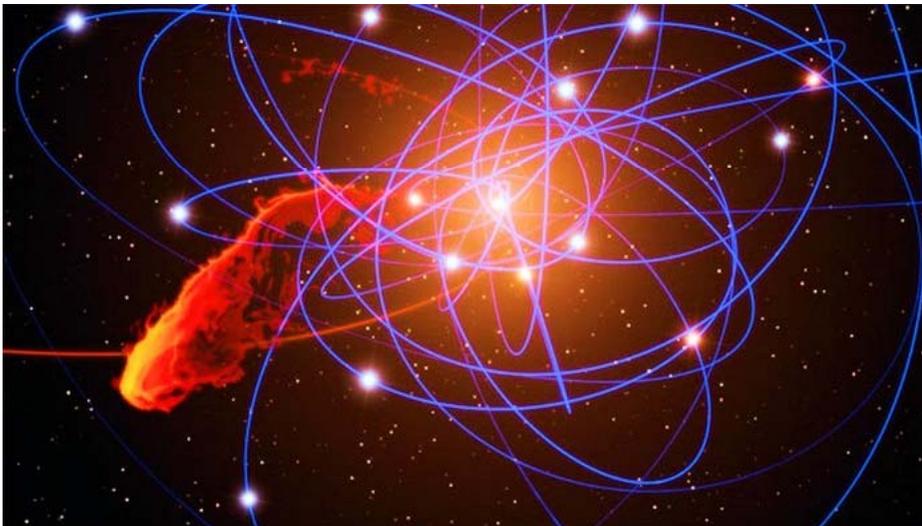




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Dynamique du gaz autour des trous noirs



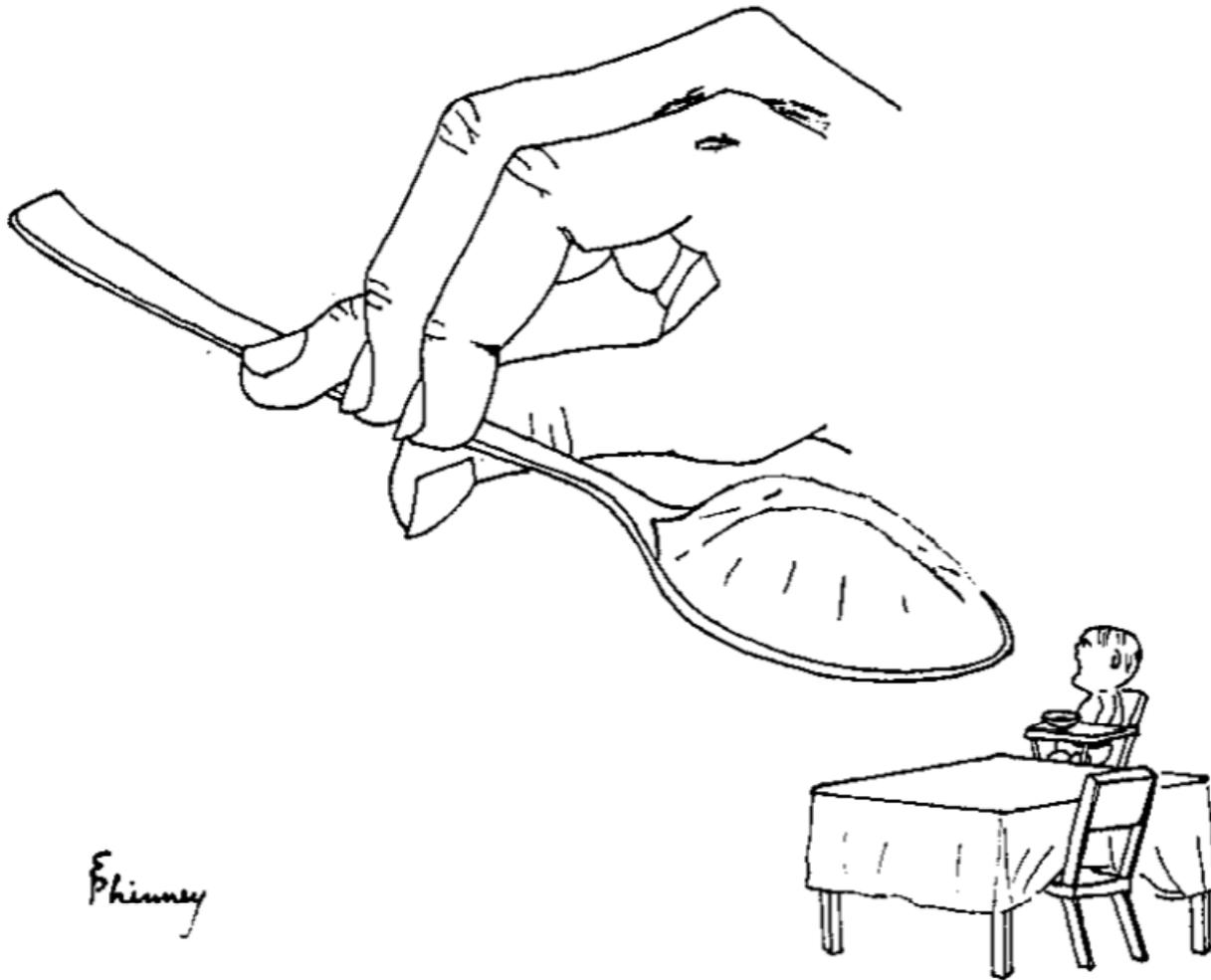
Françoise Combes



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} W (10^{46} 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

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

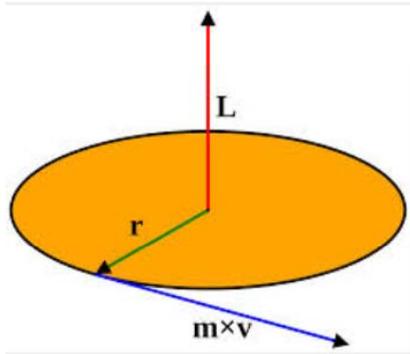
$$\text{à } 3 \text{ kpc, } L = 10^{29} \text{ cm}^2/\text{s}$$

5 ordres de grandeur

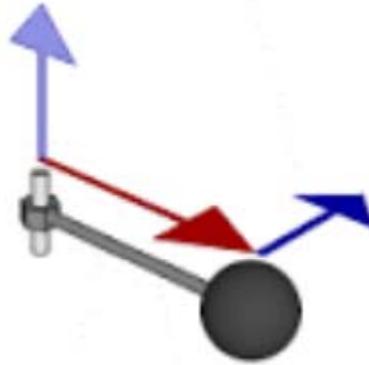


Couples de torsion pour réduire L

$$dL/dt = \tau$$



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

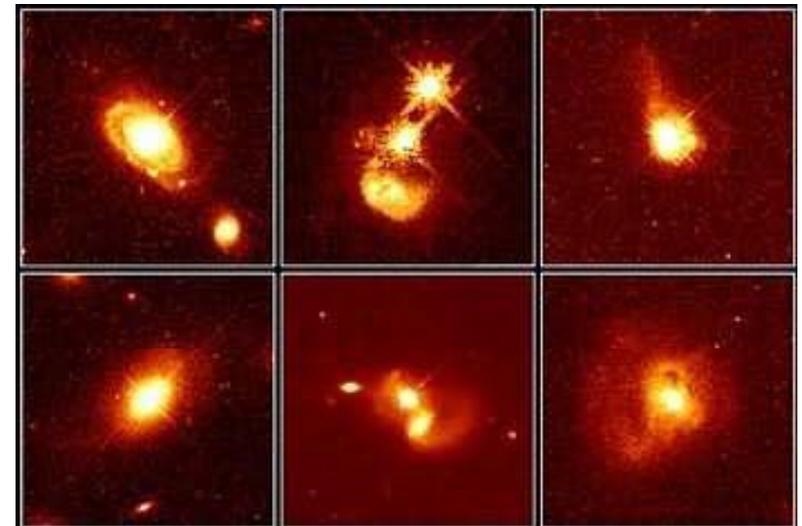


Force tangentielle nécessaire
Si le disque reste axisymétrique
→ force radiale seulement

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

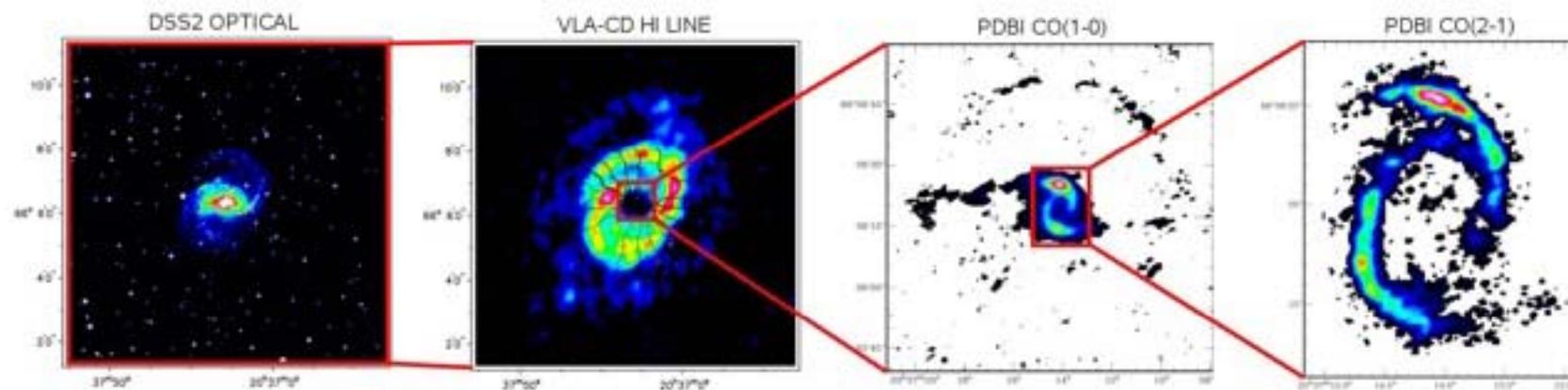
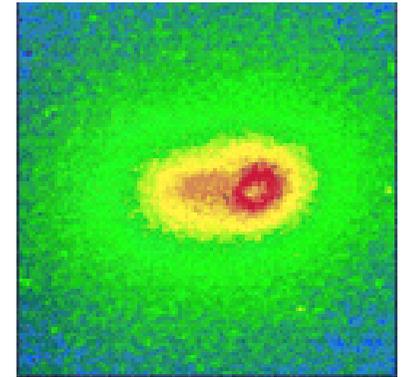


