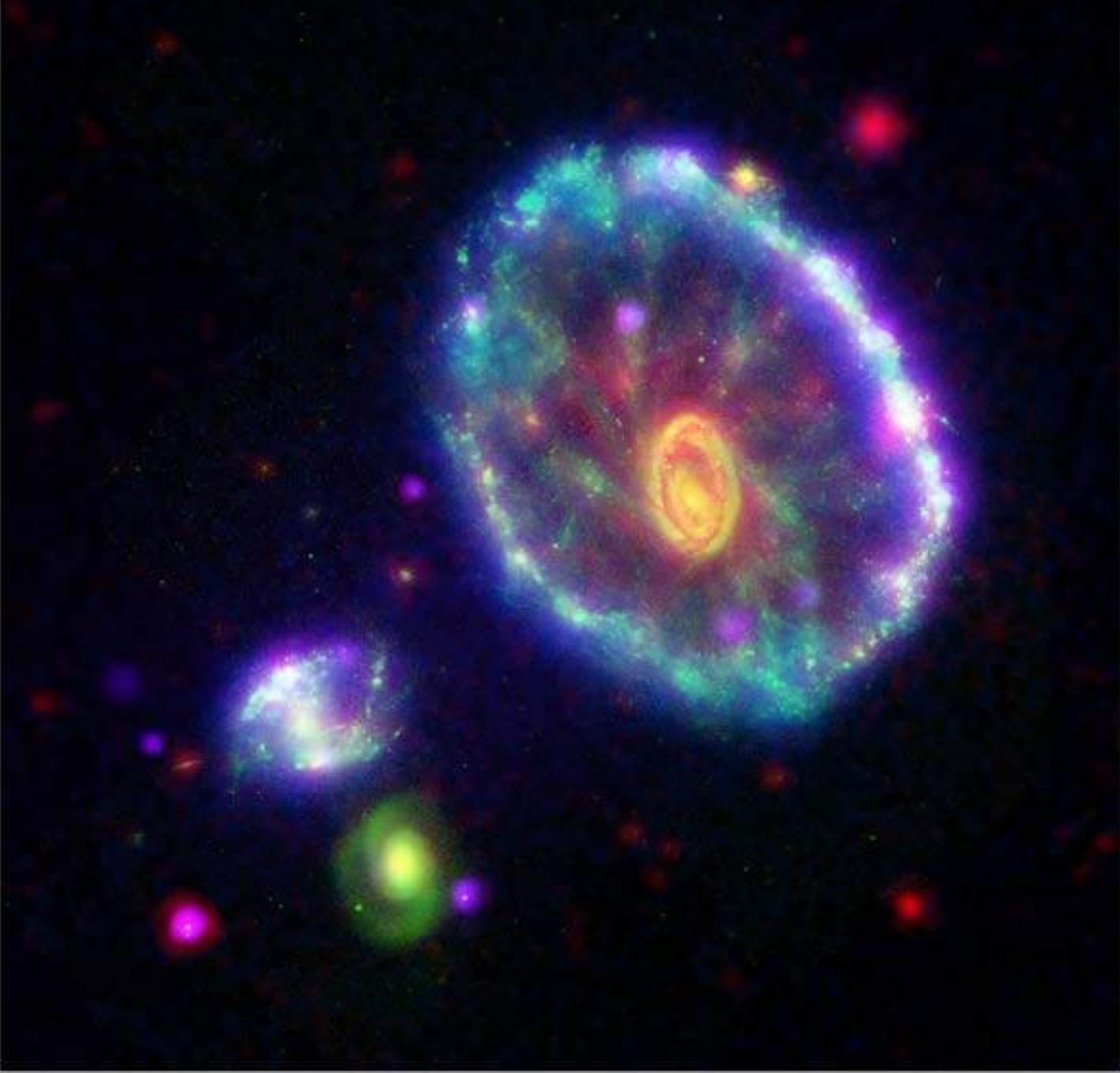
Formation des  
ondes annulaires



Période plus courte près du centre → déphasage  
Plusieurs anneaux se forment successivement,  
avant **l'enroulement dans l'espace des phases**



CARTWHEEL GALAXY



CHANDRA X-RAY



GALEX ULTRAVIOLET



HUBBLE VISIBLE



SPITZER INFRARED

# Andromède est-elle un anneau?



L'image en Ultra-Violet révèle des étoiles jeunes très bleues formées dans l'anneau et les bras spiraux  
Le bulbe de vieilles étoiles disparaît

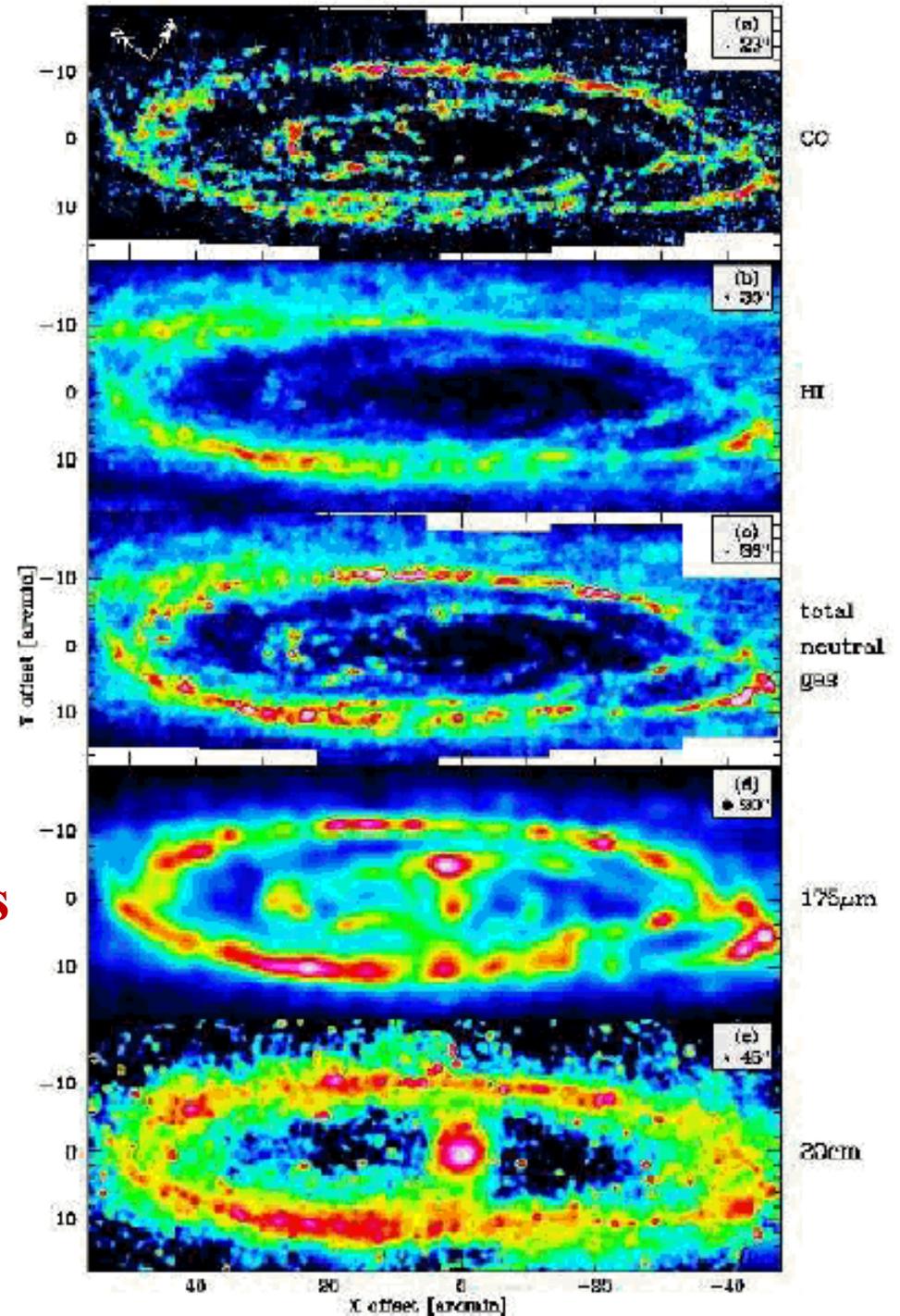
**Andromède: gaz moléculaire**

**Gaz d'hydrogène atomique**

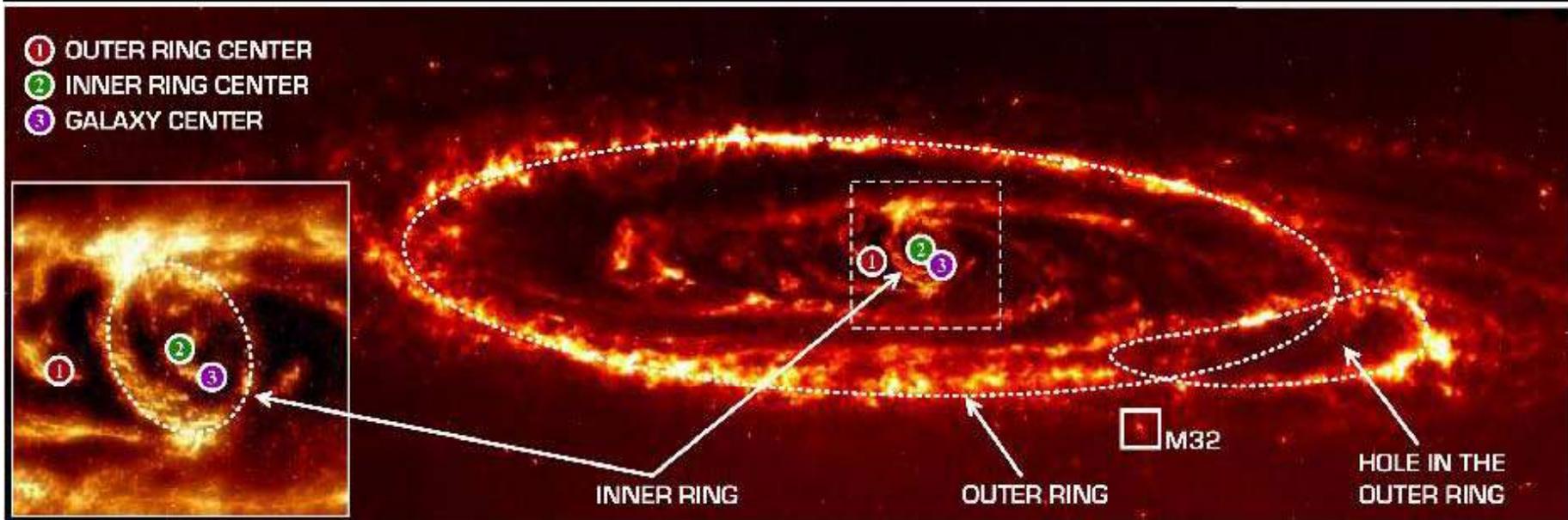
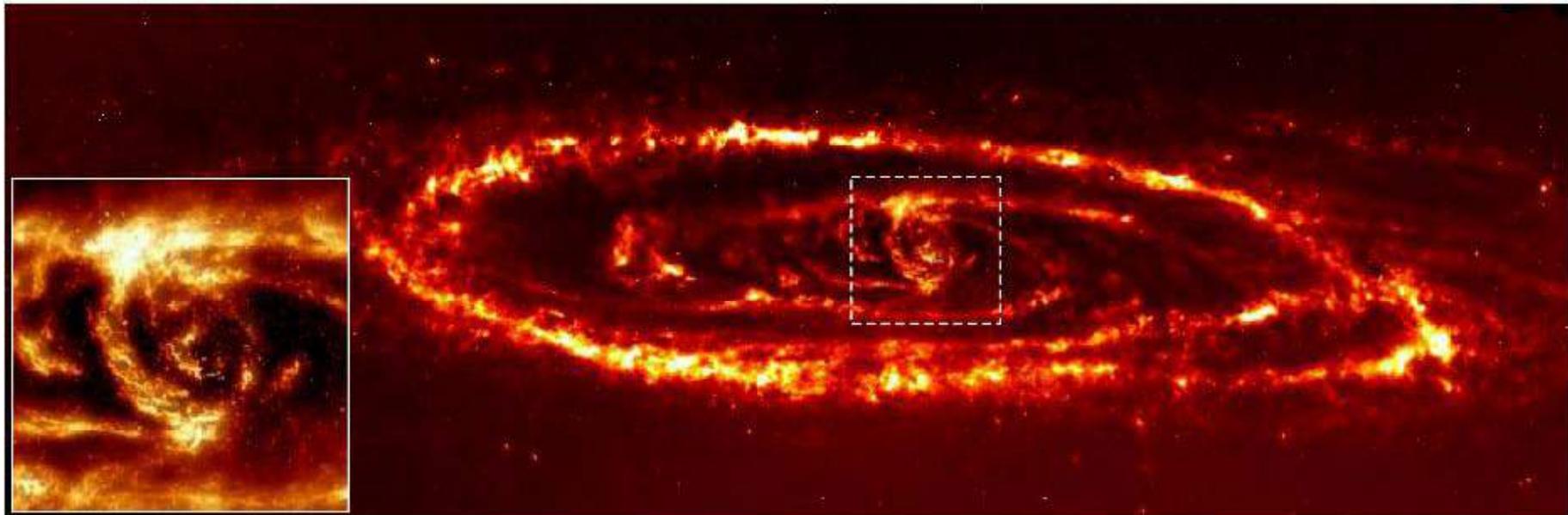
**→ Gaz total en anneau**

**Poussière chauffée par les étoiles**

**Radio, synchrotron, supernovae**



# Spitzer PAH ( $8\mu\text{m}$ ): anneaux décentrés (M31)



# Simulation numérique

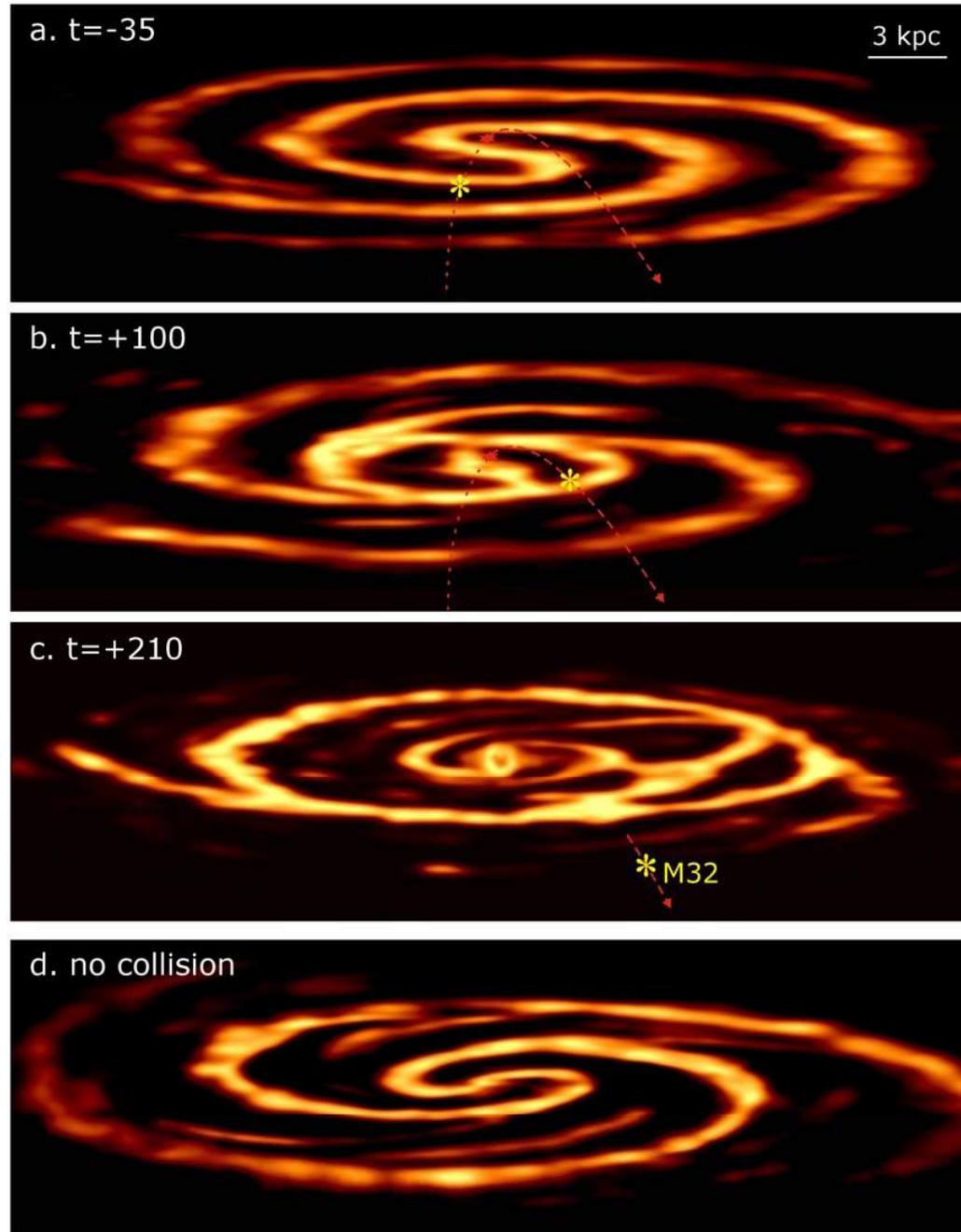
N-body + sticky  
 $10^6$  particules  
*350pc résolution*

