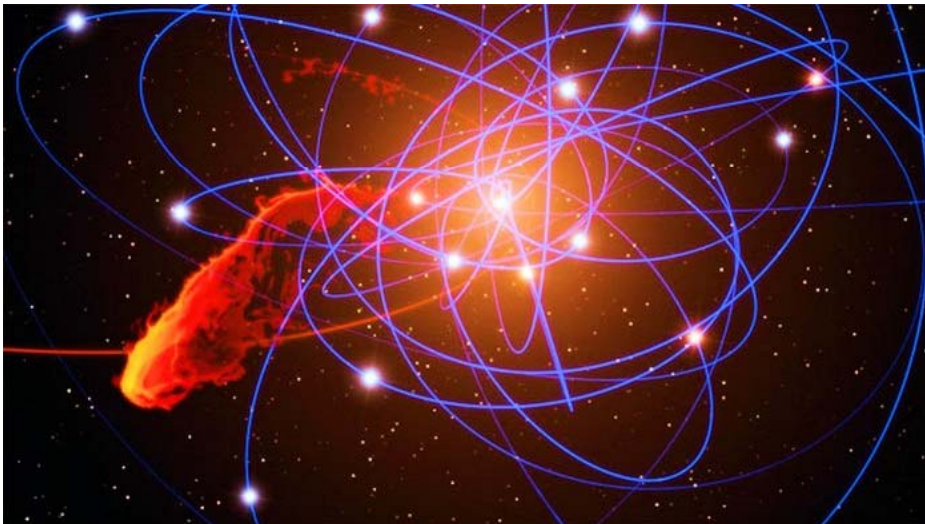




COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Dynamique du gaz autour des trous noirs



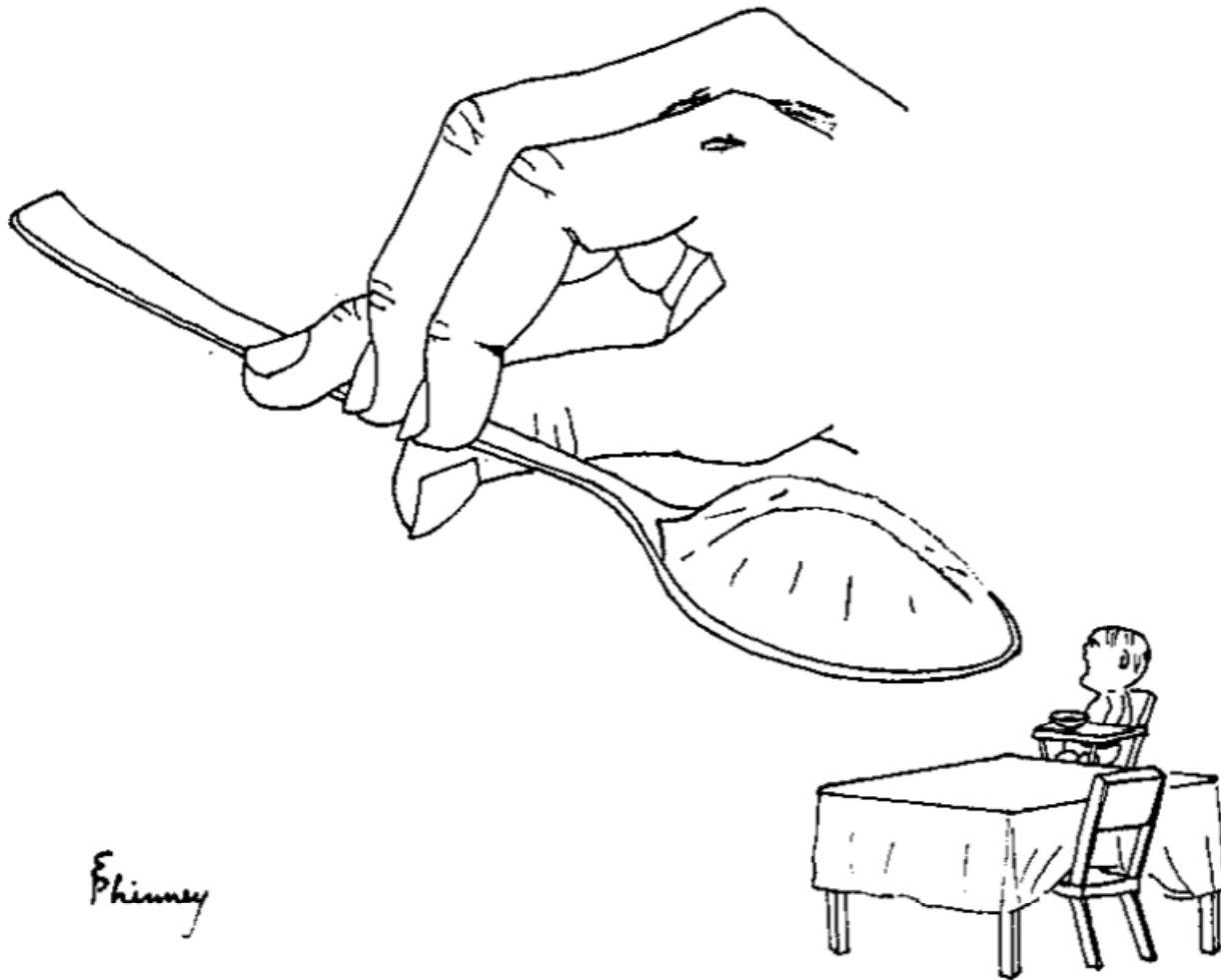
**Françoise Combes**



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

# Le problème pour alimenter le monstre

Moment cinétique  
géant à évacuer



# Ordres de grandeur

Un quasar peut émettre jusqu'à  $10^{13} L_{\odot}$ , soit  $10^{39} \text{ W}$  ( $10^{46} \text{ erg/s}$ )

Avec une efficacité de rayonnement de  $\varepsilon=10\%$ ,  $L = dM/dt c^2 \varepsilon$ ,

il faut qu'il avale

$$dM/dt = 1.7 (0.1/\varepsilon) (L/10^{39} \text{ w}) M_{\odot}/\text{yr}$$

Avec un temps d'activité de l'ordre de 100 Myr, il faudrait

avaler  $2 \cdot 10^8 M_{\odot}$ , ce qui est une fraction notable du gaz d'une galaxie

Comment le faire parvenir au centre en si peu de temps??

Moment cinétique, dernière orbite stable

$$L = 2 \cdot 10^{24} (M/10^8 M_{\odot}) \text{ cm}^2/\text{s}$$

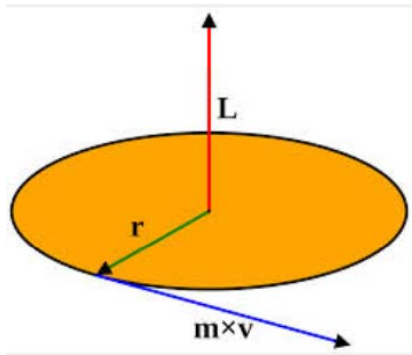
$$\text{à } 3 \text{ kpc, } L = 10^{29} \text{ cm}^2/\text{s}$$

5 ordres de grandeur

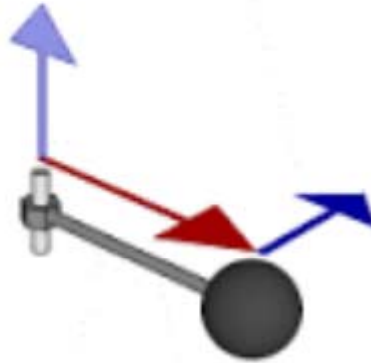


# Couples de torsion pour réduire L

$$dL/dt = \tau$$



$$\tau = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$$
$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$$

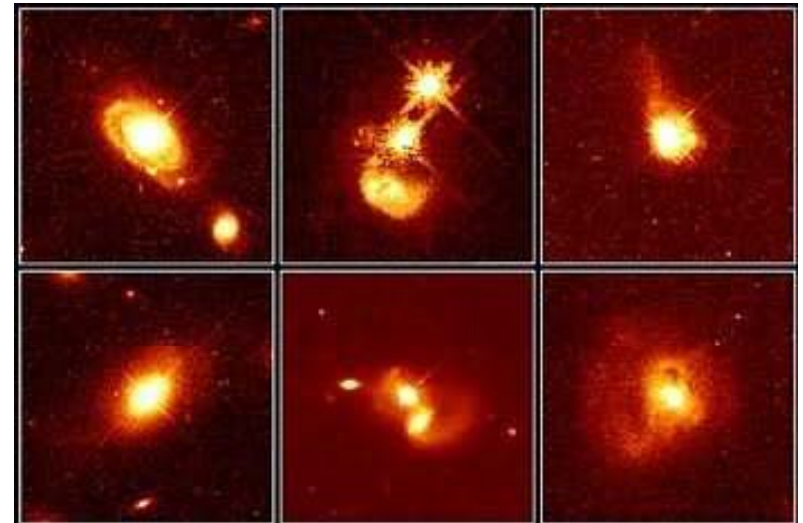


**Force tangentielle nécessaire**  
Si le disque reste axisymétrique  
→ force radiale seulement

Les asymétries peuvent être des barres, des spirales  
des interactions entre galaxies: forces de marée  
+ turbulence, viscosité MRI

Difficiles d'avoir une correspondance  
totale, car les échelles de temps sont  
disparates

<10 Myr, 100Myr ( 1kpc), 1 Gyr à 10kpc

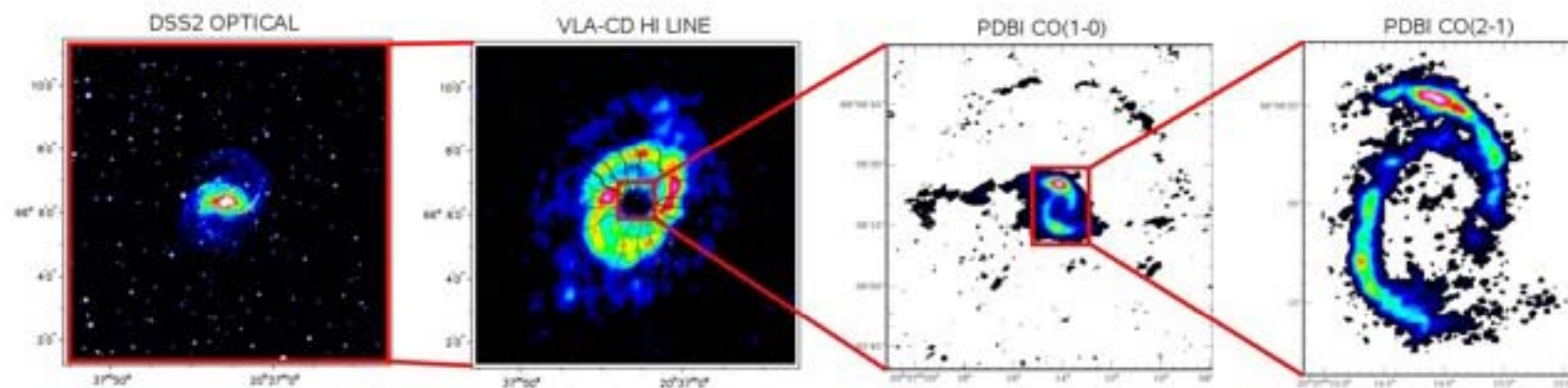
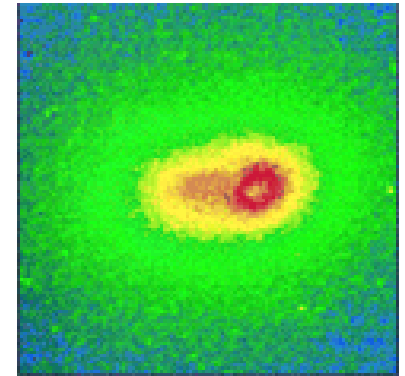


# Processus dynamiques

→ Barre à l'intérieur d'une barre,  $m=2$

→ Asymétries  $m=1$ , gauchissement

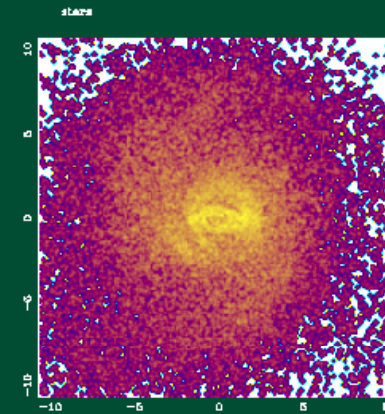
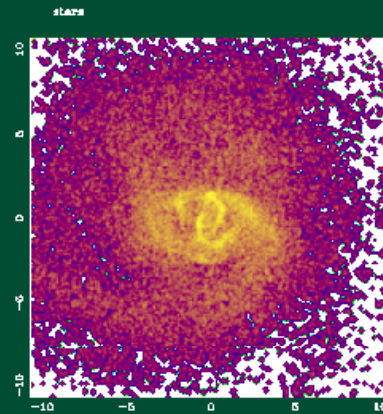
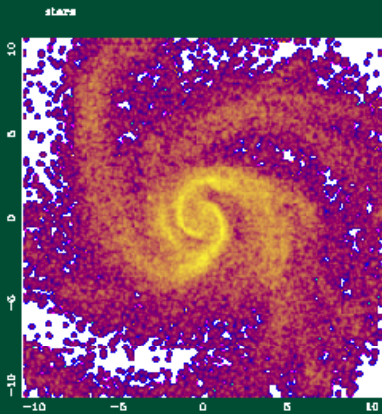
→ Viscosité turbulente, friction dynamique



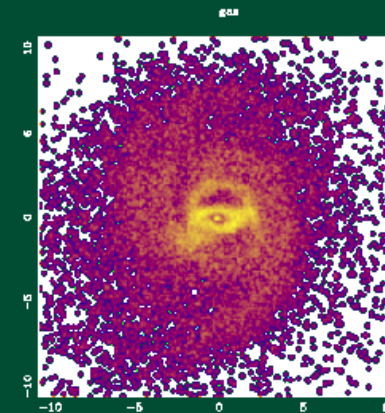
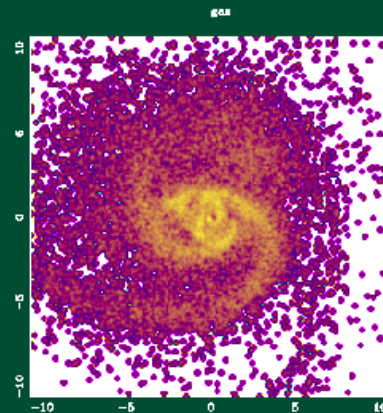
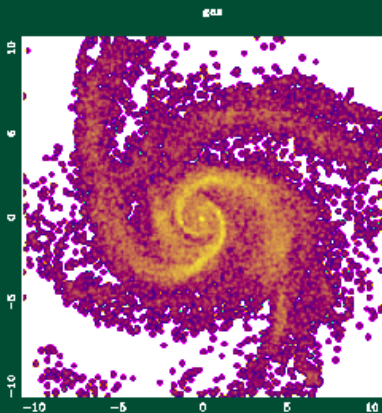


# Formation de barres, par instabilité gravitationnelle

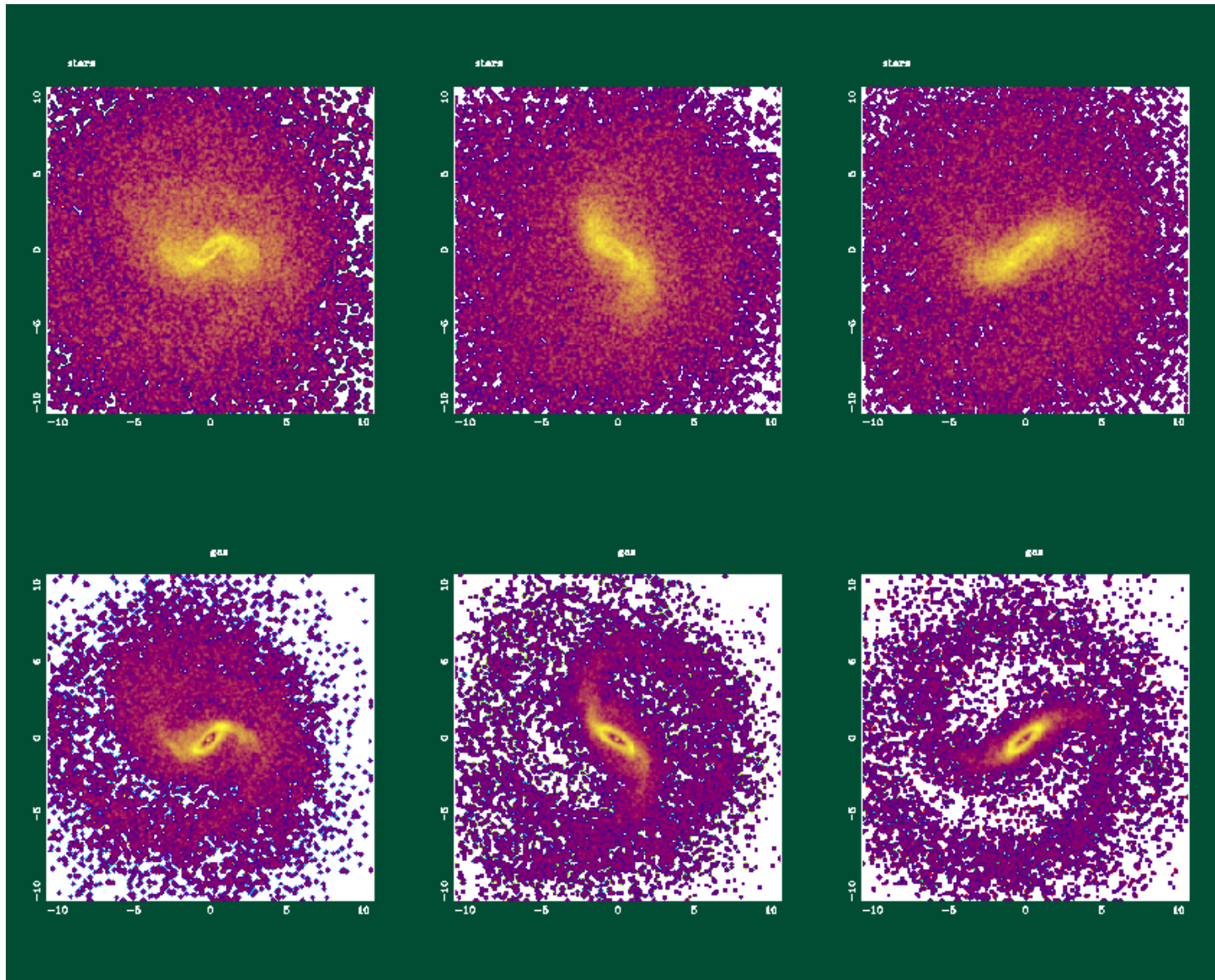
étoiles



gaz

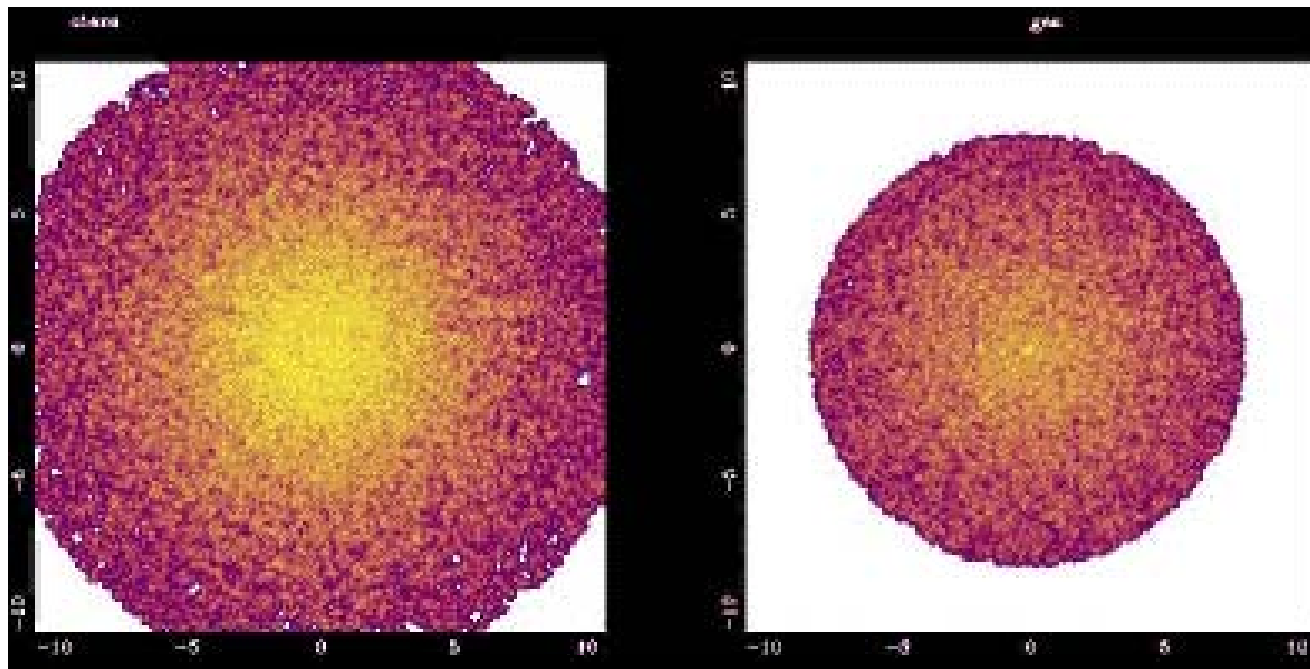


Temps Total : 1.2 Gyr

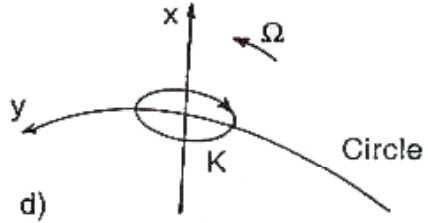
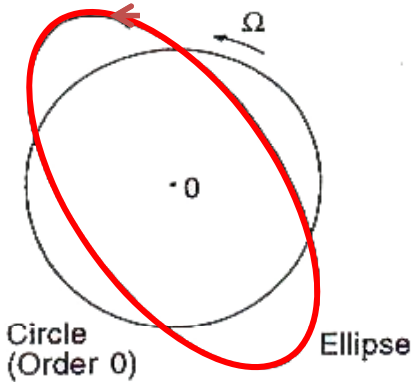
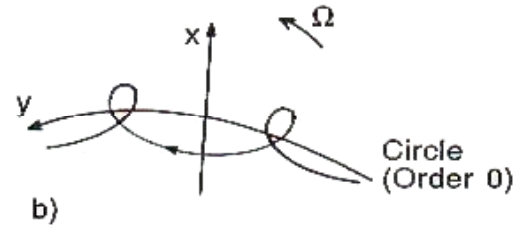
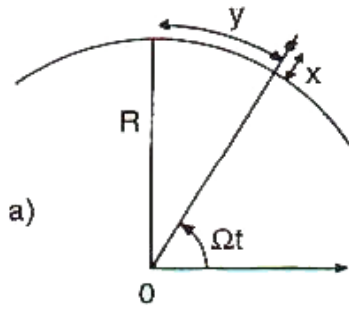


Formation d'anneaux aux résonances

# Formation d'une barre

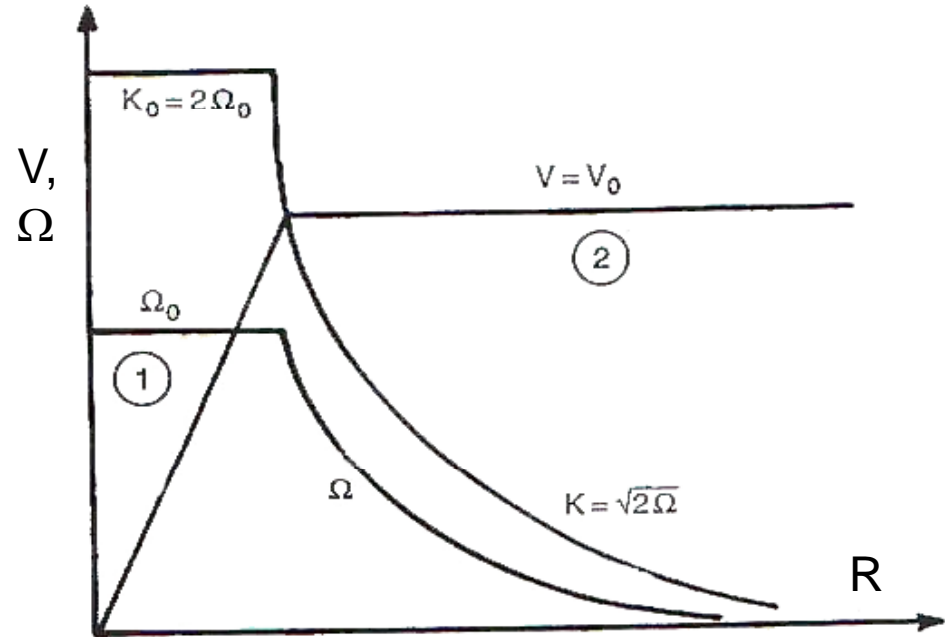






- a) Approximation épicyclique
- b) l'épicyclo est parcouru dans le sens rétrograde
- c) Cas spécial  $\kappa = 2 \Omega$
- d) corotation (CR)