Processus dynamiques

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

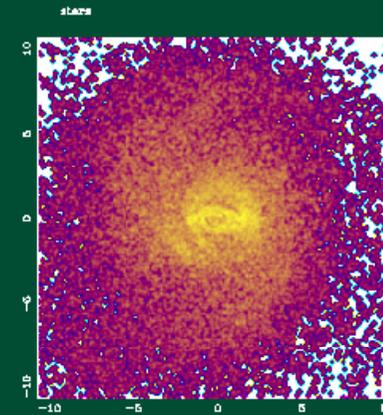
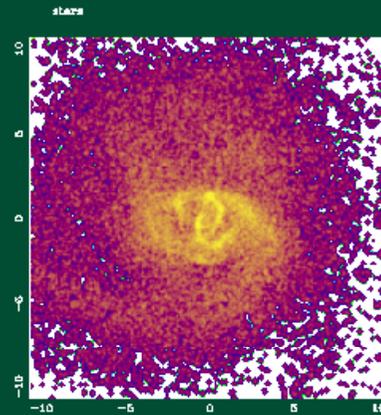
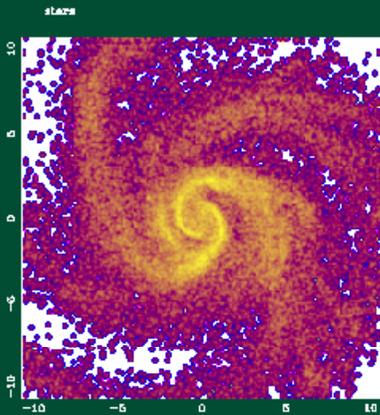
→ Asymétries $m=1$, gauchissement

→ Viscosité turbulente, friction dynamique

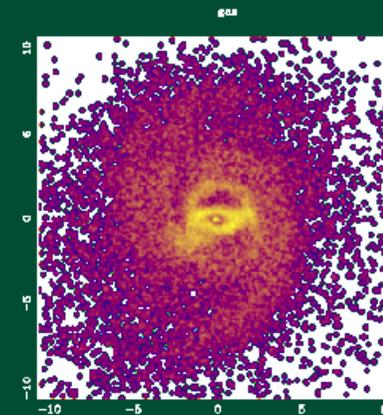
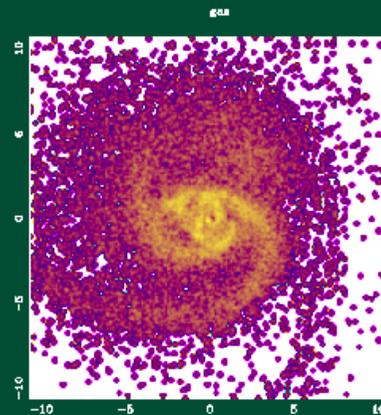
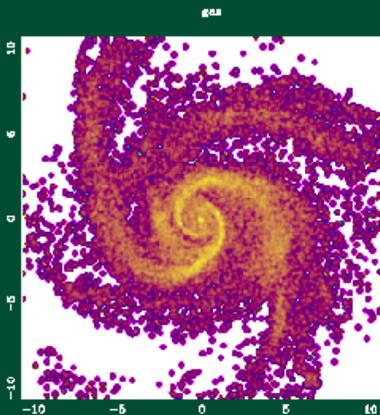


Formation de barres, par instabilité gravitationnelle

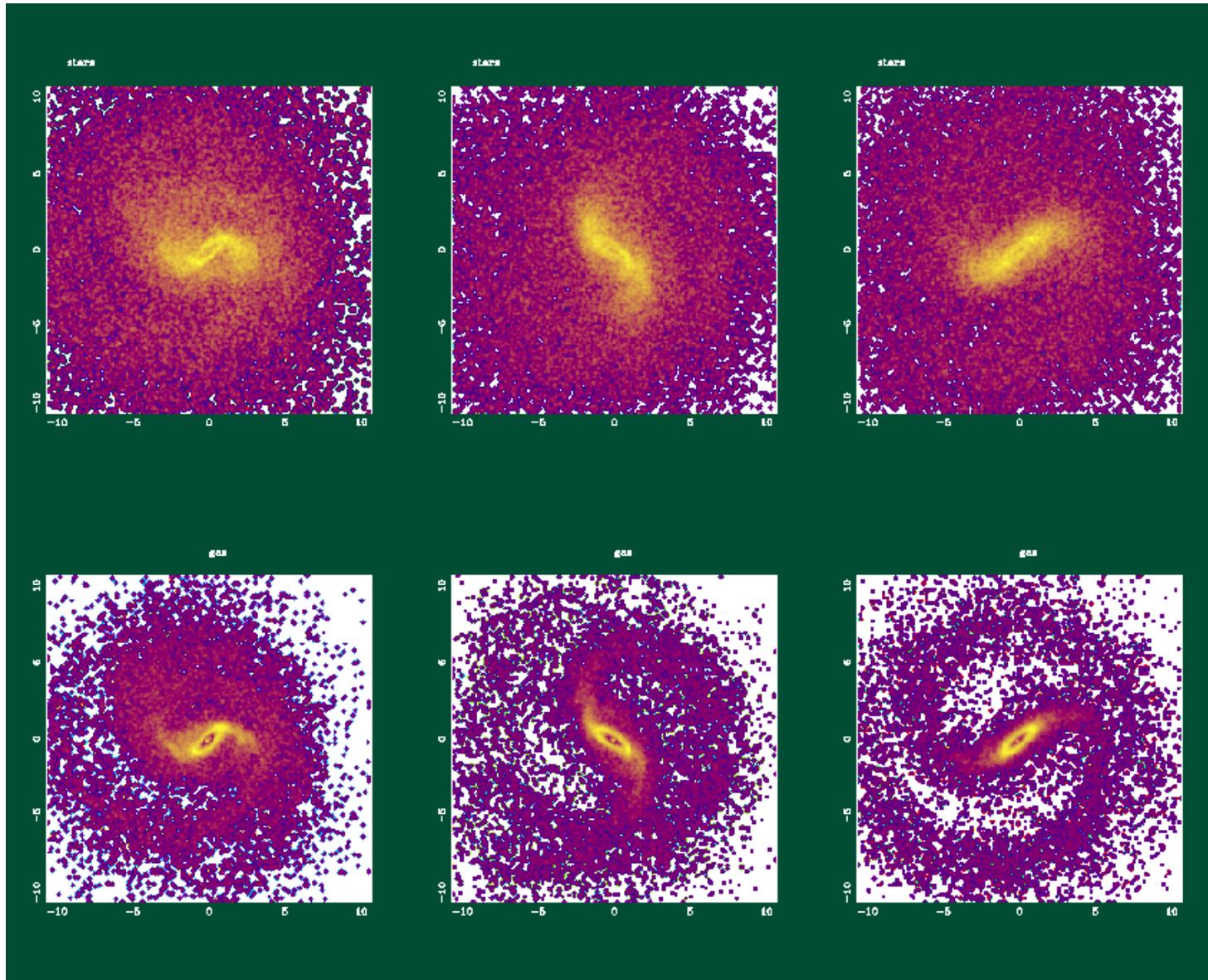
étoiles



gaz

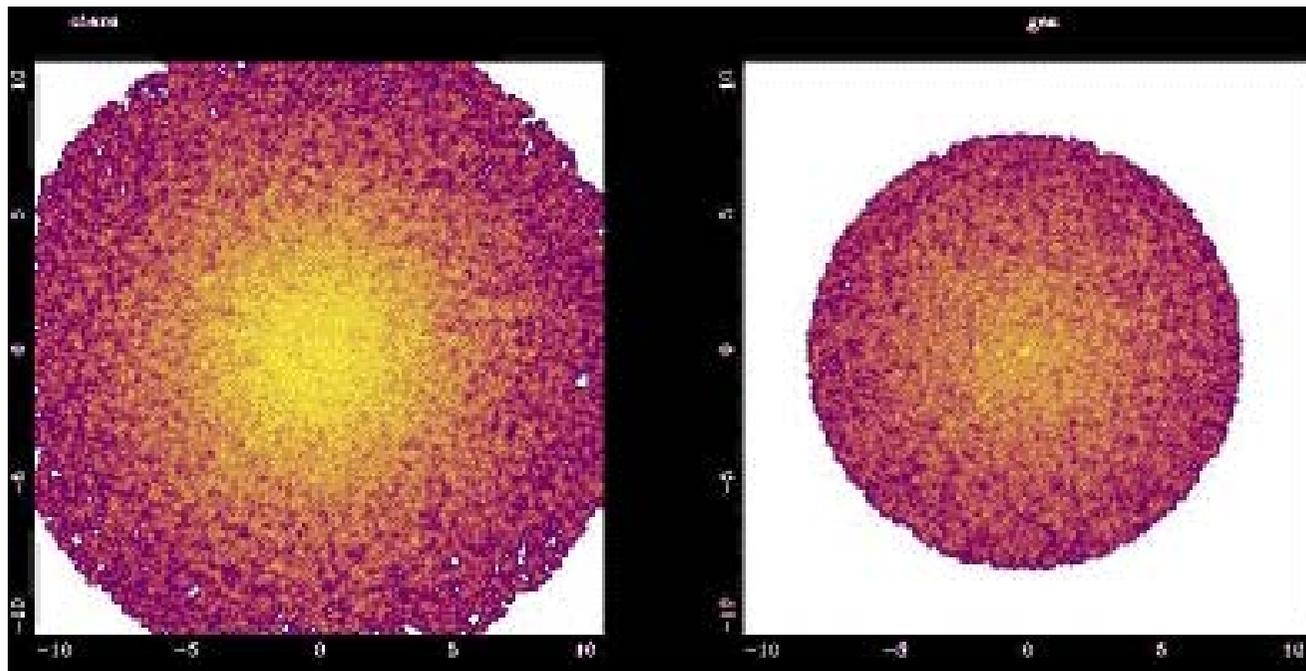


Temps Total : 1.2 Gyr



Formation d'anneaux aux résonances

Formation d'une barre



Résonances de Lindblad

Il existe toujours un référentiel Ω_b , où il existe un rapport rationnel entre la fréquence épicyclique κ 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