évolution pendant 1 Gyr  
→ barre+spiral

Puis collision 210 Myr

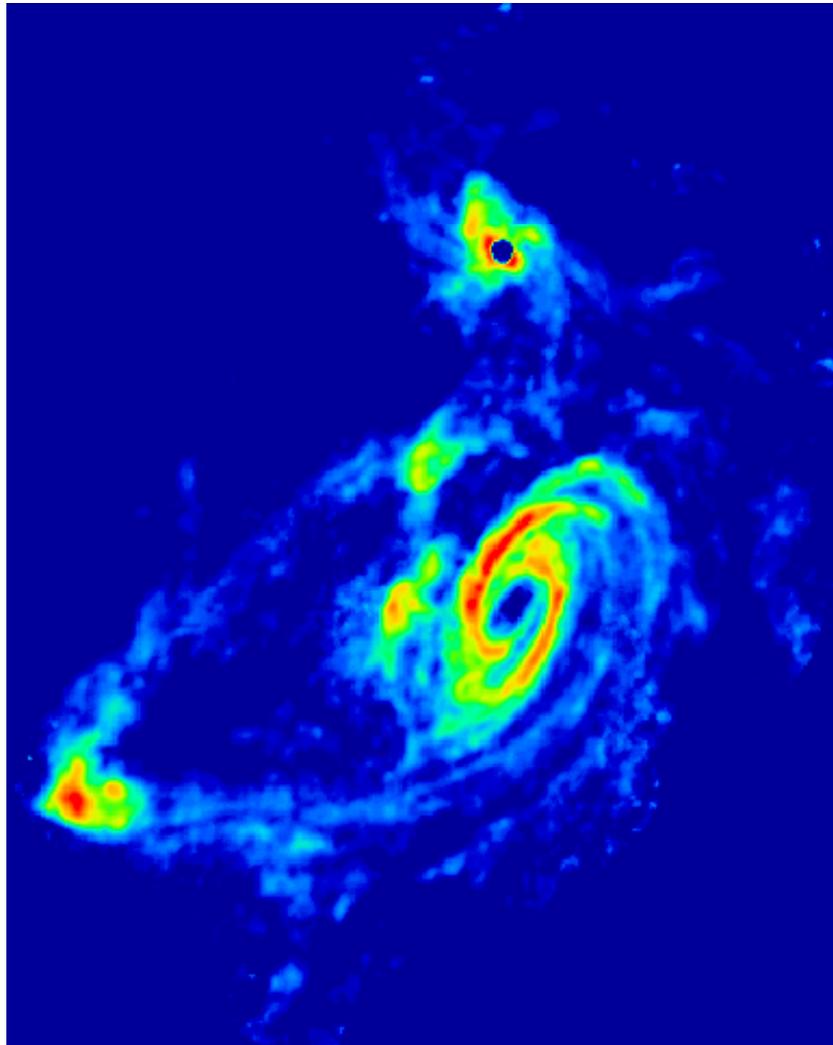
Rapport de masse 1/13

Anneau central 30deg  
inclinaison

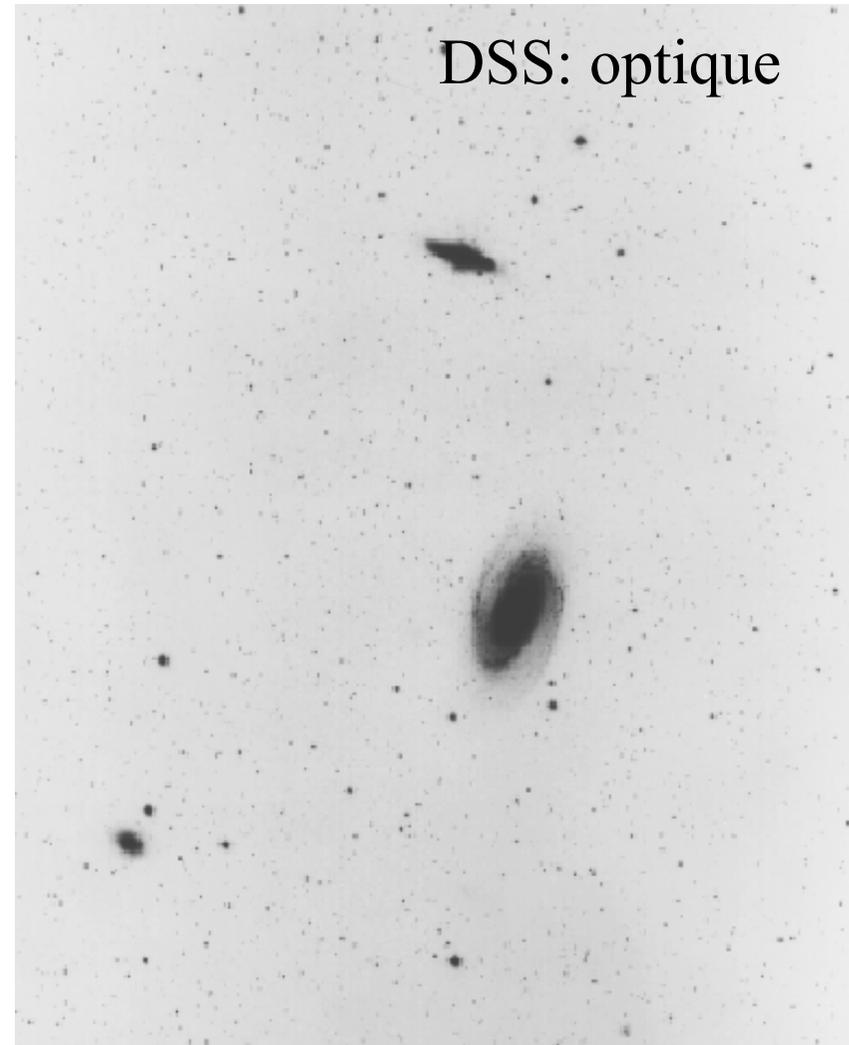


# Splash de gaz interstellaire

HI-21cm



Messier 81, Messier 82, NGC 3077



# Interaction Voie lactée- Nuages de Magellan

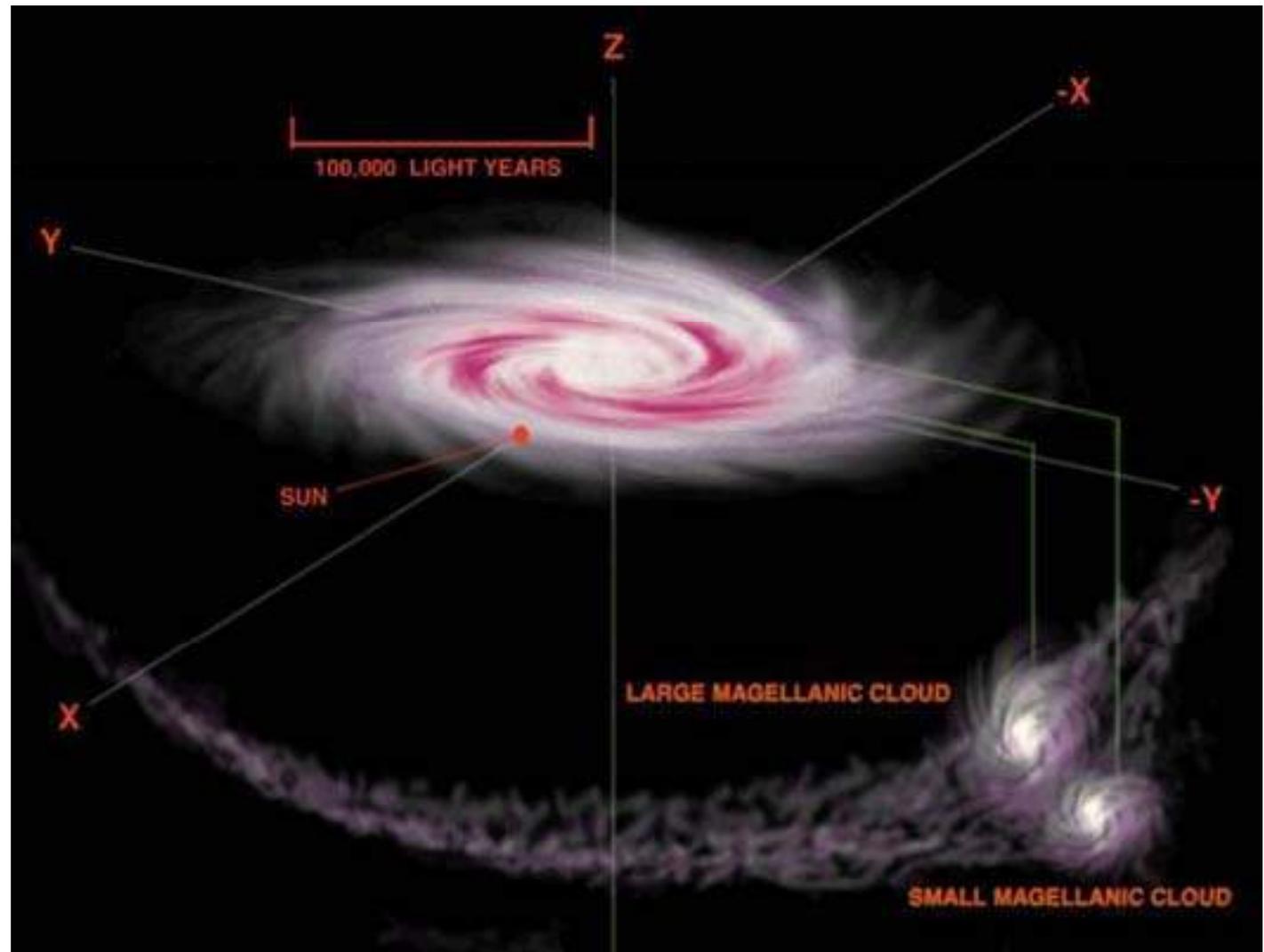
Rapport de masse faible, de l'ordre de qq %

Plusieurs passages depuis la formation du Groupe Local ?

Nuages avancent  
devant

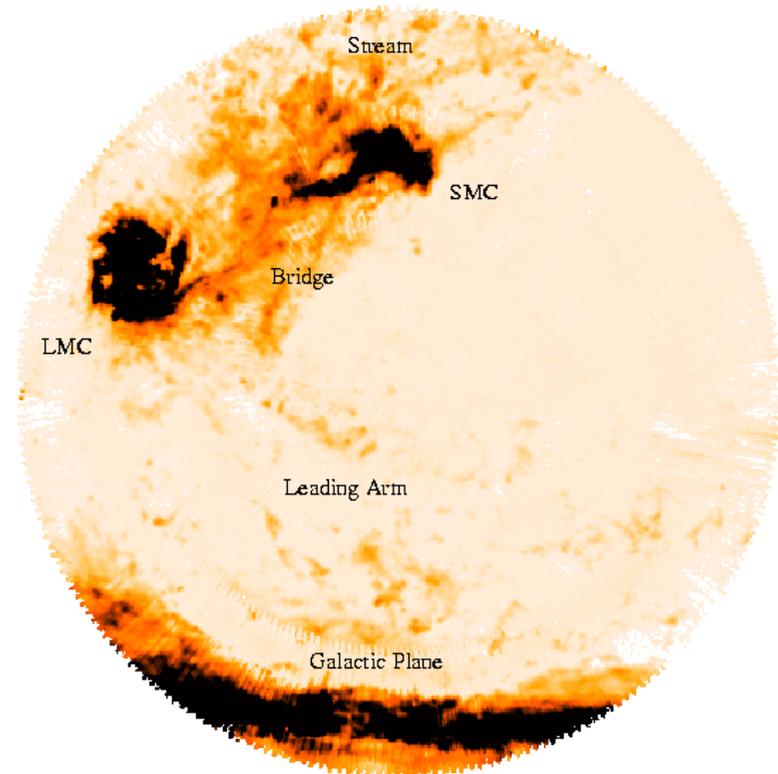
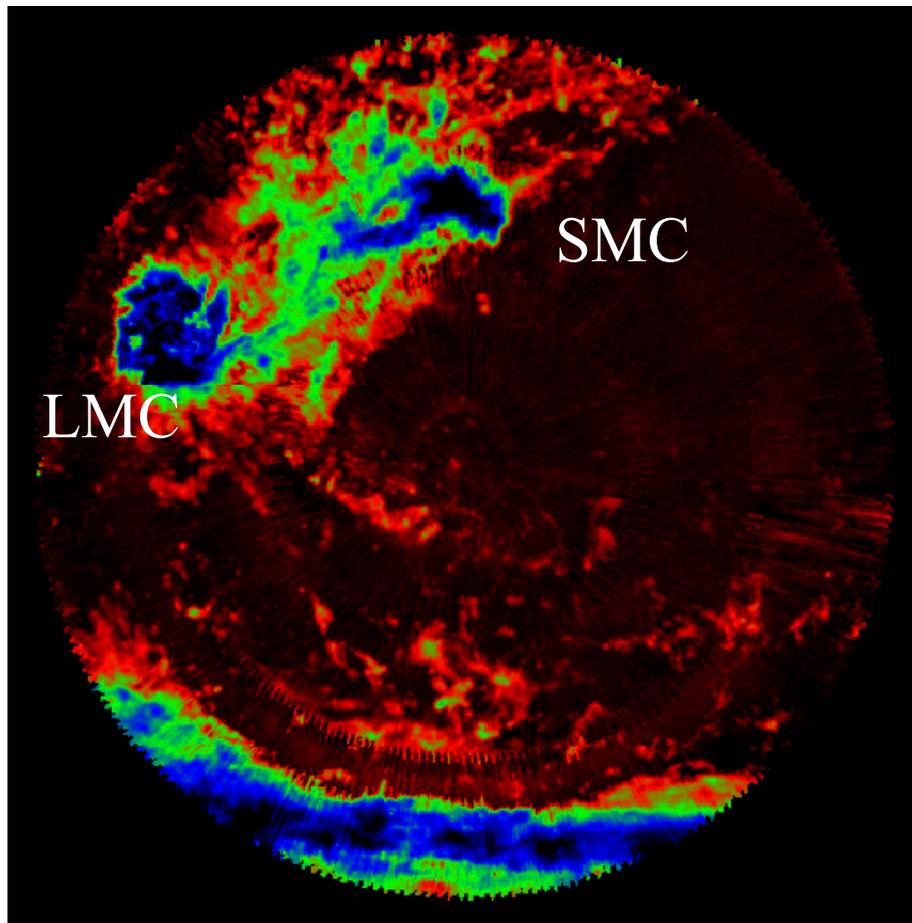
Contraintes sur la  
masse de la Voie  
lactée

$V \sim 200 \text{ km/s}$



# Le Courant Magellanique

DéTECTÉ en hydrogène atomique HI à 21cm de longueur d'onde  
Autant de masse de gaz dans le courant que dans le Petit Nuage (SMC)  
Le gaz doit avoir été aspiré du Petit Nuage, selon les simulations



*Putman et al 1998*

# Nuages à grande vitesse tombant sur la Galaxie

Origine encore inconnue

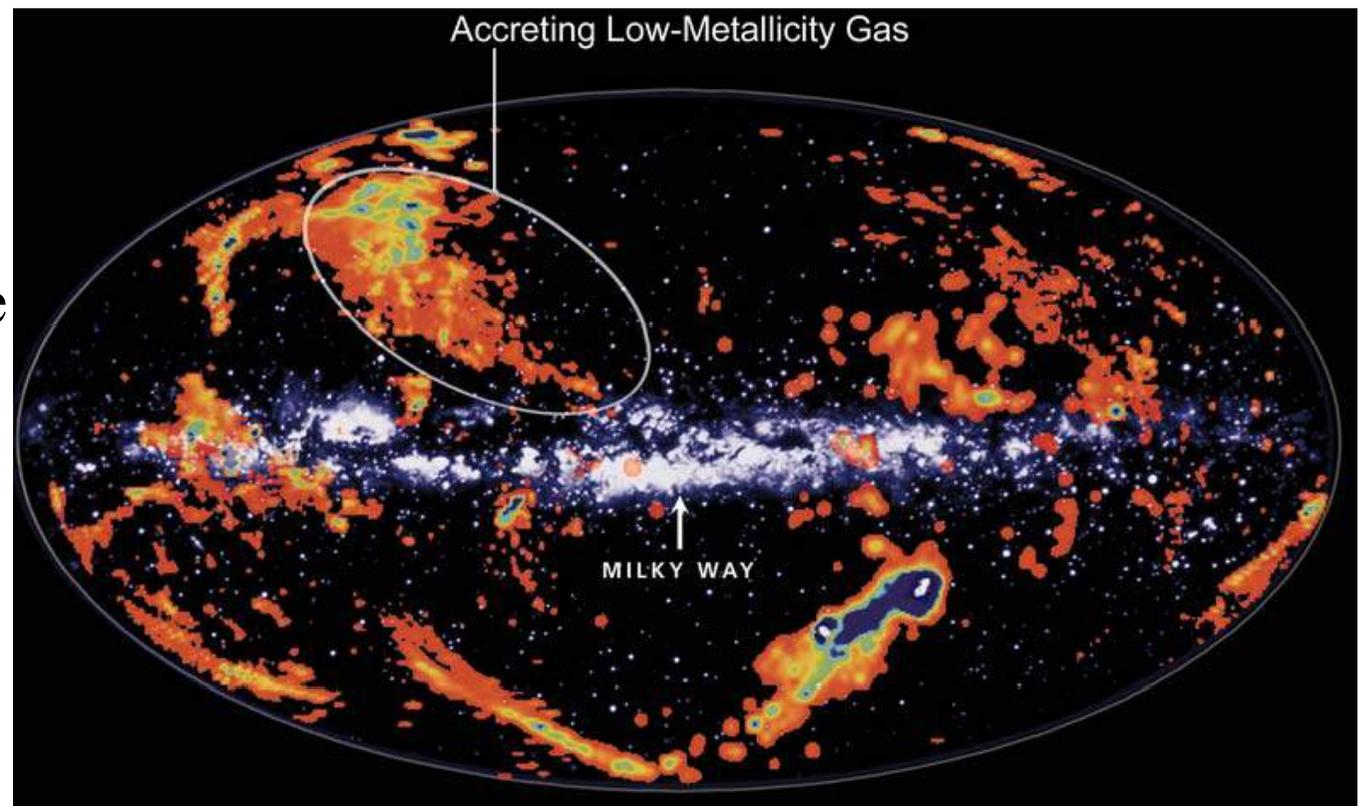
Leur masse dépend de leur distance

Résidus de la formation du Groupe Local? --> très massifs

Ou juste chute des Nuages de Magellan?

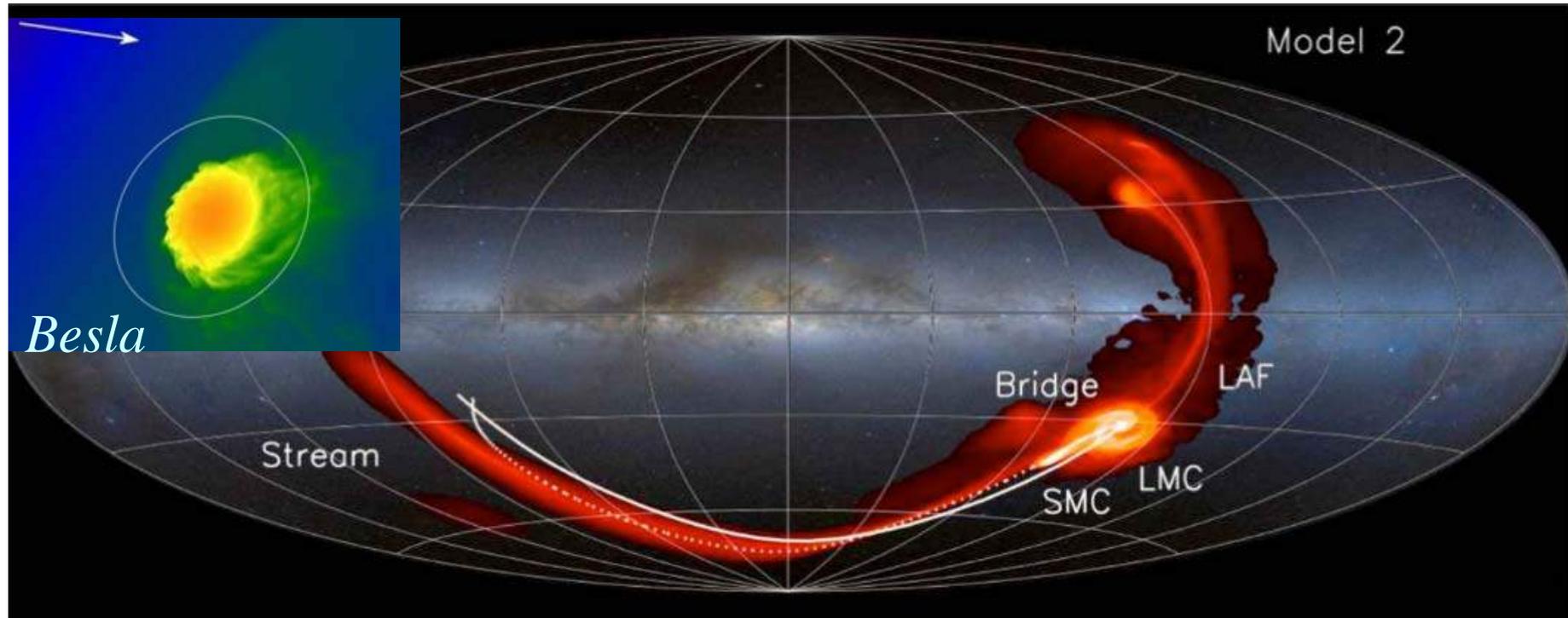
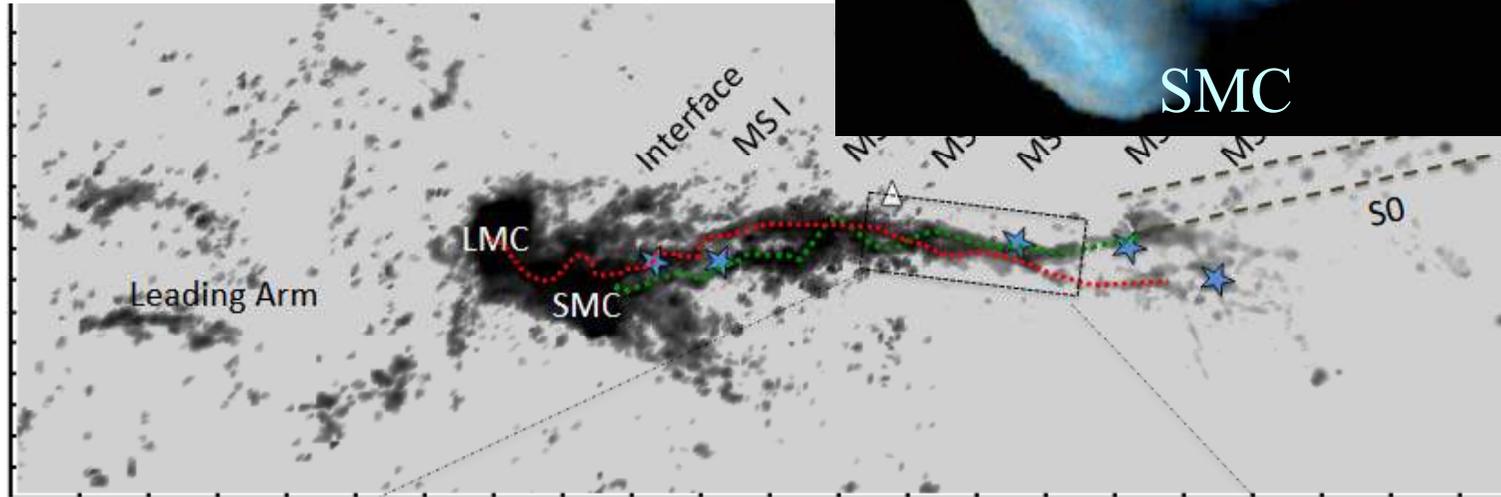
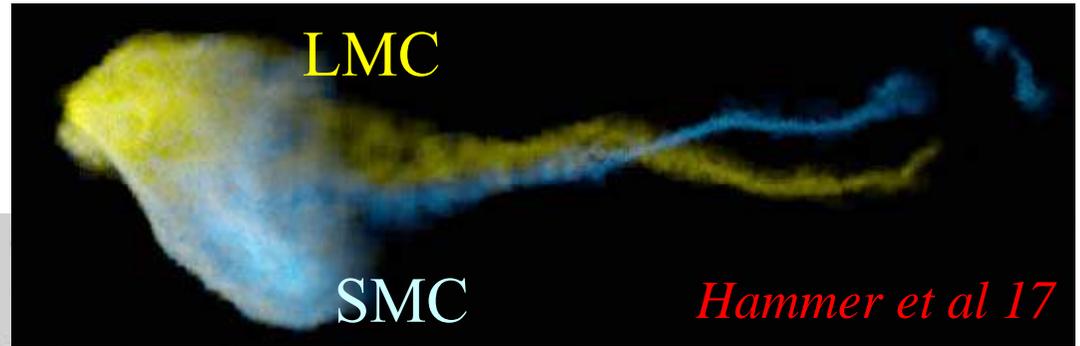
## Origines multiples

Aussi, effet fontaine après formation de supernovae..



*Wakker et al 99*

# Nouvelle orbite



# Interaction avec Andromède

La galaxie la plus massive du Groupe Local, comparable à la Voie Lactée, n'est qu'à 700 kpc  
Elle se dirige vers nous à 300km/s

Sur la base de sa vitesse radiale, le temps d'approche est de 2 Gyr

Mais sa vitesse tangentielle est inconnue

→ Bientôt des mouvements propres avec le satellite GAIA



# Simulations de la rencontre avec M31



Echelle de  
Temps  
500Myr

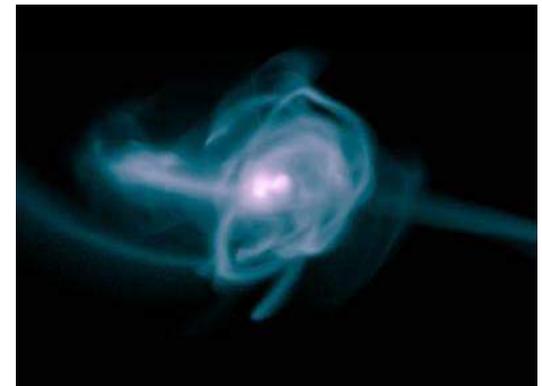


*Dubinski 1996*

*Cox & Loeb 2008*



*Besla*



Polar-Ring  
Galaxy  
NGC 4650A



PRC99-12  
Space Telescope  
Science Institute  
Hubble Heritage Team  
(AURA/STScI/NASA)

Hubble  
Heritage

## Formation des anneaux polaires

soit par fusion de galaxies  
avec J perpendiculaires

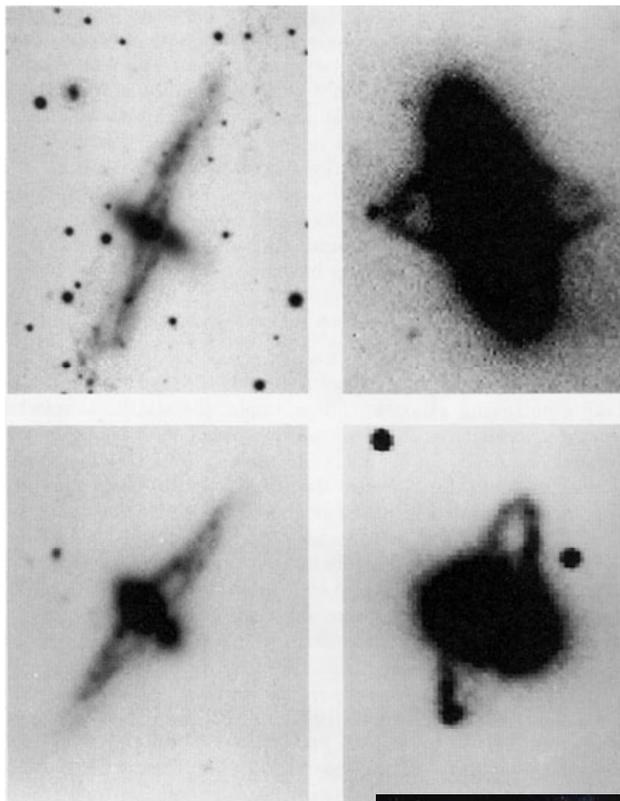
Ou par accrétion de gaz dans  
les parties externes

cf LMC/MW

Forme à 3D de la **matière  
noire?**

# Formation des Anneaux

Par accrétion?