Exemples de valeurs de  $\kappa$   
 toujours comprises entre  $\Omega$  &  $2 \Omega$



# Résonances de Lindblad

Il existe toujours un référentiel  $\Omega_b$ , où il existe un rapport rationnel entre la fréquence épicyclique  $\kappa$  et la fréquence de rotation  $\Omega - \Omega_b$

A ce moment là, l'orbite est fermée dans ce référentiel

Le cas le plus fréquent, correspondant à la forme de la courbe de rotation, et donc à la distribution de masse des galaxies

est le rapport 2/1, ou -2/1  $\Omega - \Omega_b = \pm \kappa/2$

Résonance de corotation: lorsque  $\Omega = \Omega_b$

Représentation des orbites  
résonantes dans le référentiel  
Tournant

Résonance interne de Lindblad = ILR  
Résonance externe de Lindblad = ILR

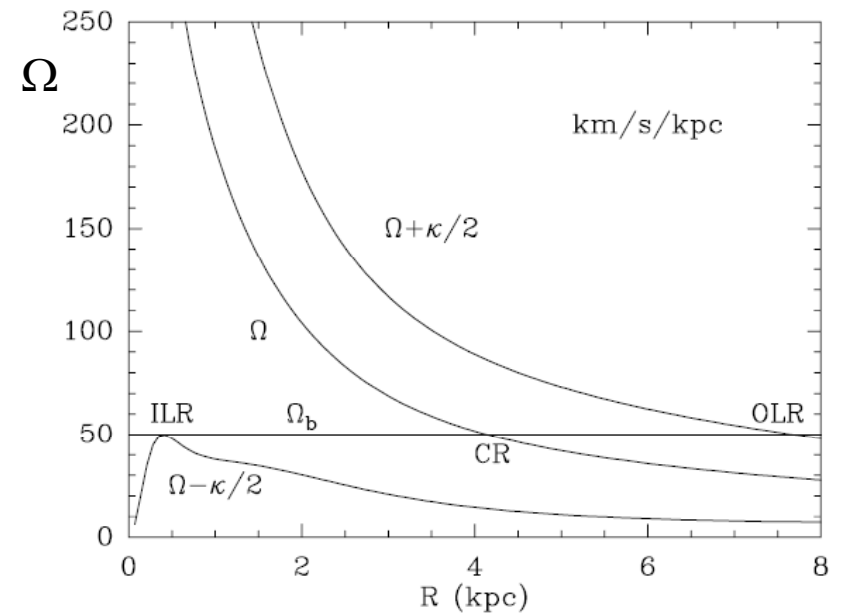
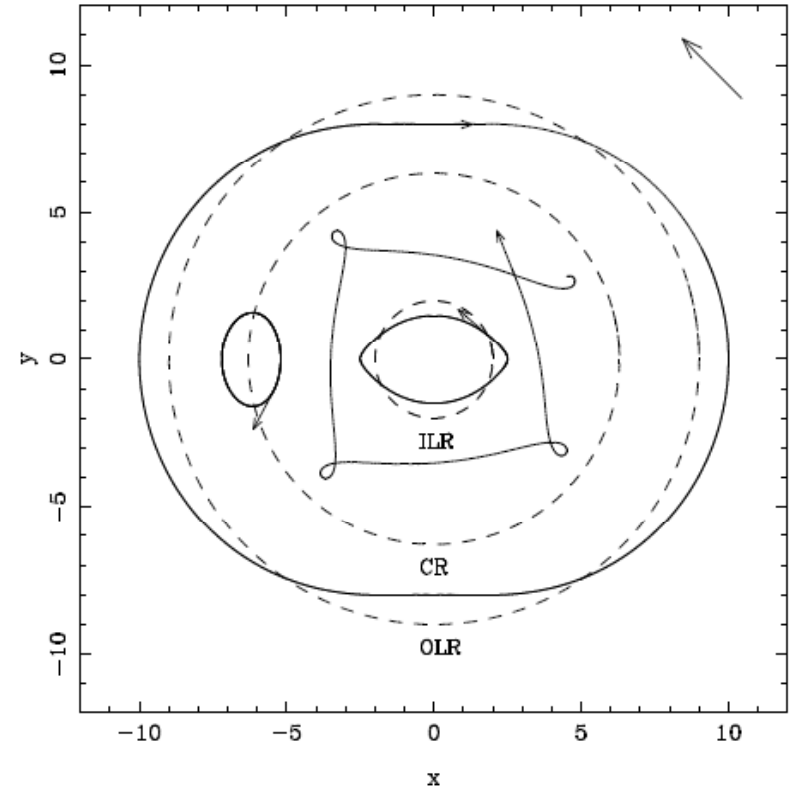
ILR:  $\Omega_b = \Omega - \kappa/2$

OLR:  $\Omega_b = \Omega + \kappa/2$

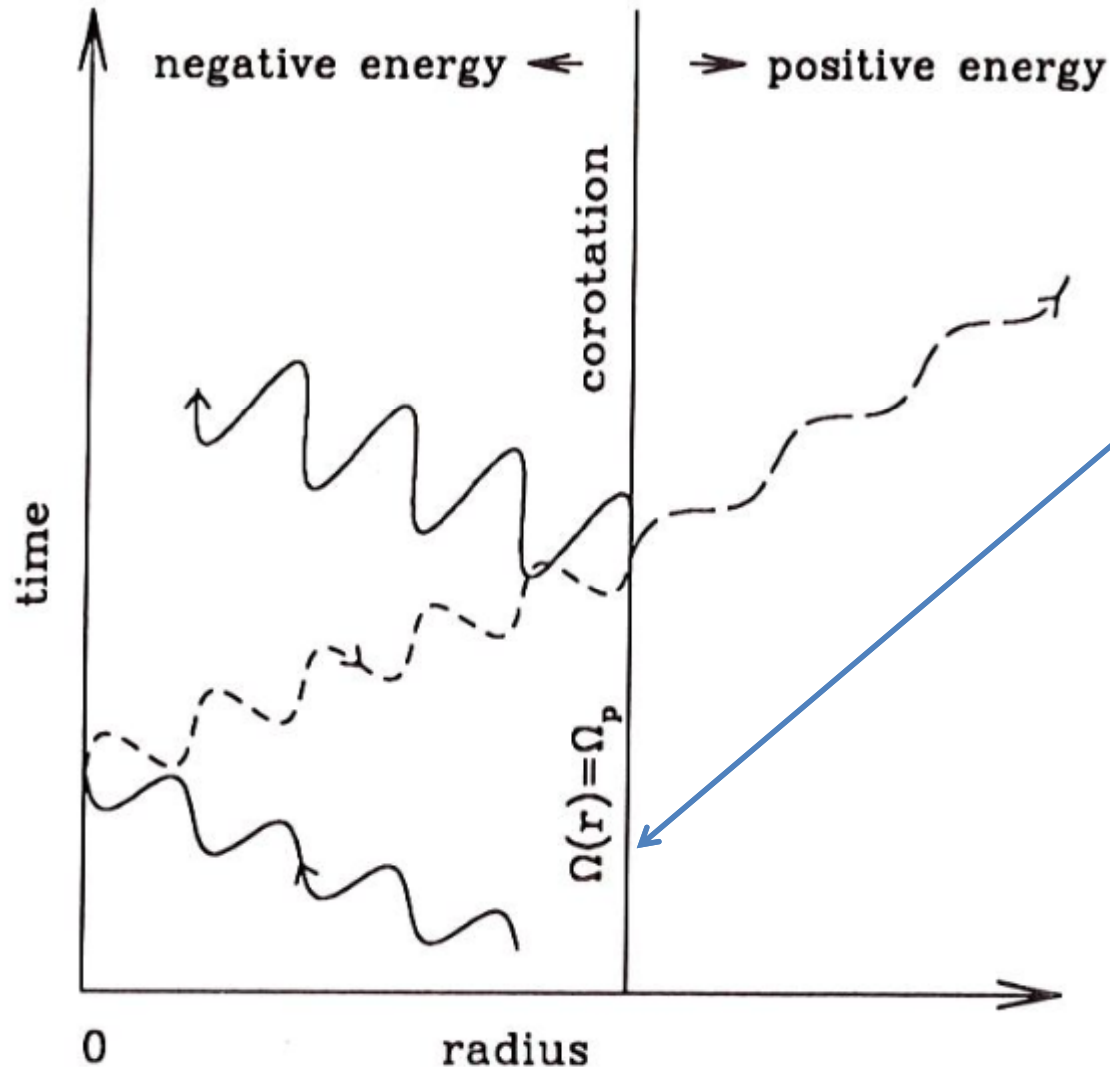
Corotation:  $\Omega_b = \Omega$

Il peut y avoir 0, 1 ou 2 ILRs,

toujours une CR, OLR



# Amplification des ondes à la Corotation

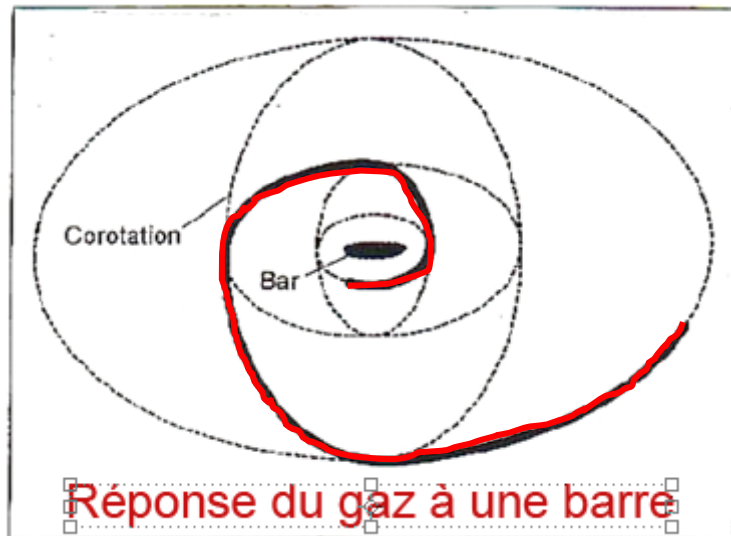
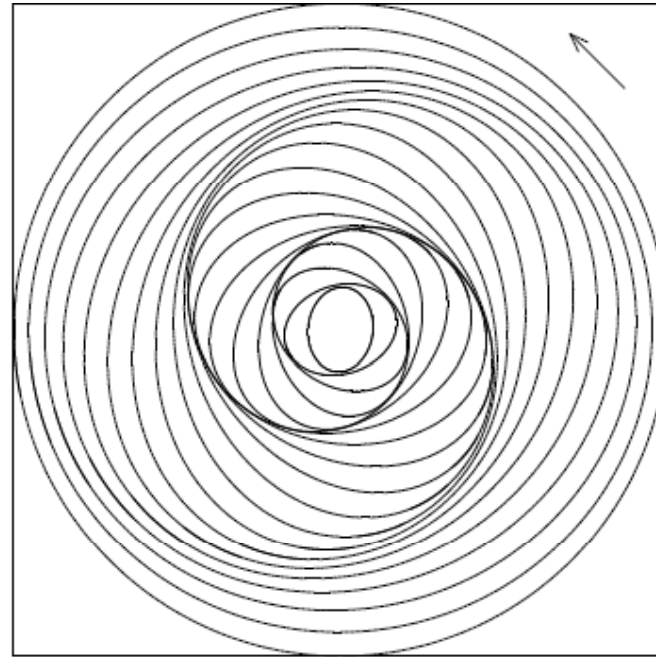
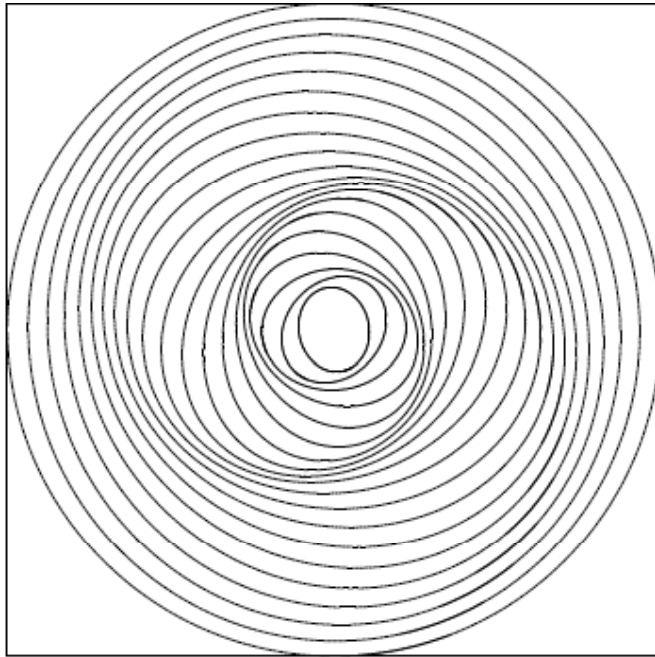


Les ondes ont  $E$  négative à l'intérieur de la CR et  $E$  positive à l'extérieur

Les ondes sont réfléchies au centre, Puis se transmettent – se réfléchissent, avec énergie  $|E|$  plus grande



# Ondes de densité spirales



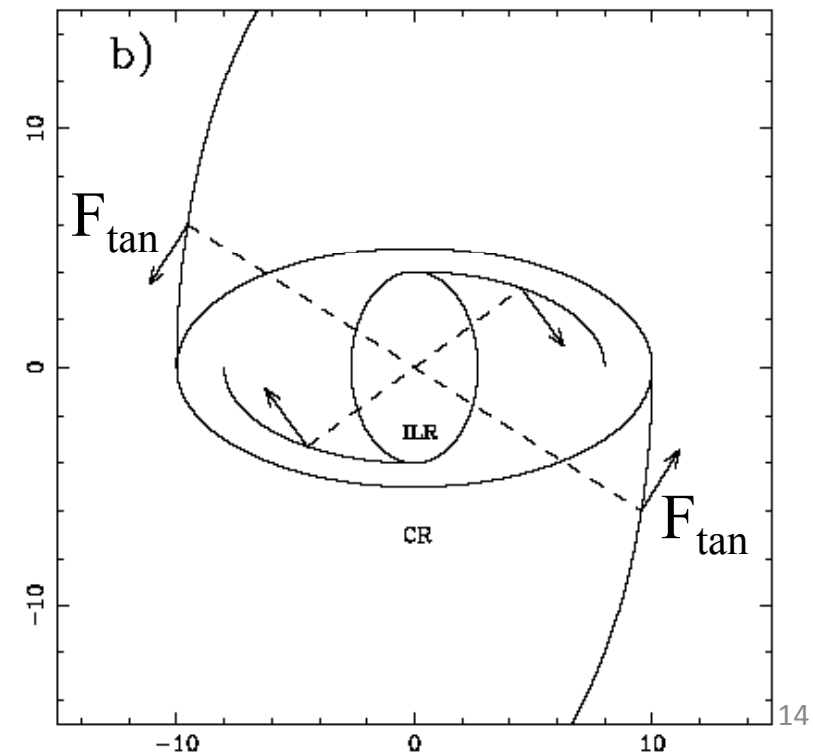
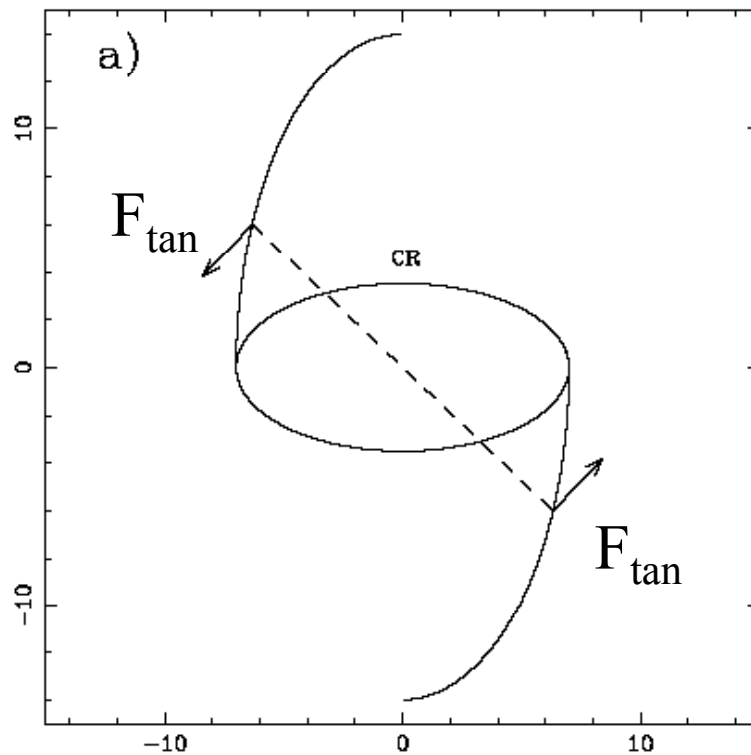
Dans un potentiel barré, le gaz suit des orbites allongées qui tournent de  $90^\circ$  à chaque résonance

# Couples exercés par la barre sur le gaz

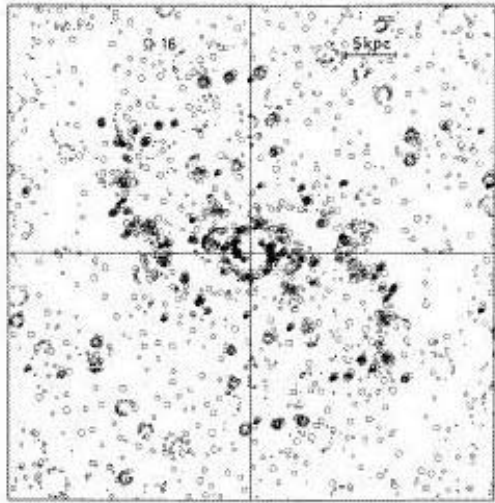
Les couples changent de signe à chaque résonance, et peuvent se déduire de simples arguments géométriques

Le gaz à l'intérieur de la corotation va perdre son moment et **tomber vers le centre**

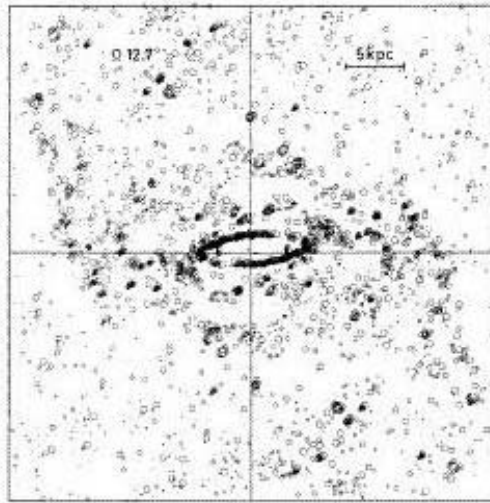
A l'extérieur de la CR, au contraire le gaz **s'accumule à l'OLR**



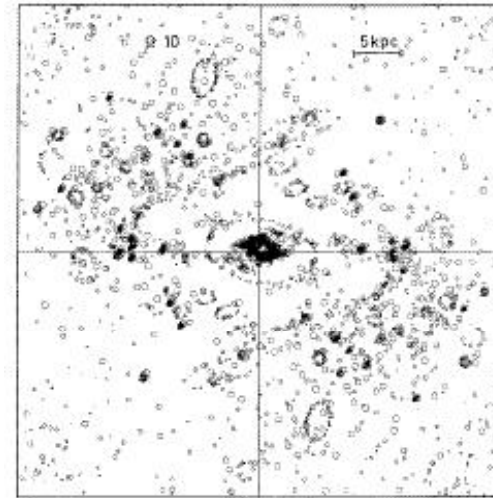
# Formation d'anneaux



$\Omega_b = 16 \text{ km/s/kpc}$



$\Omega_b = 13 \text{ km/s/kpc}$



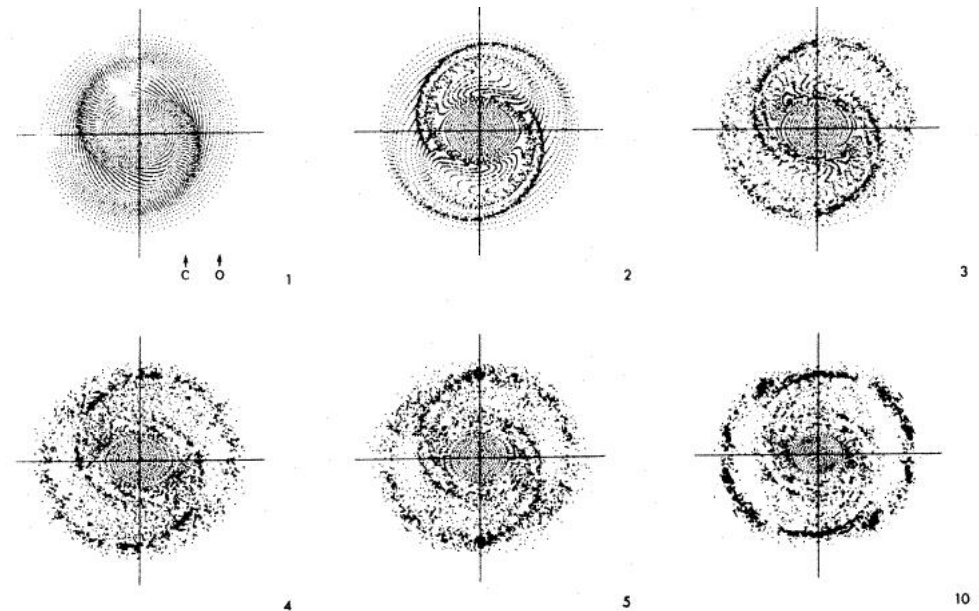
$\Omega_b = 10 \text{ km/s/kpc}$

ILR

*Combes & Gerin 1985*

Formation d'un anneau à l'OLR

*Schwarz, 1981*





# Formation d'anneaux aux résonances

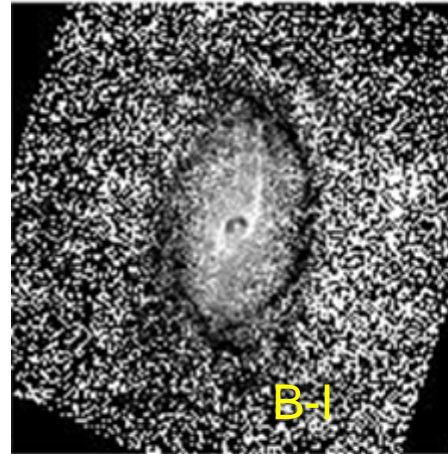
Donne une idée de  $V_s$   
(vitesse du son)

→ pas trop de viscosité

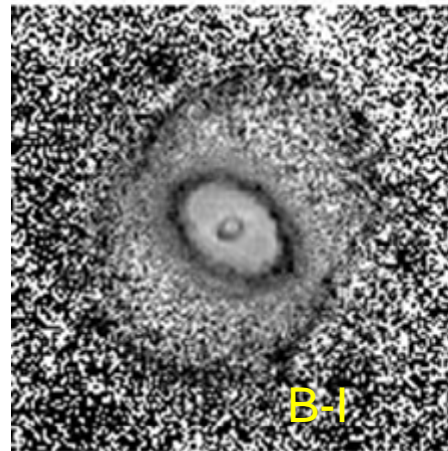
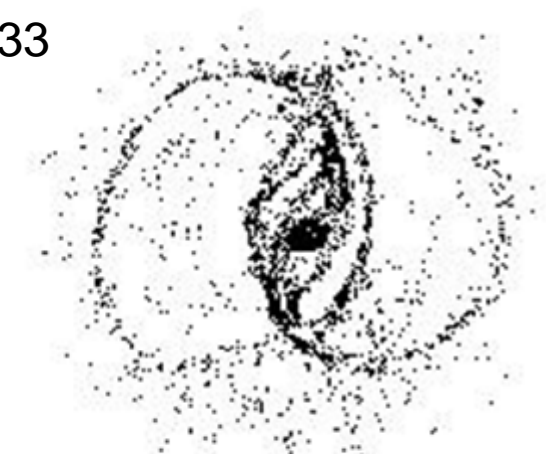
Les couples de  
gravité changent de  
signe à chaque résonance