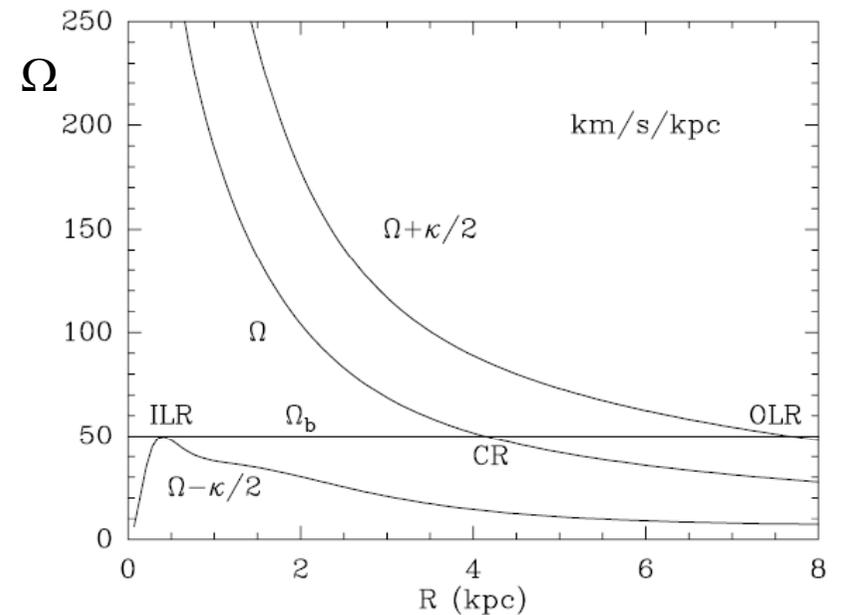
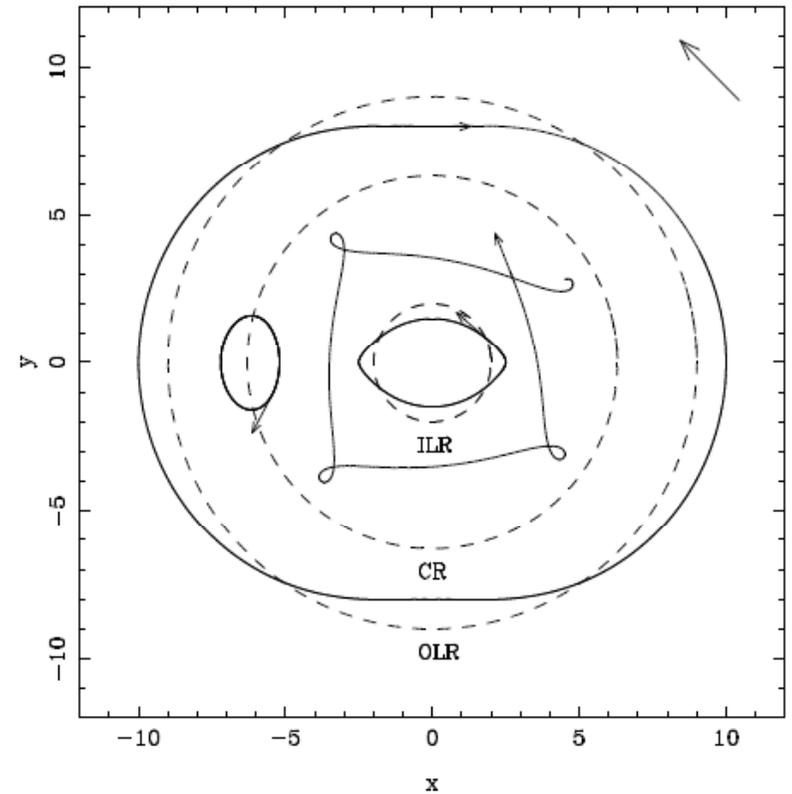
ILR: $\Omega_b = \Omega - \kappa/2$

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

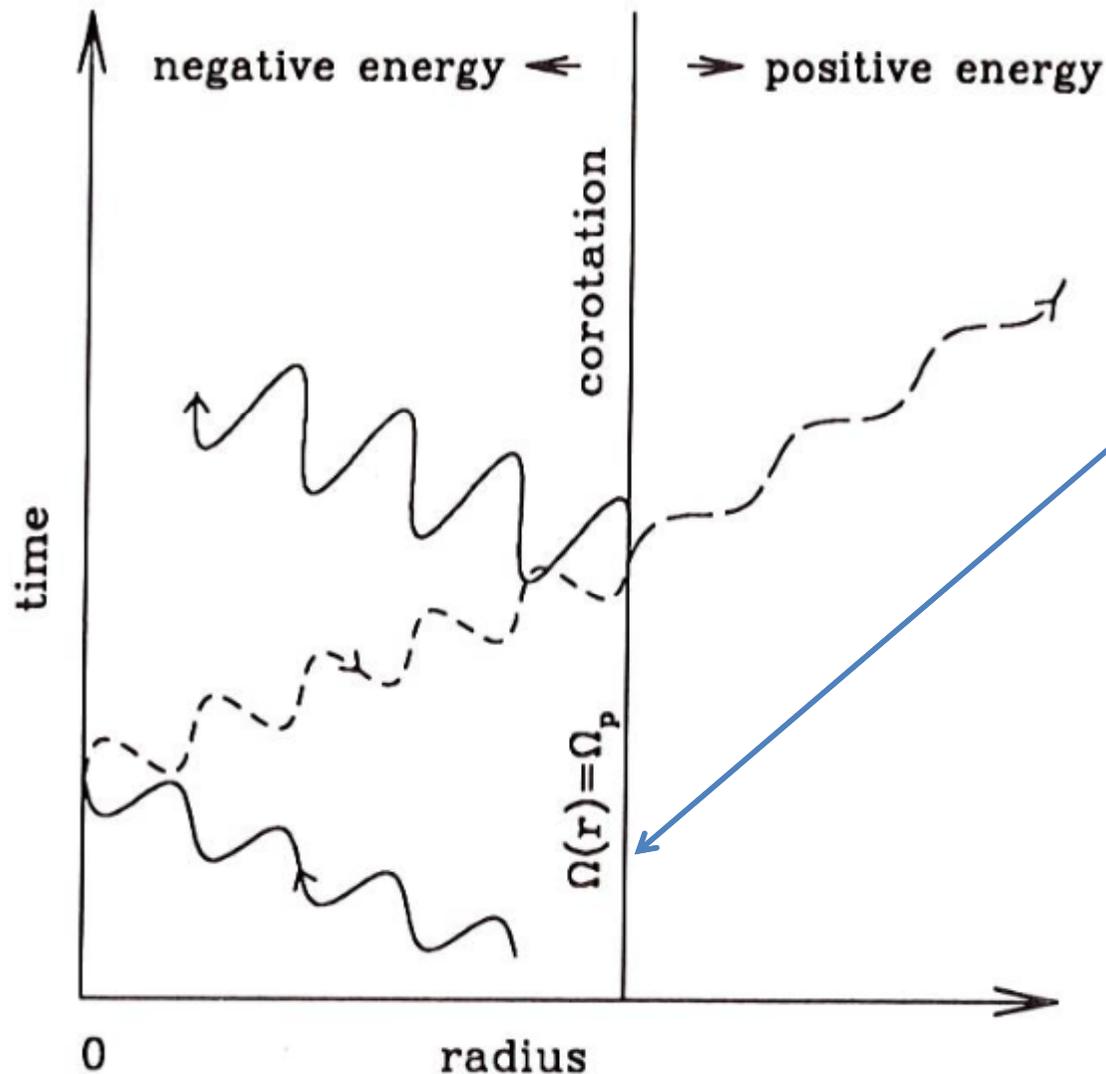
Corotation: $\Omega_b = \Omega$

Il peut y avoir 0, 1 ou 2 ILRs,

toujours une CR, OLR



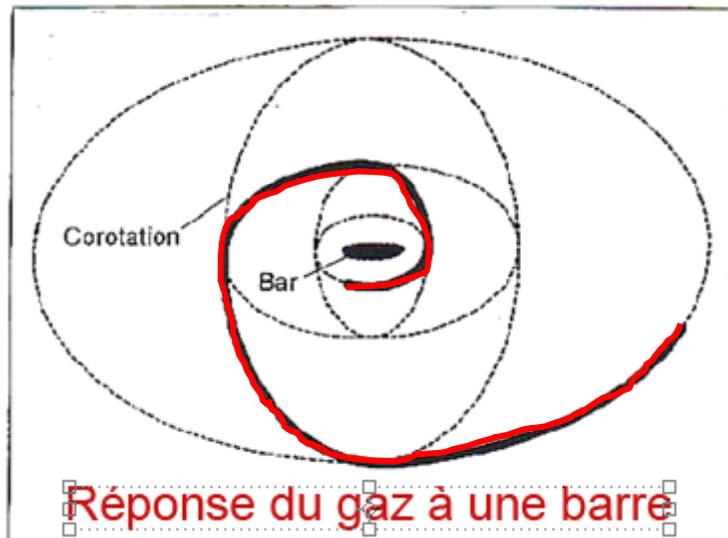
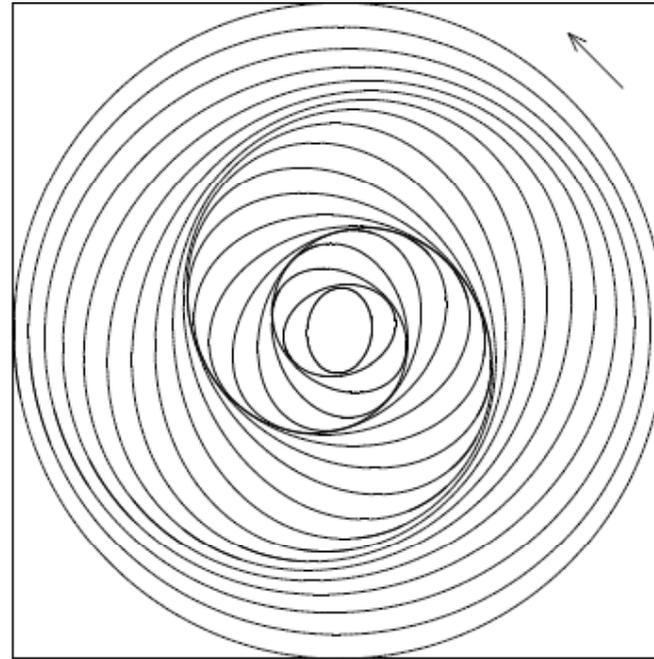
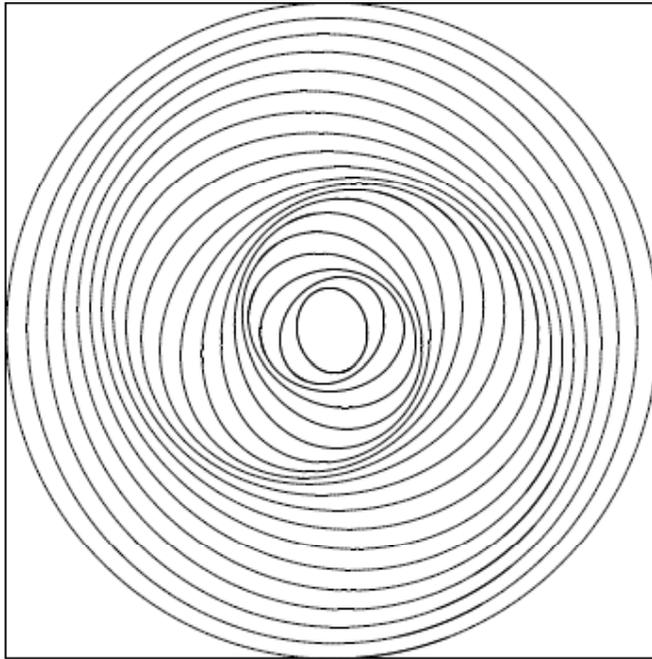
Amplification des ondes à la Corotation