NGC660  
Inclinée  
en cours de  
relaxation

*Schweizer et al 83*  
*Reshetnikov et al 97*



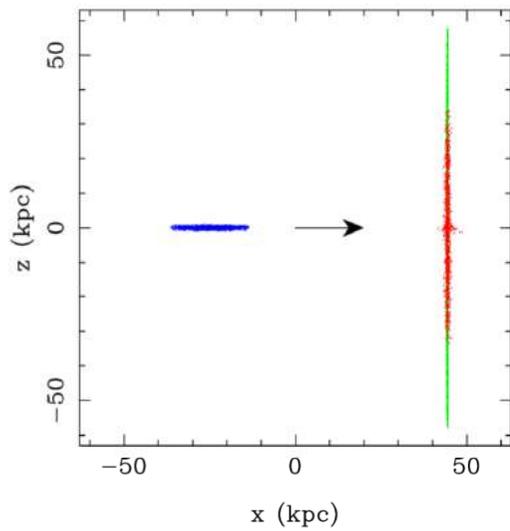
Anneau primaire?

Par collision

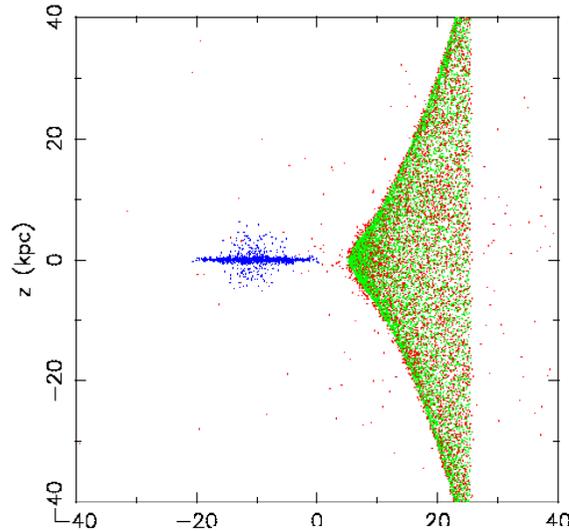
Bekki 1997, 98



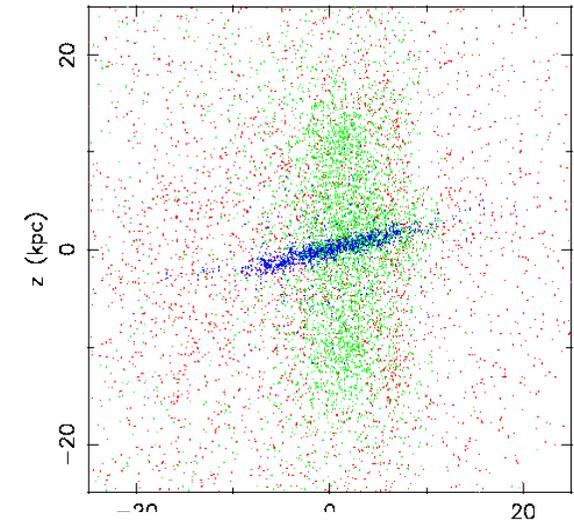
# Formation par collision



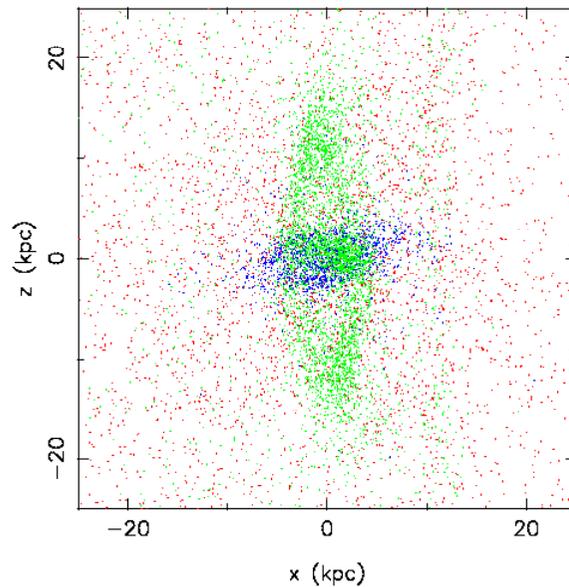
0.3 Gyr



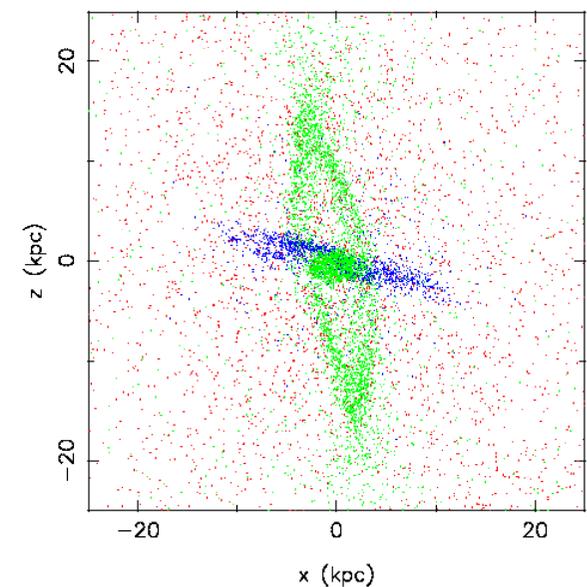
1.5 Gyr



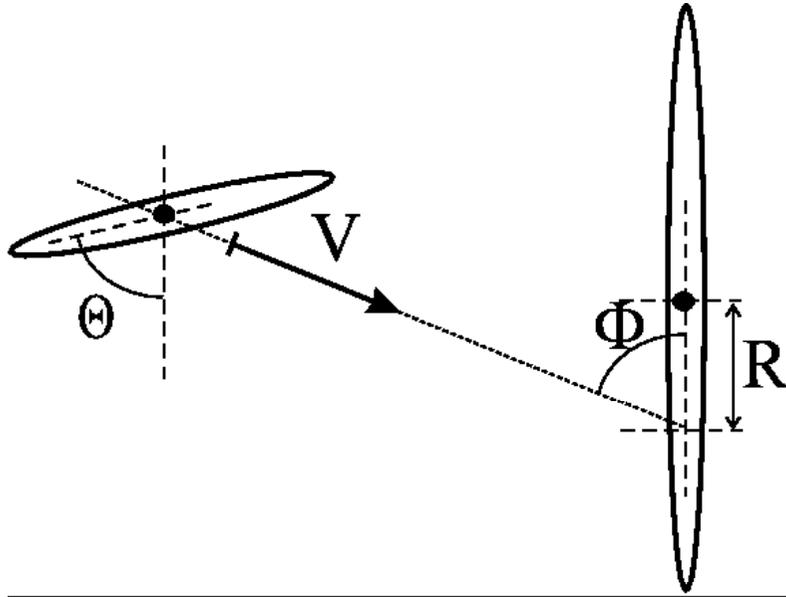
2.1 Gyr



3 Gyr

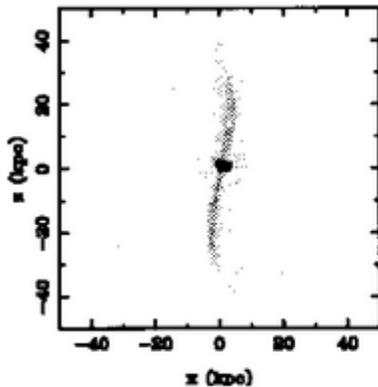


# Scénario de fusion: inclinaison de l'anneau

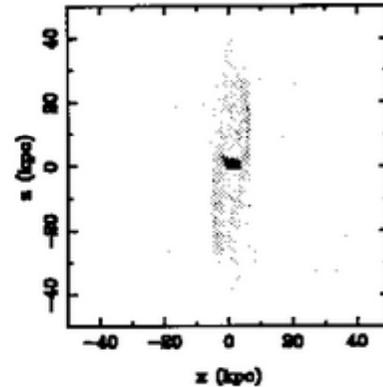


L'inclinaison dépend de  $\Theta$   
Mais même si  $\Theta < 55$  impossible  
de produire des PR plus inclinés  
que 24 degrés

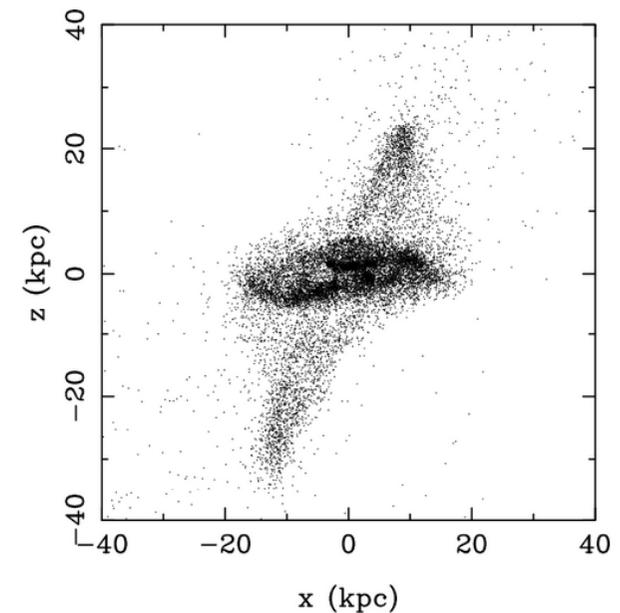
Les anneaux sont stables,  $t=8$  Gyrs



Edge-on

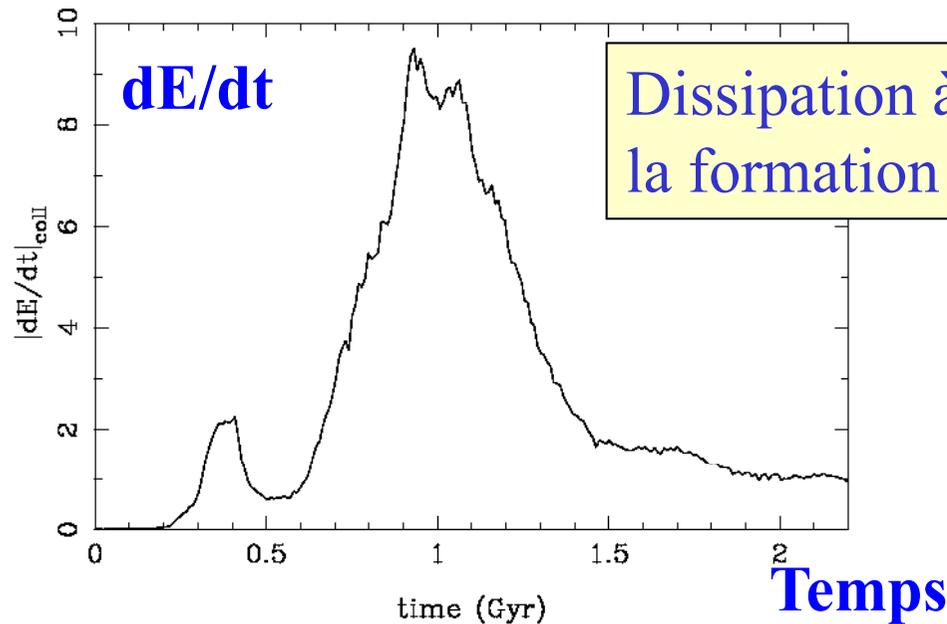
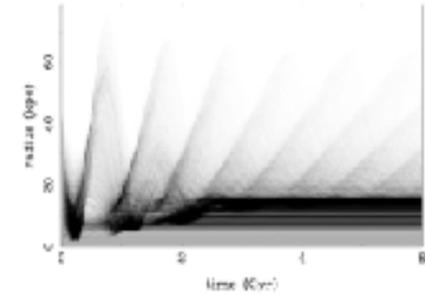
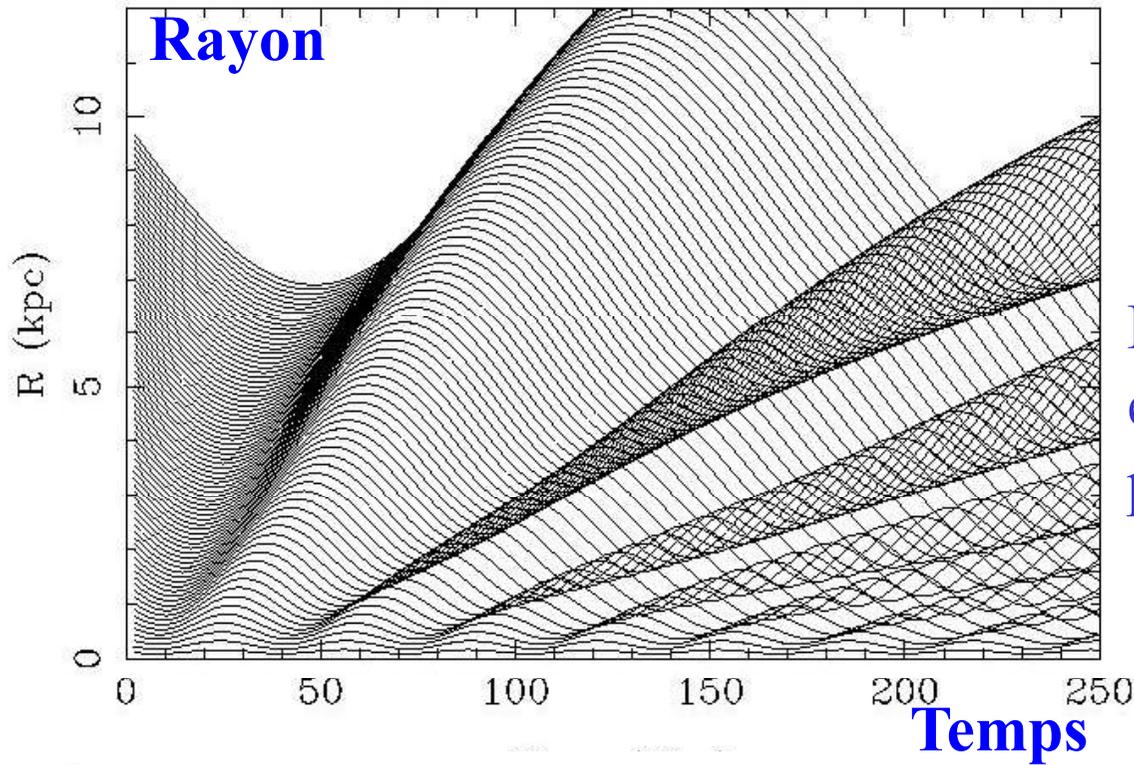