→ Relatif équilibre

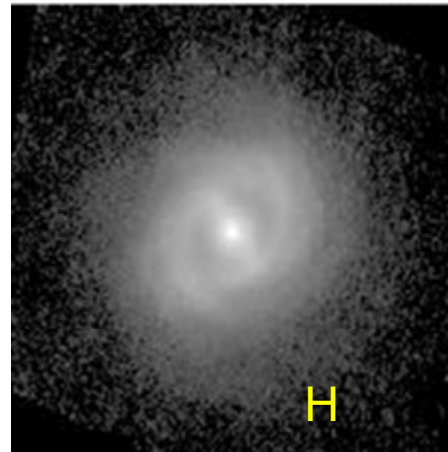
*Buta & Combes 2000*



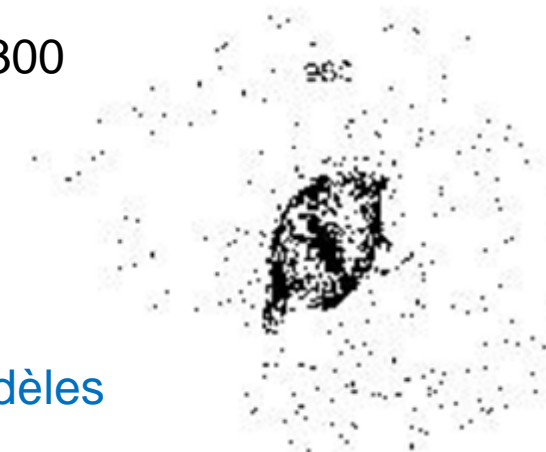
N1433



N3081



N6300



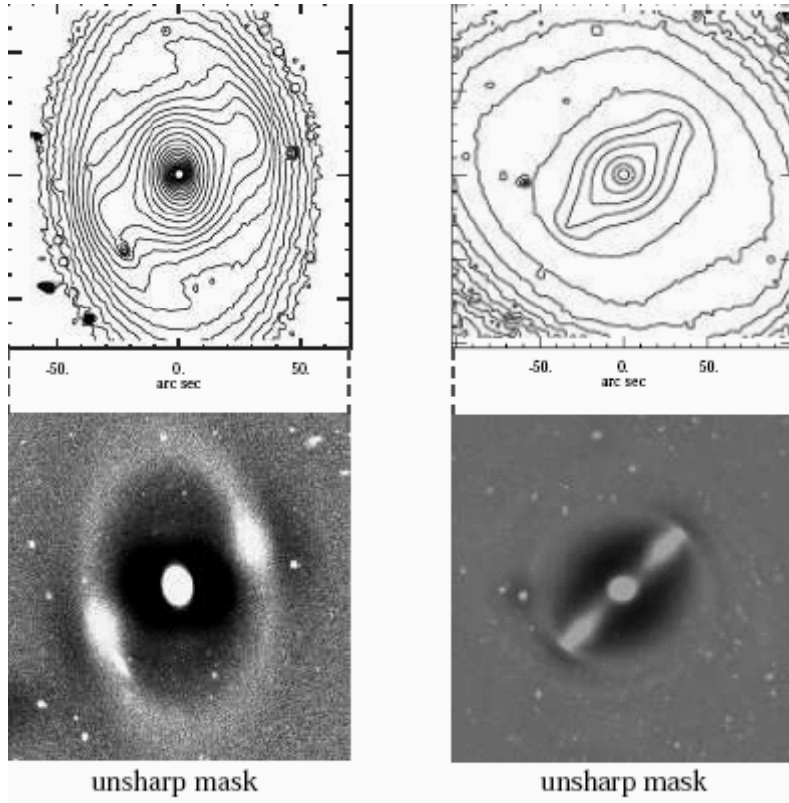
modèles



# Barres nucléaires

Phénomène observé depuis longtemps,  
mais expliqué seulement  
depuis quelques années

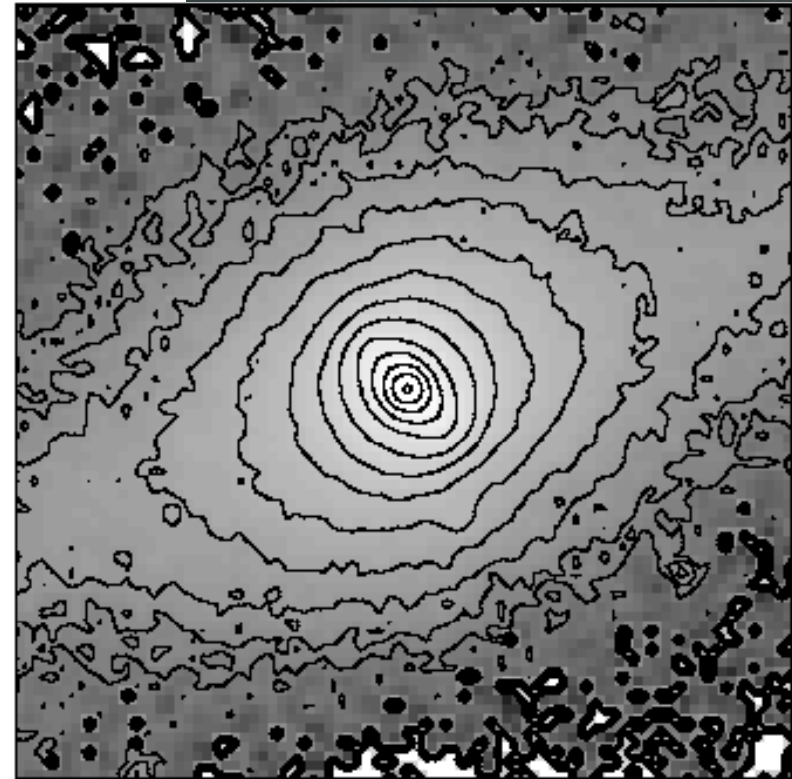
NGC 4314



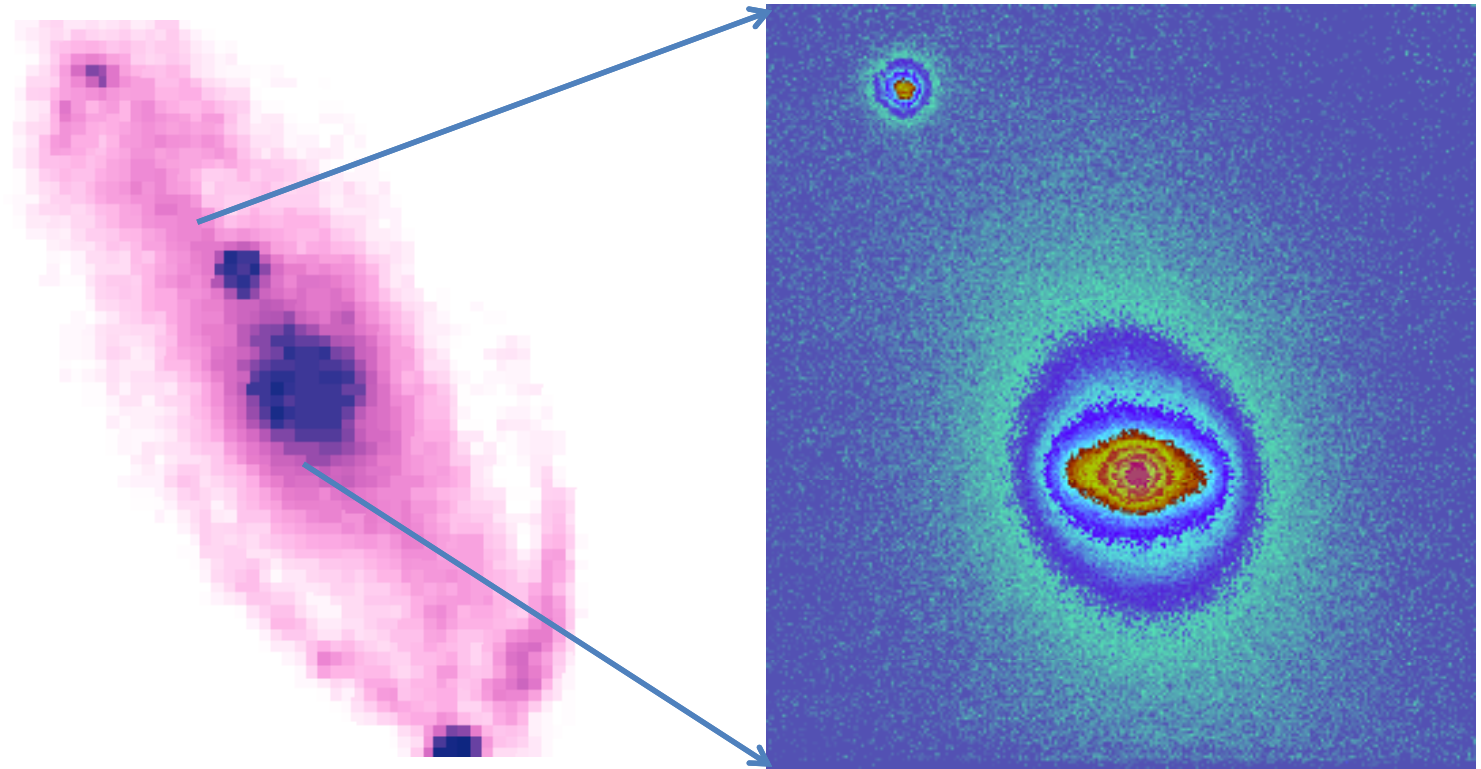
*Erwin 2004*

NGC 5850

Contours + couleur B-V



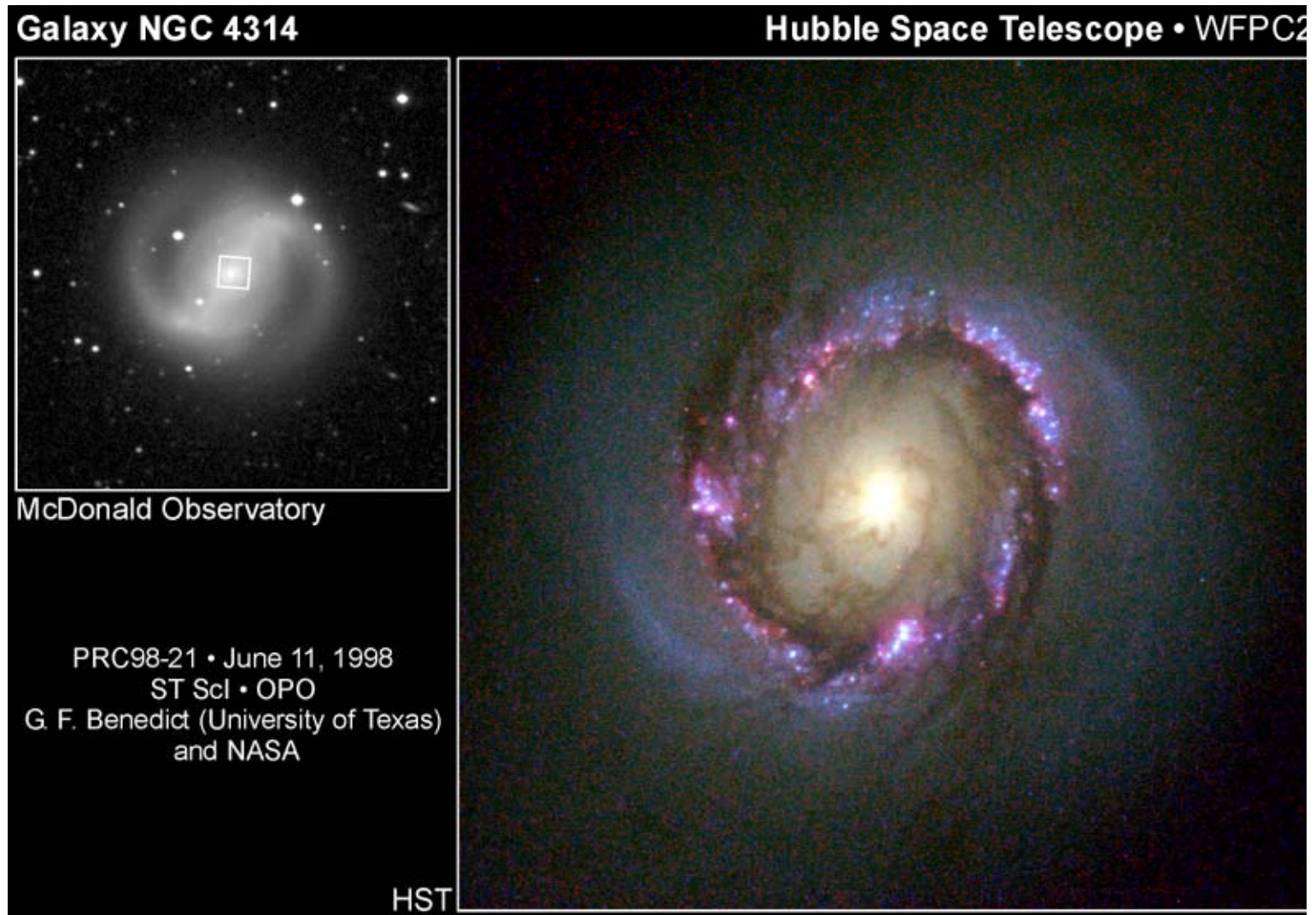
NGC 5728  
DSS  
+CFH  
Adaptive Optics  
NIR



Il peut se former deux barres emboîtées, comme des poupées russes. Ici une barre nucléaire (droite, champ de 36") au sein de la barre primaire (gauche, champ de 108").  
Noter l'étoile en haut à gauche de la barre nucléaire, qui se retrouve dans les deux images et donne l'échelle relative. La barre secondaire tourne plus vite que la barre primaire  
(Combes et al. 2001)

# NGC4314

Formation  
d'étoiles dans  
l'anneau  
entourant  
la barre  
nucléaire



Les barres nucléaires sont surtout visibles en proche infra-rouge, non perturbé par l'extinction, et rayonnement des vieilles étoiles



# Découplage de barres nucléaires

L'évolution naturelle d'un disque barré, **avec gaz**:

--Accumulation de masse vers le centre, couples de gravité

--Formation de deux résonances de Lindblad, qui affaiblissent la barre

--La courbe de rotation ( $\Omega$ ) monte de plus en plus au centre, de même le taux de précession des orbites allongées ( $\Omega - \kappa/2$ )

La matière du centre ne peut plus suivre le reste du disque

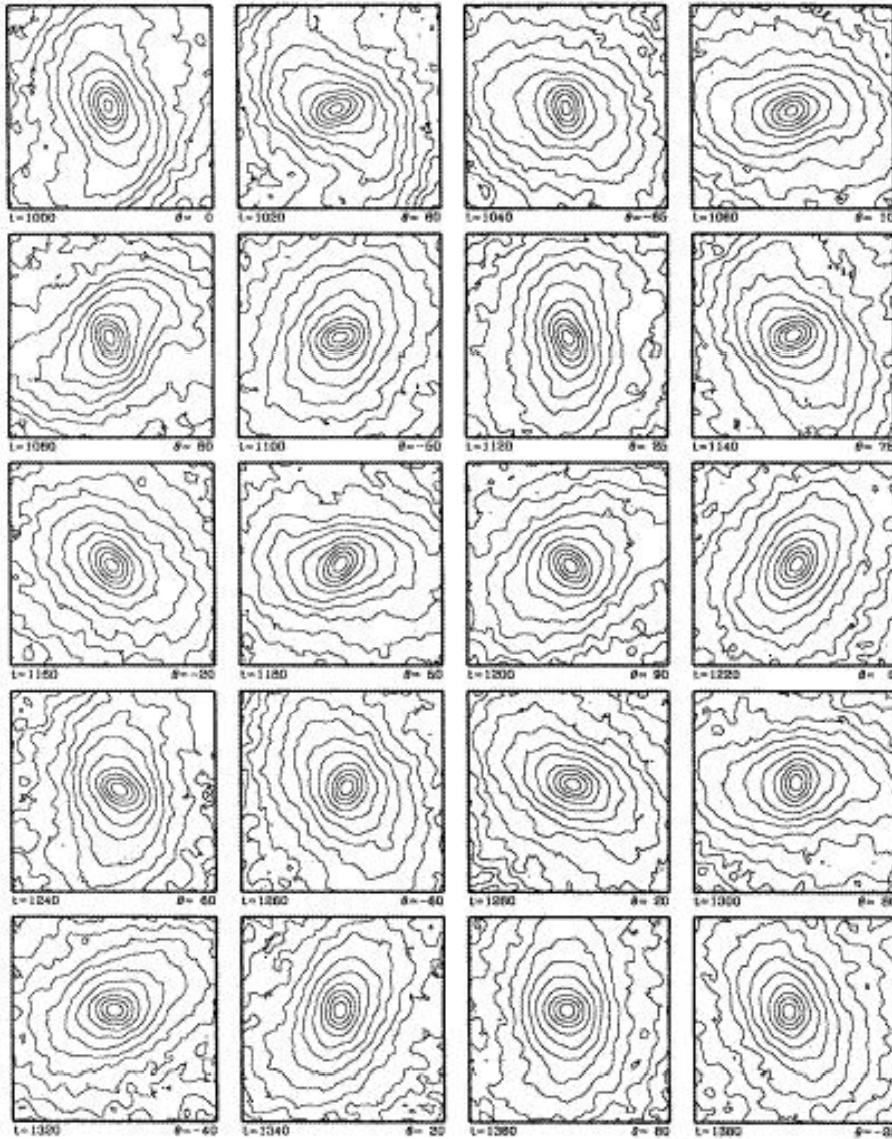


découplage

Pour éviter le chaos, il y a une résonance commune entre les barres primaire et secondaire

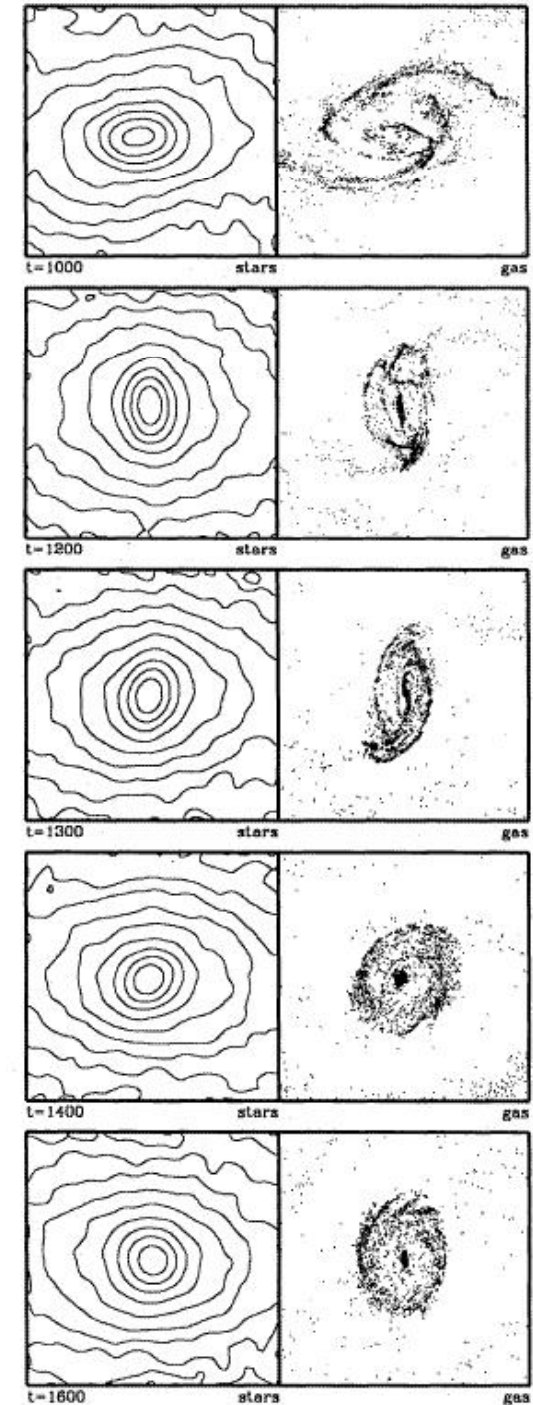
Ex: CR de la deuxième barre = ILR de la première





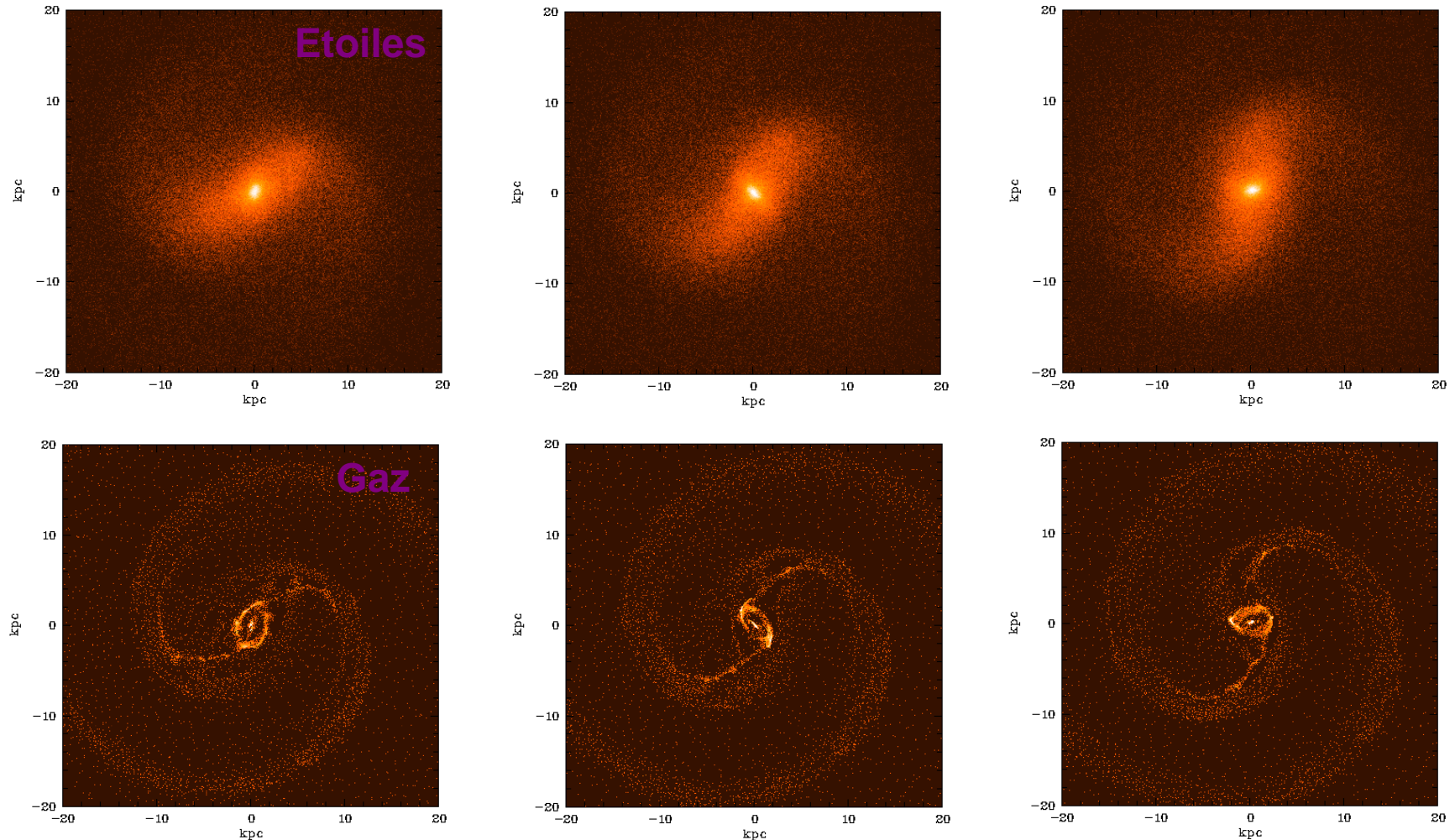
*Friedli &  
Martinet 93*

Positions  
respectives de  
l'anneau et  
de la barre



Formation d'une barre secondaire  
dans les simulations N-corps + gaz

# Barres secondaires



N corps + Hydro (D. Friedli)