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



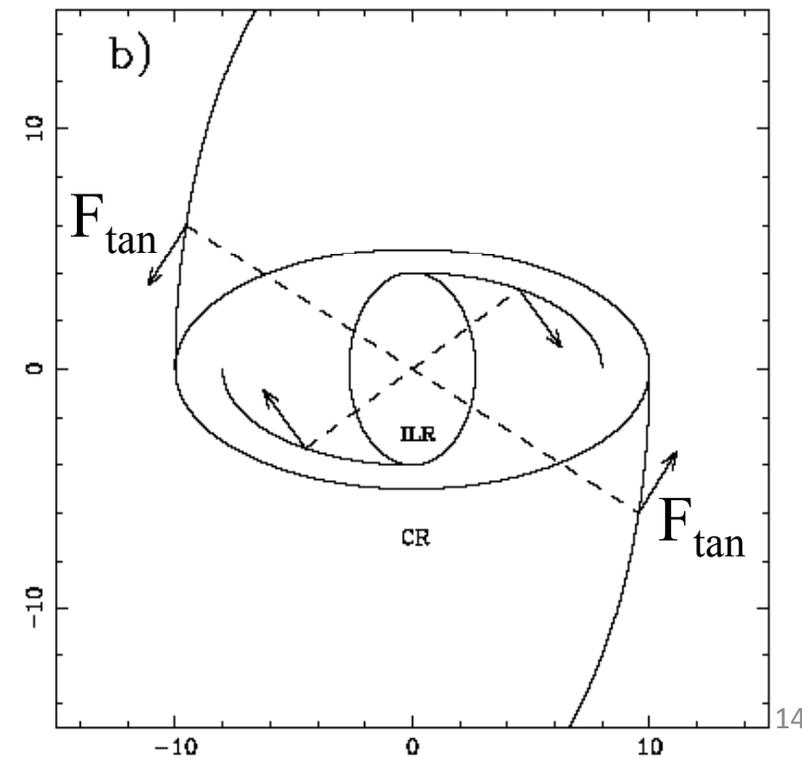
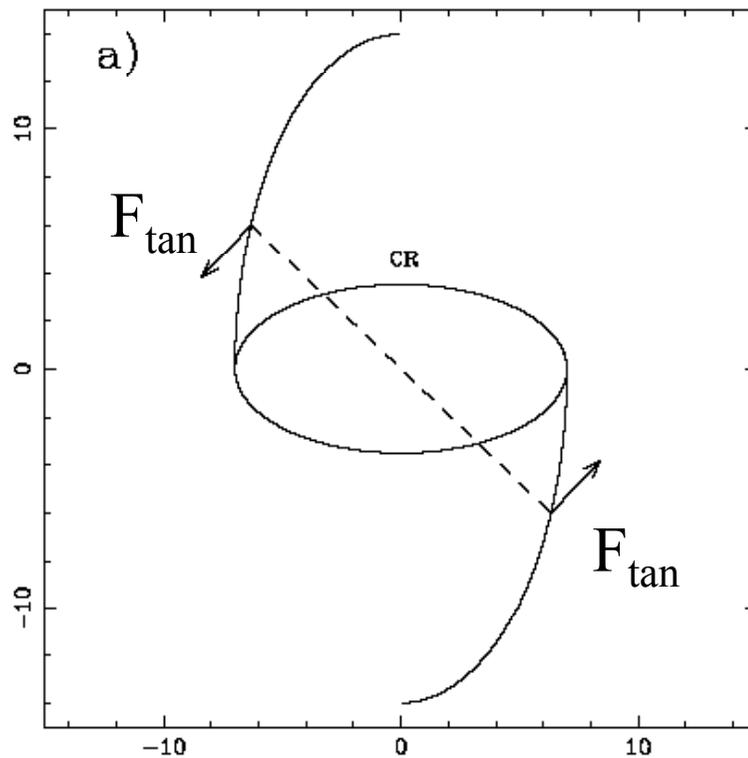
Dans un potentiel barré, le gaz suit des orbites allongées qui tournent de 90° à chaque résonance

Couples exercés par la barre sur le gaz

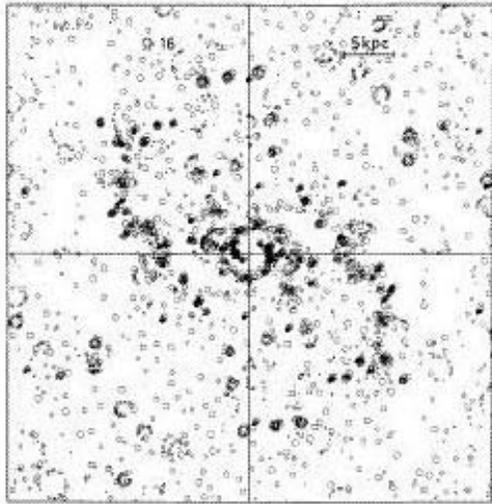
Les couples changent de signe à chaque résonance, et peuvent se déduire de simples arguments géométriques

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

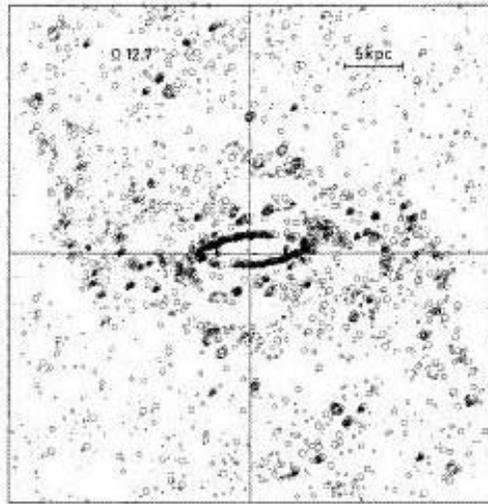
A l'extérieur de la CR, au contraire le gaz **s'accumule à l'OLR**



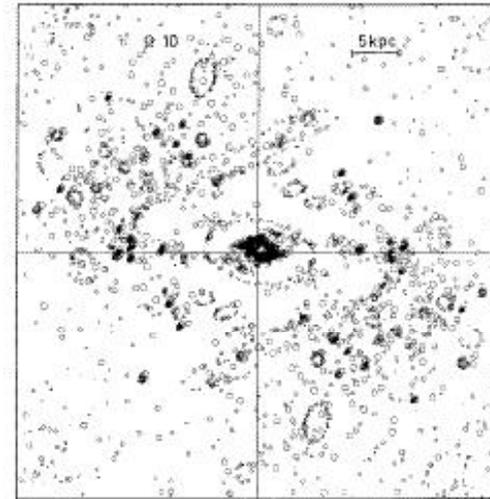
Formation d'anneaux



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



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



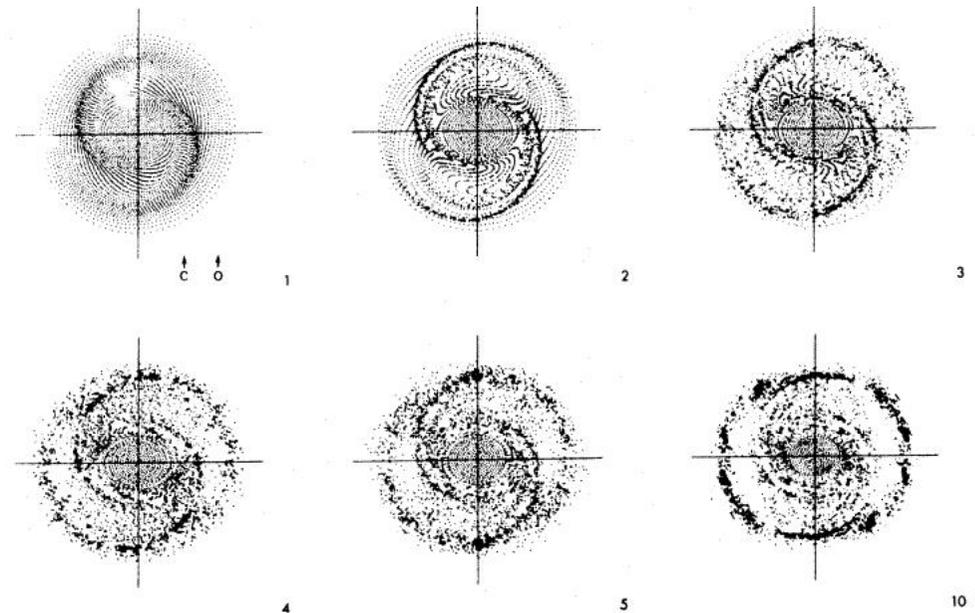
$\Omega_b = 10 \text{ km/s/kpc}$

ILR

Combes & Gerin 1985

Formation d'un anneau à l'OLR

Schwarz, 1981



Formation d'anneaux aux résonances

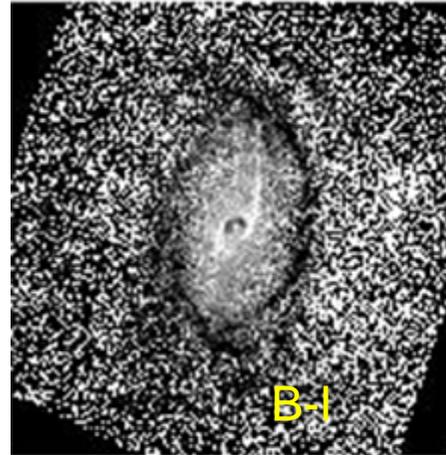
Donne une idée de V_s
(vitesse du son)

→ pas trop de viscosité

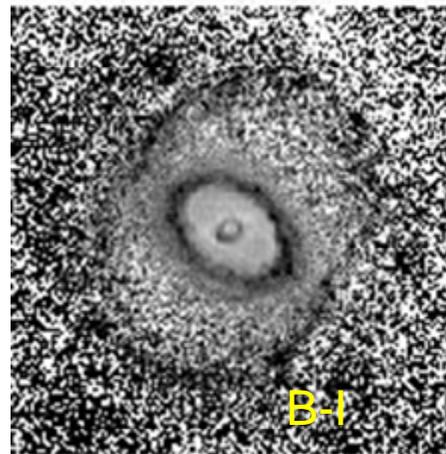
Les couples de
gravité changent de
signe à chaque résonance