10degrés

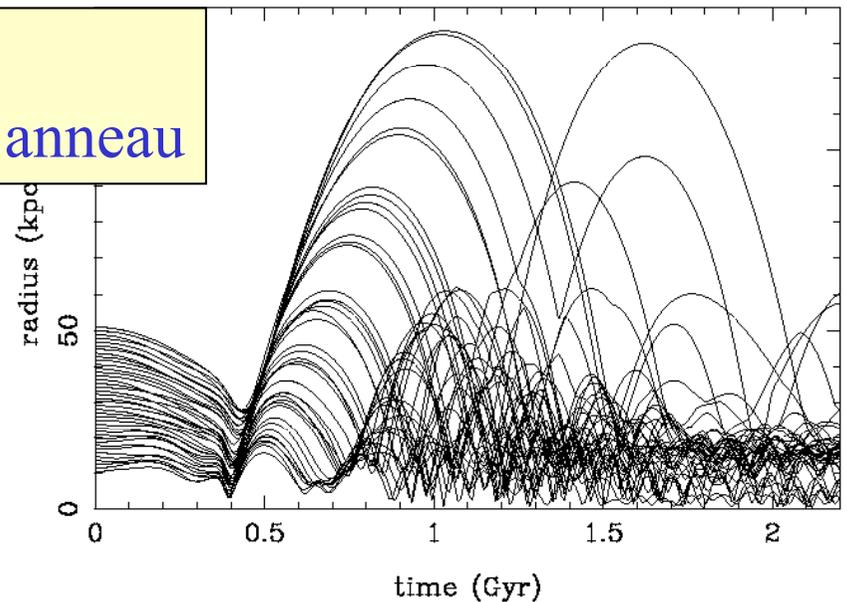


# Formation des ondes annulaires

Plusieurs anneaux avant enroulement dans l'espace des phases

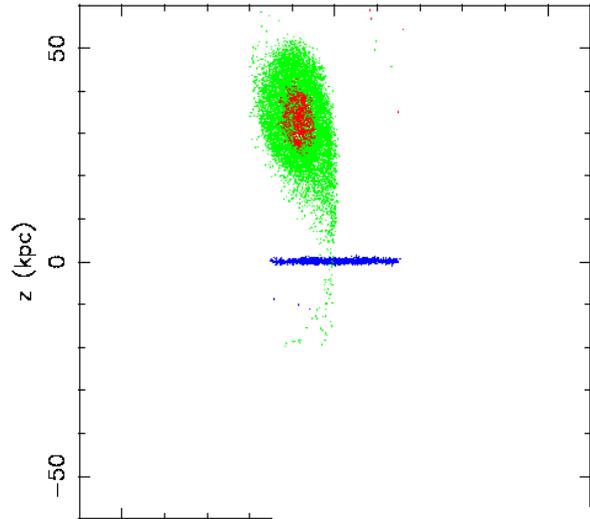


Dissipation à la formation de l'anneau

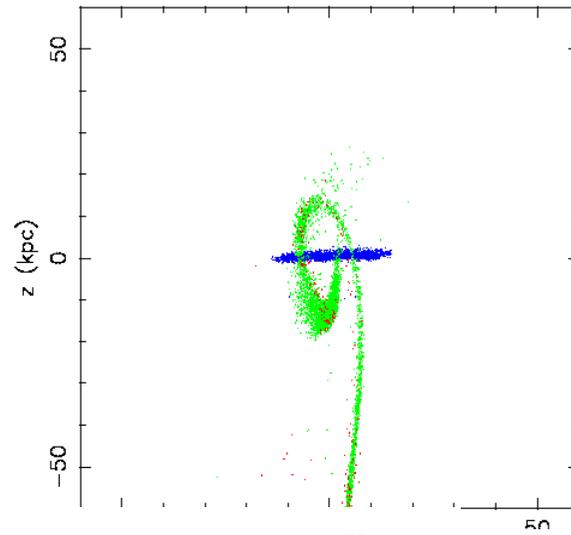


# Formation par accrétion

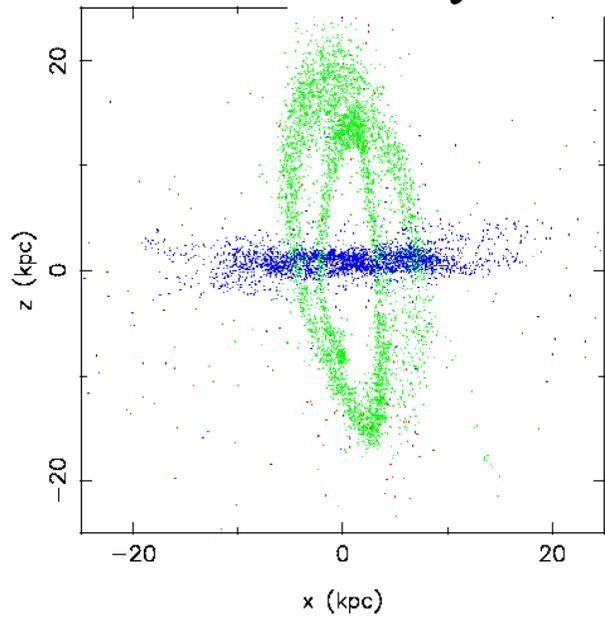
1.2 Gyr



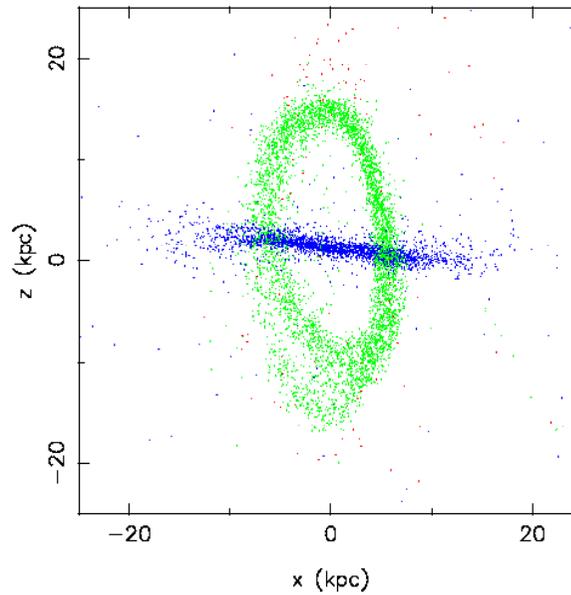
2 Gyr



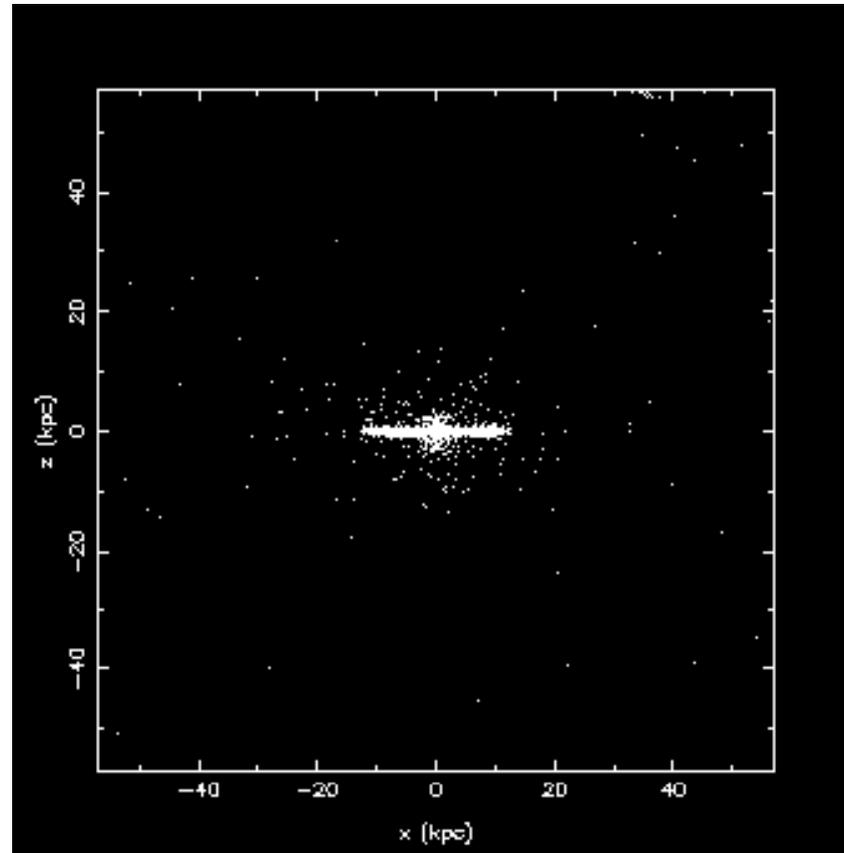
3.2 Gyr

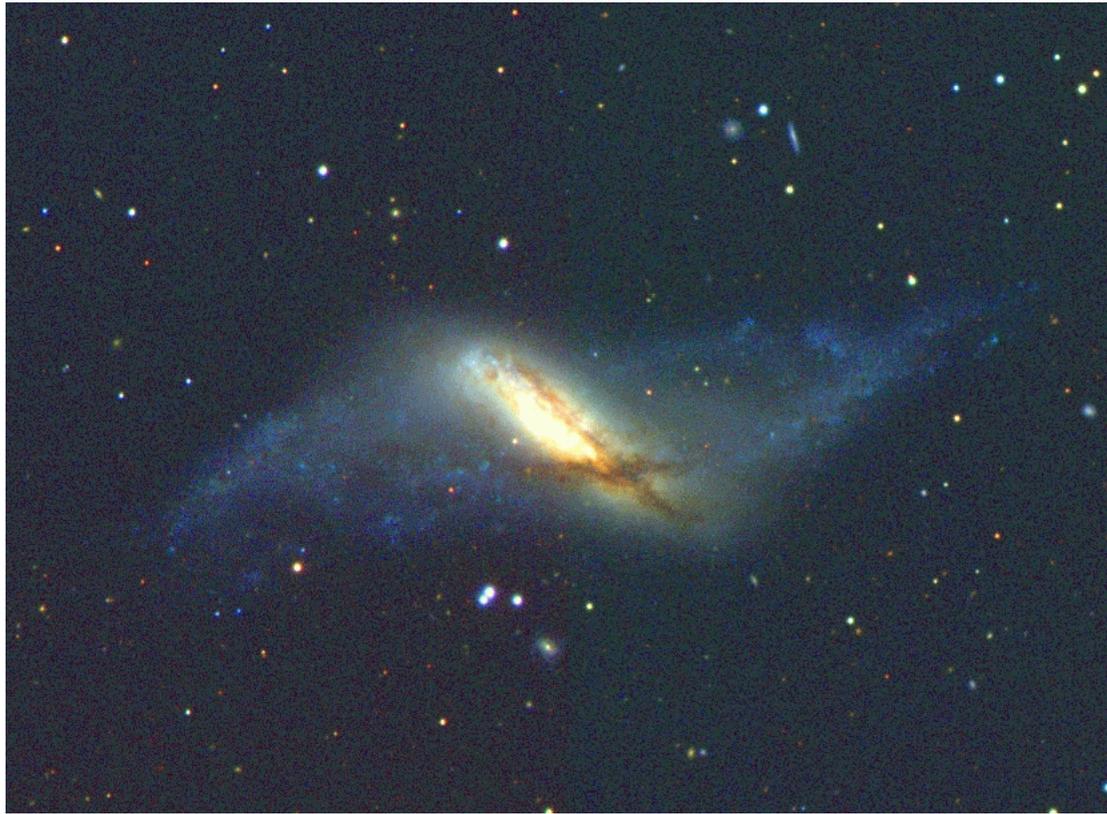


4 Gyr



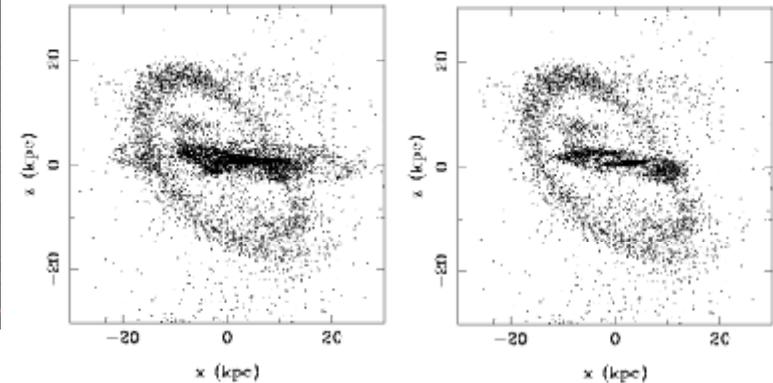
# Scénario animé de l'accrétion





## Scénario de l'accrétion

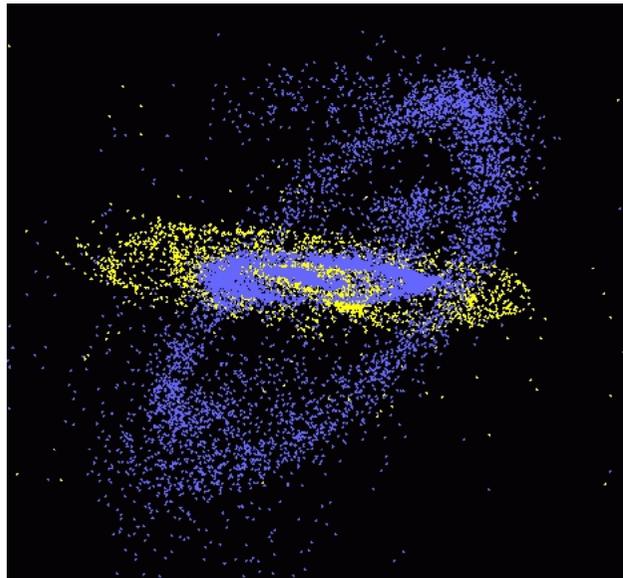
Capable de former des PR inclinés



Gas+stars

Gas only

NGC 660



NGC 660 contient du gaz  
Probablement instable par précession  
Même si self-gravitant

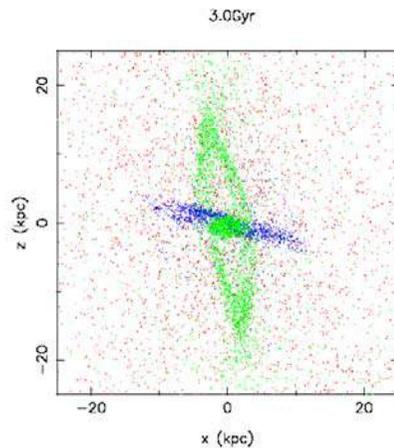
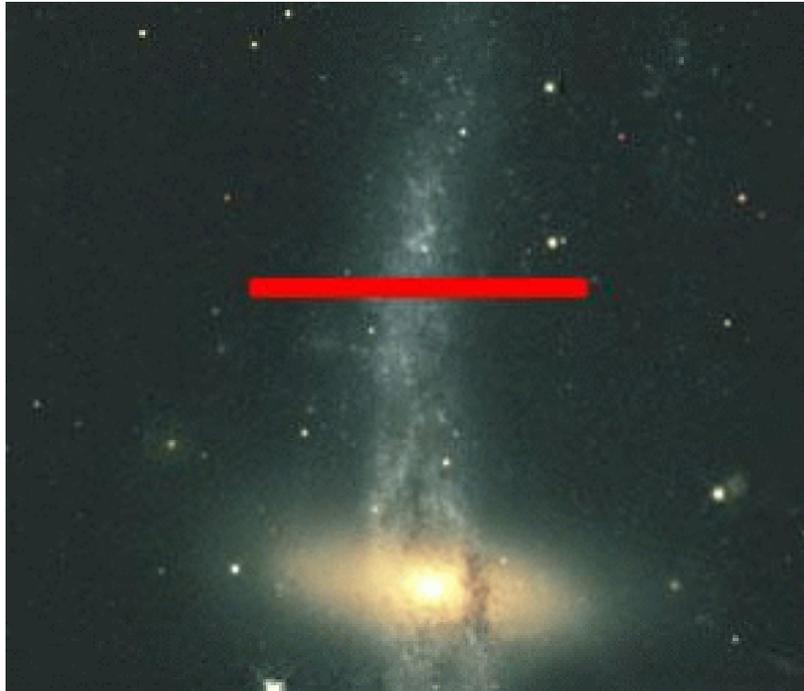
Pas dans le scénario du merging

# NGC4650A: un cas d'accrétion

Pas de halo stellaire détecté autour de la galaxie

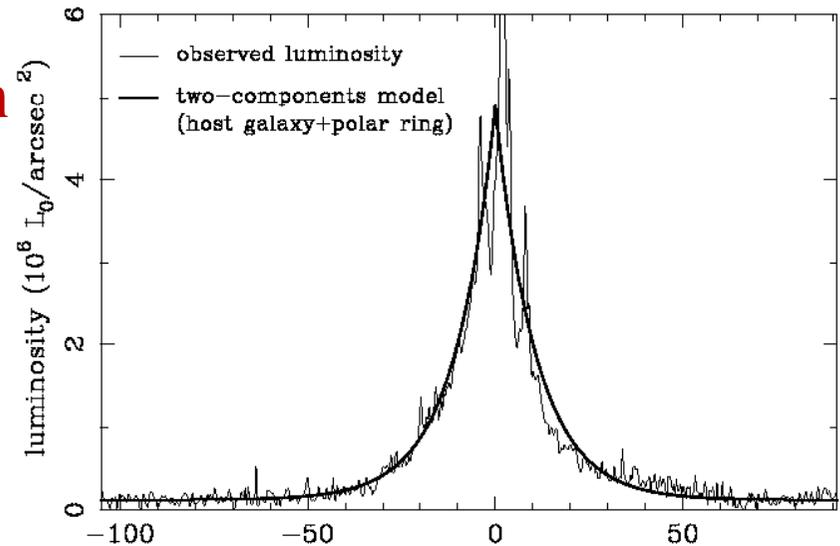
Comme dans le scénario de fusion

PR=  $8 \cdot 10^9 M_{\odot}$  HI et  
 $4 \cdot 10^9 M_{\odot}$  étoiles



Scénario de fusion

**Lum**

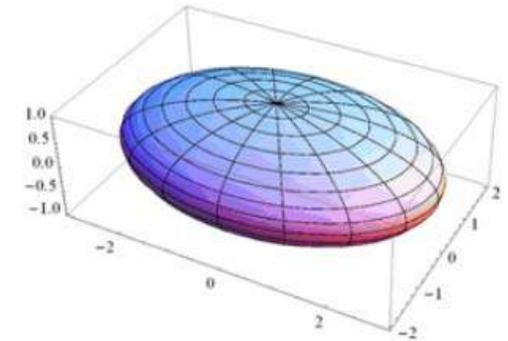


**Position le long de la fente**

# Les anneaux polaires et la matière noire

Les simulations CDM montrent que la matière noire ne se concentre pas et ne s'aplatit pas → aplatissement inférieur à E4

**Forme à 3D?**



**Le cas de NGC 4650A:**

Halo sphérique (Whitmore et al 87)

MN aplatie selon l'équateur (Sackett & Sparke 90, Sackett et al 94)

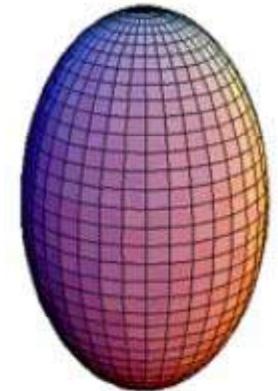
MN aplatie le long du pôle (Combes & Arnaboldi 96)

**Relation de Tully-Fisher pour les Anneaux Polaires:**

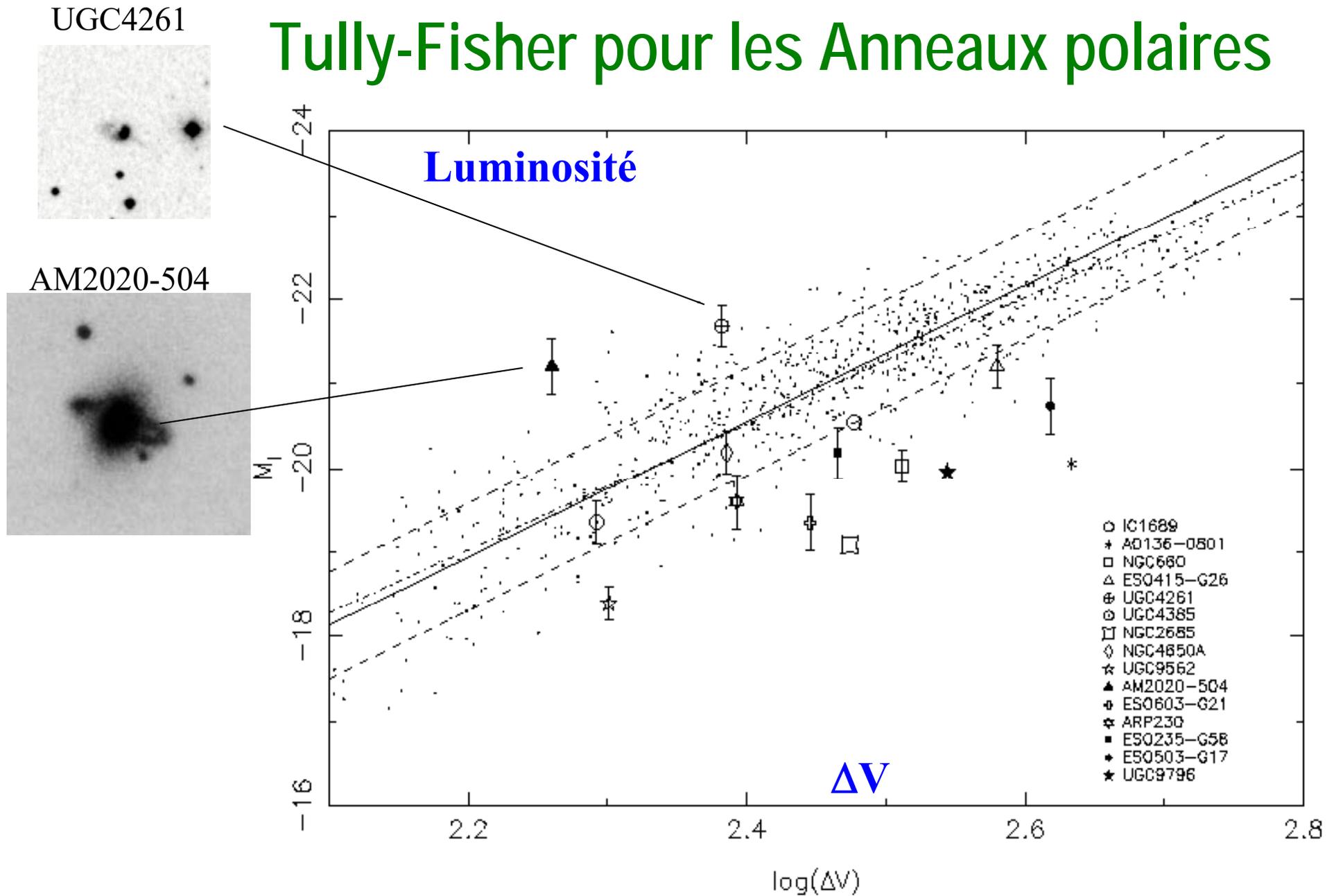
(Iodice et al 2002)

La largeur  $\Delta V$  HI mesure la dynamique des PR

Alors que la luminosité R ou NIR mesure la galaxie hôte



# Tully-Fisher pour les Anneaux polaires

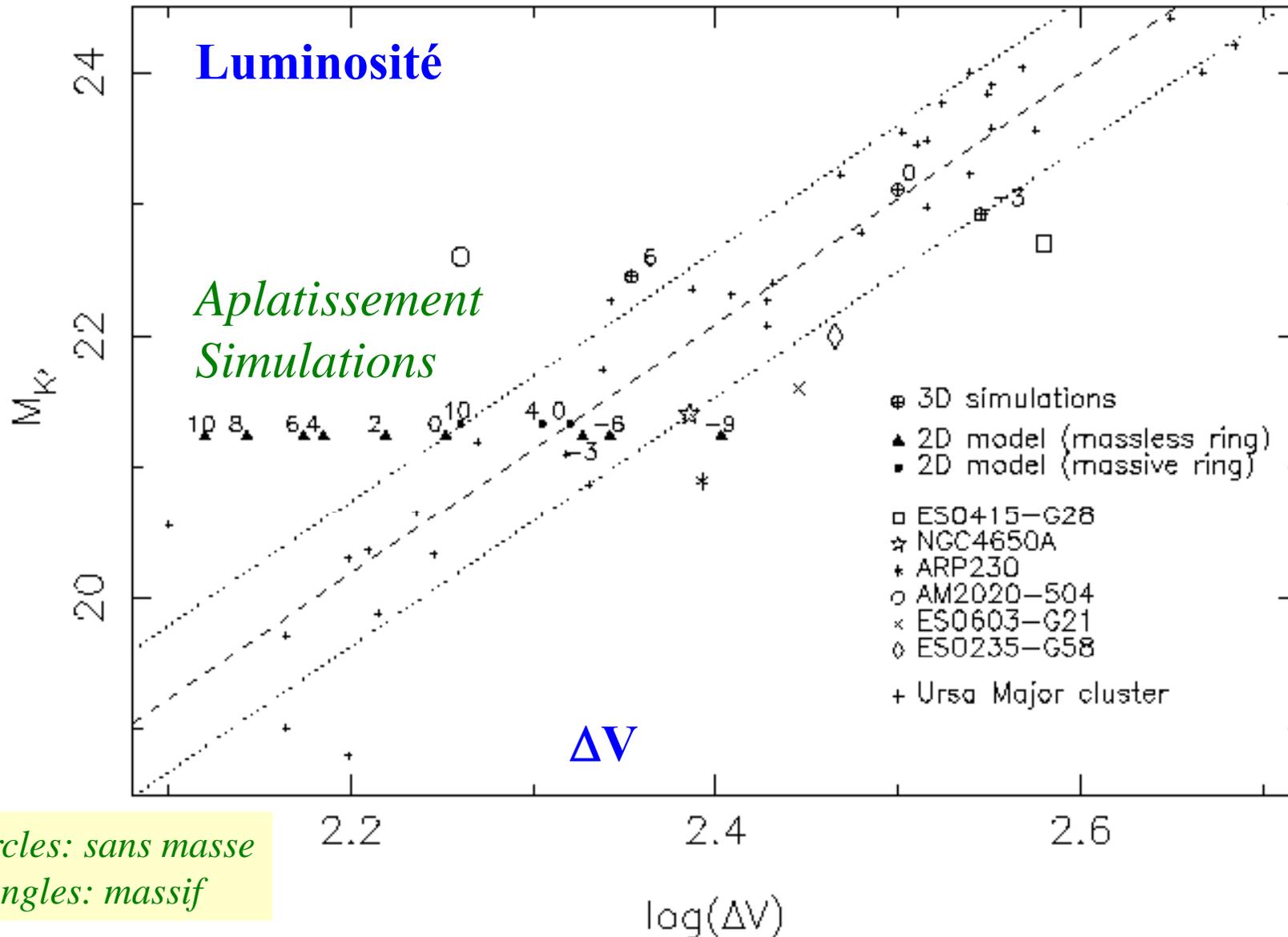


*Iodice et al 2002*

TF en bande I

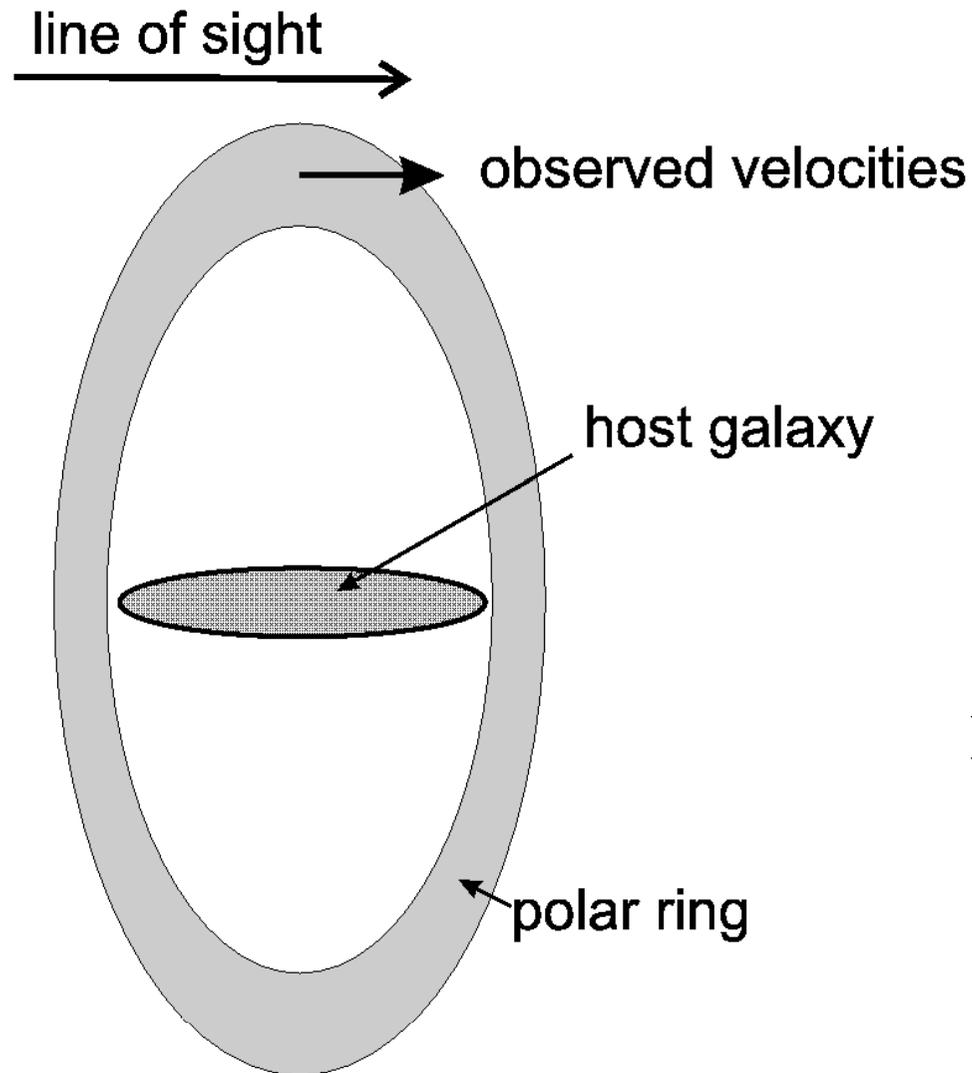
# TF pour les Anneaux et simulations

15%peak



*Cercles: sans masse  
triangles: massif*

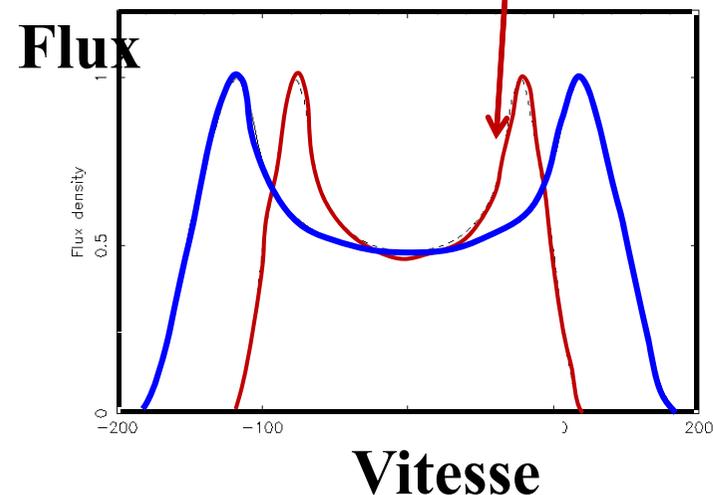
# Les Anneaux ne sont pas circulaires



Les deux composants sont vus edge-on (effet de sélection)