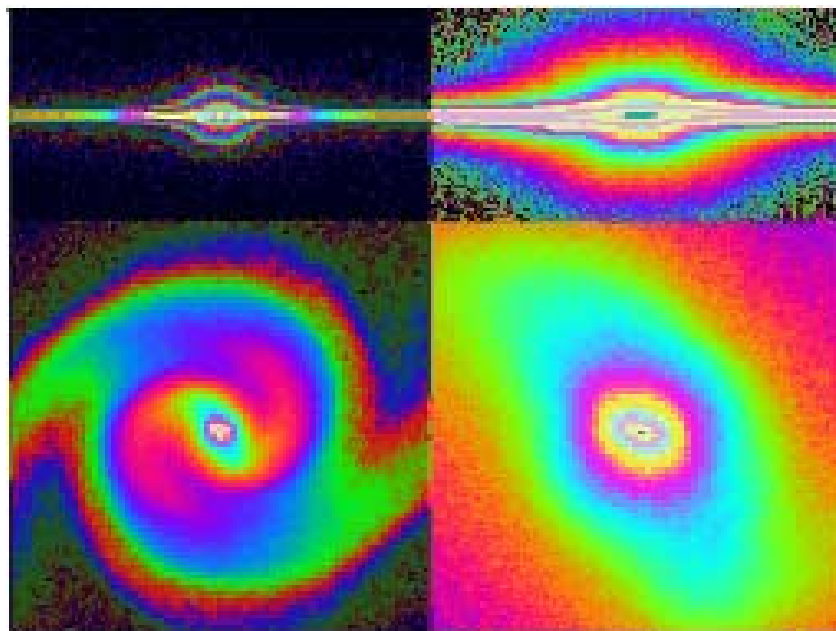
t

# Barres et doubles barres

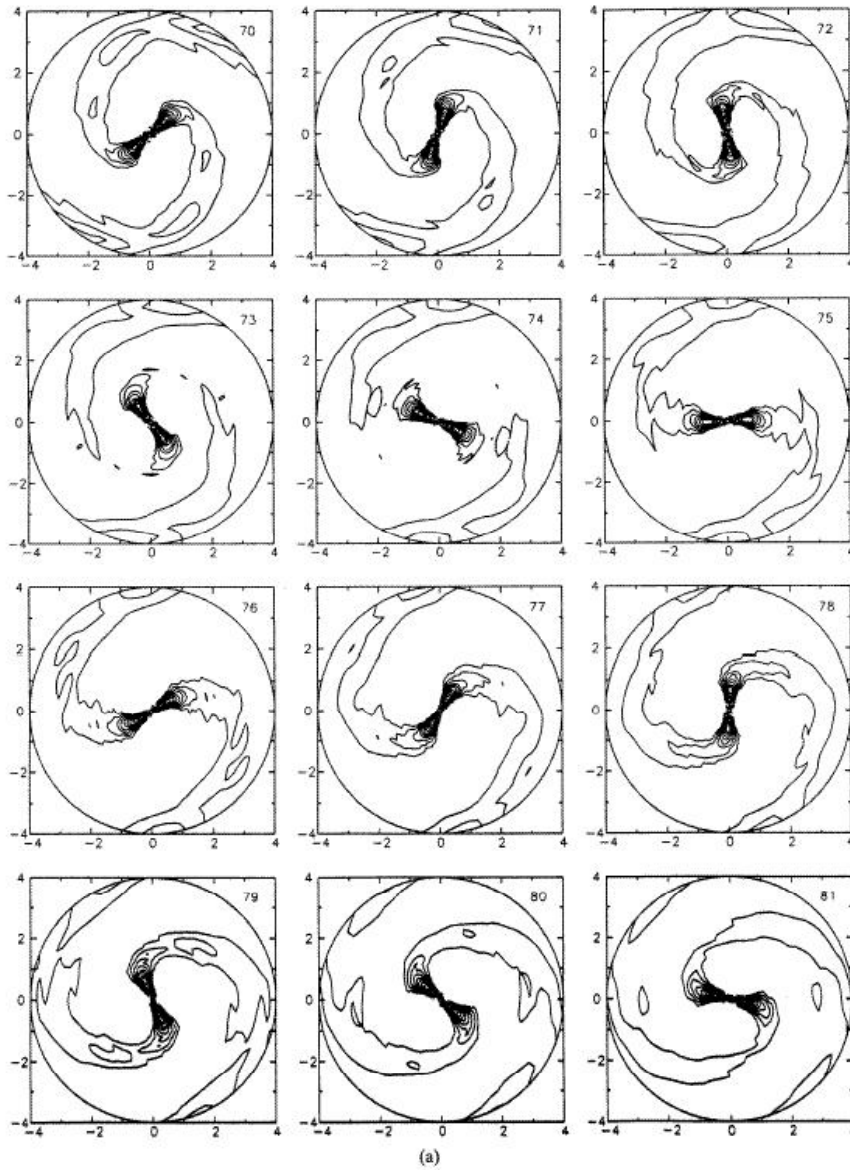
zoom

Par la tranche

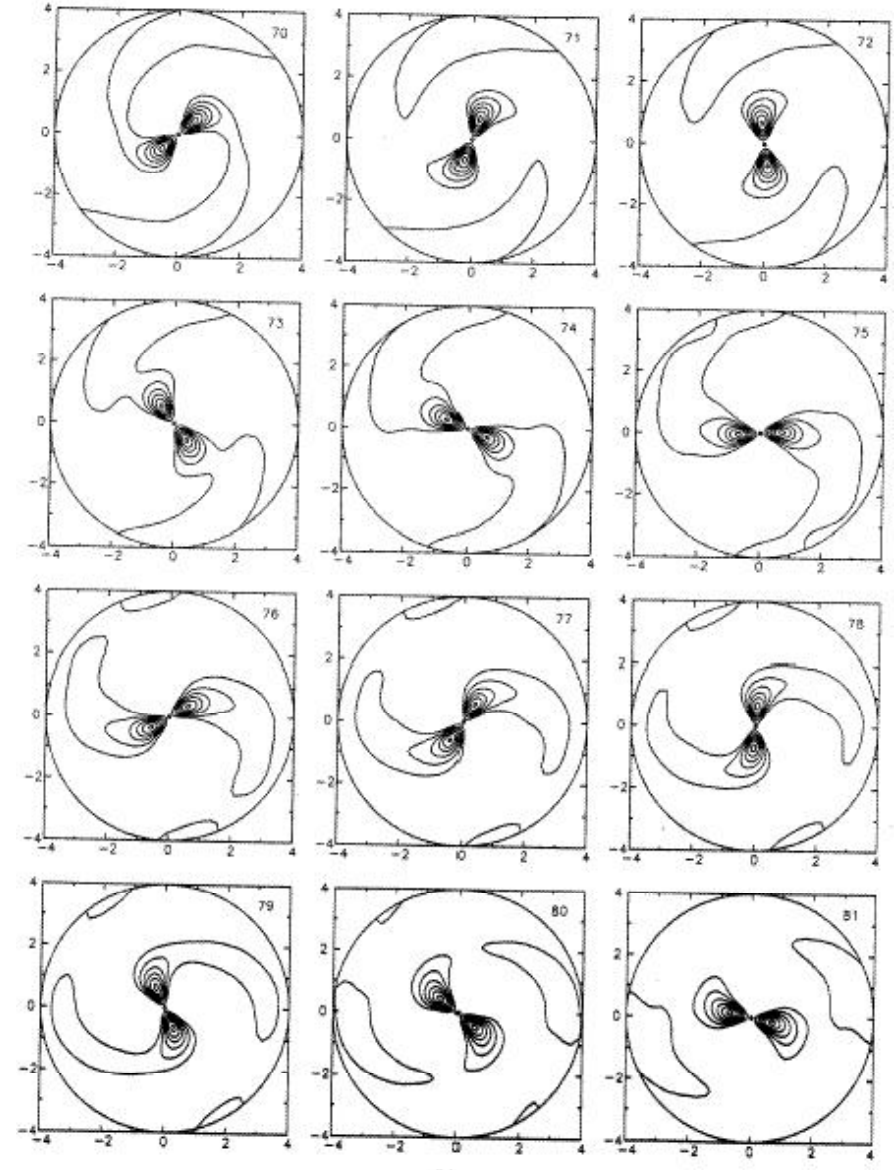
Vue de face







densité



potentiel

Barre et spirale à vitesses différentes (*Sellwood & Sparke 1988*)



# Alimentation des noyaux actifs

Les barres sont un moyen de précipiter le gaz vers le centre pour alimenter les starbursts, mais aussi les AGN

Pourtant, dans une première étape, la matière est piégée dans les anneaux à l'ILR

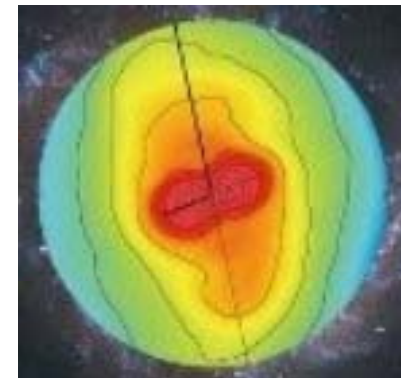
La barre secondaire permet d'aller plus loin, de prendre le relai

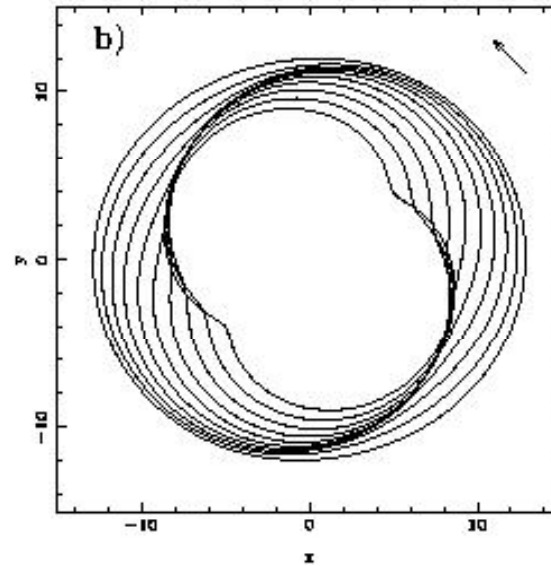
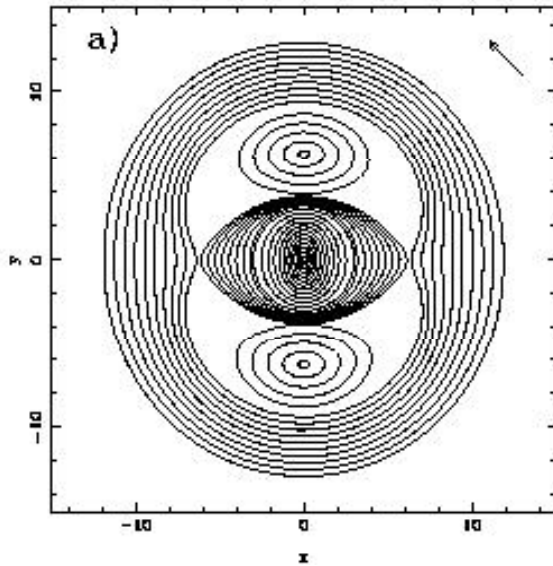
Quelles sont les orbites à l'intérieur de la barre secondaire??

Spirale nucléaire?

Troisième barre?

Combien de résonances?





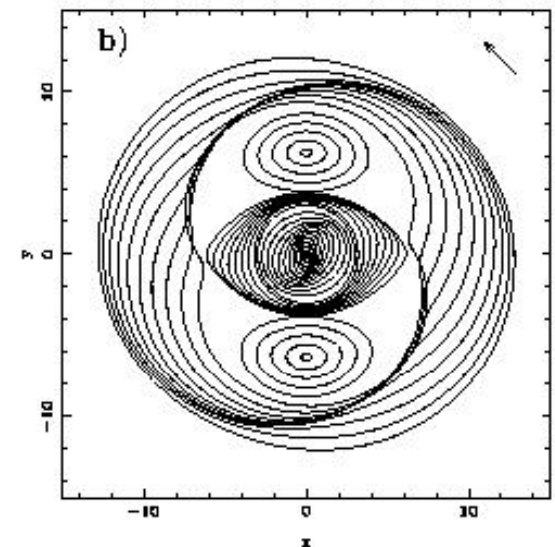
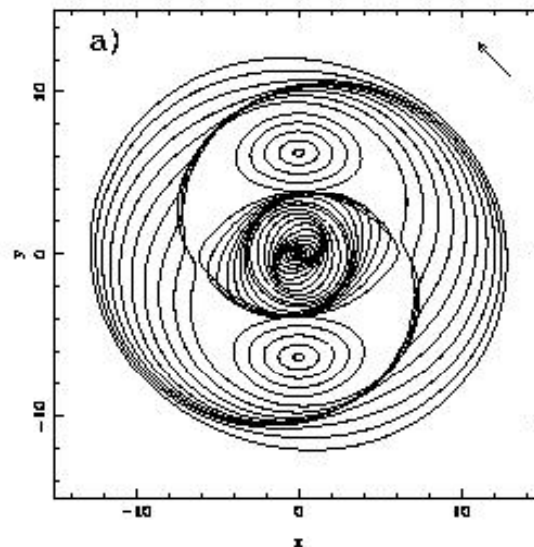
Orbites périodiques dans un potentiel en  $\cos 2\theta$

Le gaz tend à suivre ces orbites, mais tourne graduellement de  $90^\circ$  à chaque résonance

a) sans BH,  
leading

b) avec BH,  
trailing

Sens d'enroulement  
de la spirale



# Instabilités $m=1$ , décentrement



Asymétries excentriques observées dans la distribution de lumière, mais aussi du gaz HI à 21cm

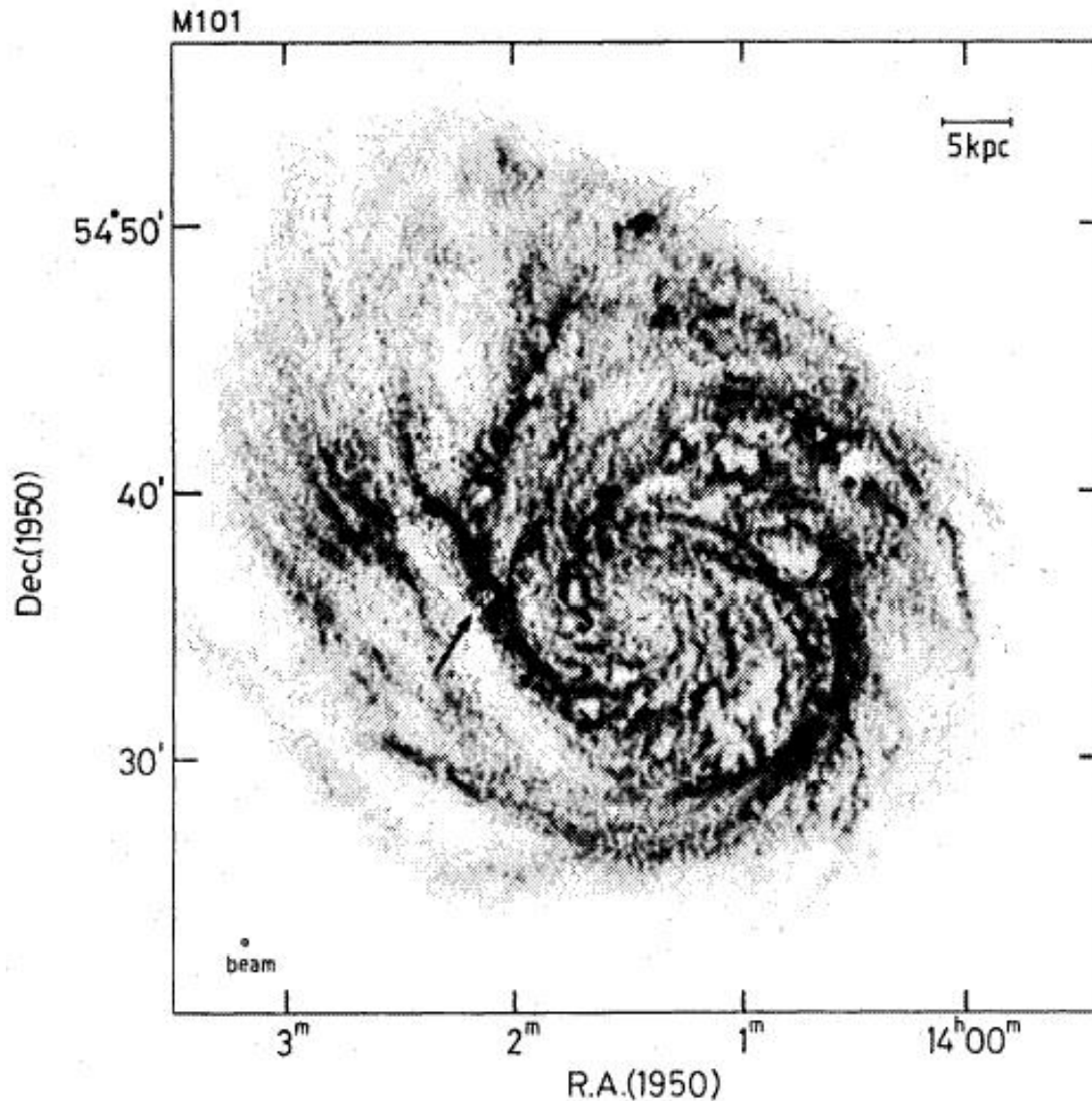
Richter & Sancisi (1994) plus de la moitié est très asymétrique (parmi 1700 galaxies)

Cas de M101, NGC 628.. Parfois un compagnon, la plupart du temps non

les orbites rétrogrades favorisent  $m=1$  (*Zhang & Hohl 1978, Palmer & Papaloizou 1990*)

Ces instabilités loin du centre nous renseignent **sur la matière noire**

Parfois des interactions de galaxies, mais pas toujours



*Kamphuis et al 1991*

**M101**

**Noter les nombreuses bulles**

La flèche indique une super-bulle, d'ue peut-être à une interaction

Pourtant, aucune interaction majeure, pas de compagnon massif, proche

# Mécanismes possibles

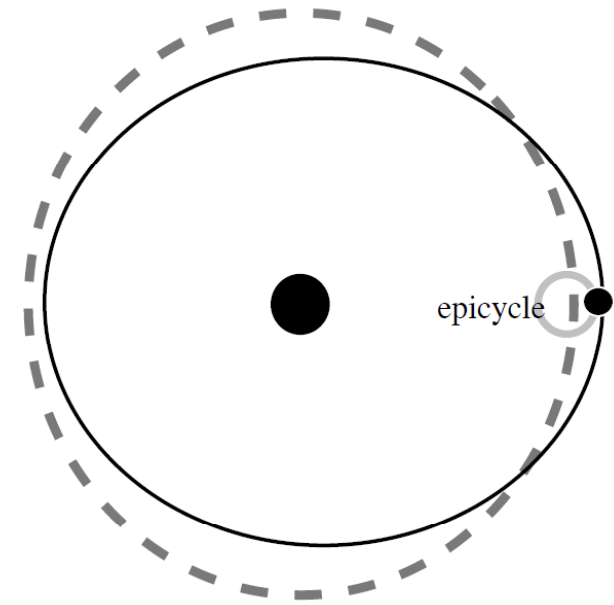
Principale difficulté: Le taux de précession différentielle très rapide  $\Omega - \kappa$  près du centre

Excepté pour un disque purement Képlérien, potentiel en  $1/R$  où  $\Omega = \kappa$

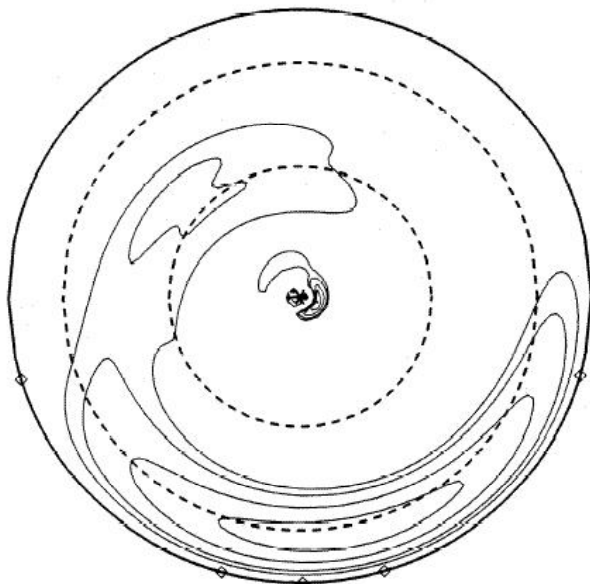
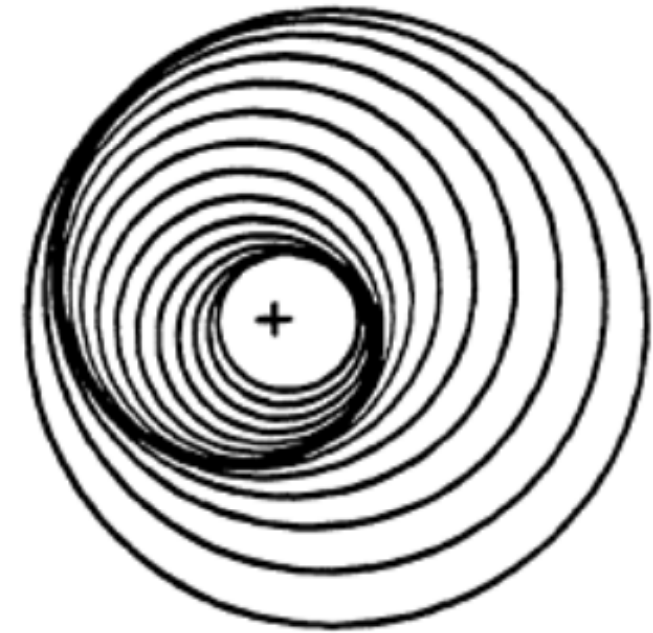
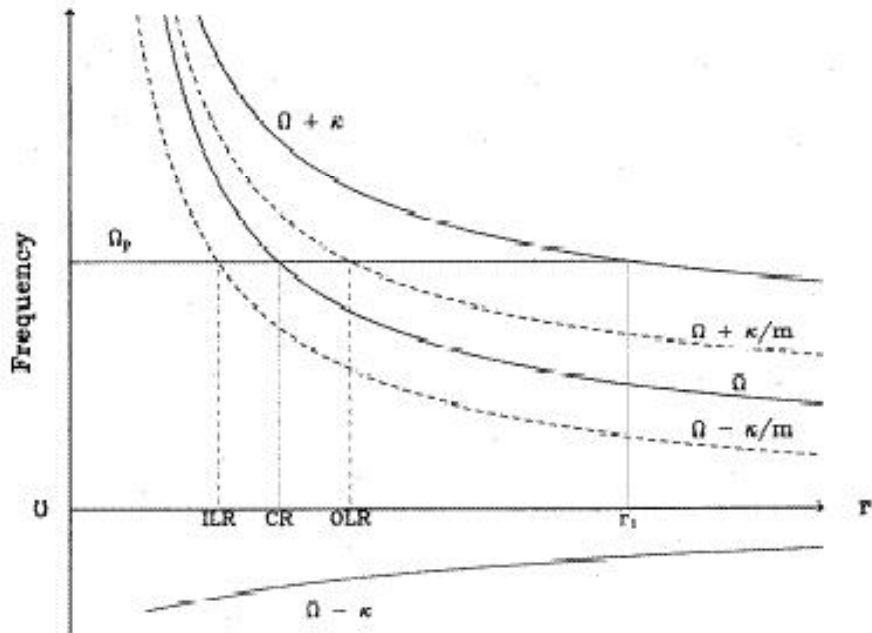
**m=1 mode propre**, mais il faut que la self-gravité soit importante

**Nature physique de l'instabilité ?**

Simple description WKB (*Lin & Shu 64, Toomre 77*)







Equidensity Contours

**Instabilité  $m=1$**   
dans un disque quasi  
képlérien  
*Adams, Ruden & Shu 1989*

Calcul de la perturbation

# Amplification à la Corotation

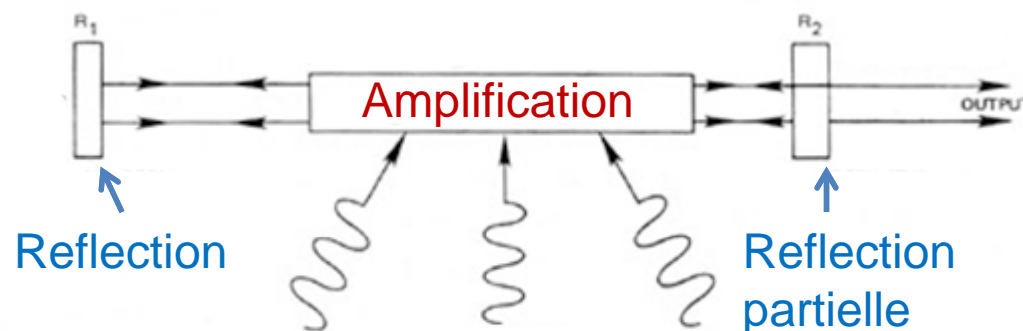
Energie et Moment angulaire de l'onde sont:

- positifs en dehors de CR ( $\Omega > \Omega_p$ ): l'onde tourne plus vite
- négatifs à l'intérieur ( $\Omega < \Omega_p$ ): moins vite

Les ondes sont partiellement transmises, et partiellement réfléchies à CR avec une zone évanescente si la dispersion de vitesse est élevée

L'onde réfléchie, par conservation de E, à une amplitude accrue

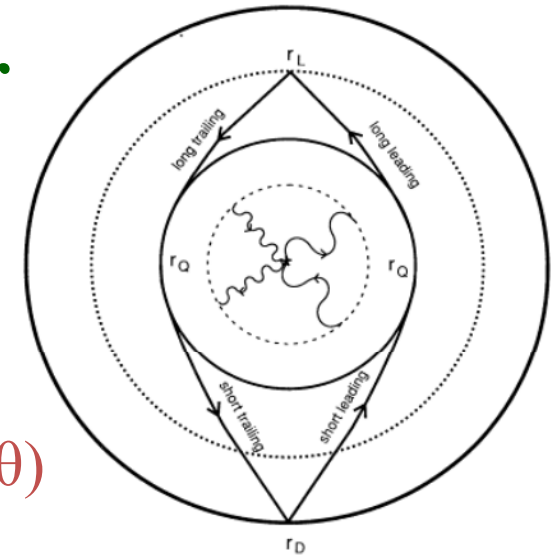
Si cette amplificateur est couplé à une réflexion aux résonances ou aux frontières, on a un WASER, *comme dans une cavité Laser*