→ Relatif équilibre

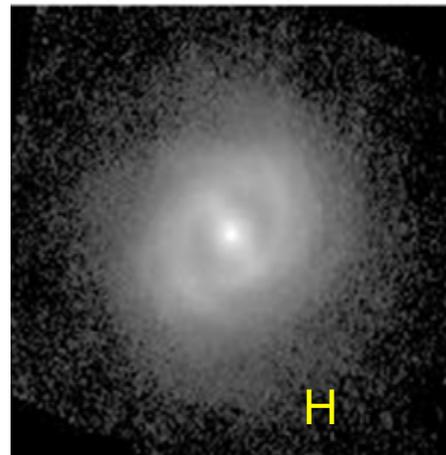
Buta & Combes 2000



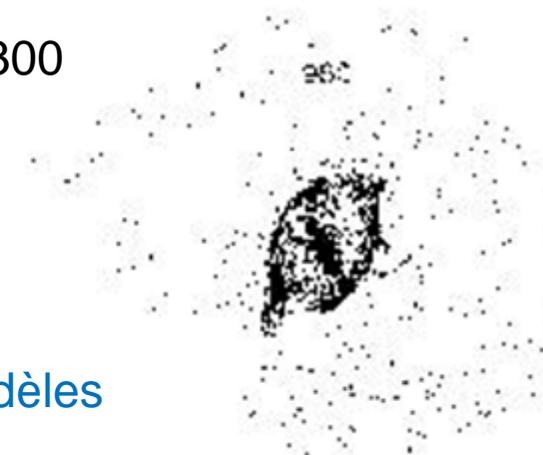
N1433



N3081



N6300

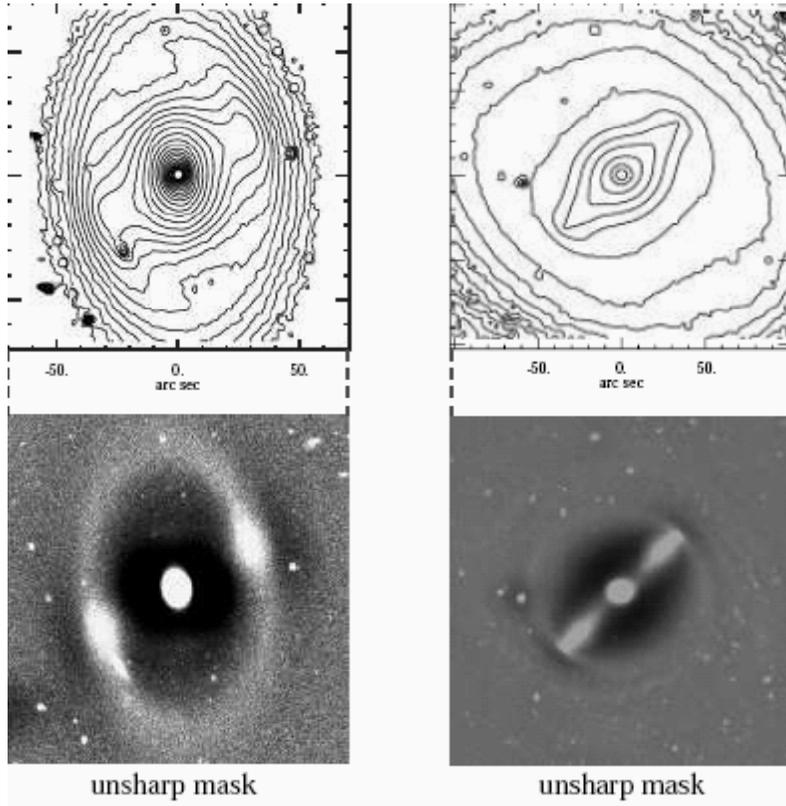


modèles

Barres nucléaires

Phénomène observé depuis longtemps,
mais expliqué seulement
depuis quelques années