Le  $V$  observé des est le plus petit, quand la MN est aplatie selon l'équateur

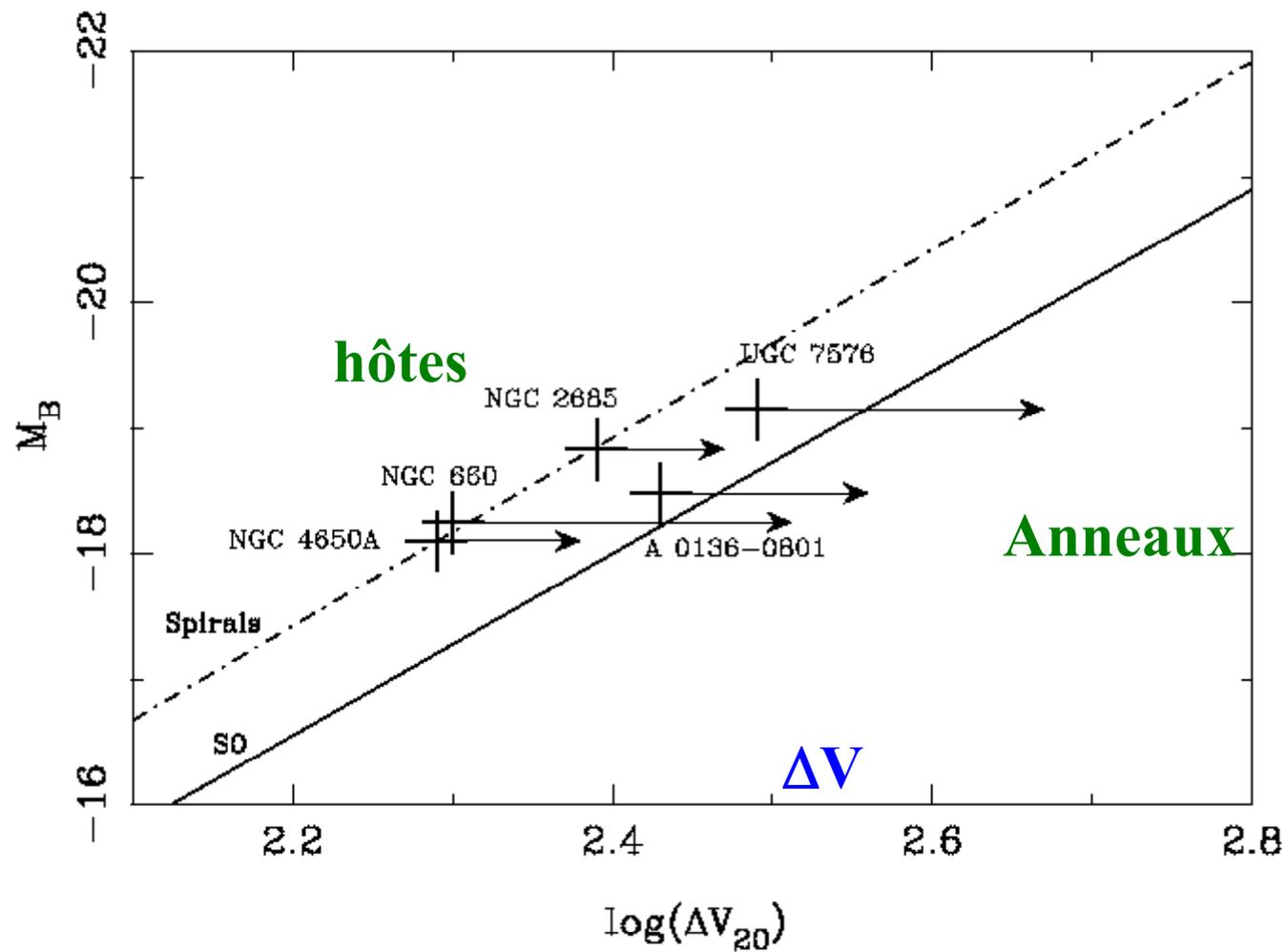
Plus il y a de MN, plus l'anneau est excentrique



# TF de la galaxie hôte vs Anneau Polaire

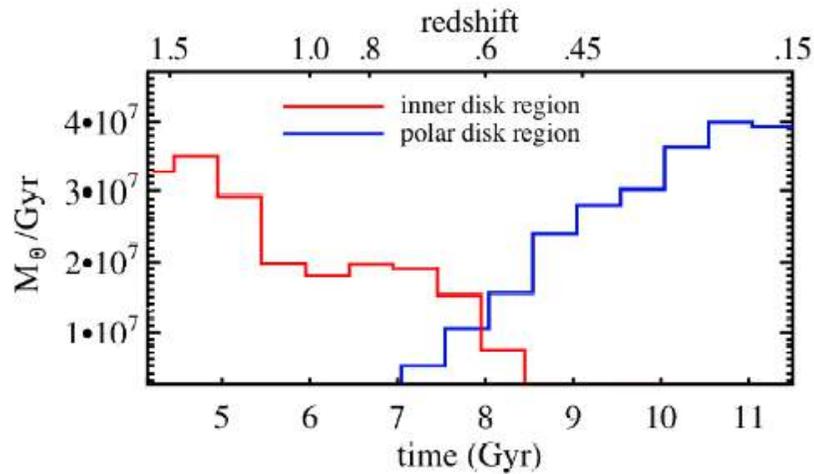
Luminosité

Galaxies spirales



→ En fait, les anneaux tournent plus vite

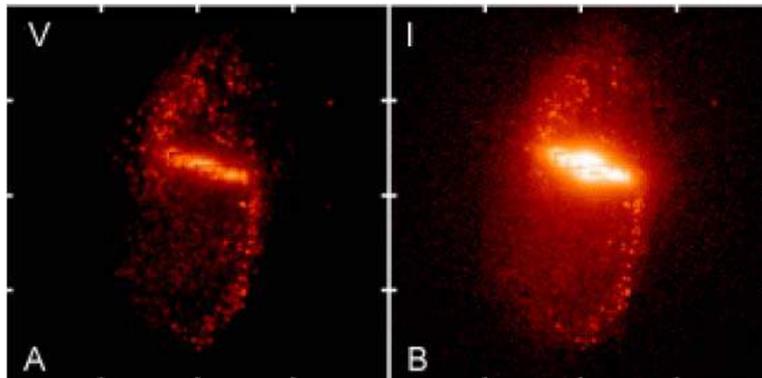
# Anneaux polaires et accrétion cosmique



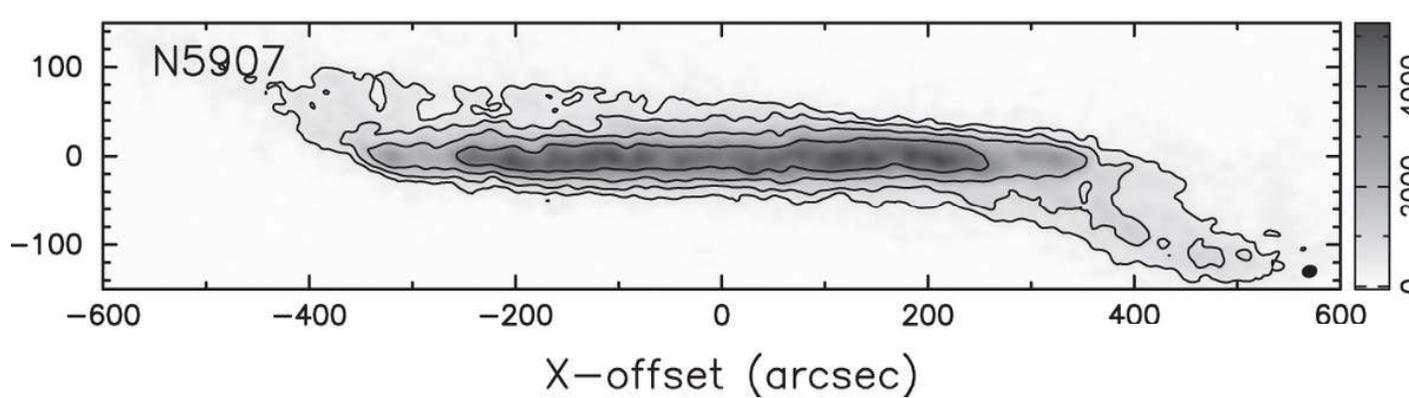
*Brook et al 2008*

→ Après 1.5 Gyr, l'interaction entre les 2 disques détruit l'anneau

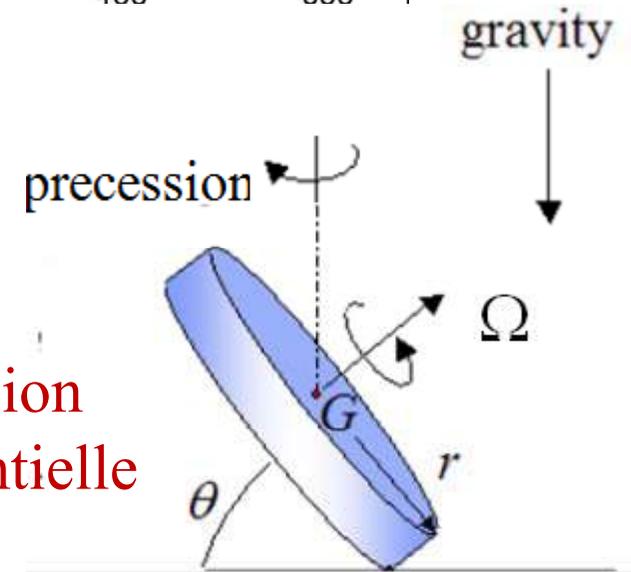
→ Courbe de vitesse semblable dans les plans équatorial et polaire



# Warps et oscillations en z



La majorité des galaxies ont un warp qui pourtant devrait s'amortir rapidement  
→ Soit le halo est sphérique

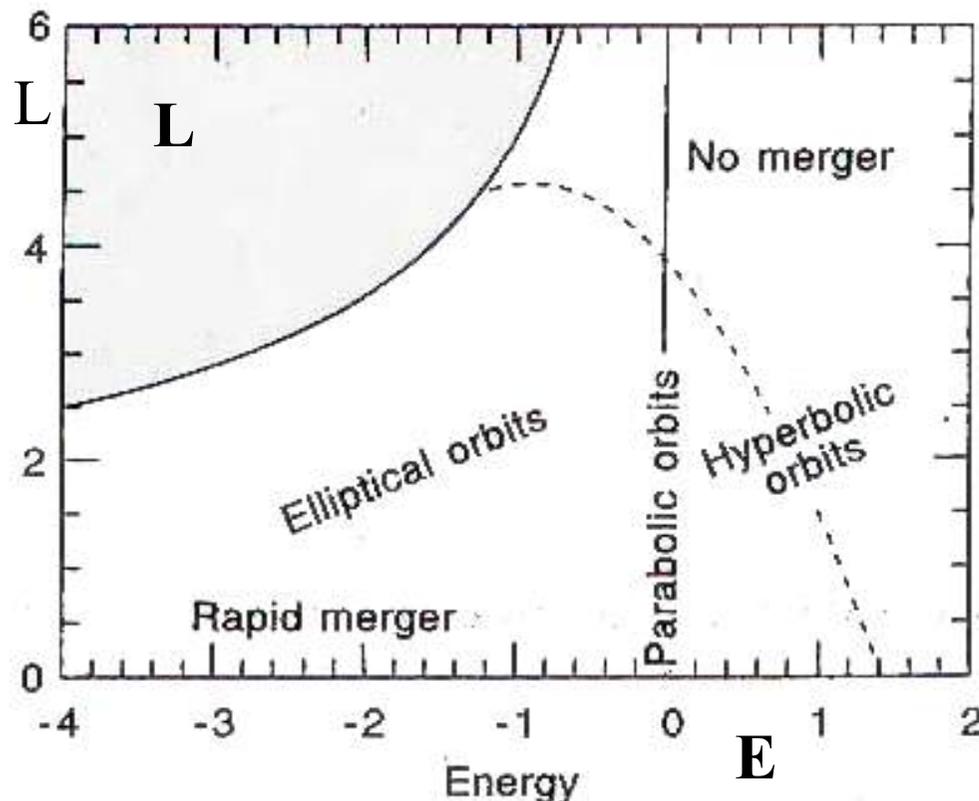


→ Autres mécanismes, comme interaction entre galaxies, ou bien **accrétion continue de gaz** externe, avec un moment angulaire différent

# Critères pour la fusion entre galaxies

**Deux galaxies sphériques:** dépend de leur énergie  $E = v^2/2$   
de leur moment  $L = bv$

Pour deux systèmes non liés, il existe une vitesse  $v_{\max}(E_{\max})$   
au delà de laquelle la fusion ne se produira pas



Pour les galaxies spirales  
phénomènes de résonance

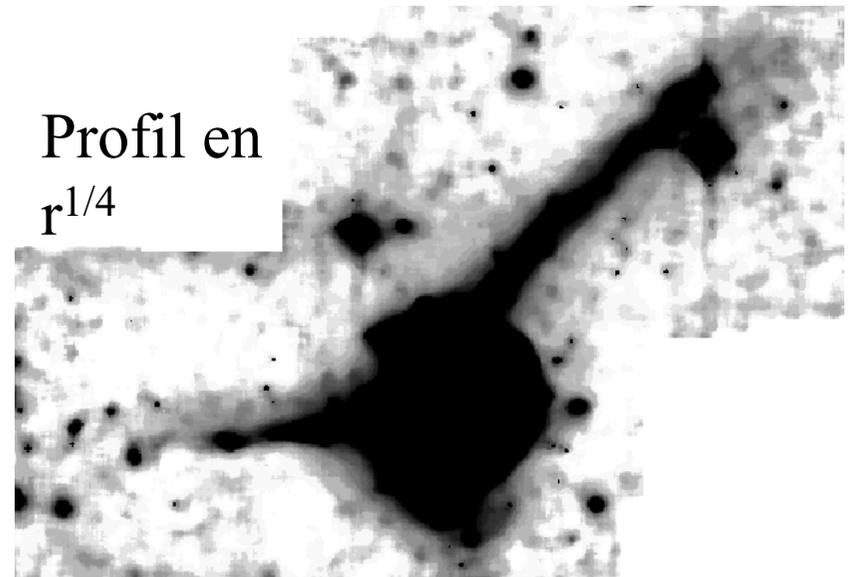
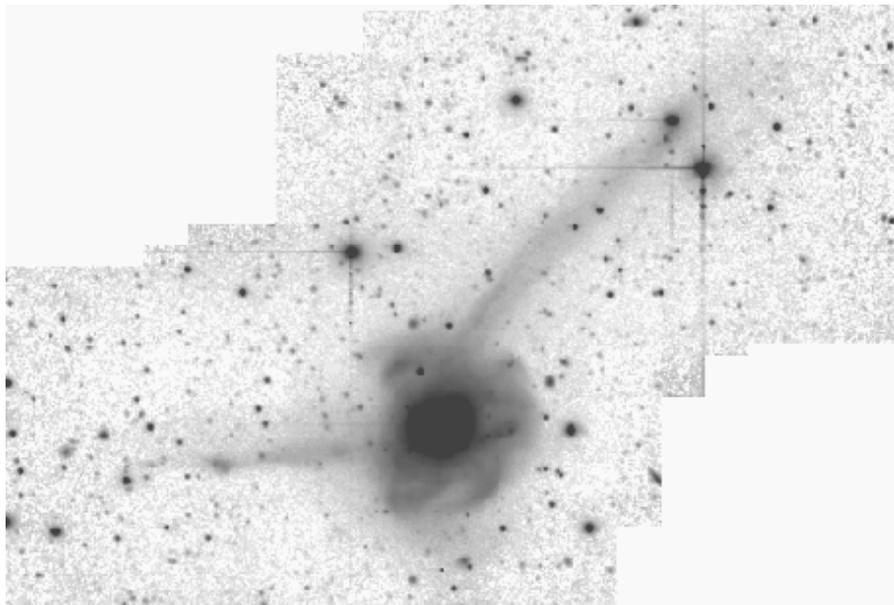
la fusion en est facilitée

# Formation des Elliptiques par fusion

Fusion de spirales de masse comparable ("major mergers")  
mais aussi beaucoup de masses plus petites ("minor mergers")

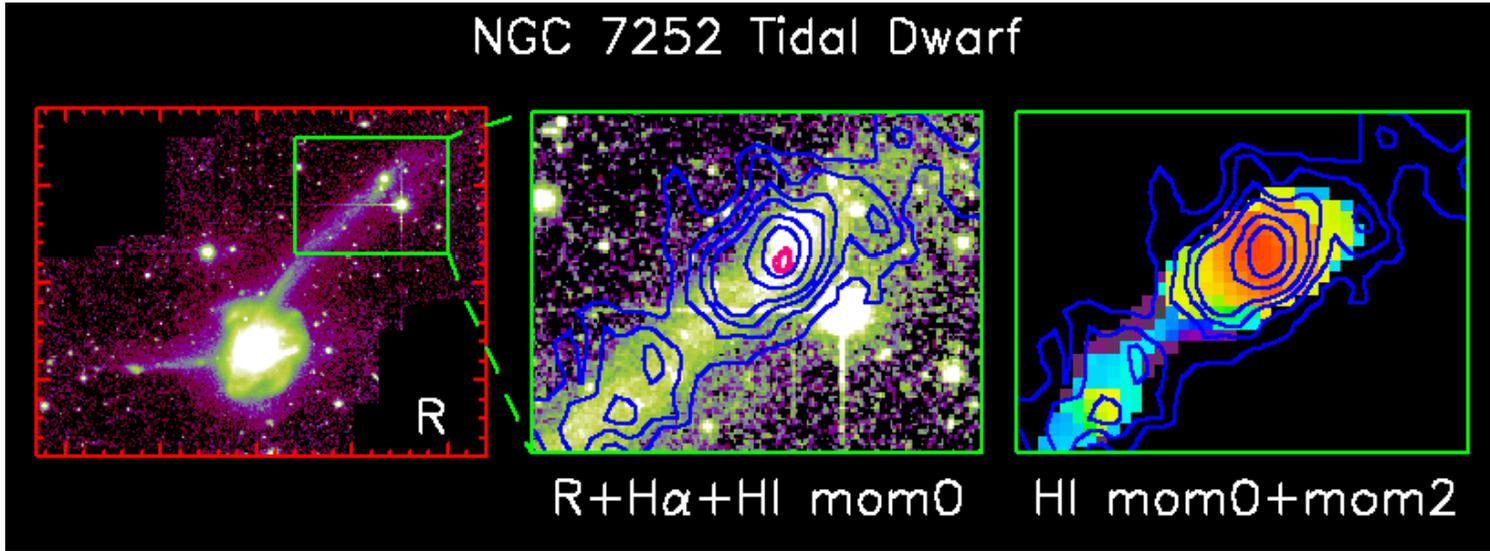
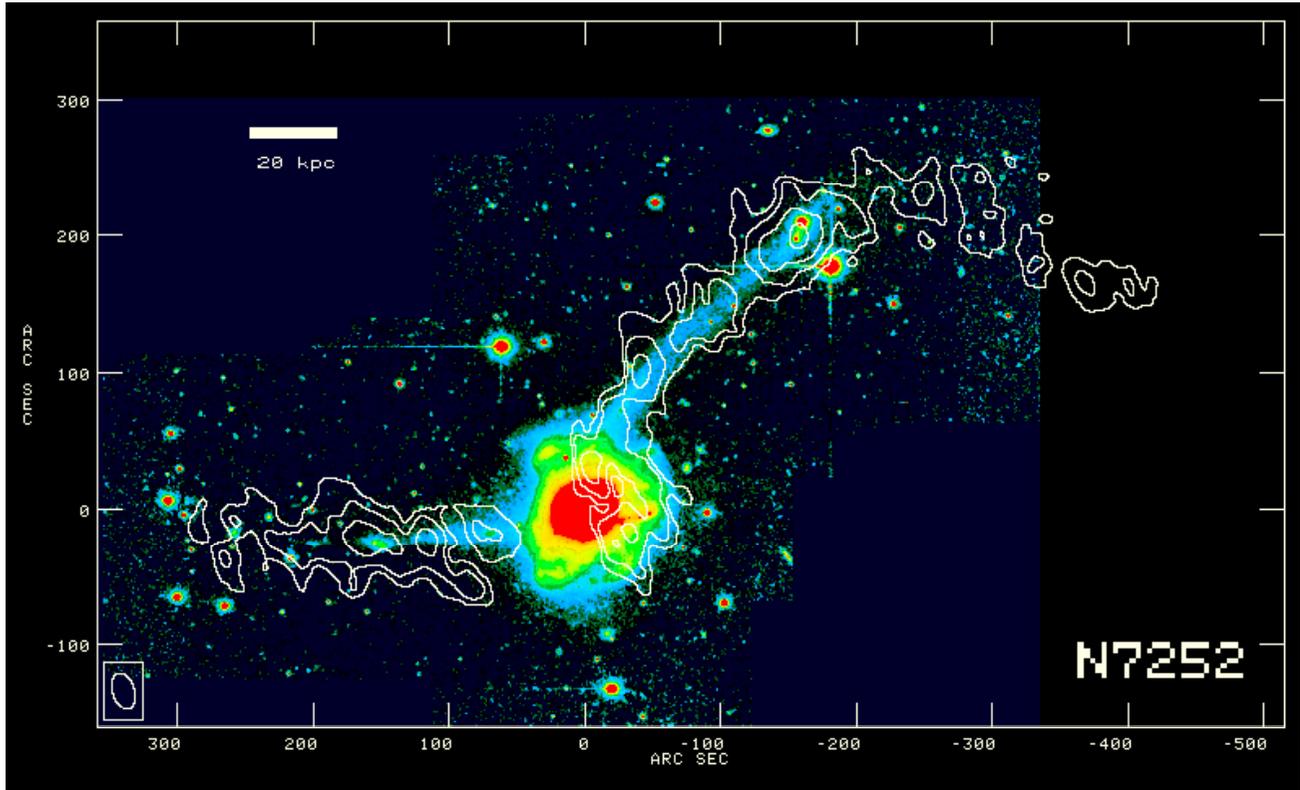
**Obstacle résolu:** le nombre des amas globulaires,  
la densité dans l'espace des phases au centre des E-gal