## Pour $m=1$ , il existe un autre amplificateur

Pas seulement la Corotation

Le potentiel indirect, qui est dû au décentrement de la masse centrale  $\Phi ( r, \theta, t ) = \alpha \omega^2 r \cos ( \omega t - \theta )$



### Force à longue portée

Le disque se conduit comme une cavité résonante avec le décentrement stimulant constamment de nouvelles ondes trailing

La masse centrale gagne du moment angulaire, de même que le disque en dehors de CR

→ Ce mode permet au disque interne de perdre du moment angulaire, et au gaz de tomber sur le trou noir central

# Couples de gravité de la barre

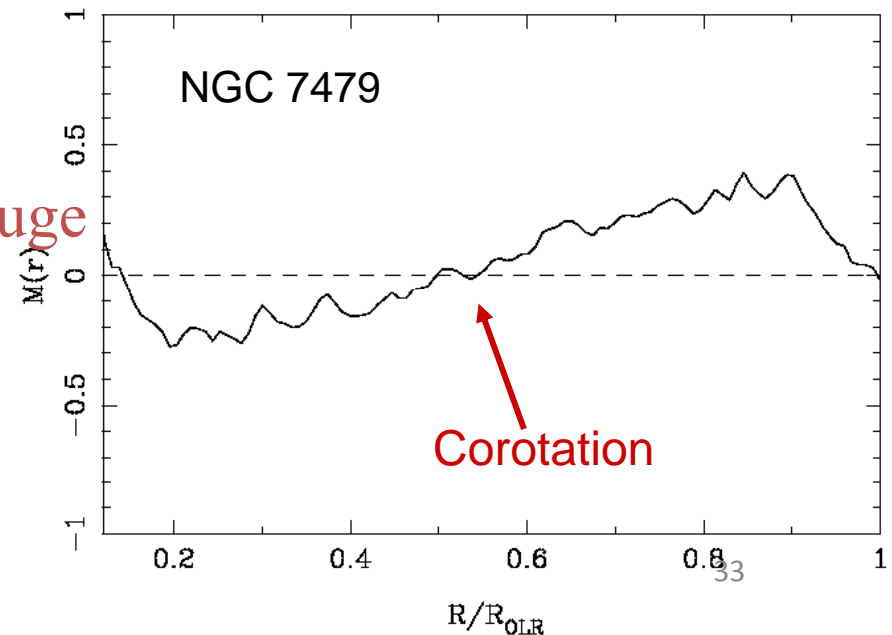
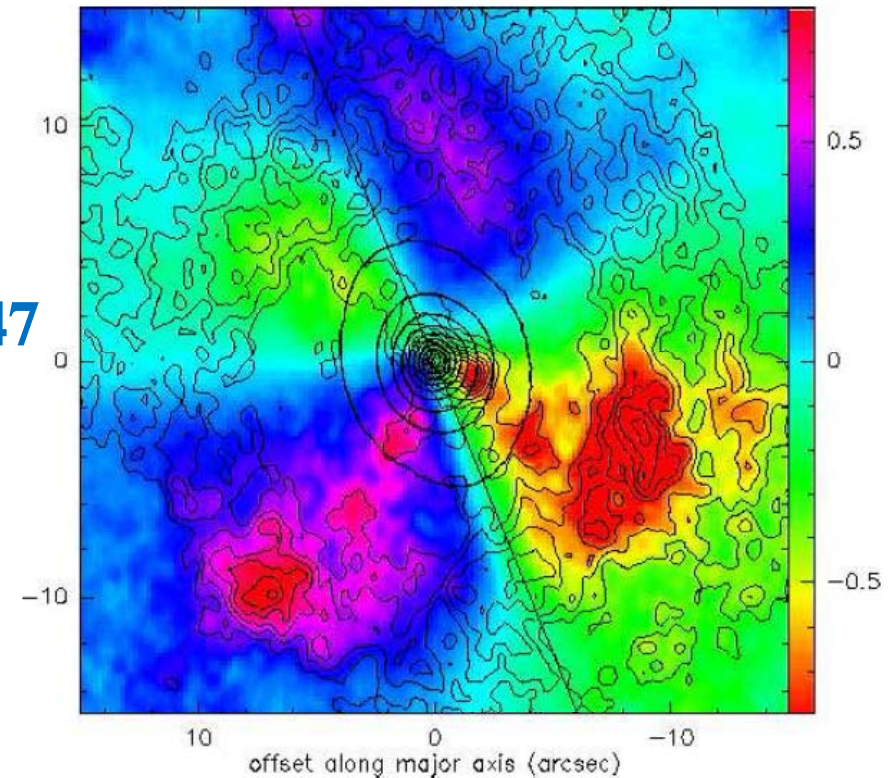
## Carte des couples pour NGC 3147

*Casasola et al 2008*

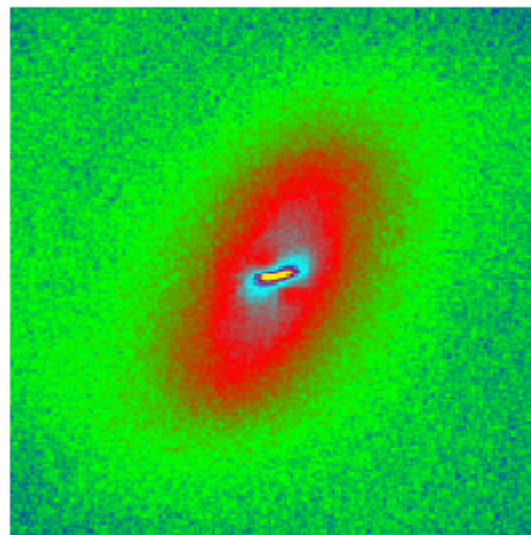
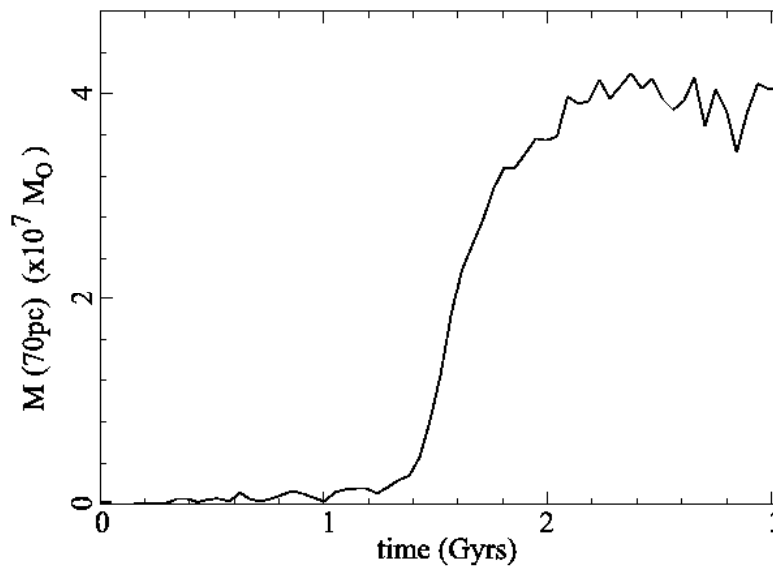
**Action sur le gaz:** signe des couples, dépend du déphasage entre le gaz et le potentiel dû aux étoiles

Couples calculés à partir de l'image rouge (vieilles étoiles), sur le gaz

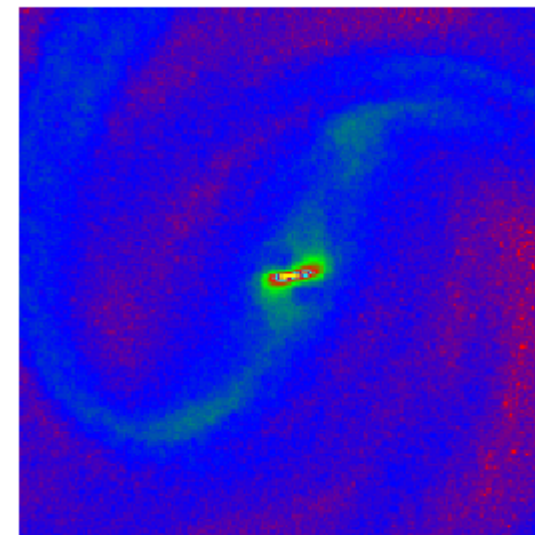
Le gaz donne L aux étoiles  
→ Affaiblit ou détruit la barre



# Flux de gaz avec deux barres



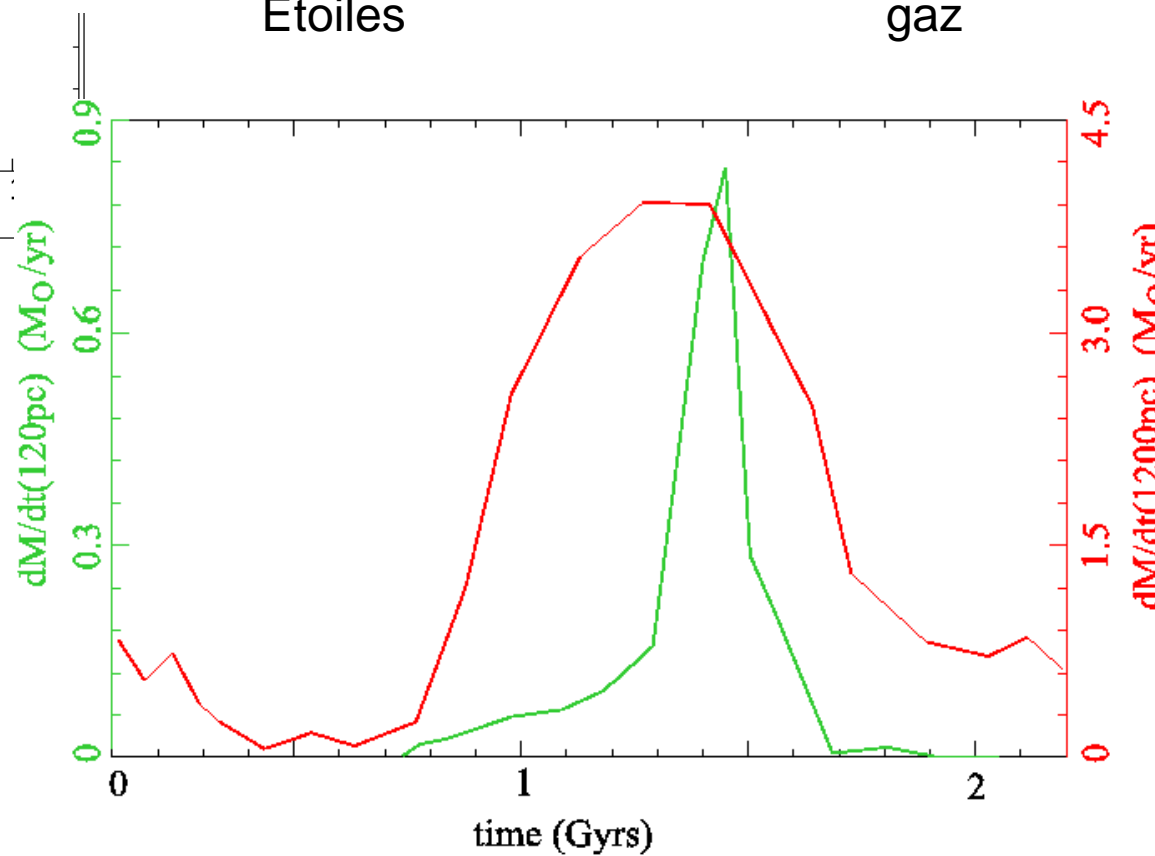
Etoiles



gaz

Flux de gaz cumulé (70pc)

Flux dans 20pc et dans in 200pc





# NGC2782:

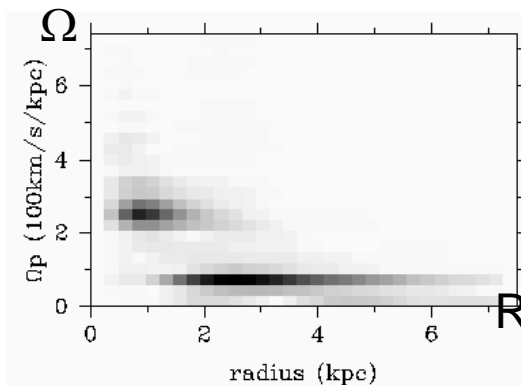
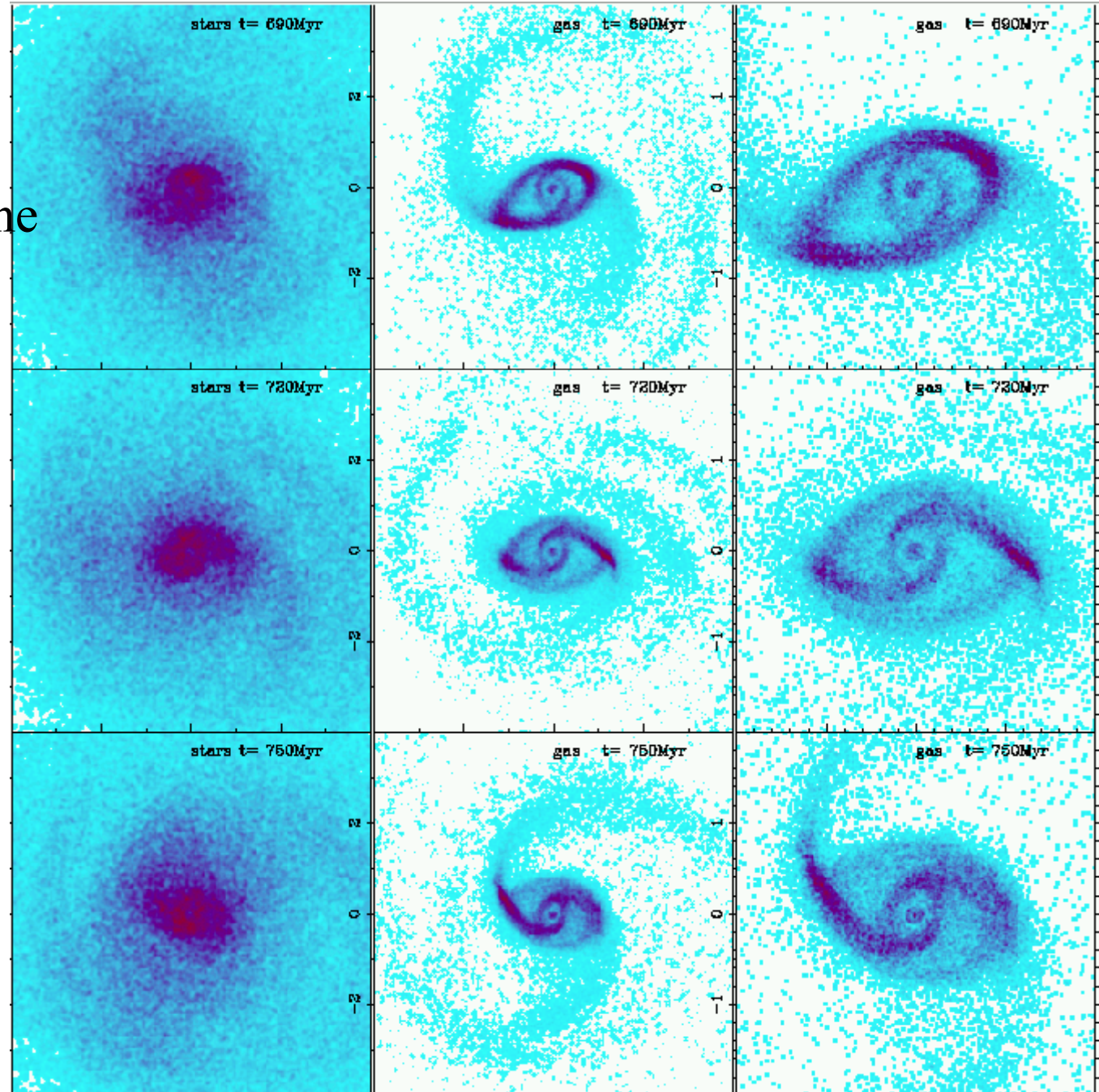
Formation d'une  
barre primaire et d'une  
**2ème découplée**  
dans une simulation  
N-corps+hydro

**Phase courte**, où les  
couples sont négatifs  
jusqu'au centre

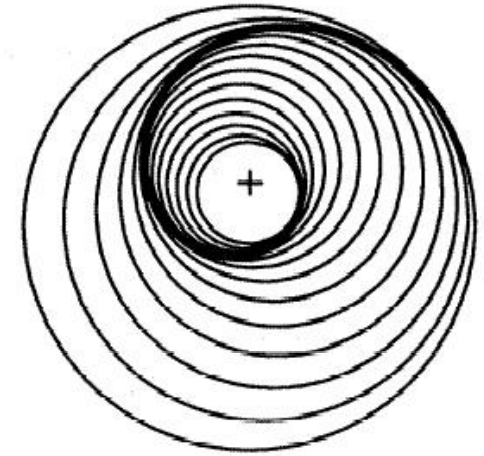
Etoiles

Gaz

Zoom



# Instabilités $m=1$



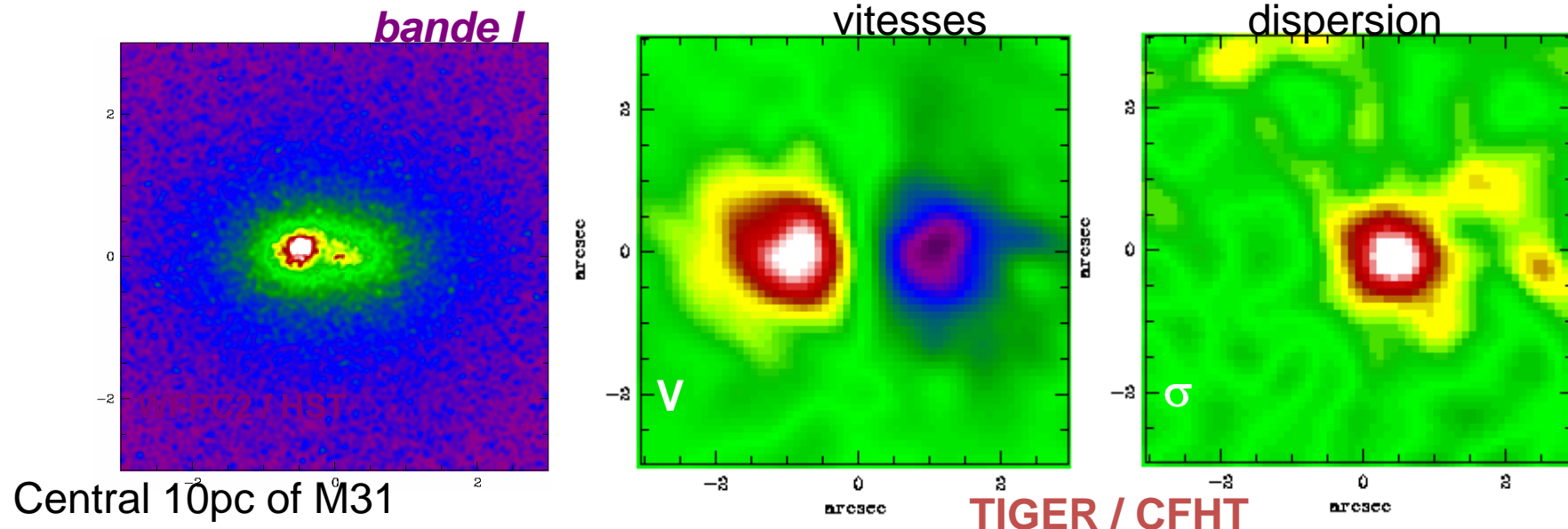
Précession différentielle très rapide  $\Omega - \kappa$

Près du trou noir, disque képlérien, où  $\Omega = \kappa$

$m=1$  mode propre, avec une forte self-gravité

→ + potentiel indirect, dû au dé-centrage du trou noir

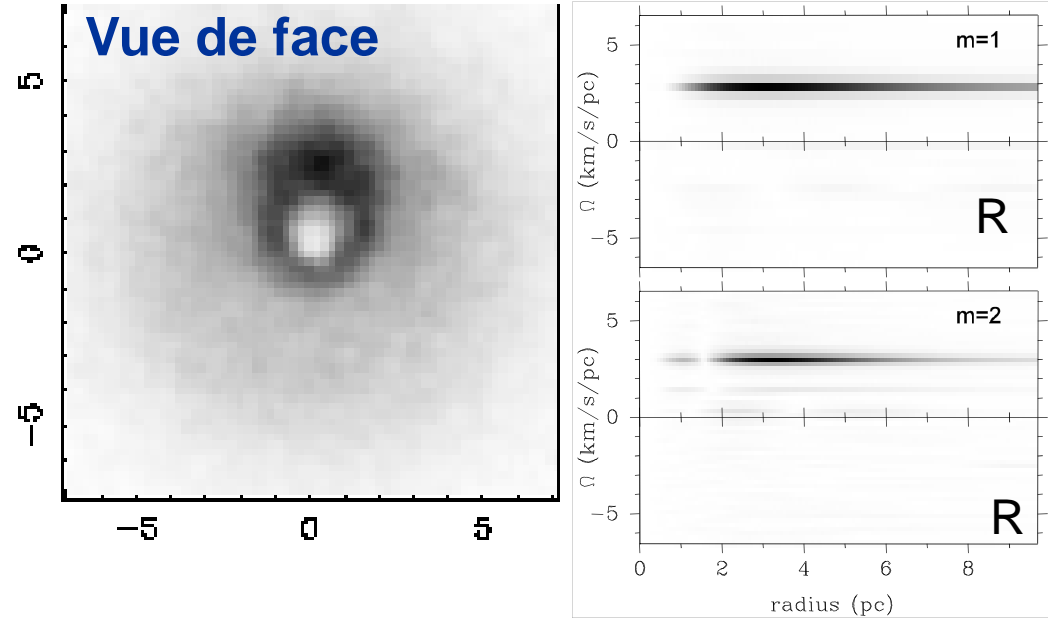
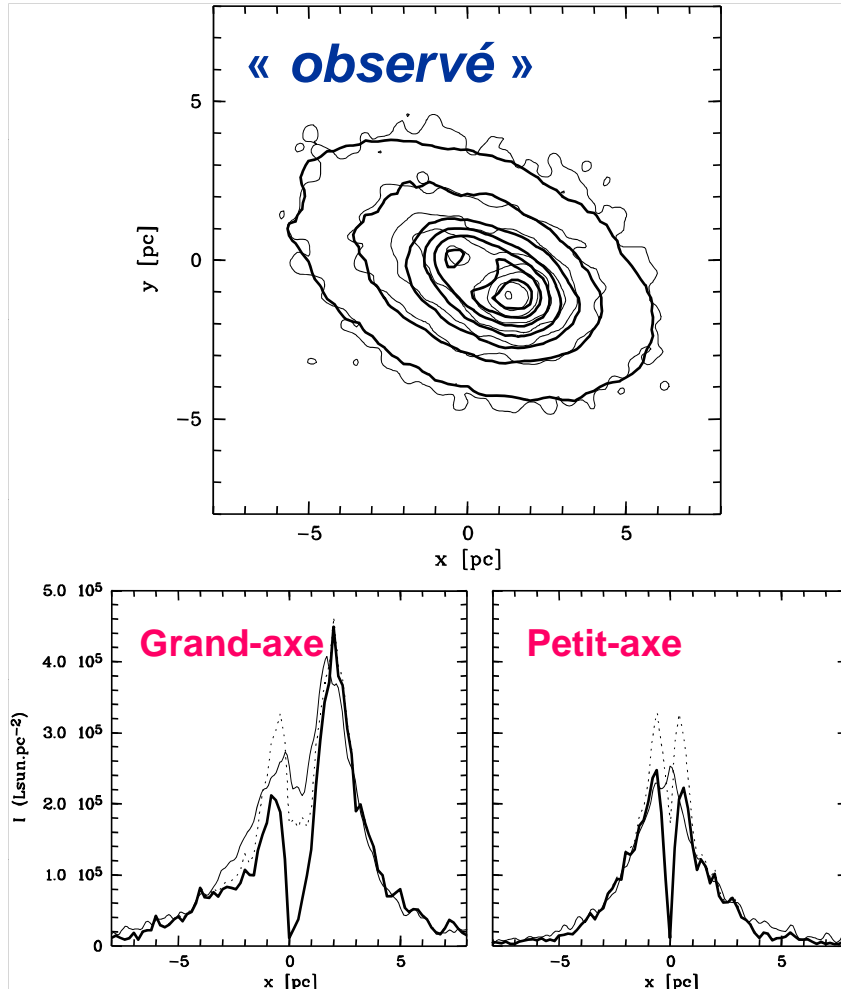
→ Ce mode permet au disque interne de perdre du moment angulaire,  
Et au gaz de tomber vers le trou noir (*cf Reichard et al 2009*)



# Un mode $m=1$ képlérien dans M31

*Vitesse de l'onde*

$\Omega$



- ✓ BH:  $7 \cdot 10^7 M_{\text{sol}}$
- ✓ Disque: 20-40% de la masse totale
- ✓ *Vitesse de l'onde:* 3 km/s/pc  
(fréquence orbitale: 250 km/s/pc)
- ✓ *Durée de vie:* > 3000 rotations  
 $\sim 4 \cdot 10^8$  yrs