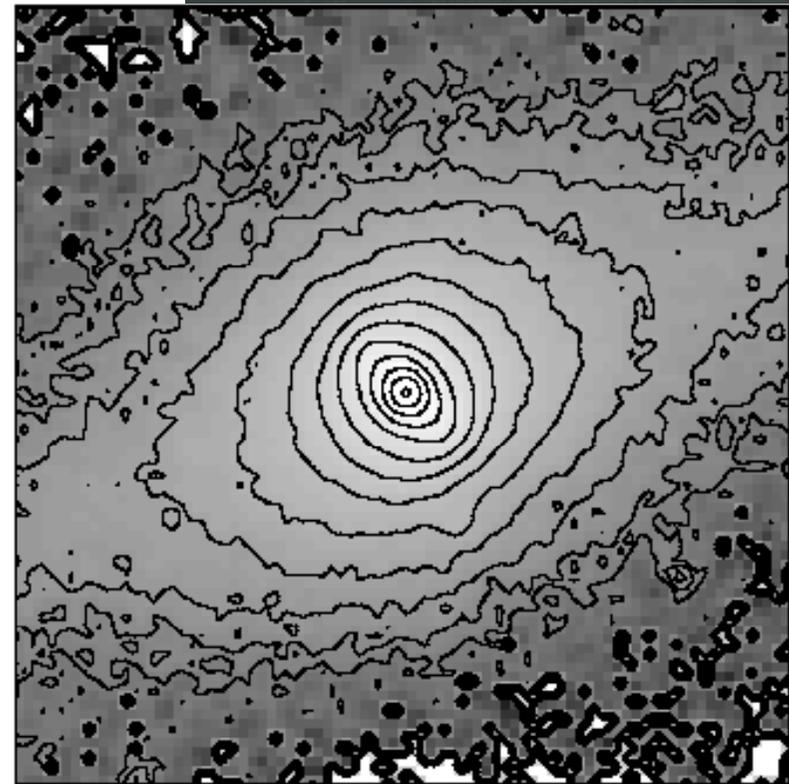
NGC 4314



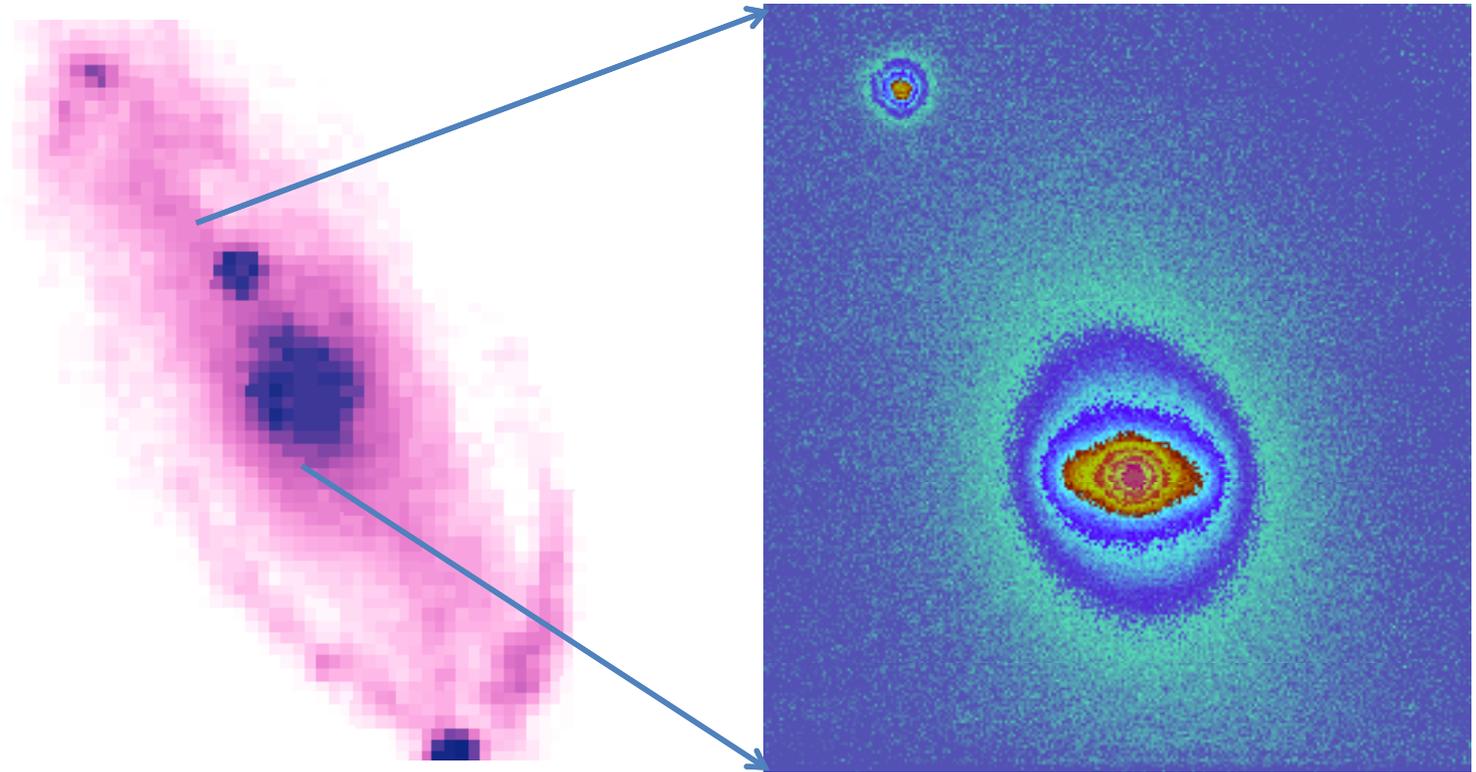
Erwin 2004

NGC 5850

Contours + couleur B-V



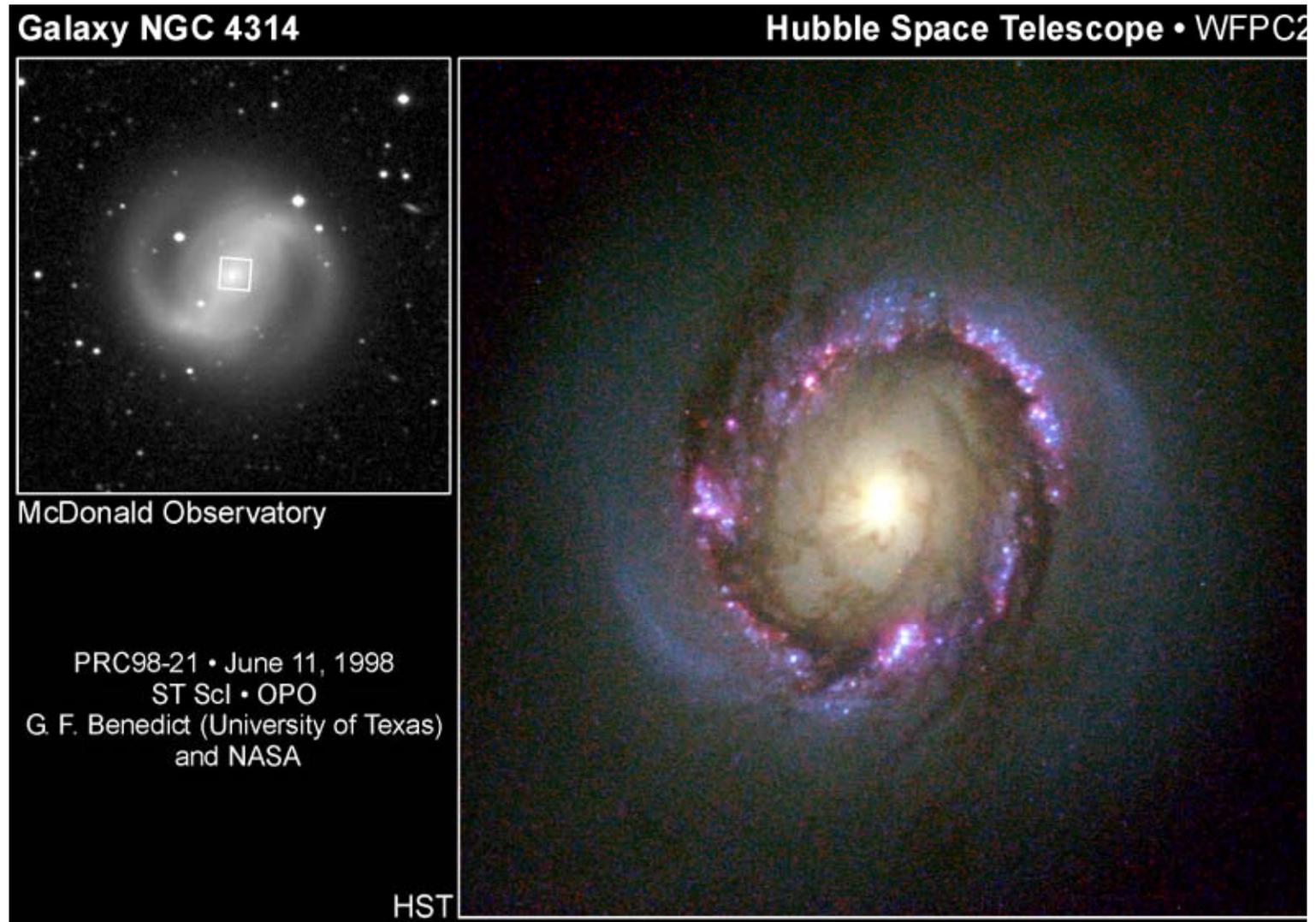
NGC 5728
DSS
+CFH
Adaptive Optics
NIR



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

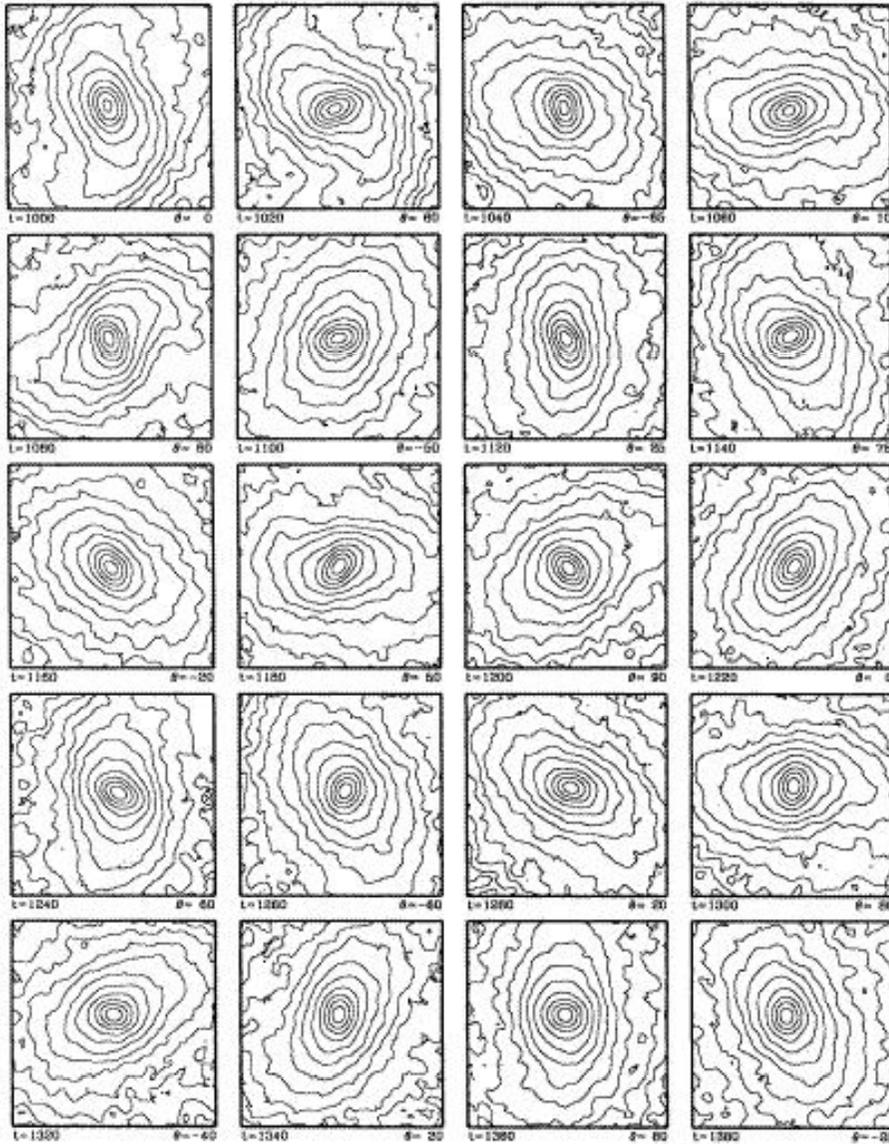
--La courbe de rotation (Ω) monte de plus en plus au centre, de même le taux de précession des orbites allongées ($\Omega - \kappa/2$)

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

 découplage

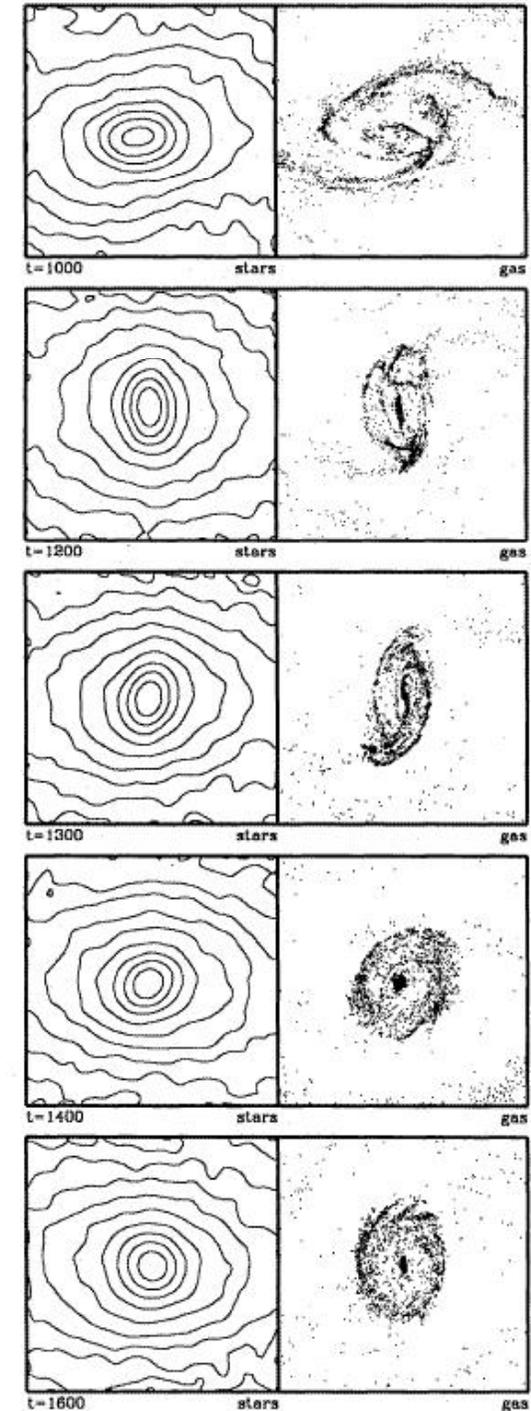
Pour éviter le chaos, il y a une résonance commune entre les barres primaire et secondaire