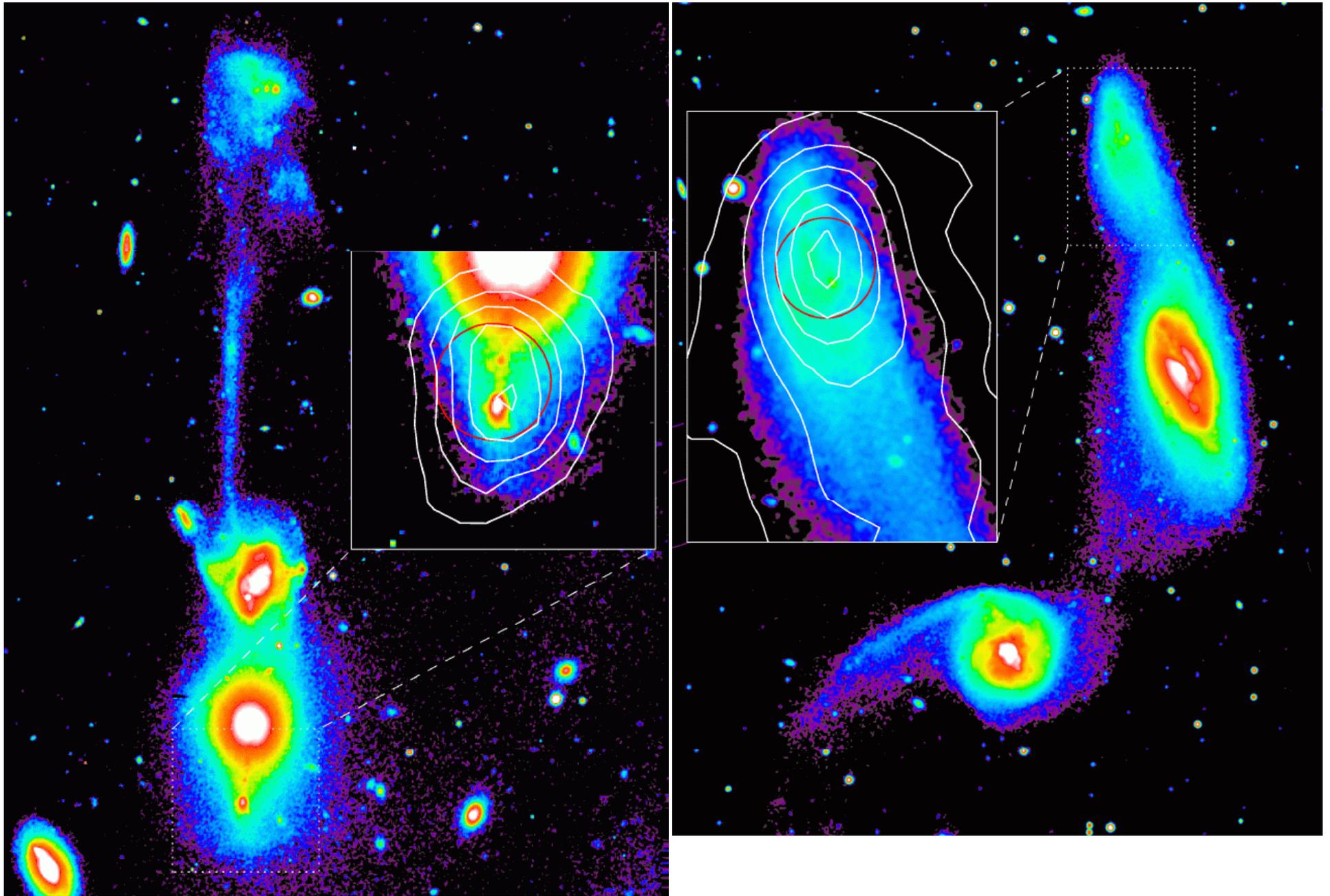
NGC 7252 (*Schweizer, 82, Hibbard 99*)



Hibbard's website  
HI 21cm

Formation de naines  
de marées  
(tidal dwarfs)

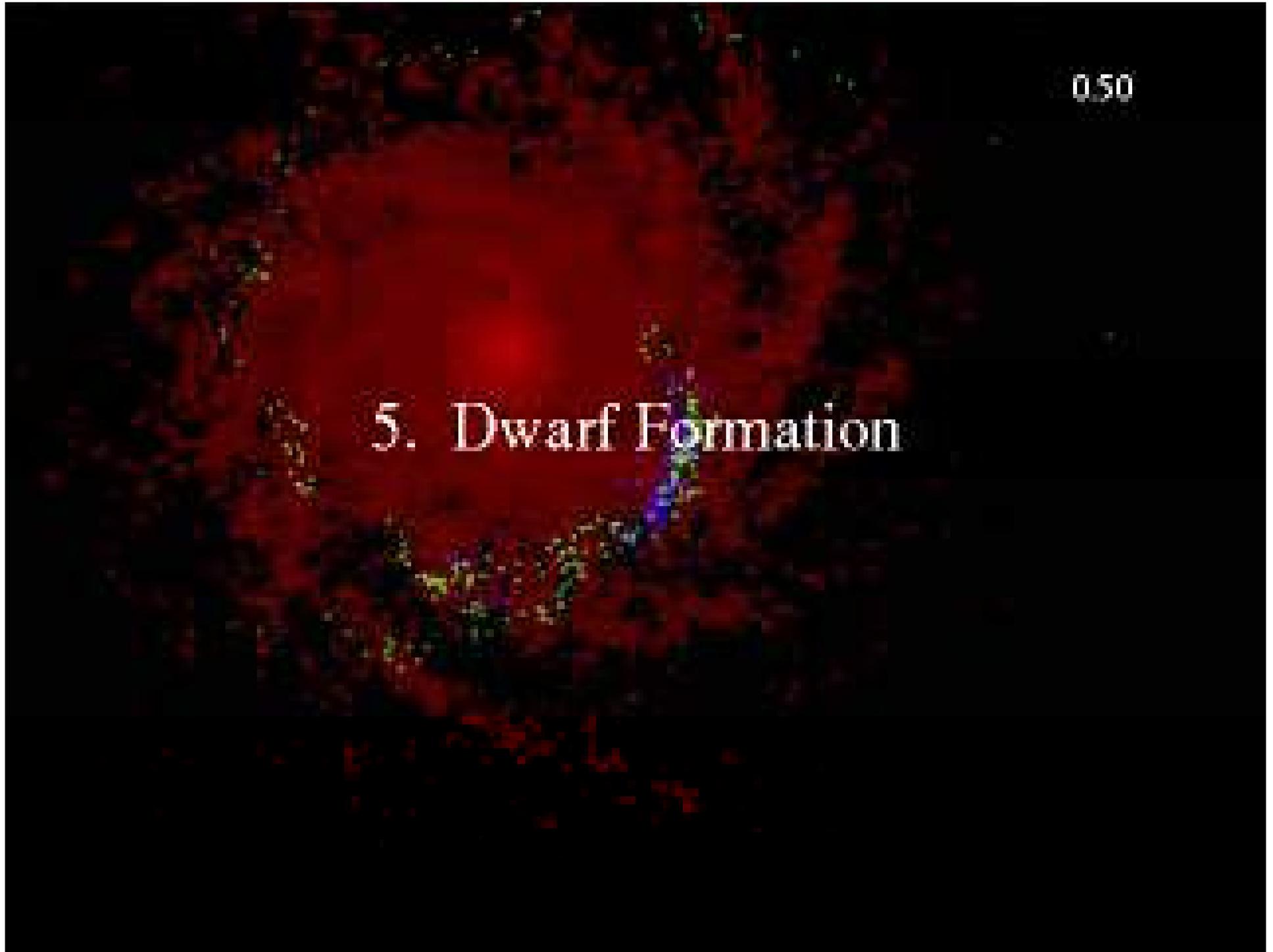




*Braine et al 2000, 01*

0.50

## 5. Dwarf Formation



# Coquilles autour de galaxies elliptiques

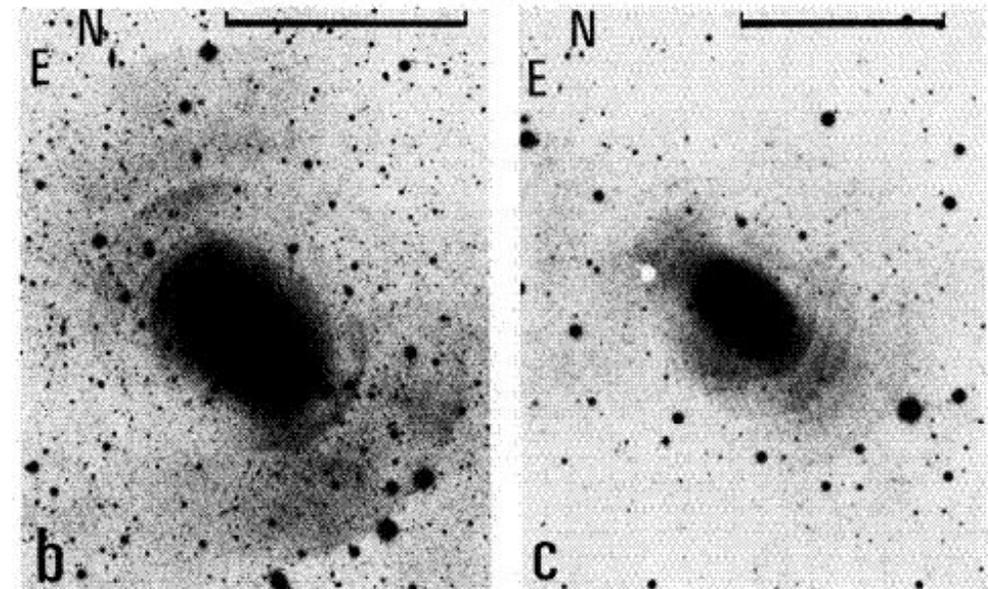
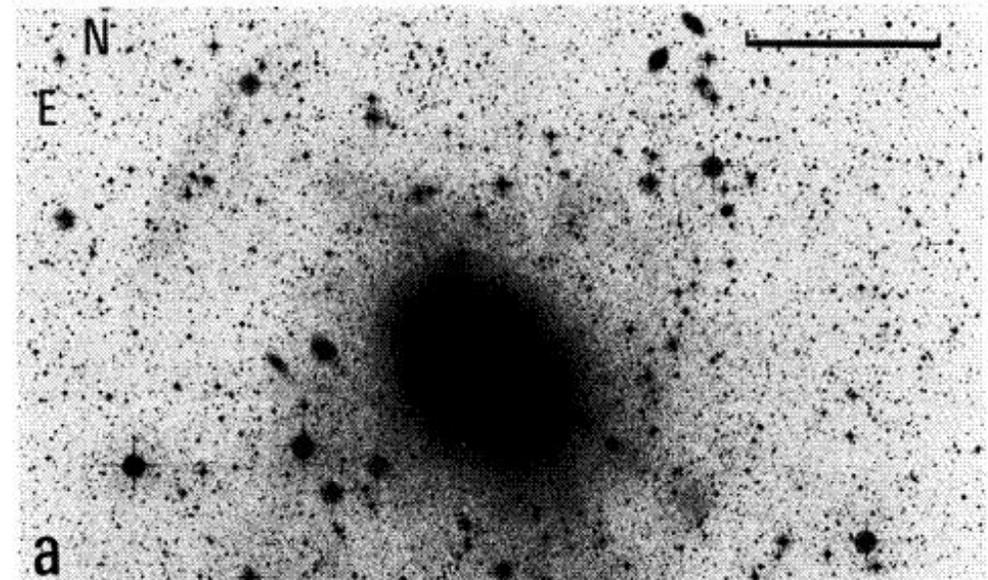
Phénomène très fréquent,  
technique du "unsharp masking"  
*Malin & Carter 1983*

NGC 3923: 25 shells

jusqu'à 200kpc du centre

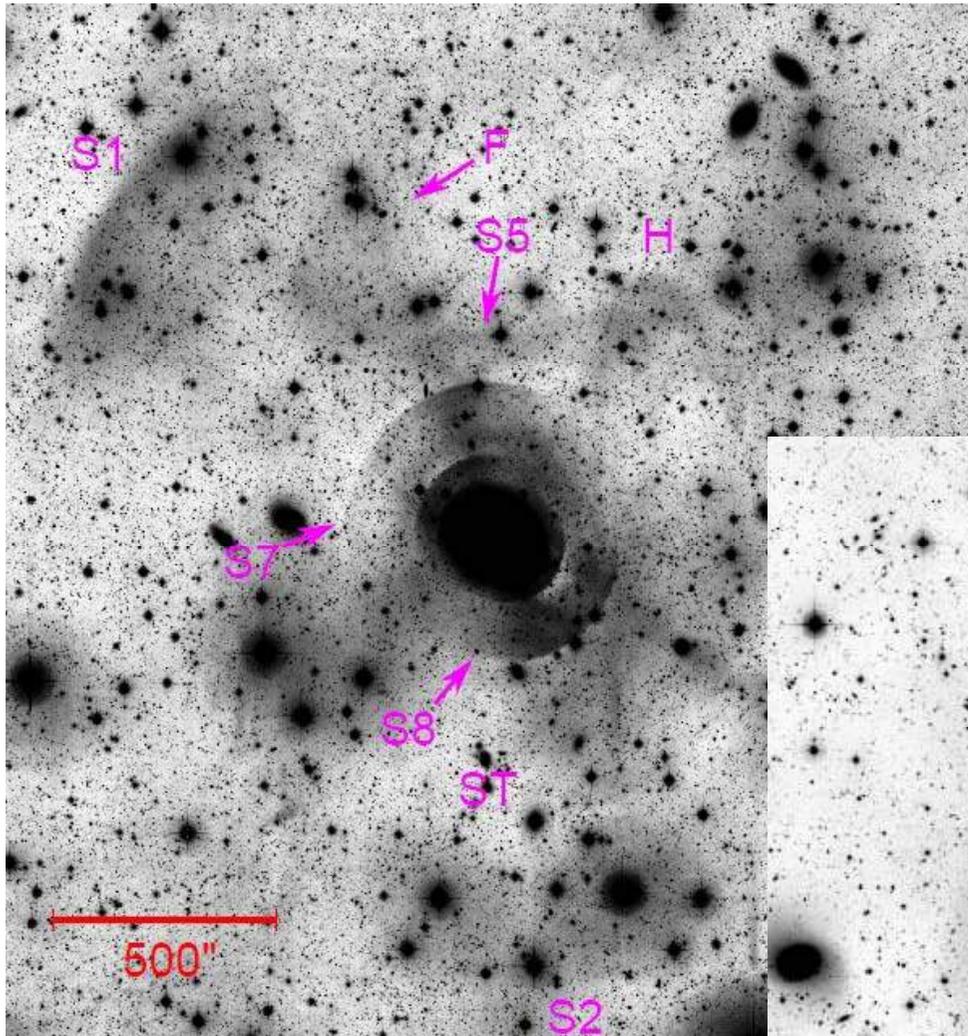
Alignement perpendiculairement  
au grand axe, pour les galaxies  
**allongées**

S'enroulent aléatoirement pour  
les galaxies **rondes en projection**



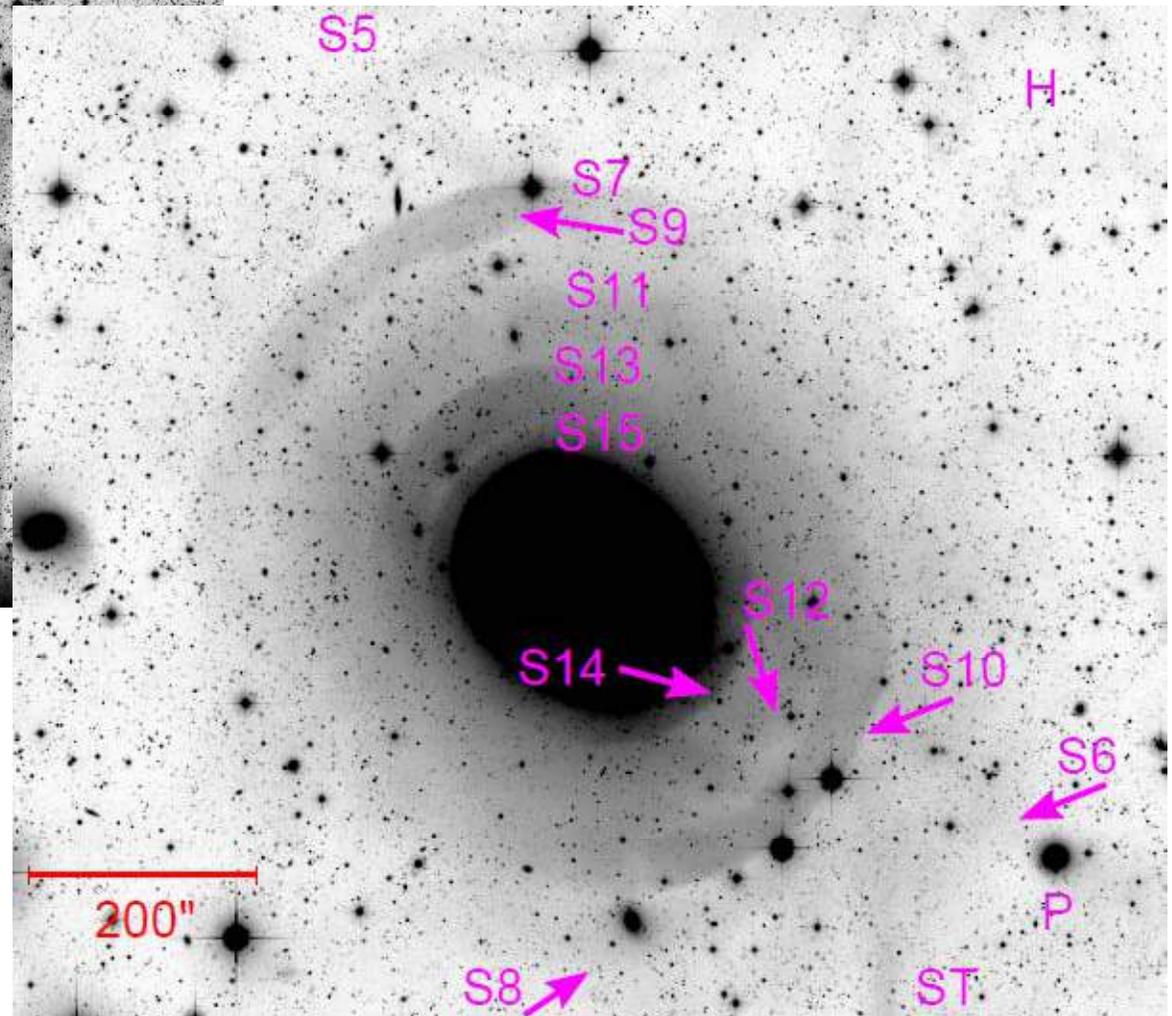
# Images Megacam au CFHT

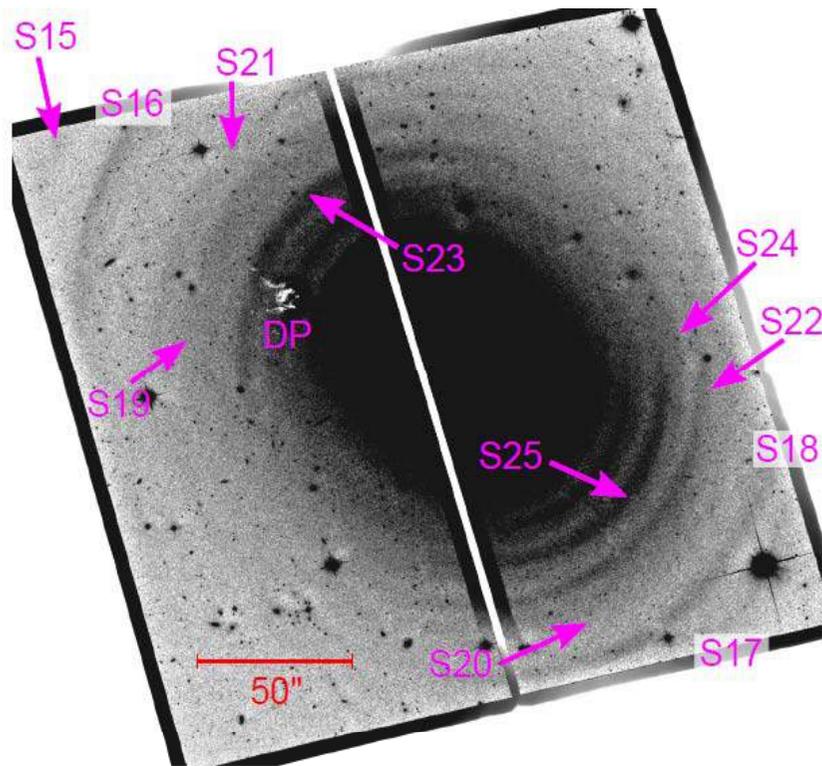
Les coquilles numérotées à partir de l'extérieur, S1 –S8 500''