Linear cuts

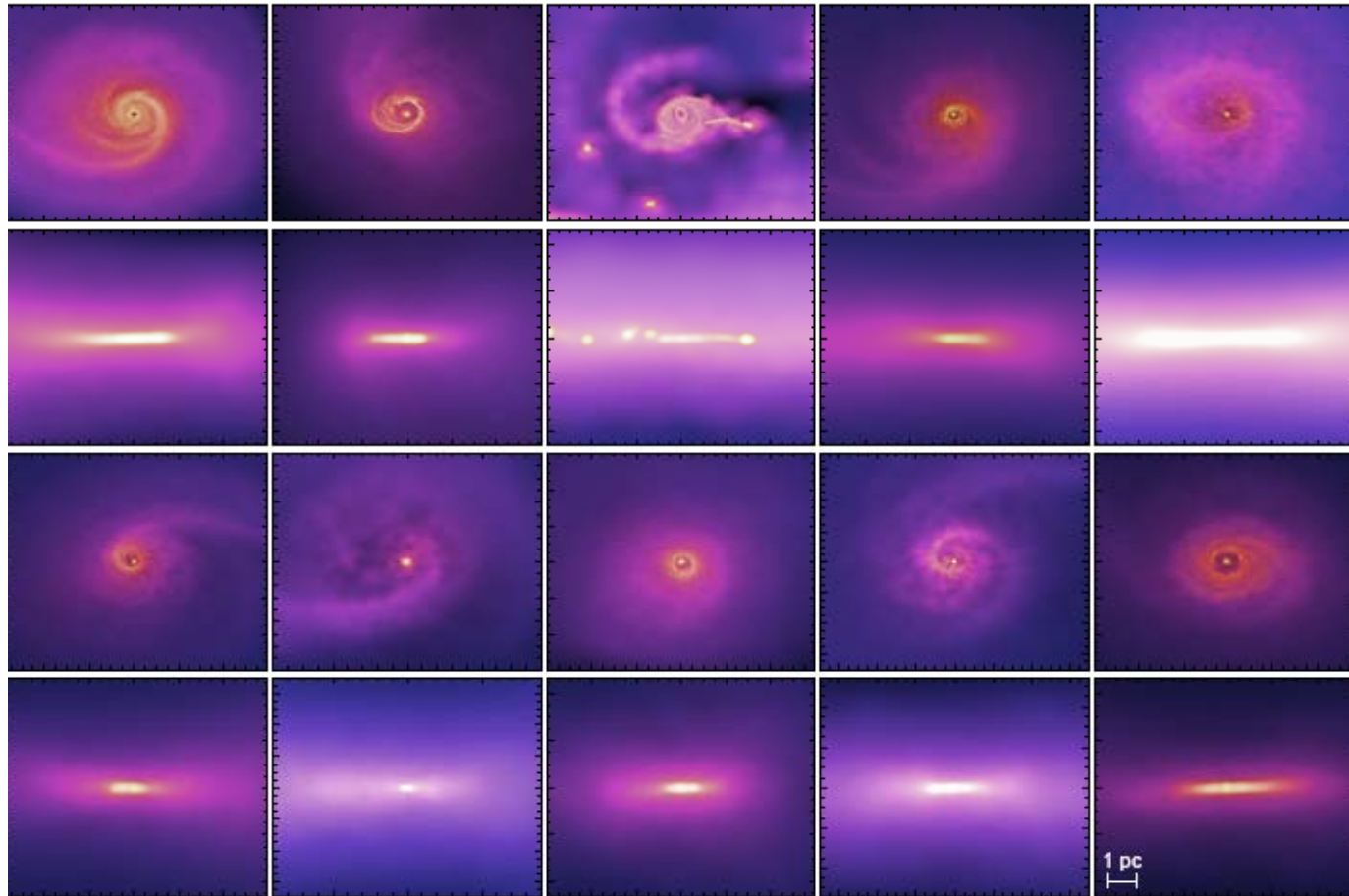
Bacon et al 2001



# Accrétion à petite échelle

Simulations de l'accrétion sur un trou noir → disque épais ( $\sim 10\text{pc}$ )

Simulation zoom: cascade de  $m=2$ ,  $m=1$ , + fragment et turbulence



Quand  $f_{\text{gas}}$  est grand

$10^{22}-10^{25} \text{ cm}^{-2}$

Fragmentation

Warp, twist

torsion

→ Disques épais

→ Friction

dynamique sur un

nuage  $M=10^6 M_{\odot}$

$t \sim 80 \text{ Myr} (r/100 \text{ pc})^2$

varie en  $1/M$

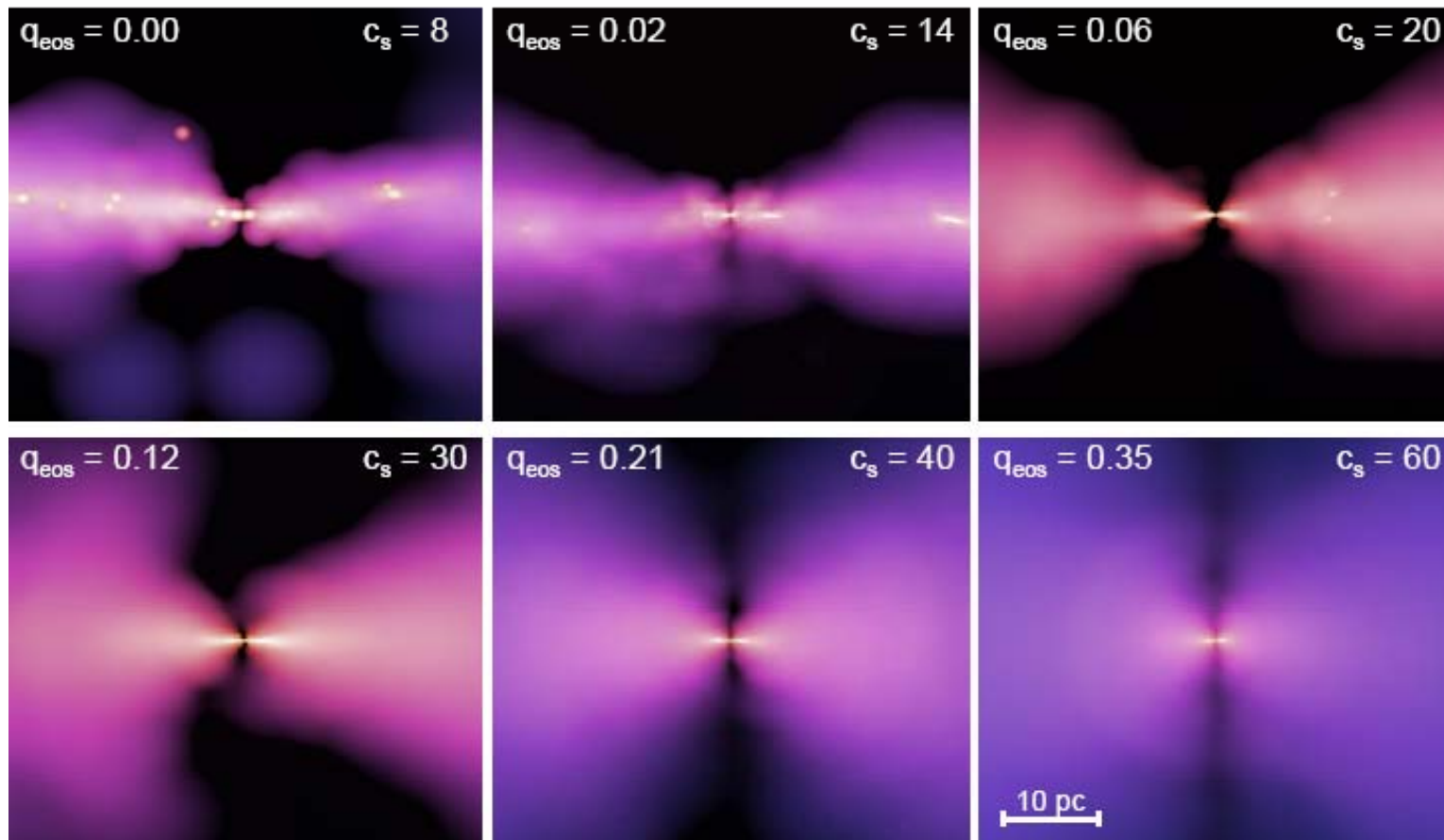
Le gaz s'accumule au centre, jusqu'à  $f=90\%$



# Formation du tore moléculaire ?

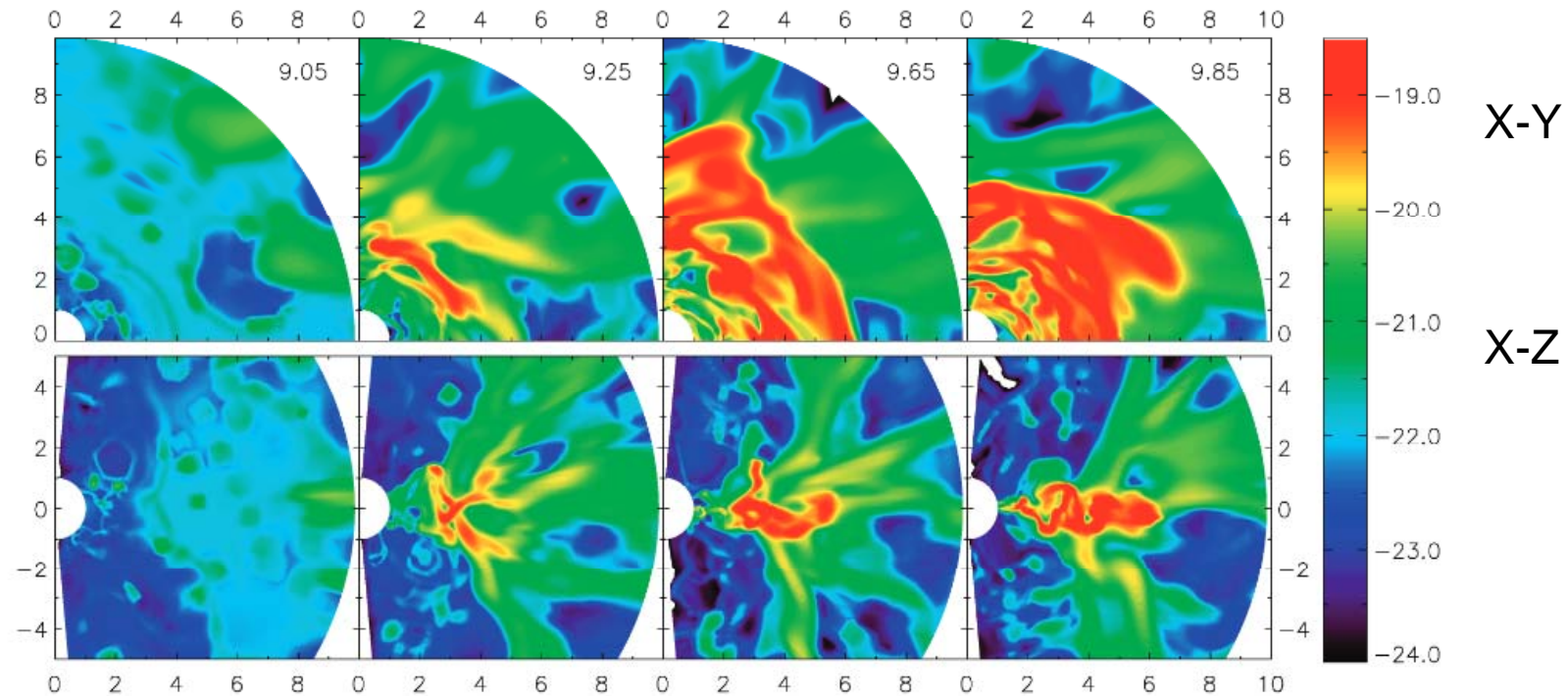
Même simulation, mais plot en coordonnées  $R, z$ , variation de  $C_z$ , et pression sous-maille. Equation d'état du gaz  $\rightarrow$  feedback des supernovae

$q$  (Eq d'état, isotherme-adiabatique), et  $c_s$  (vitesse du son)



# Disques minces et épais

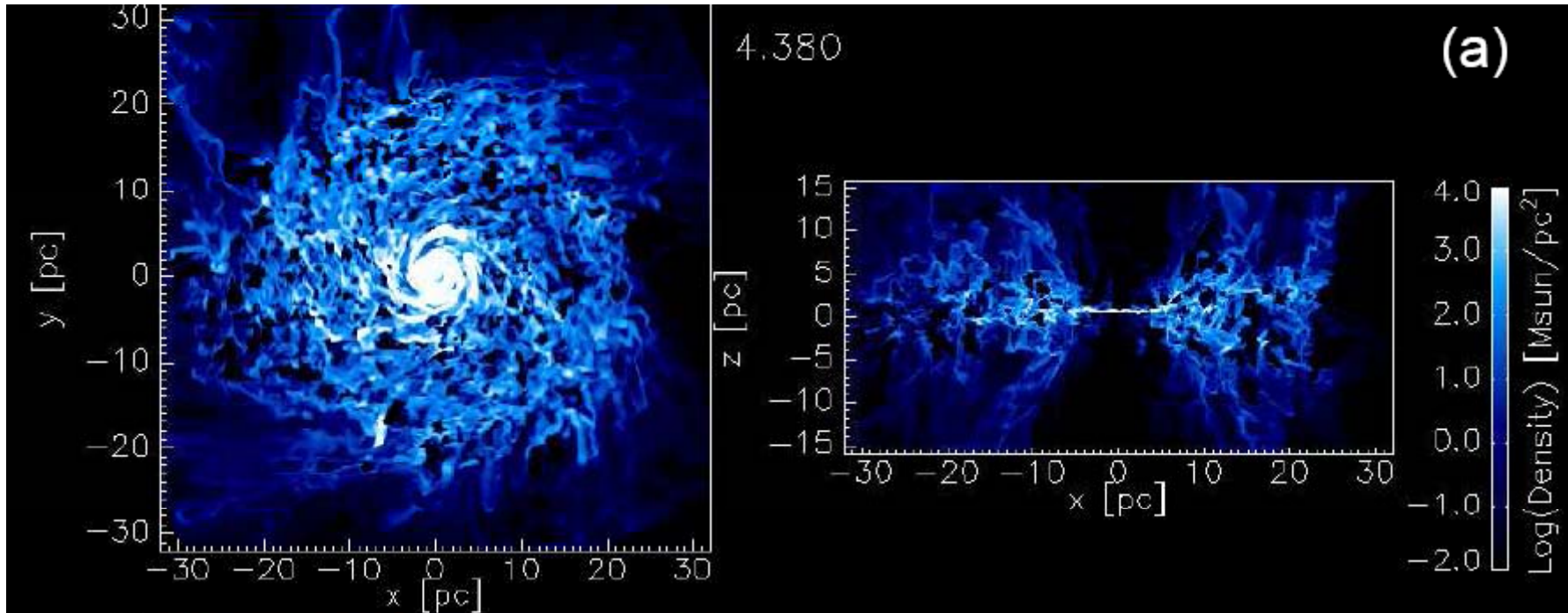
Un disque chaud et mince, puis froid et épais, turbulent, co-existent  
Le milieu multi-phase se développe avec les vents stellaires, à partir  
d'un amas nucléaire d'étoiles –filaments froids, et milieu chaud diffus



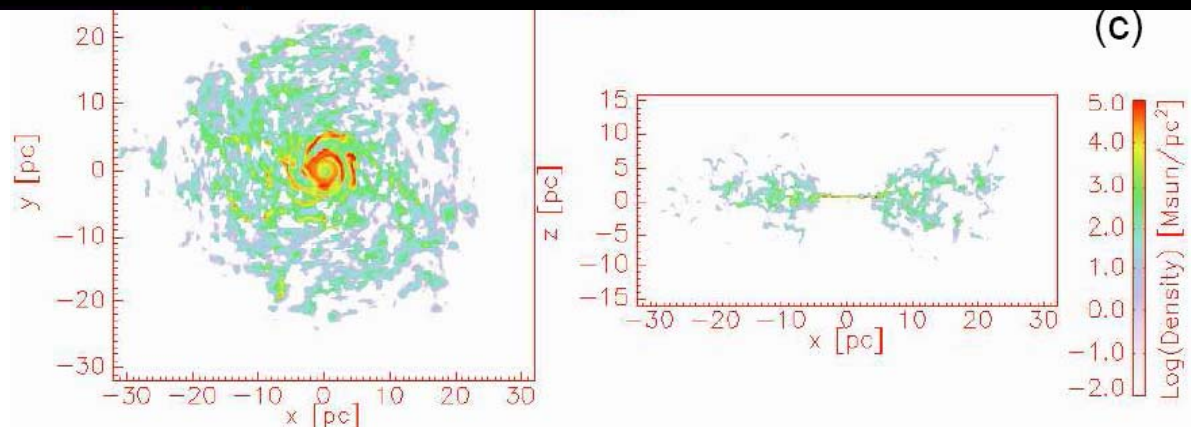
Temps en orbites, échelles en pc, densités en  $\text{g/cm}^3$

# Disques moléculaires minces

Avec plus de raffinement: formation de  $H_2$ , et chimie self-consistante  
Flux UV, dans un rayon de 30pc, SN feedback



40%  $H_2$   
1.5 E6 Mo  
< 5pc au centre



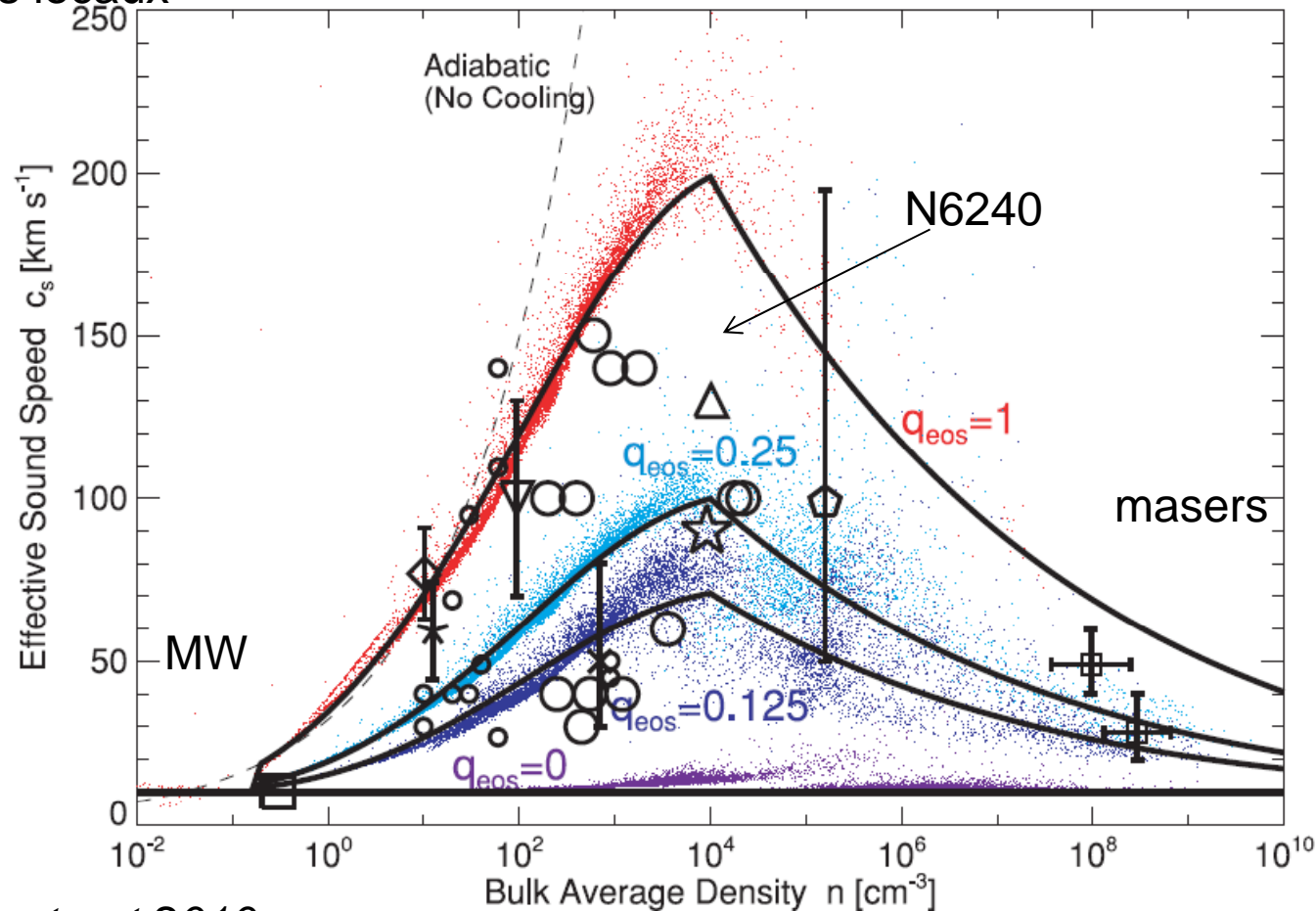
Wada et al 2009

# Influence du feedback stellaire

Le feedback stellaire est inclus dans l'équation d'état (EOS)  
(physique sous-maille)

$$c_s = \sqrt{q_{\text{eos}} c_s^2[q = 1] + (1 - q_{\text{eos}}) c_s^2[q = 0]} .$$