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



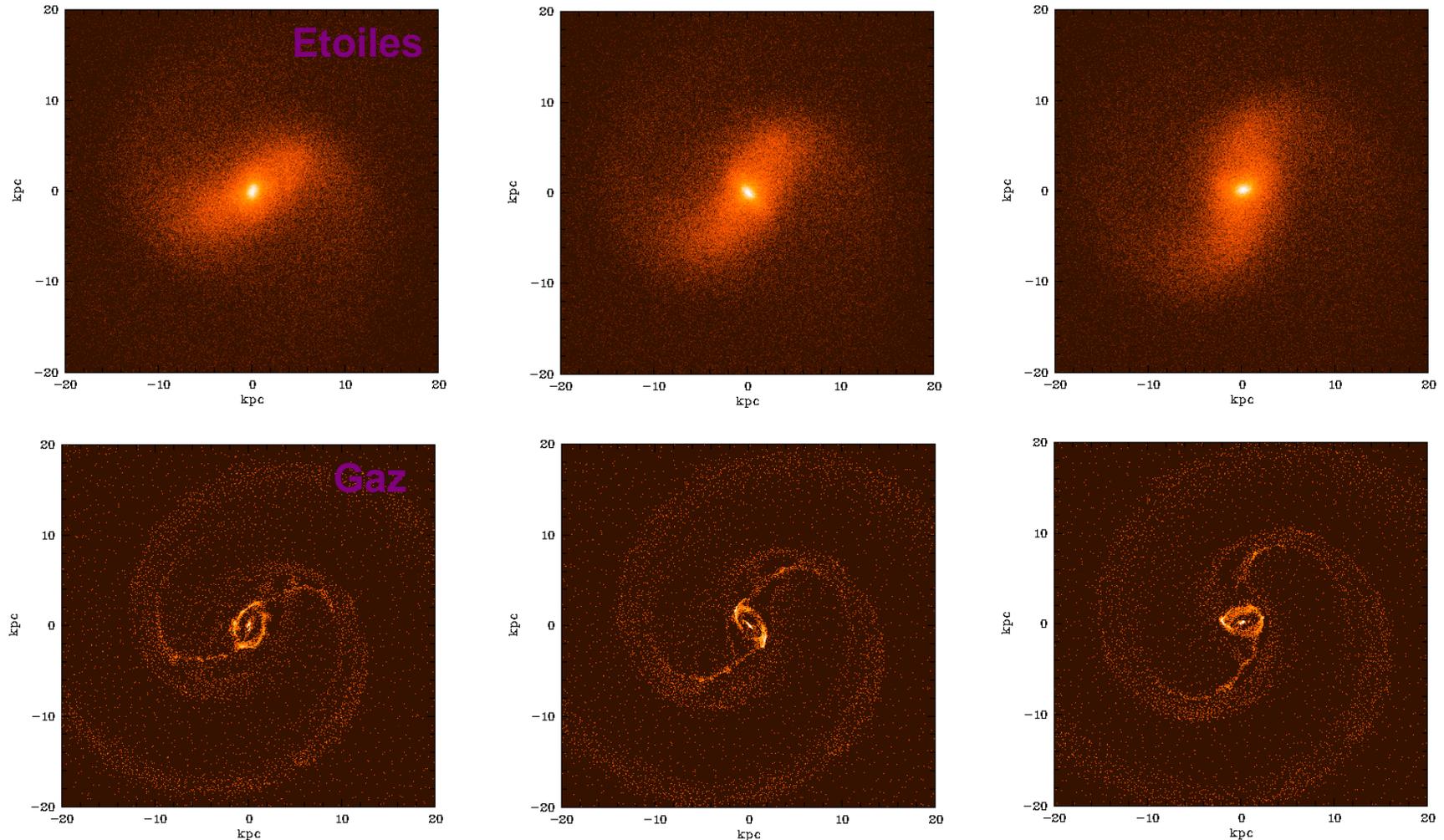
*Friedli &
Martinet 93*

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)

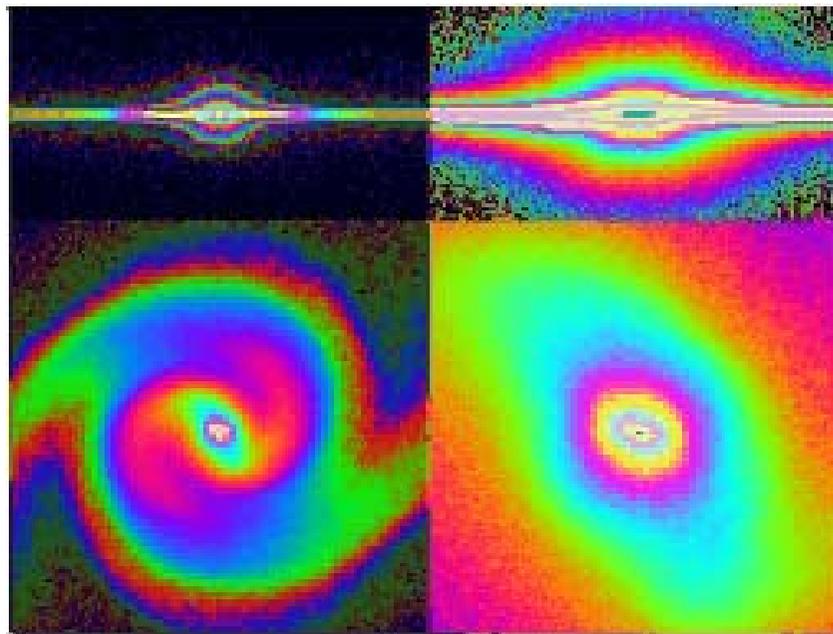
t

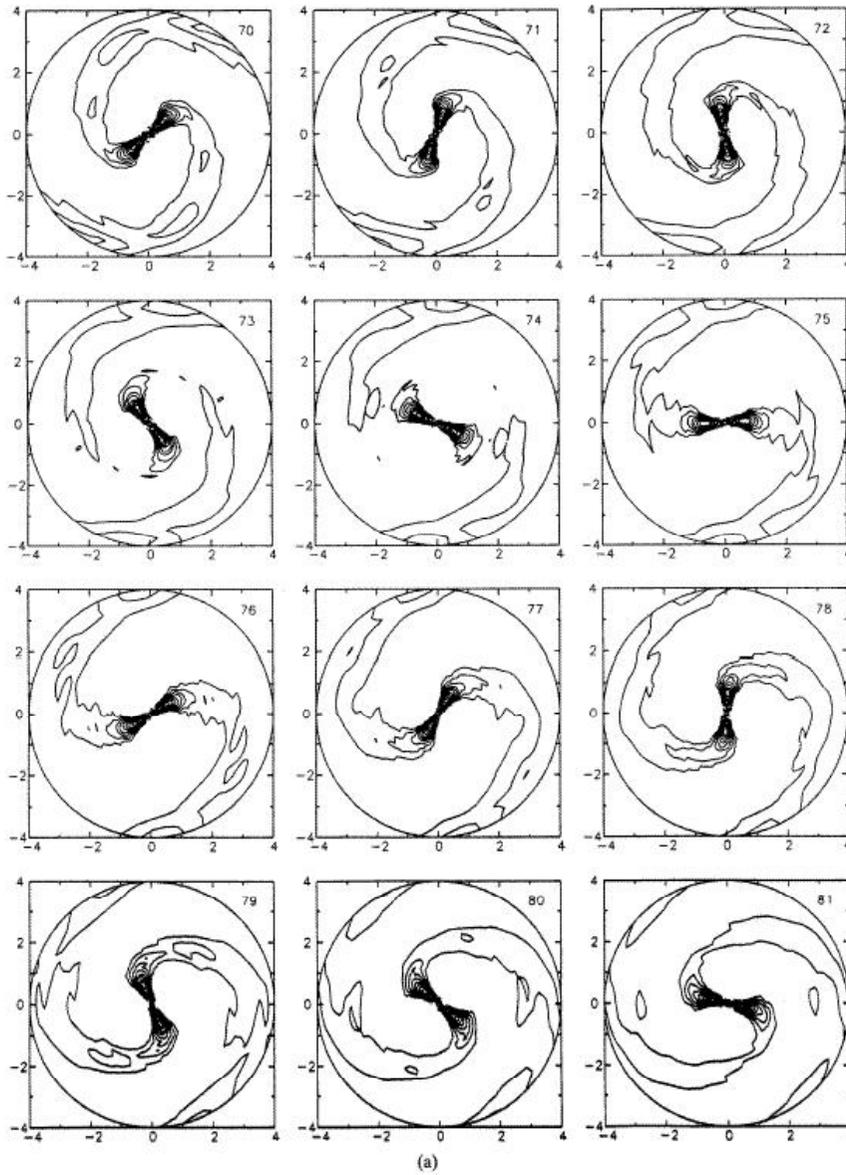
Barres et doubles barres

zoom

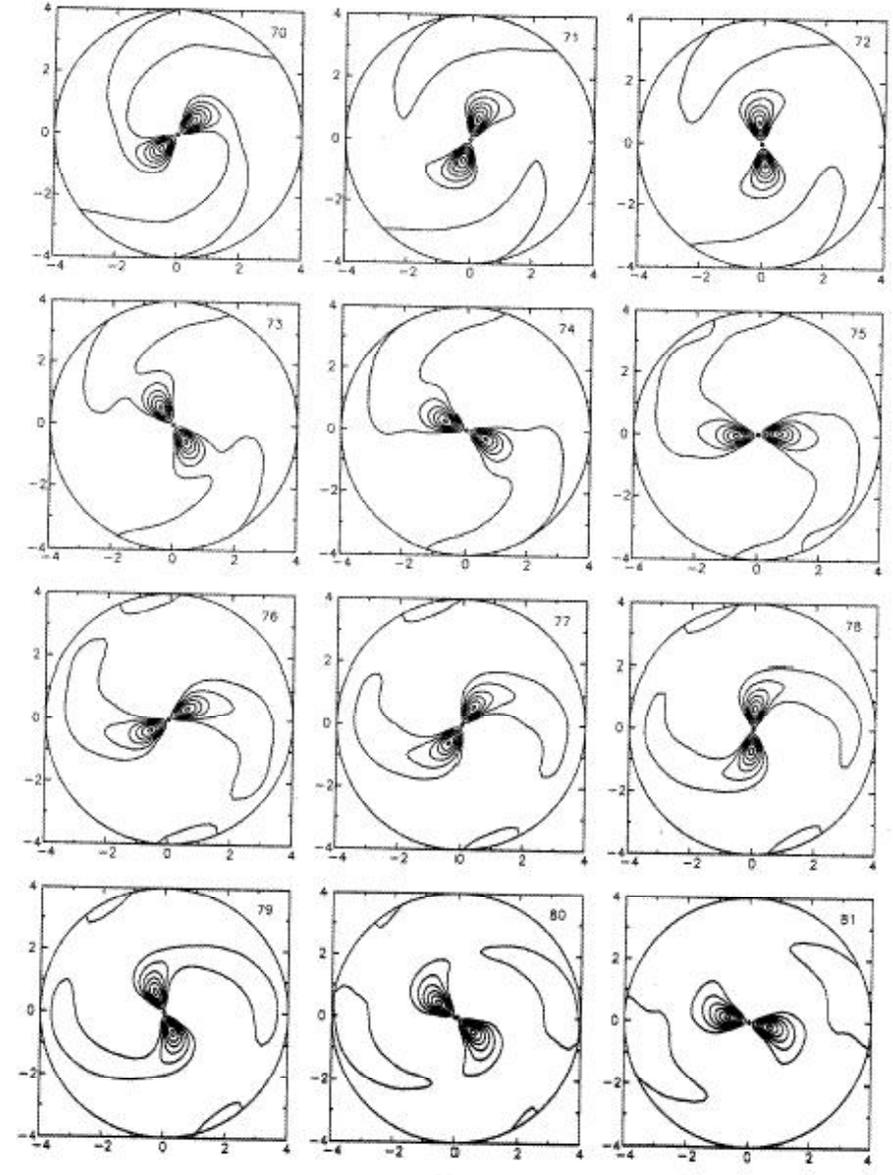
Par la tranche

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

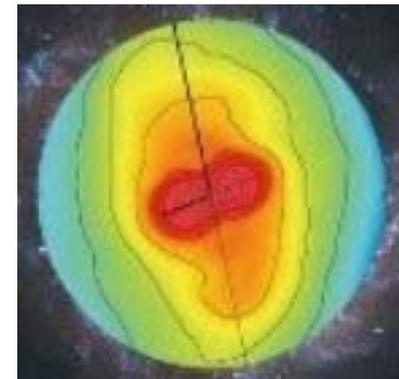
La barre secondaire permet d'aller plus loin, de prendre le relai