S8-S15, 200'' (10''=10kpc)  
29mag/arsec<sup>2</sup>

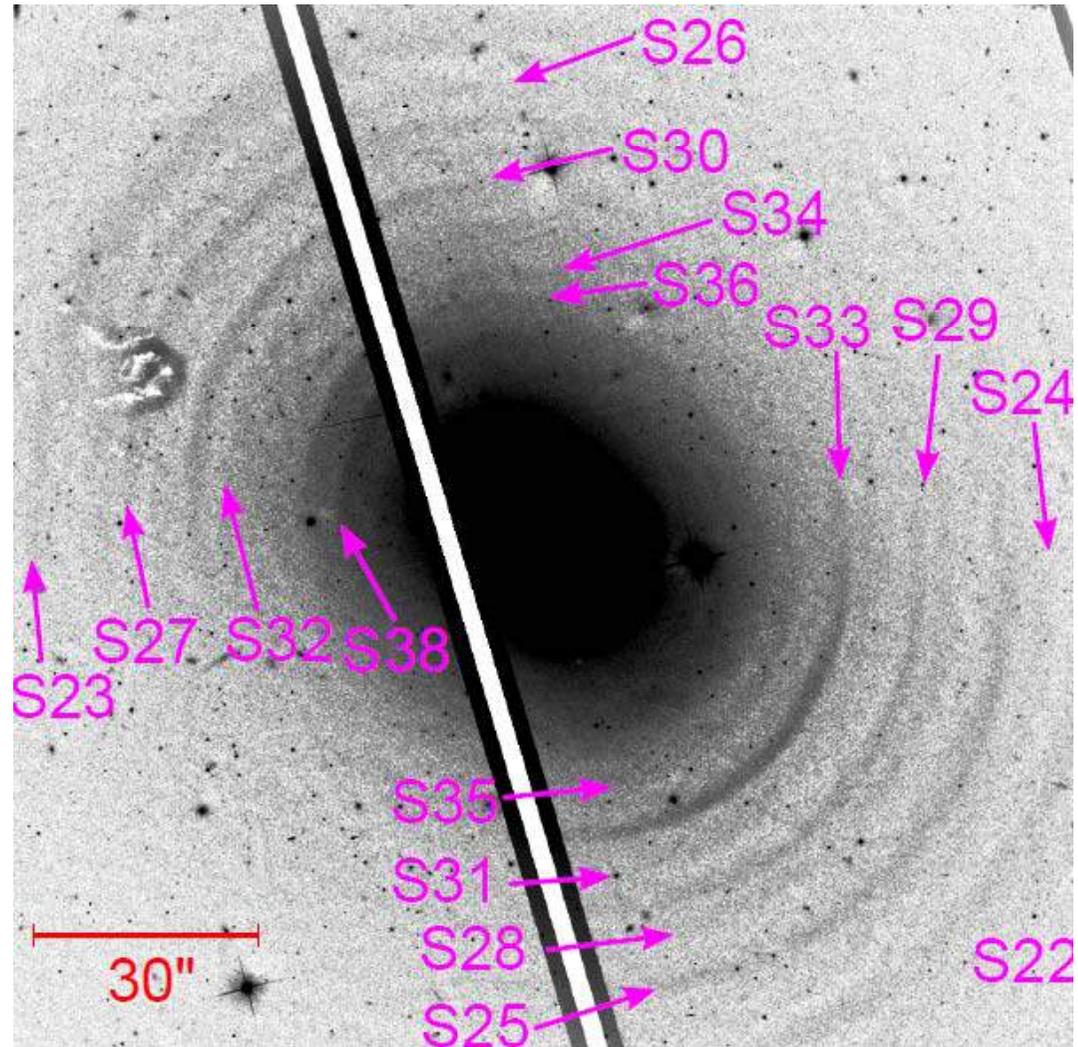
*Bilek et al 2016*





## Images HST

S15-S25, 50''



S26-S40, 30''

Disposées de façon alternée  
de part et d'autre  
Jusqu'à 42! (et 63kpc)  
Viennent au moins de 2  
galaxies naines

*Bilek et al 2016*



*P-A. Duc, Megacam*

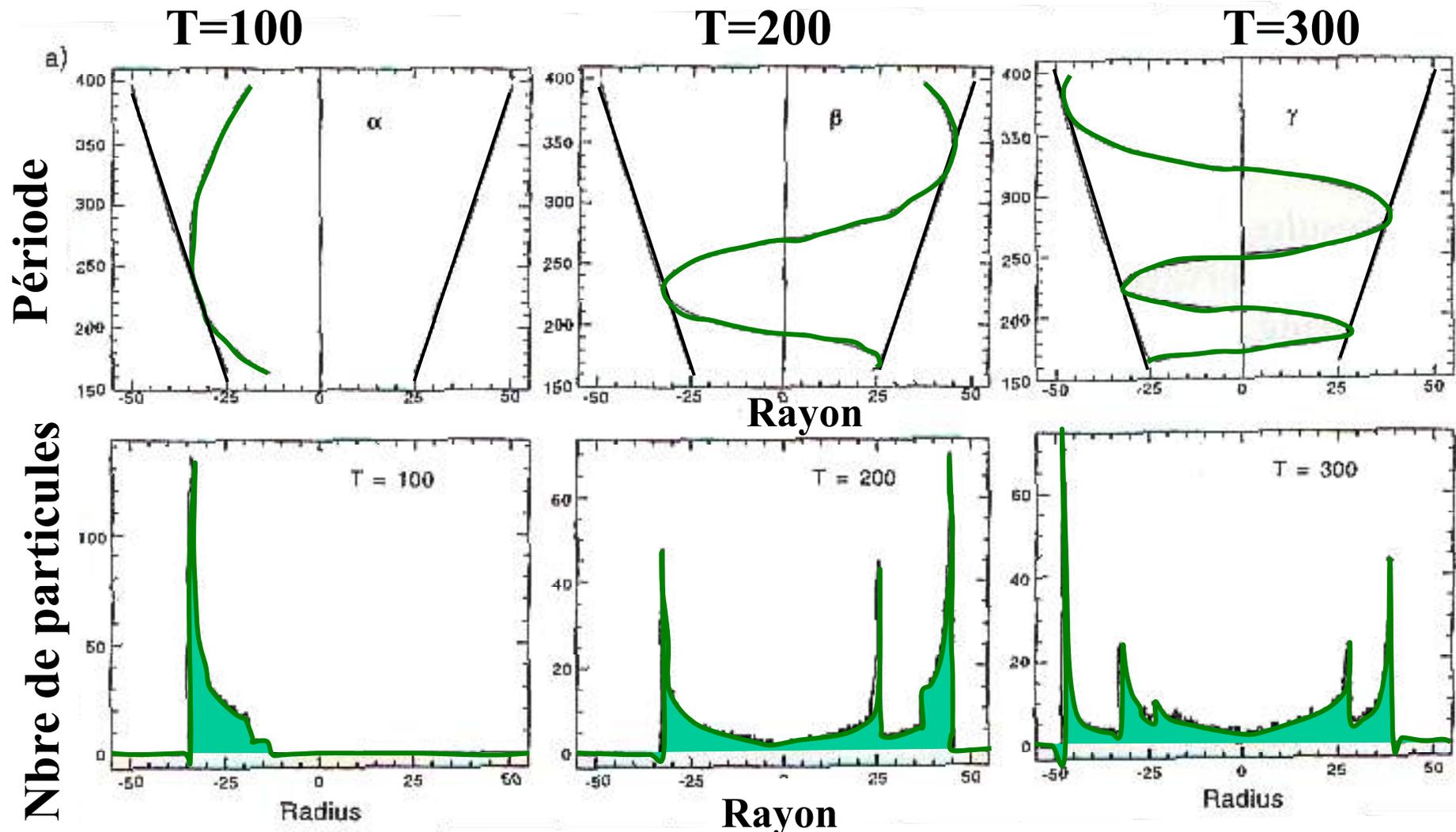


N474

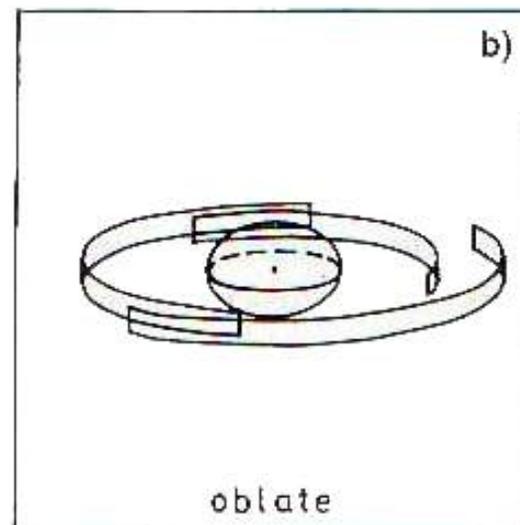
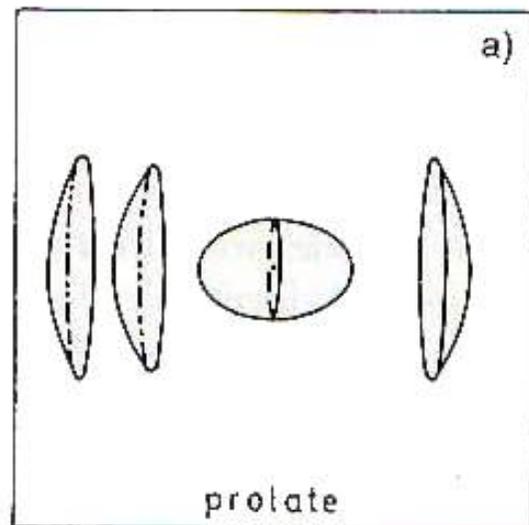
# Mécanisme d'enroulement de phase

Enroulement de phase (*Quinn 1984, Dupraz & Combes 1986*)

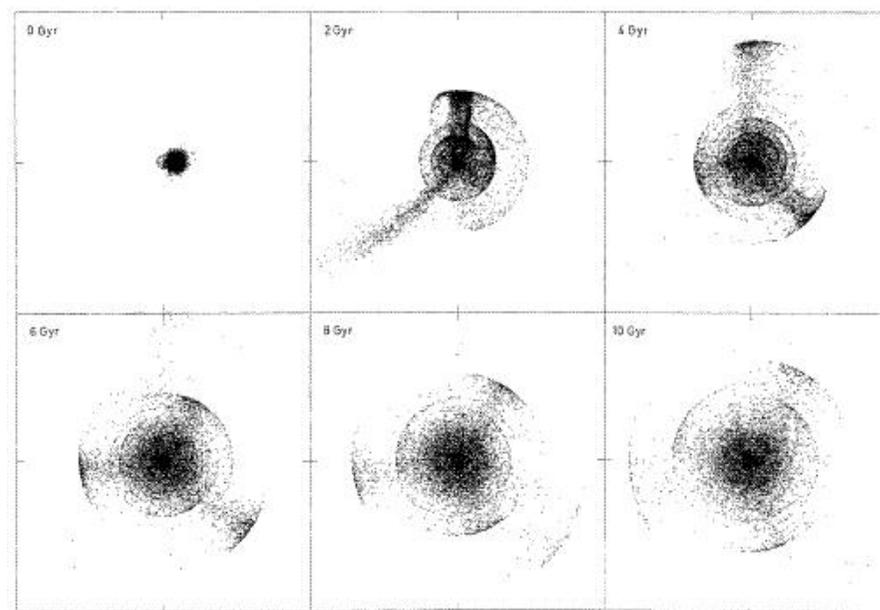
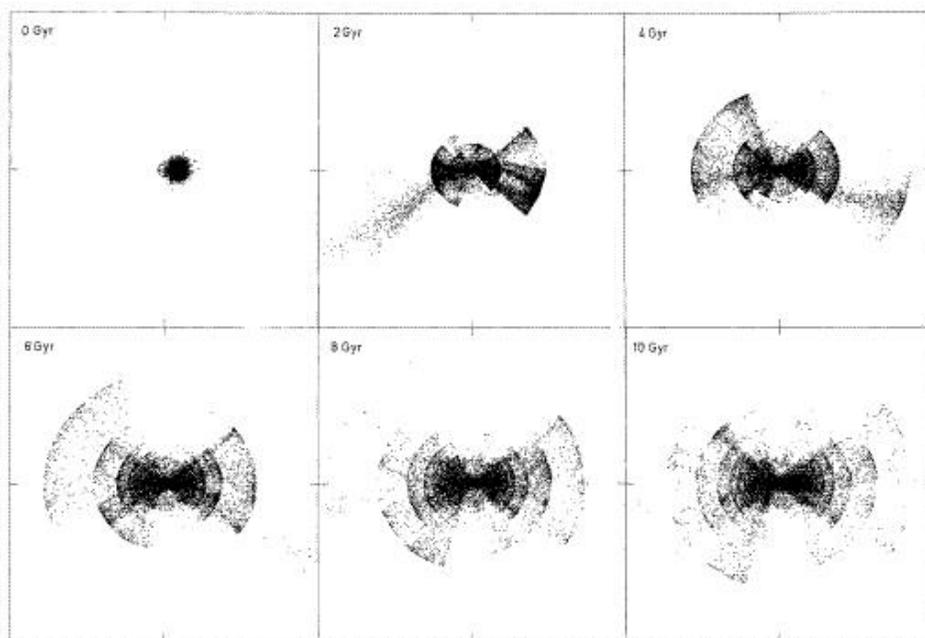
Forme à 3D des galaxies elliptiques? Matière noire?



Coquilles  
alignées selon  
le grand axe



dans  
le plan  
équatorial



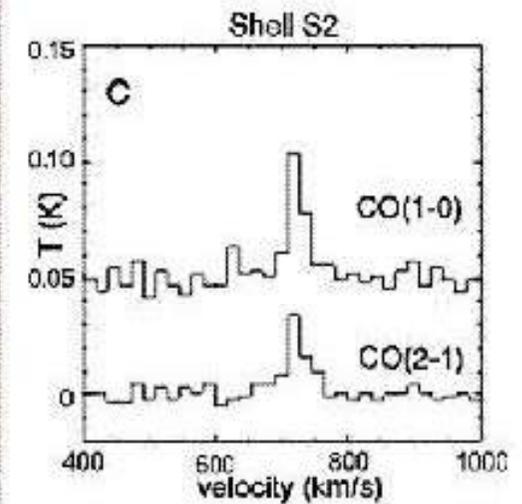
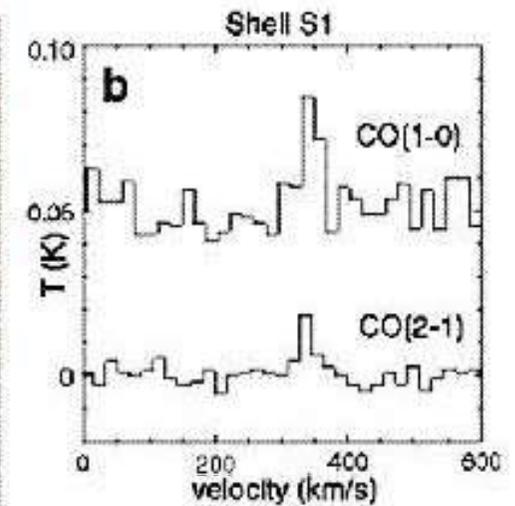
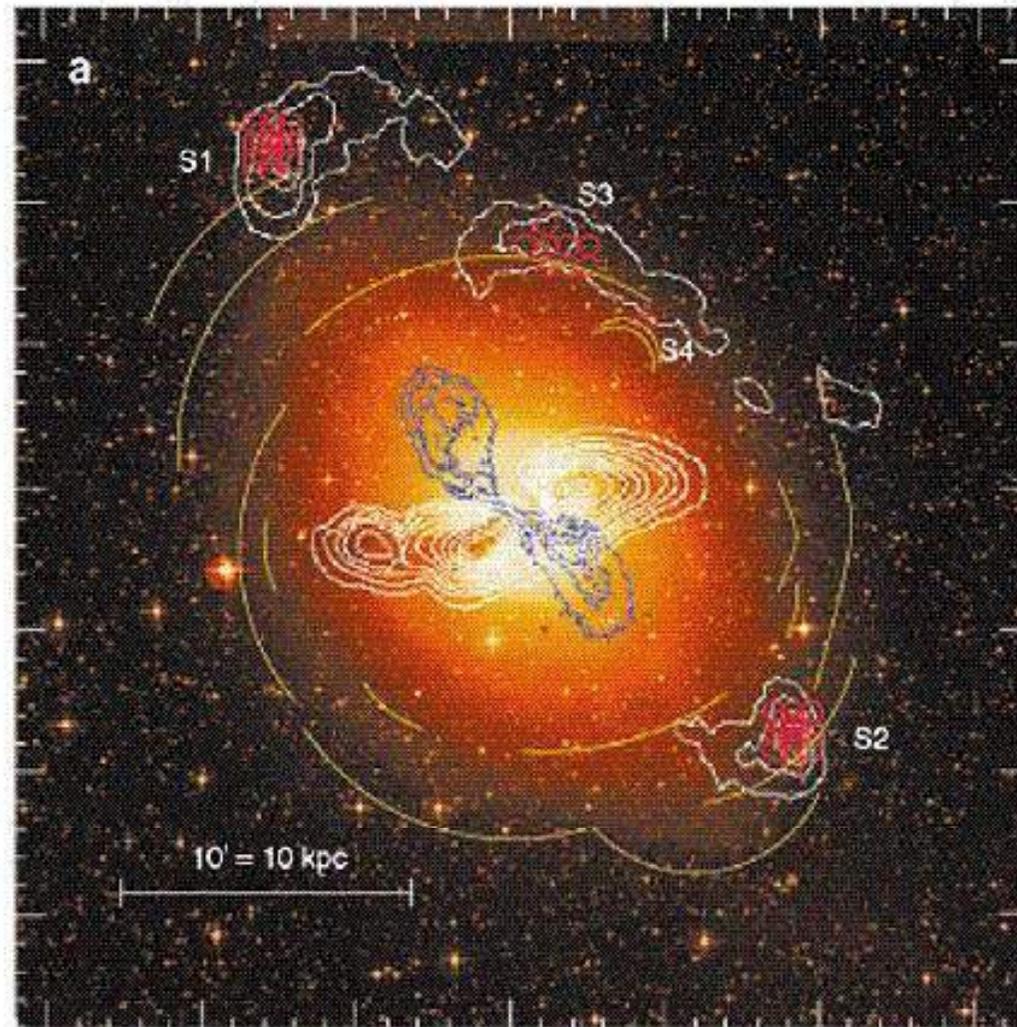
# Gaz dans les coquilles?