O starbursts locaux

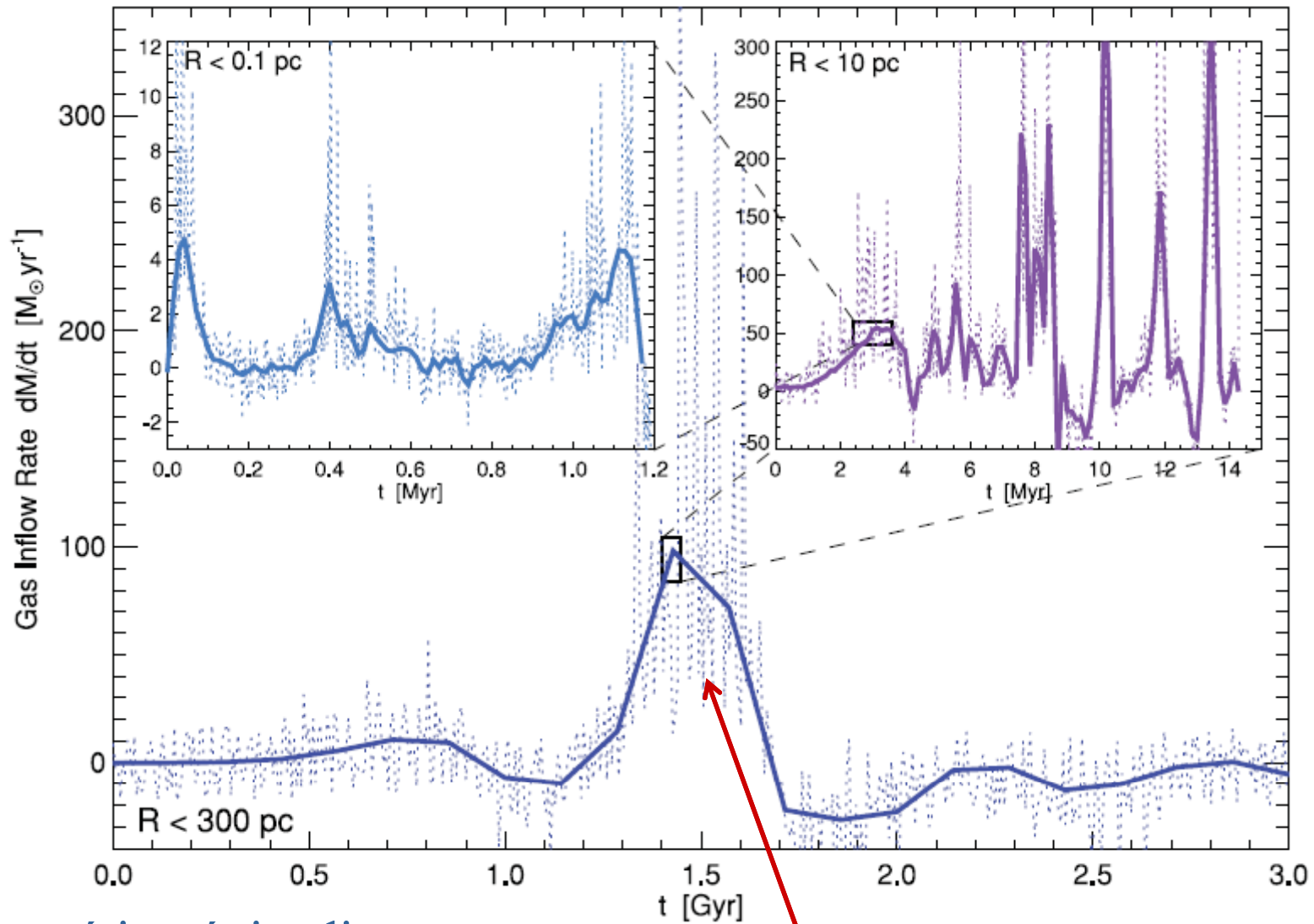




# Taux d'accrétion, fusion

2<sup>ème</sup> resimulation

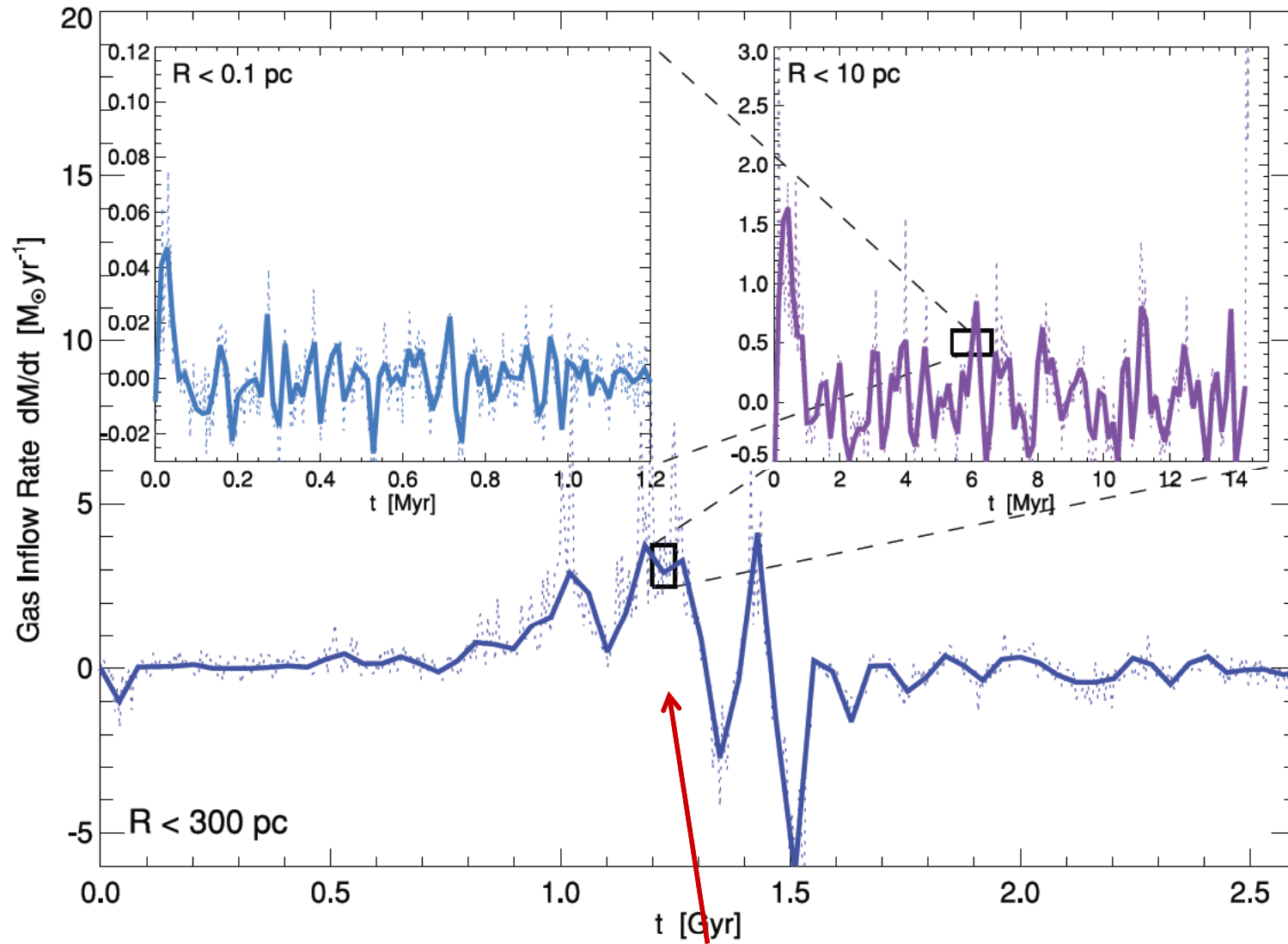
1<sup>re</sup> resimulation



→ Accrétion épisodique  
Self-similaire

Coalescence des 2 noyaux

# Taux d'accrétion, cas isolé



Barre modérée

# Statistiques des barres -- Echelles de temps Alimentation à 10-100pc

→ Seulement ~35% de couples négatifs au centre, échelle 1"~50-100pc  
6 sur 16 galaxies (*échantillon NUGA*)

N1961, N2782, N3147, N3368, N3627, N3718, N4321, N4569,  
N4579, N4736, N4826, N5248, N5953, N6574, N6951, N7217

→ Le reste du temps, couples positifs, maintient le gaz dans un anneau

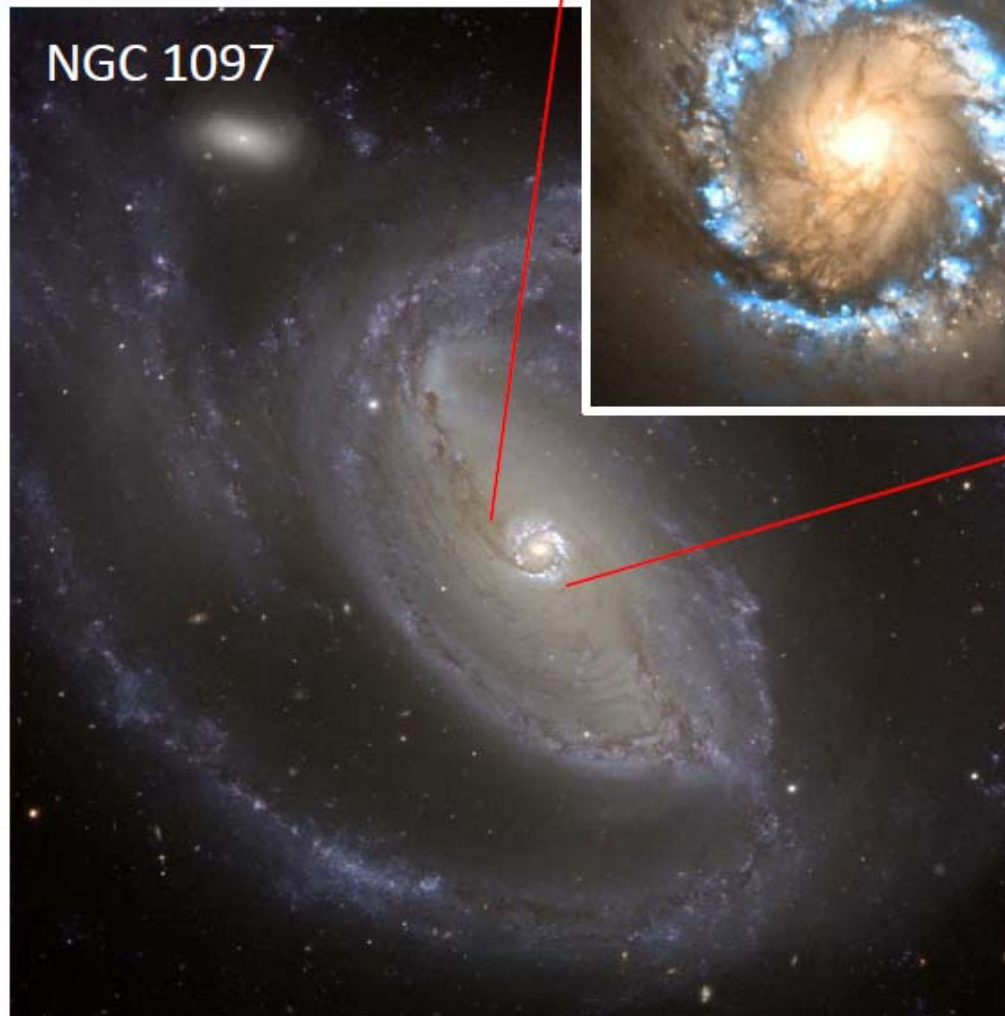
→ Phases d'alimentation courtes, qq  $10^7$  yrs, à cause du feedback?

Rare de voir des AGN binaires, pas d'alimentation simultanée

Difficile d'identifier la cause: les barres ont eu le temps de faiblir

→ La formation d'étoiles est aussi alimentée par les couples, toujours en association avec l'activité AGN, mais durée de vie plus longue

# Rôle de la formation d'étoiles au centre



## Accrétion de gaz

En route le gaz fragmente et forme des étoiles

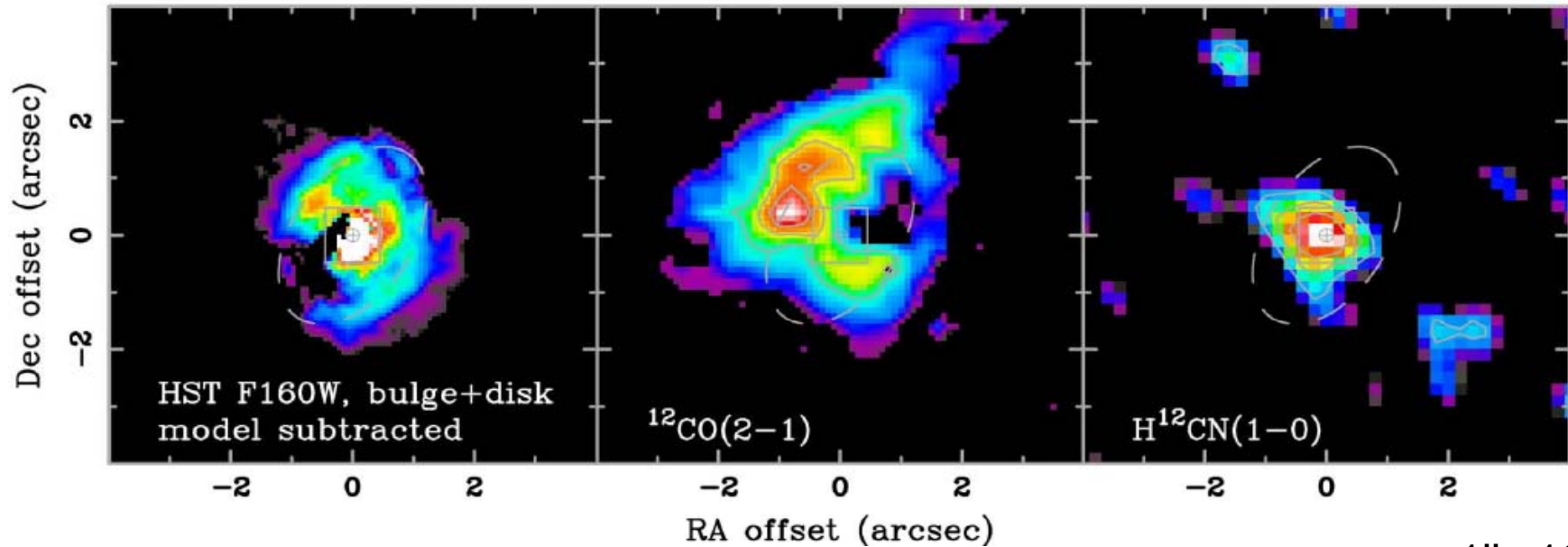
Une partie alimente l'AGN

La perte de masse des étoiles jeunes est aussi accrétée

Echelles de temps  $\sim 10$  pc  
 $t \sim 20\,000$  ans

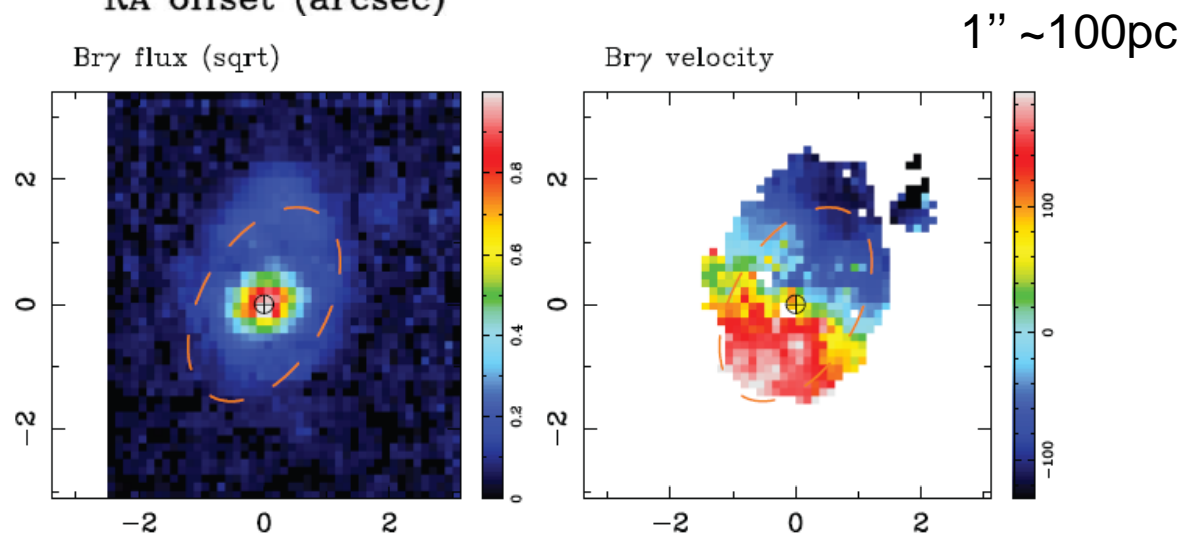


# Evidence de formation récente d'étoiles



N3227: anneau à 140pc,  
formation d'étoiles  
très récente  
à des échelles de  $\sim 10\text{pc}$

*Davies et al 2015*

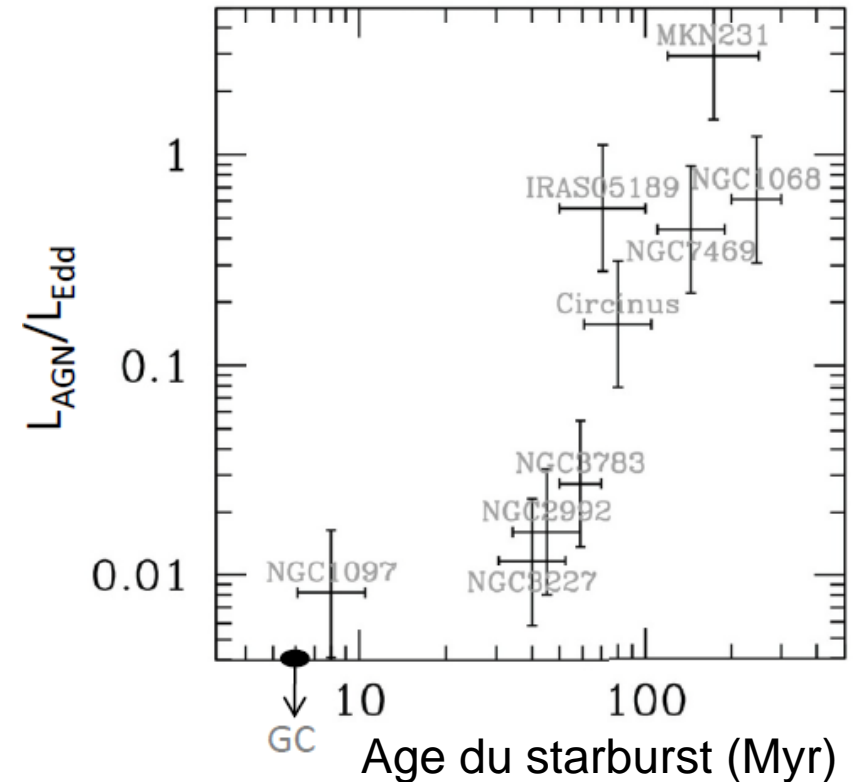
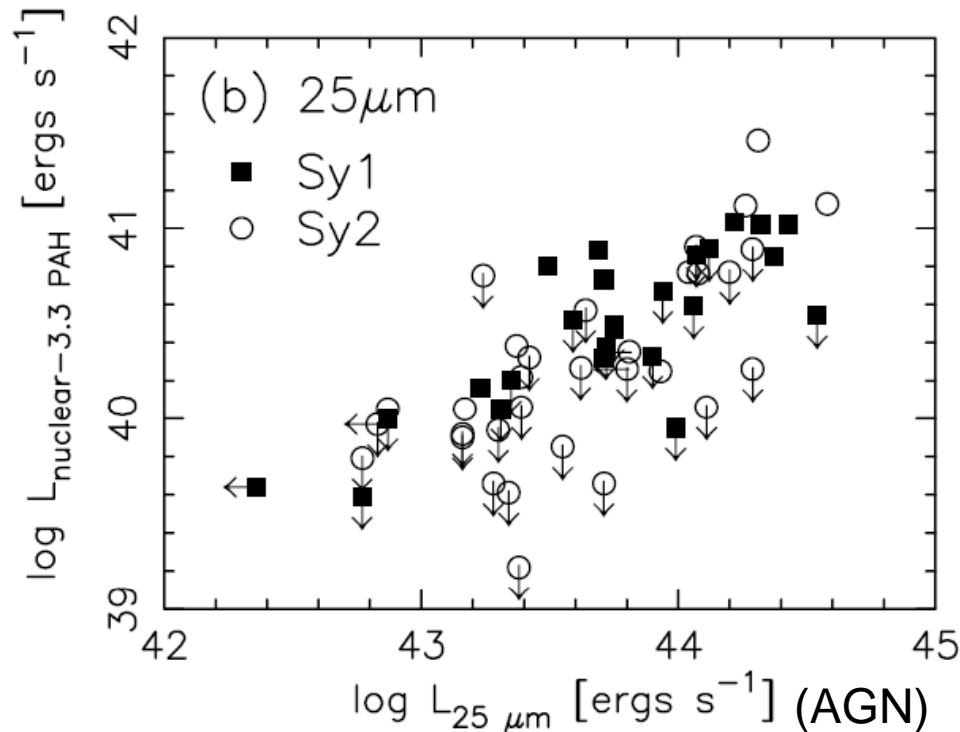


20% des galaxies à disques ont des anneaux nucléaires

# Présence d'un starburst nucléaire

Dans la moitié des cas: formation d'étoiles dans le torus

Délai 50-100Myr?



Corrélation de la bande 3.3 $\mu$ m des PAH (starburst)  
avec 25 $\mu$ m, venant de l'AGN

Polycyclic Aromatic Hydrocarbon



*Imanishi & Wada 2004*<sup>48</sup>

# Rôle des interactions entre galaxies

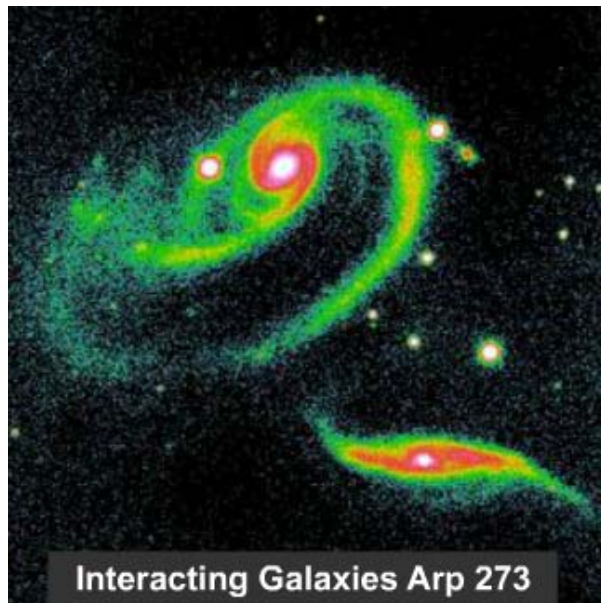
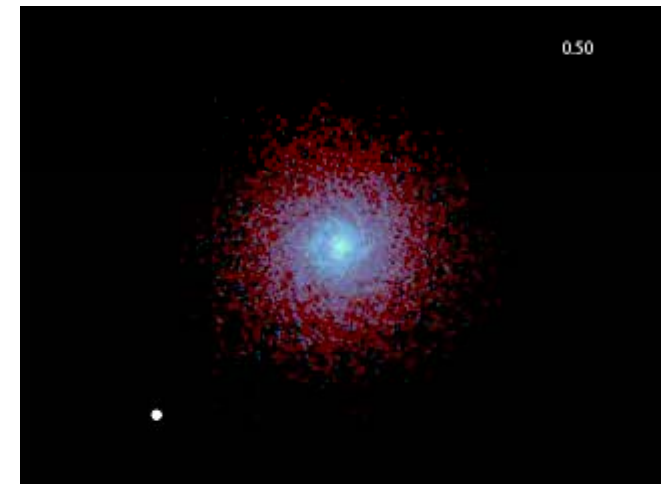
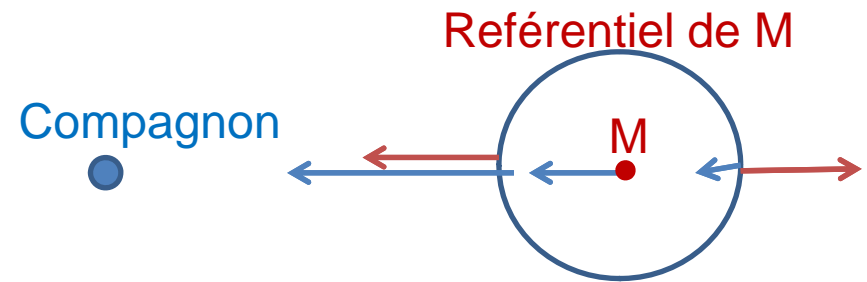
Evénement plus violent

Echange efficace de moment angulaire

L'interaction de marée (**symétrie  $m=2$** ) engendre la formation de barre

Le gaz est précipité vers le centre

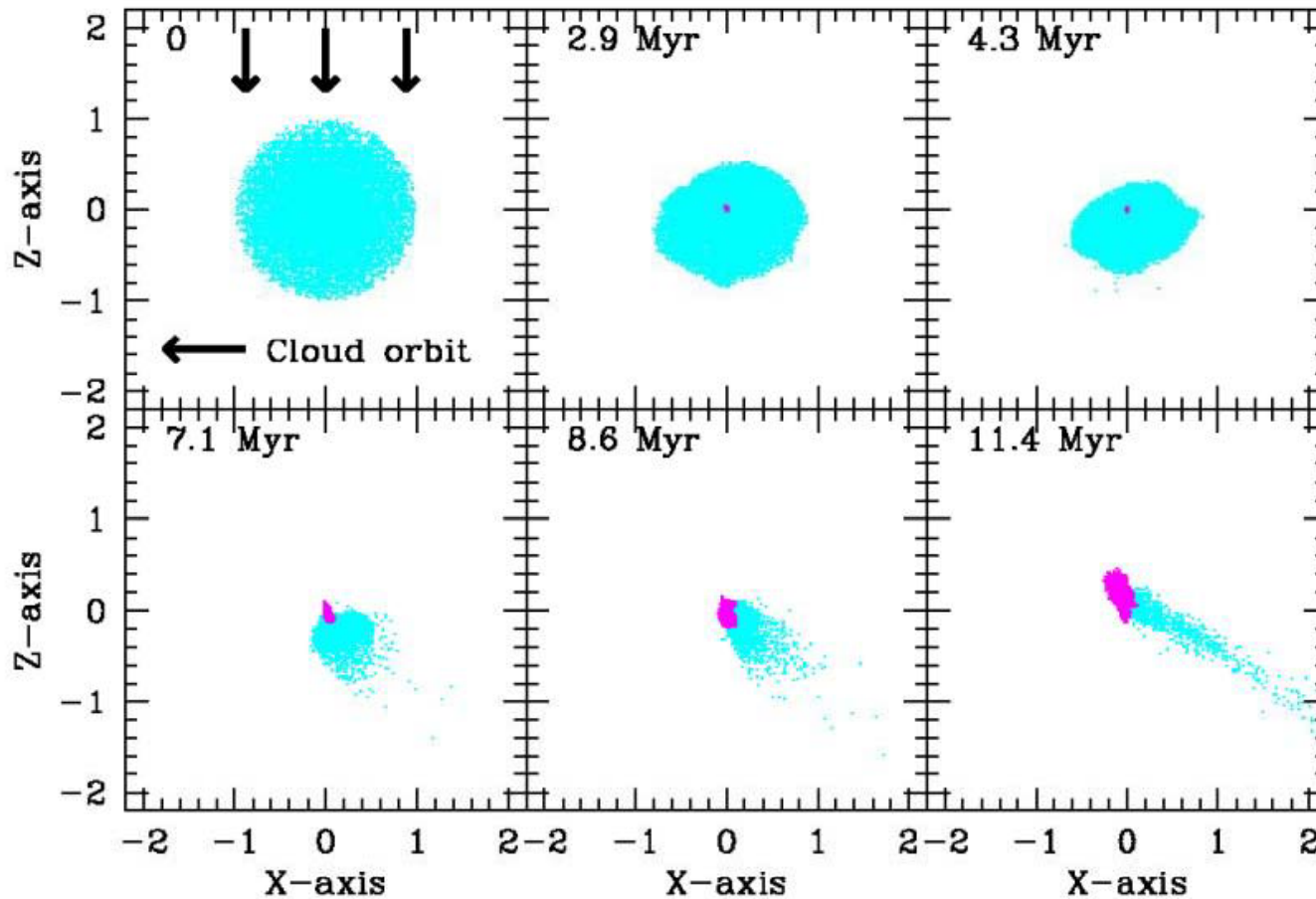
→ starburst et après un délai, AGN?