Jaune:  
étoiles

Blanc: HI

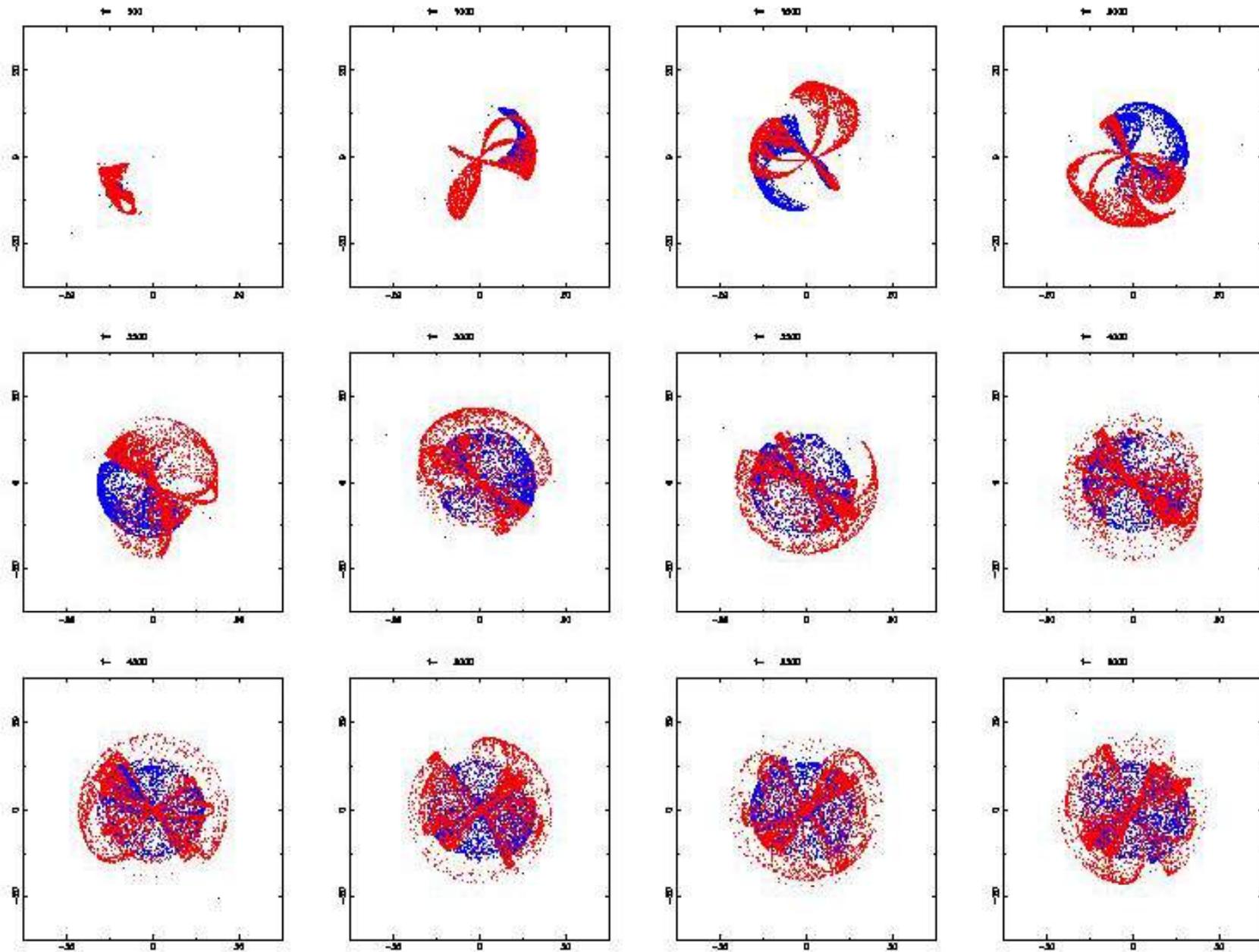
Bleu: Radio  
jets

Rouge  
CO obs



*Charmandaris, Combes, van der Hulst 2000*

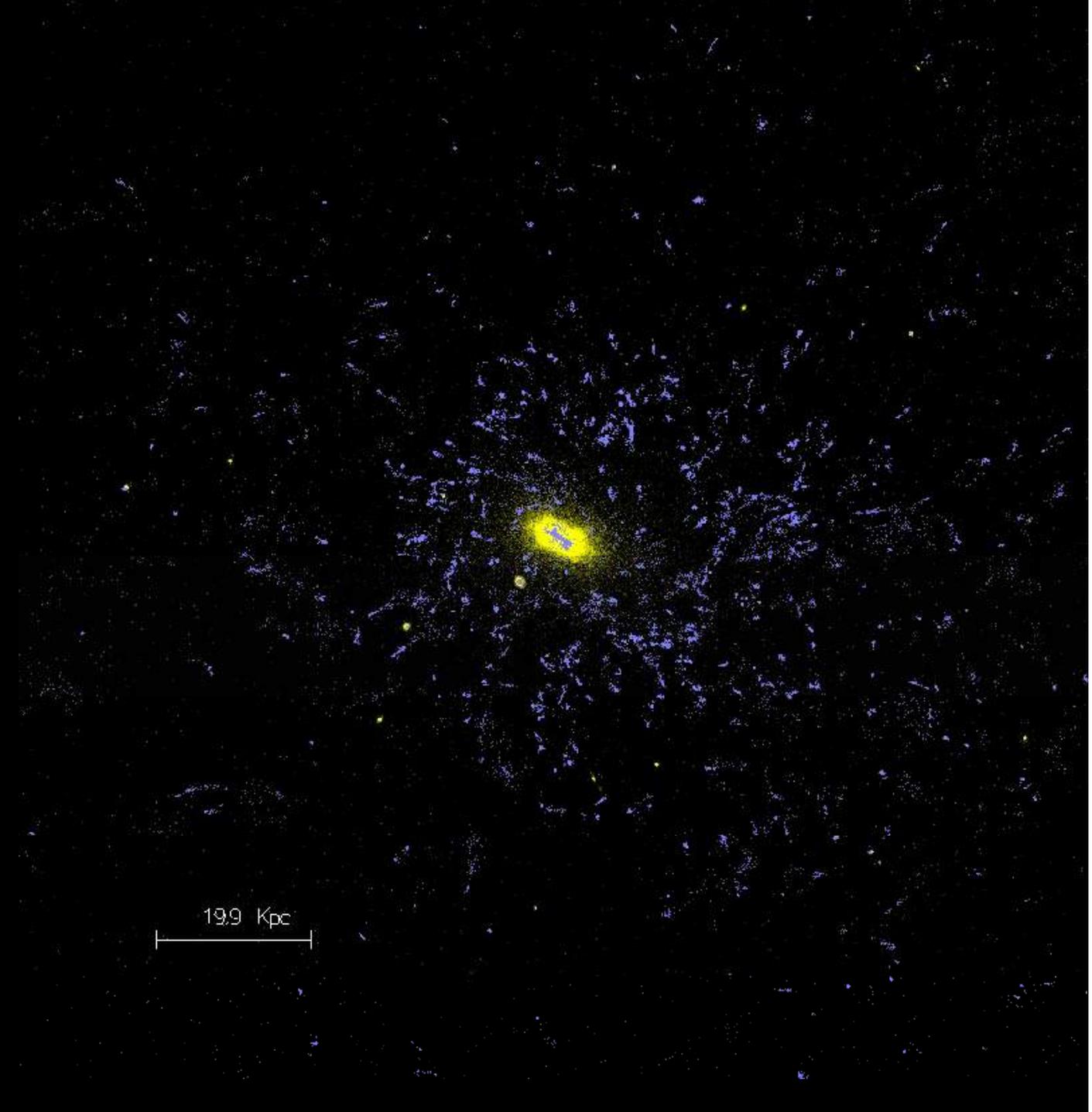
Moins de friction sur le gaz → coquilles externes



Gaz rouge, étoiles bleues

# Scénario hiérarchique

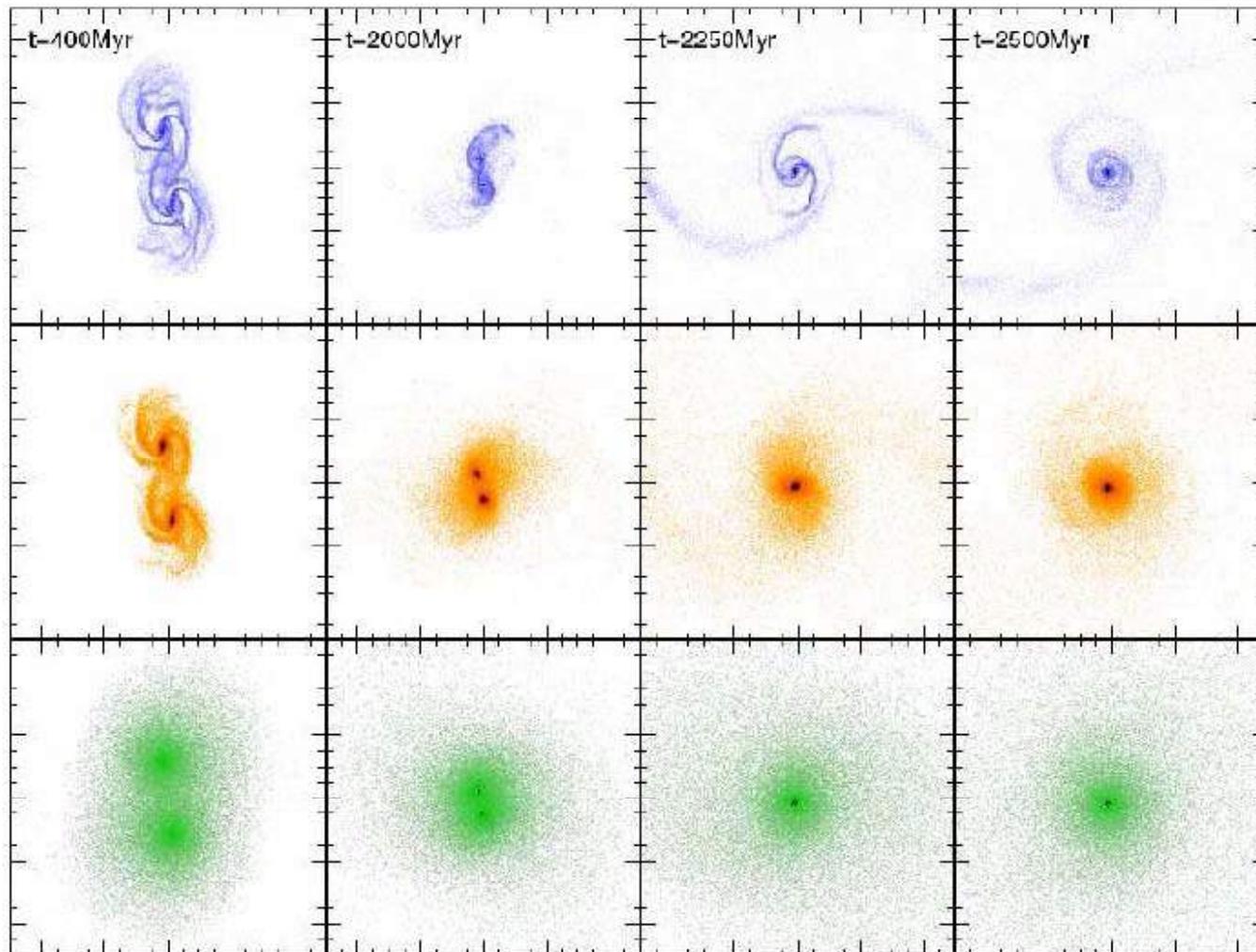
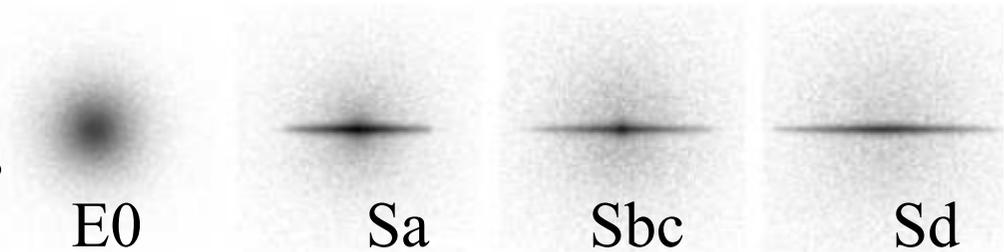
Formation de  
galaxies par  
série de fusions



19.9 Kpc

# Formation d'étoiles dans les fusions

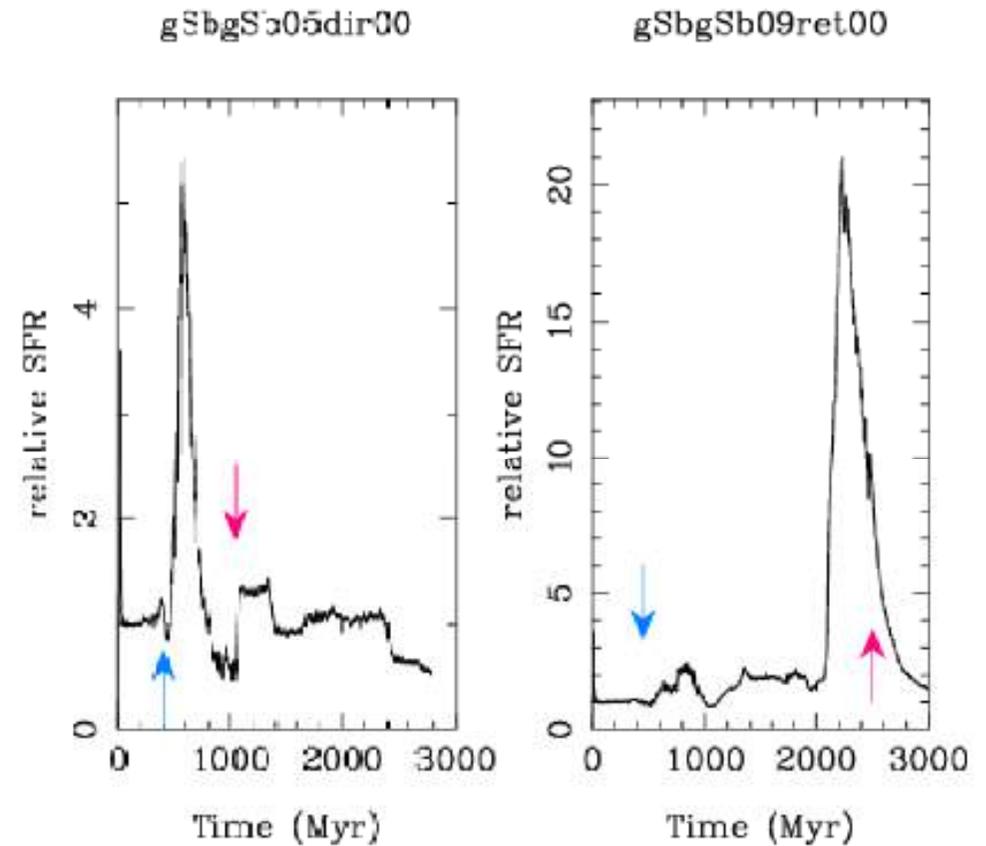
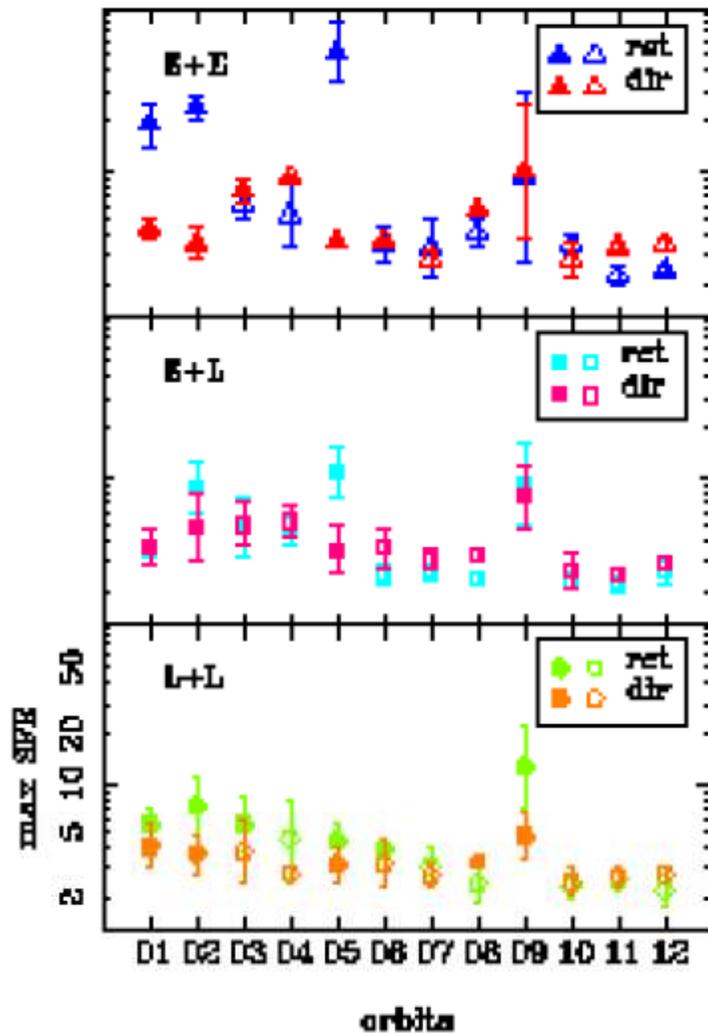
Transfert du gaz vers le centre  
par les barres dans les interactions



Simulations  
GALMER  
*Di Matteo et al 07*

Tree-SPH  
 $2 \cdot 10^5$  part  
SF+ feedback

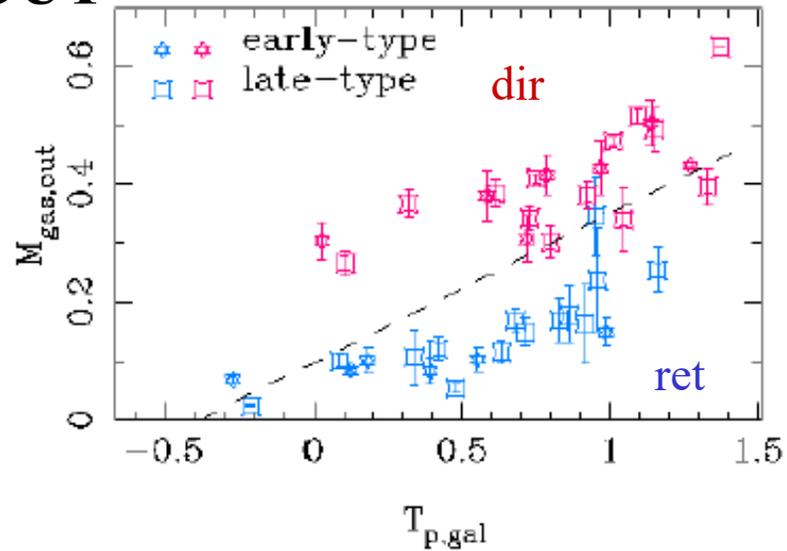
# Le flux de gaz produit des starbursts



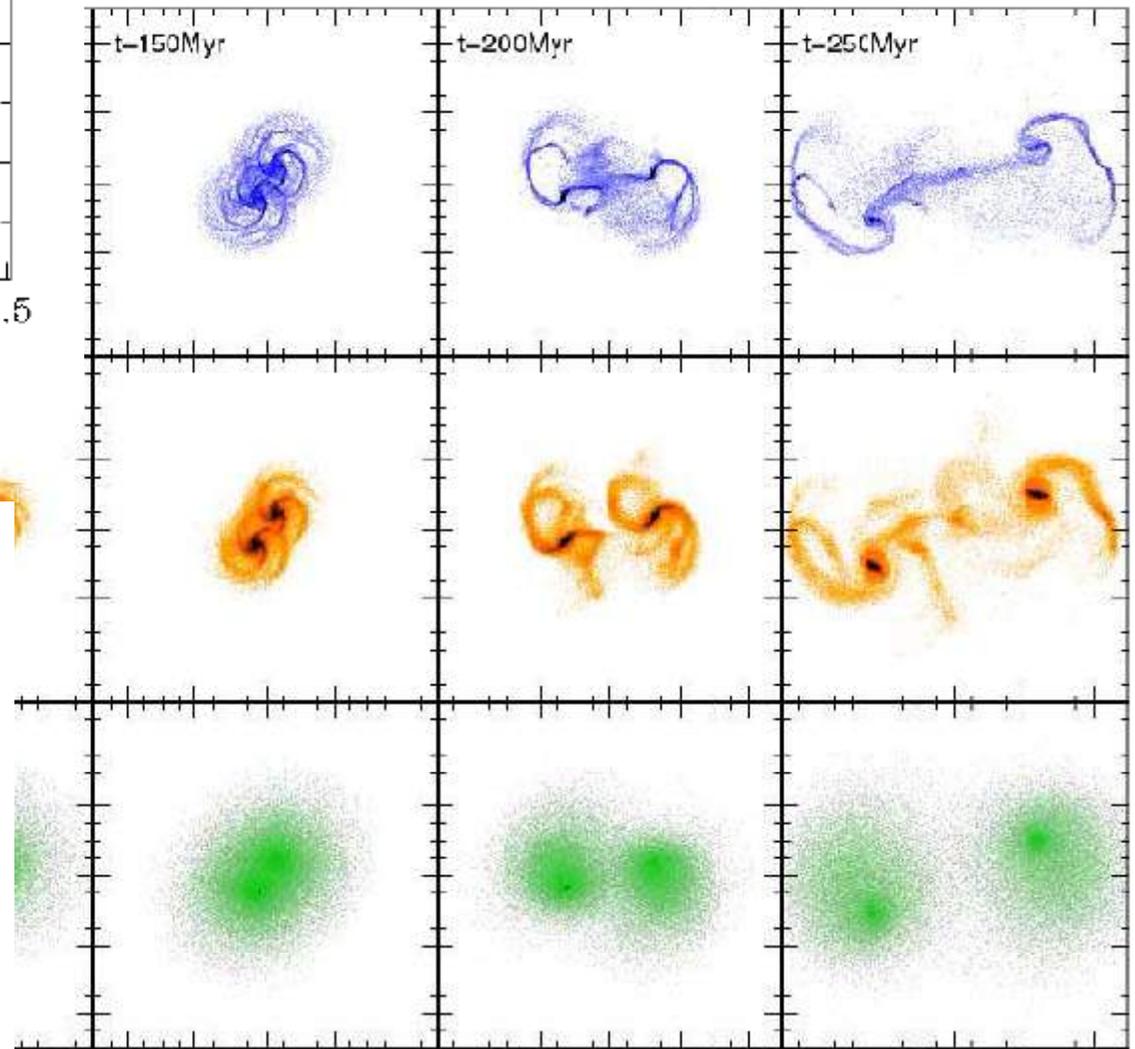
Orbites retrograde → plus de starbursts

# Sens des flux de gaz

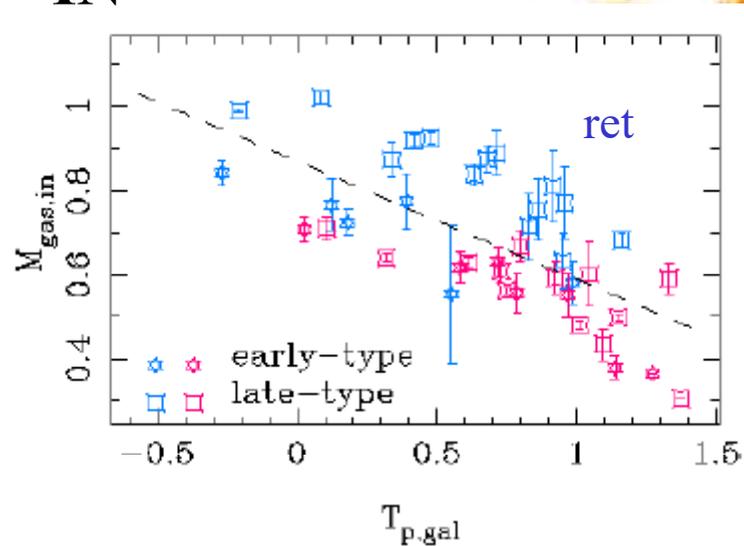
OUT



Orbite directe gSa gSa



IN



100kpc



# Conclusions



Interaction entre galaxies: formation de bras spiraux, de roues de Charrette, de warps, d'anneaux polaires..

Formation d'étoiles, **starbursts**



Formation des galaxies par fusion: **scénario hiérarchique**

Formation de "super star clusters" qui deviendront des amas globulaires

**Histoire de la formation d'étoiles**: pic vers  $z=2$ , quand les amas se virialisent, et les galaxies fusionnent en grand nombre