Toutes les galaxies les plus brillantes: ultra-lumineuses (ULIRG) sont des interactions de galaxies ou fusions

Le contraire n'est pas vrai

*(condition nécessaire mais non suffisante)*

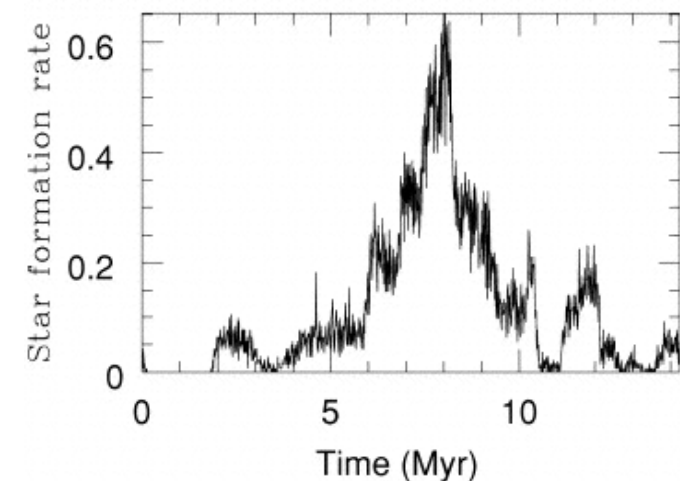


Pression  
dynamique  
dans un amas

*Bekki & Couch 03*

Compression des nuages moléculaires  
par la pression dynamique

Dans Abell 1367 flambées des galaxies  
qui entrent *Gavazzi et al 2003*





# Galaxies Ultra-Lumineuses

Les galaxies en interaction ont plus de gaz H<sub>2</sub> (plus d'émission CO)  
Le gaz H<sub>2</sub> est aussi plus concentré

En moyenne, le contenu H<sub>2</sub> est multiplié par 4-5

(Braine & Combes 1993)

Facteur de conversion?  $X \sim n^{1/2}/T_r$

Efficacité de formation d'étoiles  $SFE=L_{FIR}/M(H_2)$  trop grande?

Ceci est attendu, de part les couples gravitationnels de l'interaction,  
Précipitant le gaz vers le centre



déclenche le starburst



Condition pour un starburst: accumuler le gas en un temps assez court  
pour que le feedback n'ait pas le temps de réguler

# Formation de super-amas d'étoiles

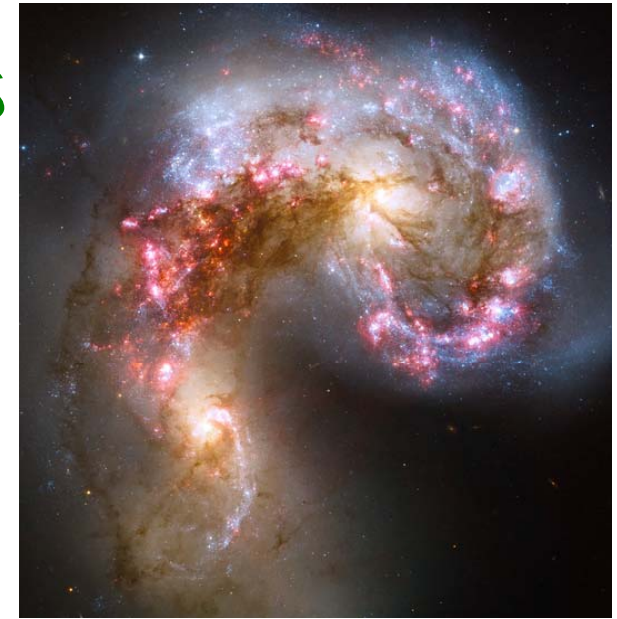
Longueur critique de self-gravitation  $\lambda_{\text{crit}} \sim 200\text{pc}$

Masse correspondante  $M \sim 10^9 M_{\odot}$

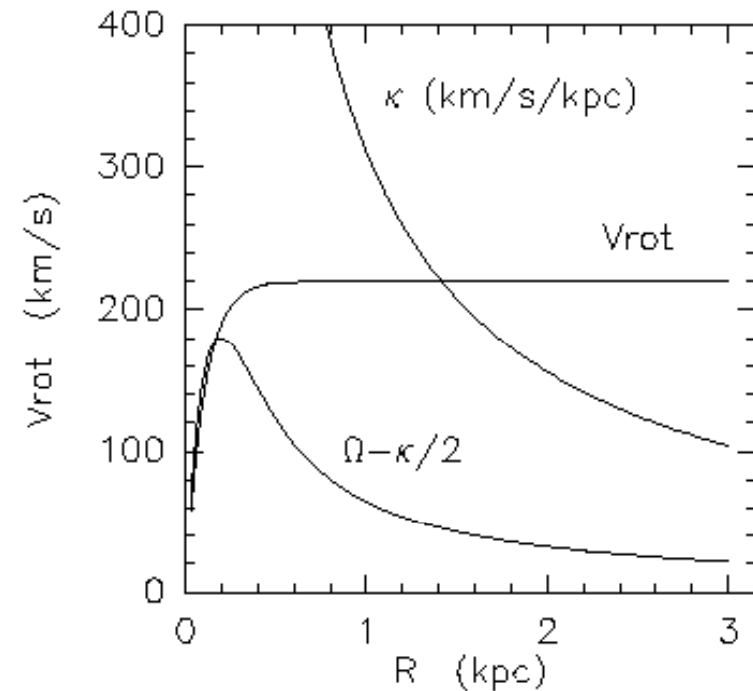
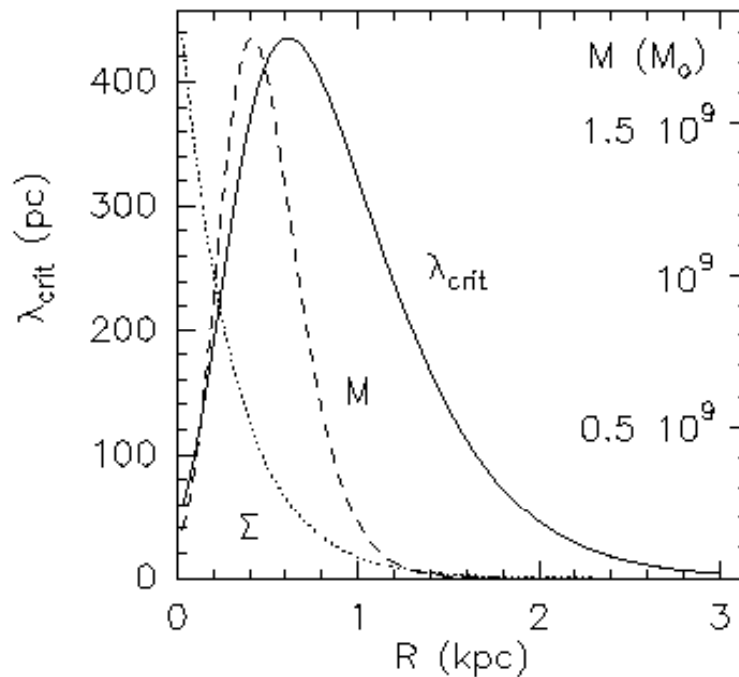
pour une densité surfacique de gaz  $\Sigma$

(max  $5 \times 10^3 M_{\odot}/\text{pc}^2$  ou  $3 \times 10^{23} \text{H}_2 \text{cm}^{-2}$ )

$\Sigma$  assez fort pour former des super-amas



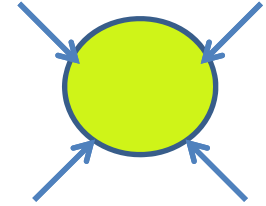
Les Antennes



# Forces de marée compressives

Pour une densité à symétrie sphérique en  $\rho(r) \sim r^{-a}$ , la force/u de masse est en  $r^{1-a}$ , donc l'attraction peut croître avec la distance, si  $0 < a < 1$

→ la force de marée est compressive  $F_{\text{mar}} \sim (1-a) r^{-a}$   
En particulier, pour une densité=cst (rotation  $V$  en  $r^{1-a/2}$ )



Les nuages à l'intérieur du cœur sont comprimés, ce qui déclenche la formation d'étoiles

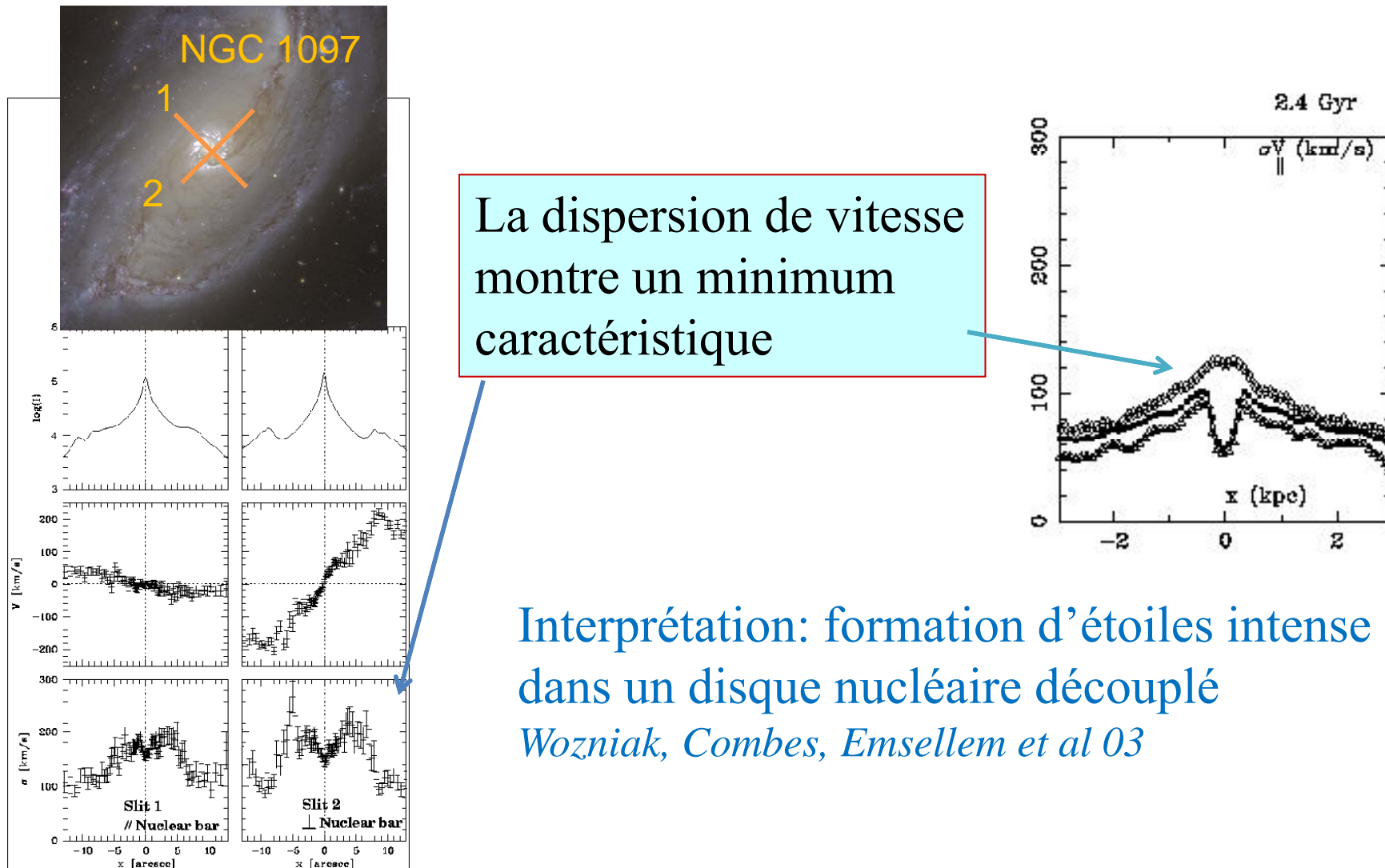
Cela peut aussi expliquer la formation de starbursts nucléaires et celle de disques d'étoiles nucléaires

**→ Minima de dispersion de vitesse au centre des galaxies**

*(Emsellem et al 2001, Wozniak et al 2003)*

# Disques d'étoiles nucléaires découplés

Des disques nucléaires d'étoiles froides sont observés dans les galaxies de Seyfert, avec double barre *Emsellem, Greusard, Combes et al 01*

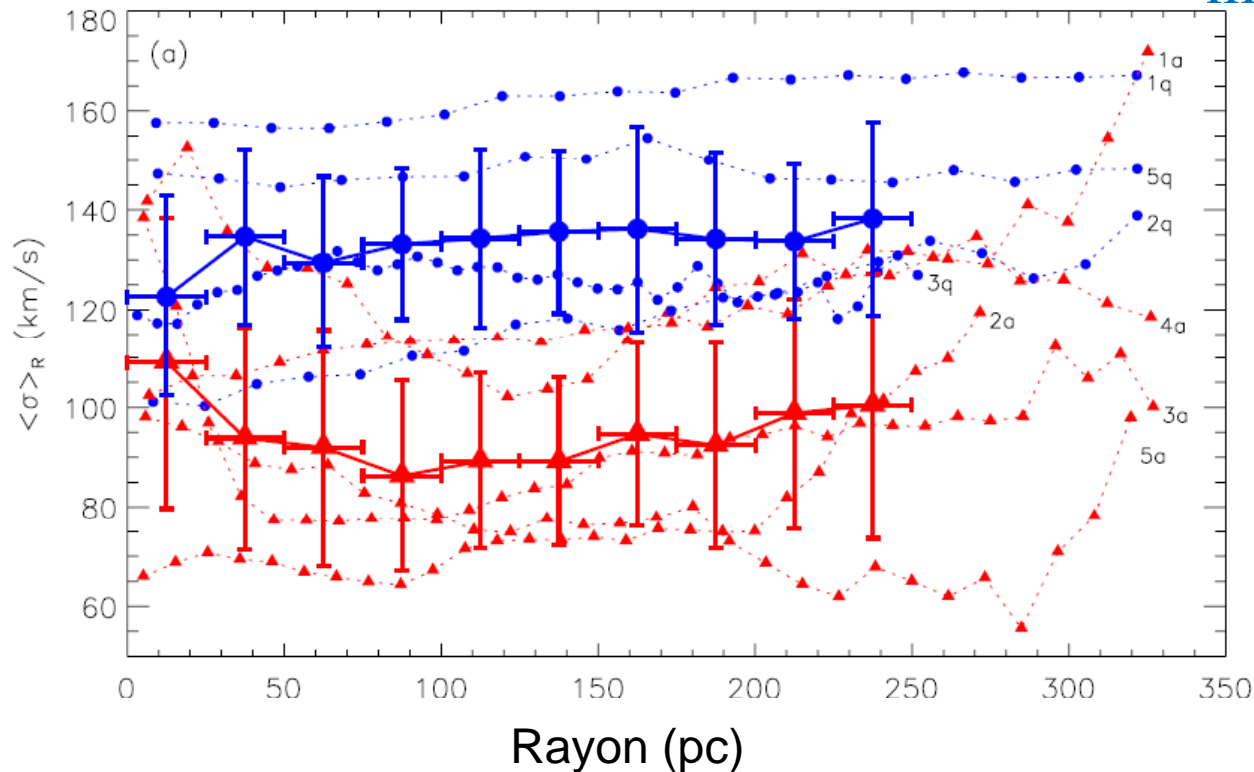




# Seyfert versus galaxies non actives

Les galaxies **actives** ont un minimum de dispersion

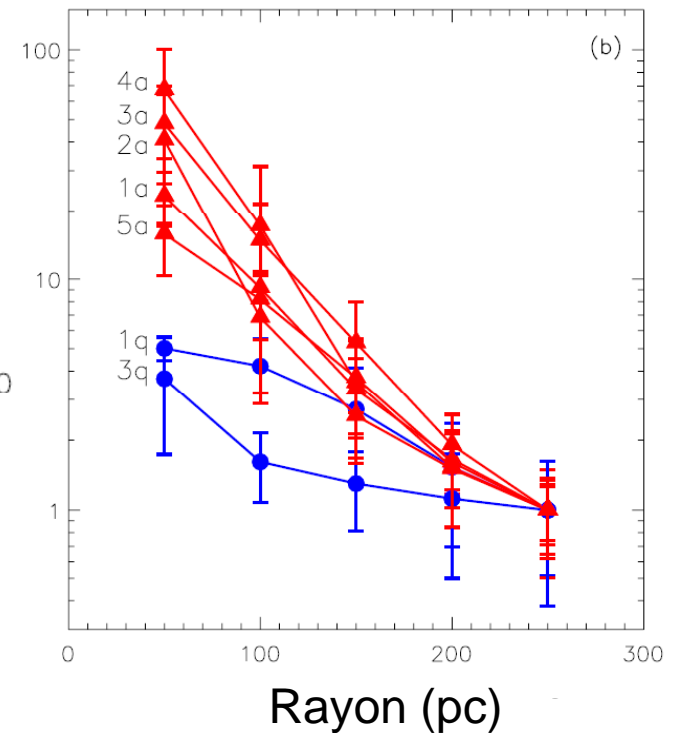
Dispersion de vitesse



Les galaxies **actives** ont un disque de gaz plus important

*Hicks et al 2013*

Densité  $H_2$



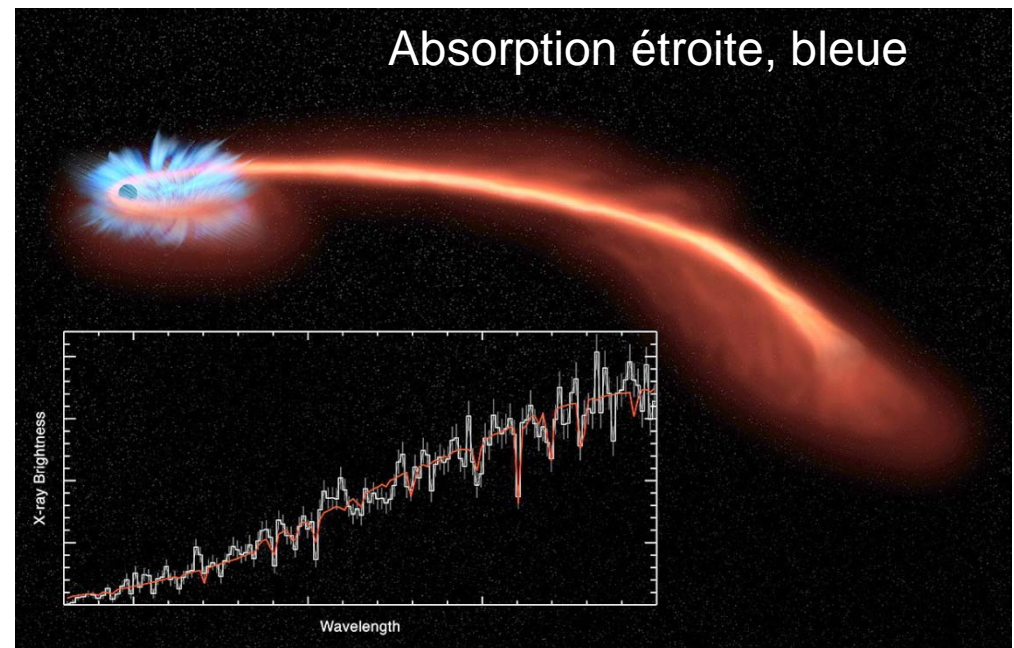
# Croissance des trous noirs par les étoiles

Possible pour les trous noirs de masse inférieure à la limite de Hills  
 $M_{\bullet} = 3 \cdot 10^8 M_{\odot}$  Les TN plus massifs ont une densité moyenne trop faible et les étoiles sont avalées intactes

Pour un TN comme celui de la Voie Lactée, une étoile devrait être détruite **tous les 10 000 ans**

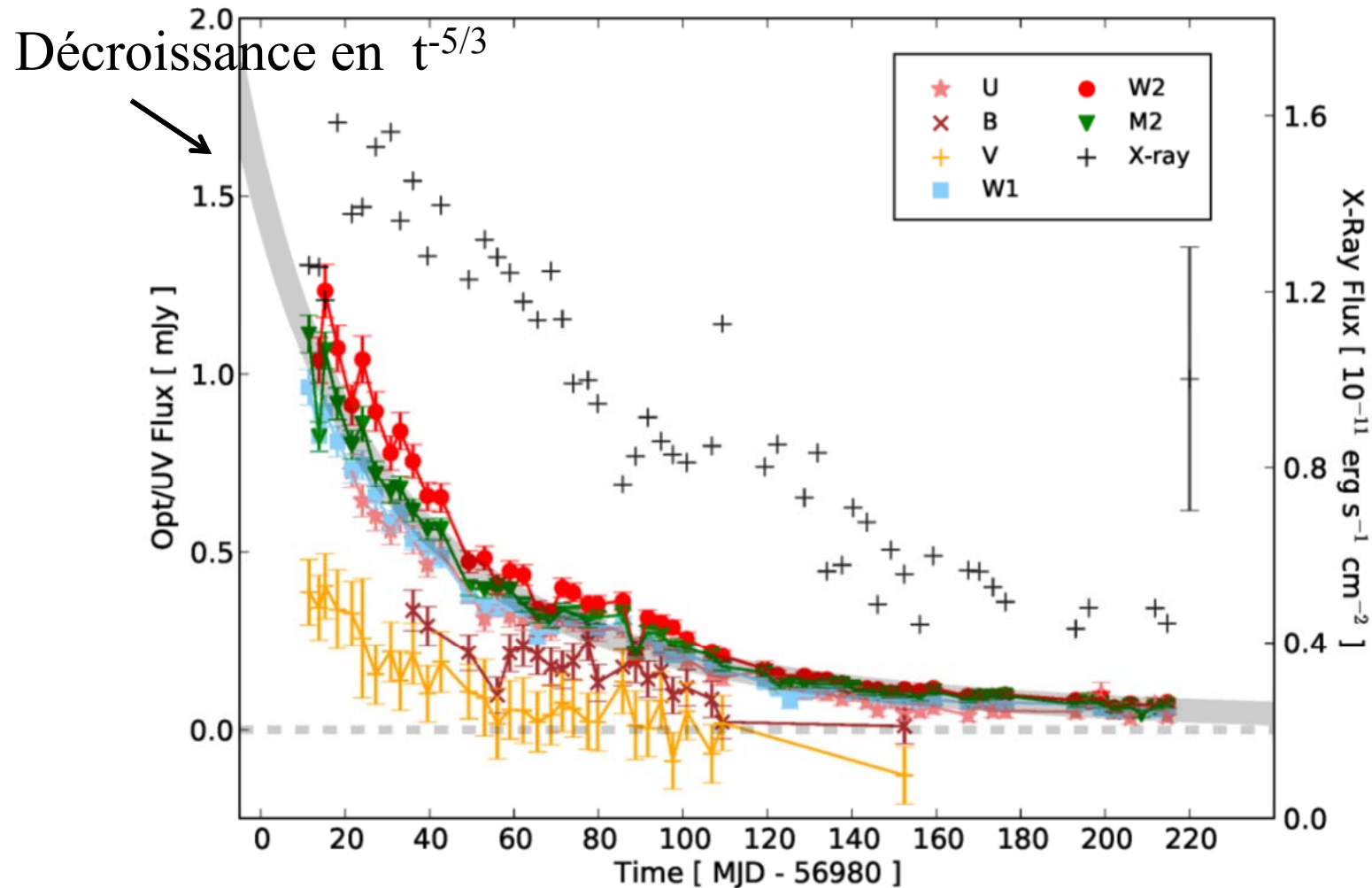
→ Ou bien on pourrait observer le phénomène tous les ans, avec le suivi de  $10^4$  galaxies

→ Observation par les rayons X  
Miller et al 2015  
ASASSN-14li dans PGC 043234



# Preuve de l'évènement « TDE »

TDE Tidal Disruption Event = ASASSN-14li, galaxie non active  
Suivi de la décroissance du flux, depuis la découverte en 2014



# Alimentation du TN – Selon l'échelle

→ Les barres primaires essentielles de 10kpc à R ~ 100pc

Puis des barres nucléaires de 100pc à 10pc

Barres + asymétries, interaction de marée, fusions et structures emboîtées à diverses échelles alimentent les starbursts et les AGN:  
Surtout  $m=2$ , mais aussi  $m=1$ , ou compagnons

→ Echelles ~1-10pc, turbulence, viscosité, warp, torsions, friction dynamique, formation de disques épais, tant qu'il y a du gaz (après, reste un amas nucléaire d'étoiles, cf M31)

→ feedback, flux de gaz sortant dû aux starbursts et aussi AGN si violent

→ Non-alignement entre les petites et grandes échelles