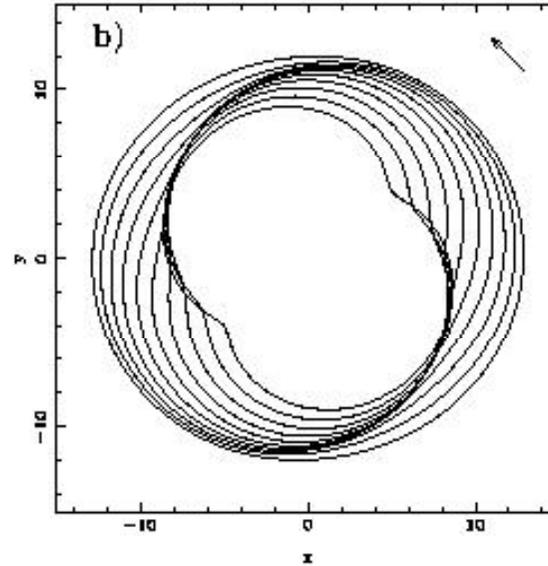
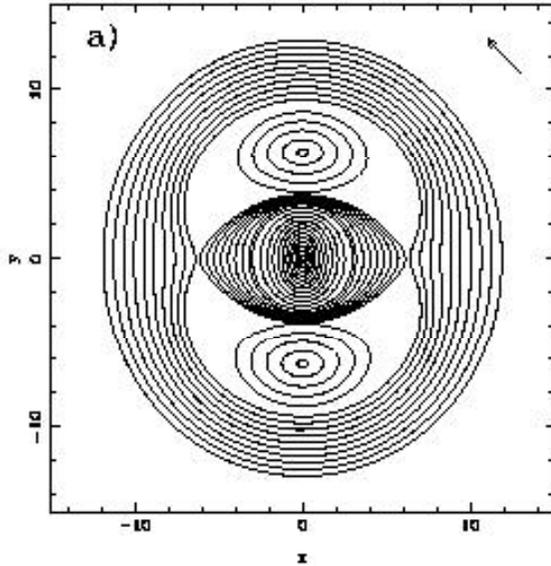
Quelles sont les orbites à l'intérieur de la barre secondaire??

Spirale nucléaire?

Troisième barre?

Combien de résonances?





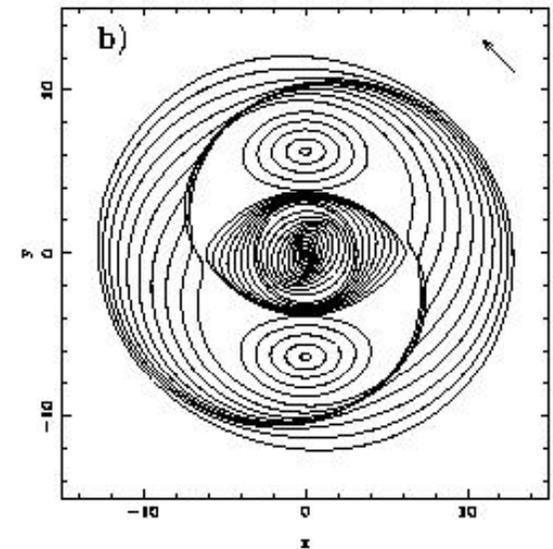
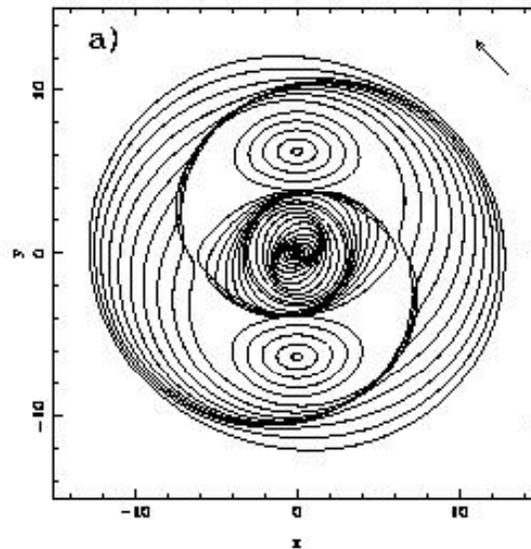
Orbites périodiques dans un potentiel en $\cos 2\theta$

Le gaz tend à suivre ces orbites, mais tourne graduellement de 90° 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

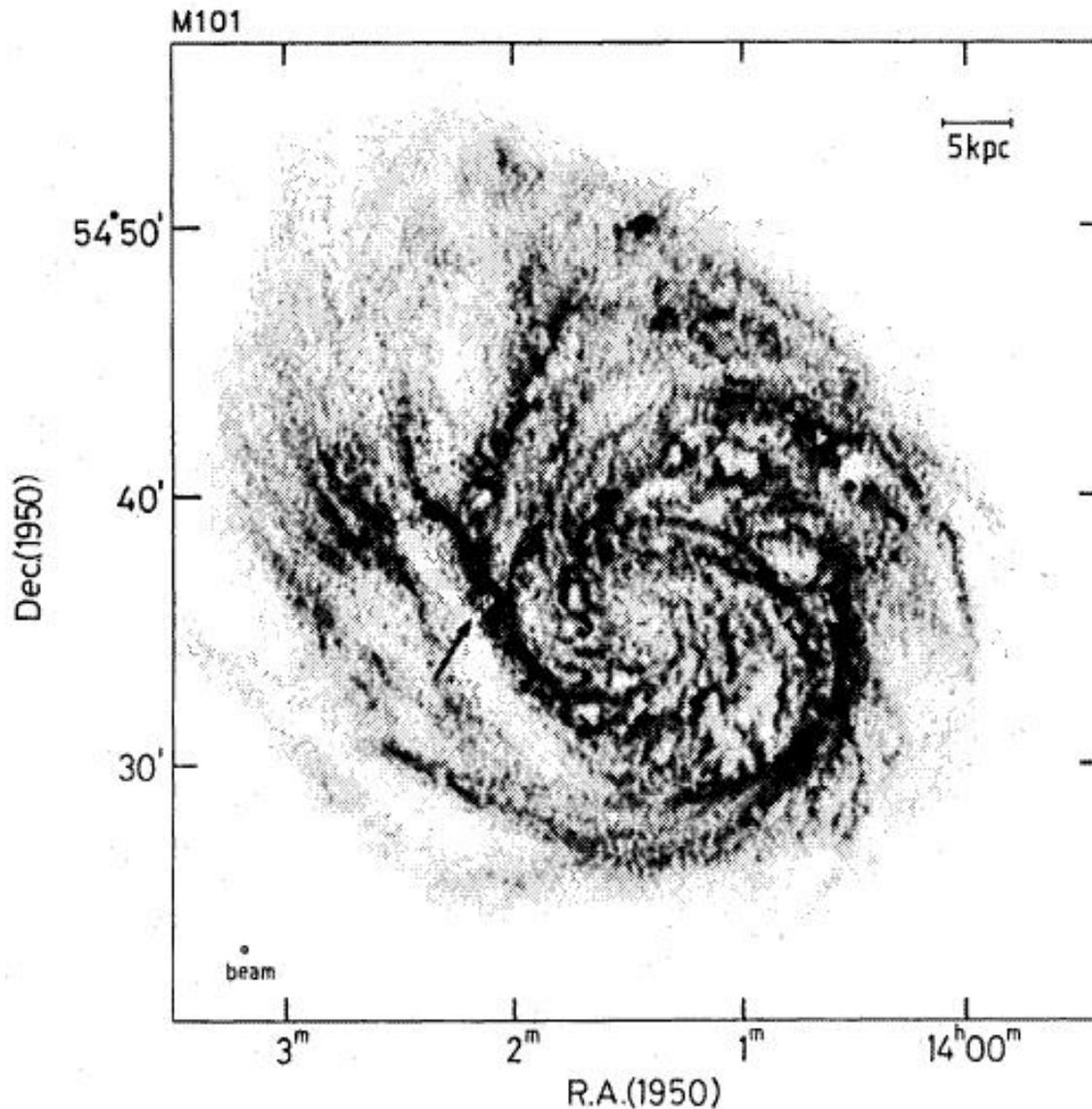
Richter & Sancisi (1994) plus de la moitié est très asymétrique (parmi 1700 galaxies)

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

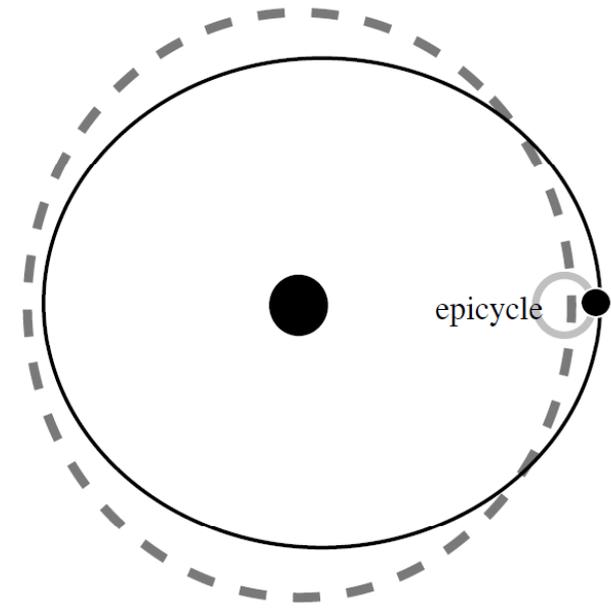
Principale difficulté: Le taux de précession différentielle très rapide $\Omega - \kappa$ près du centre

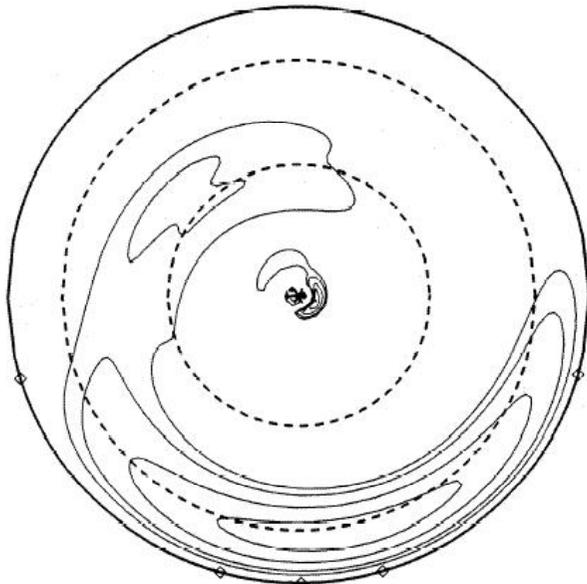
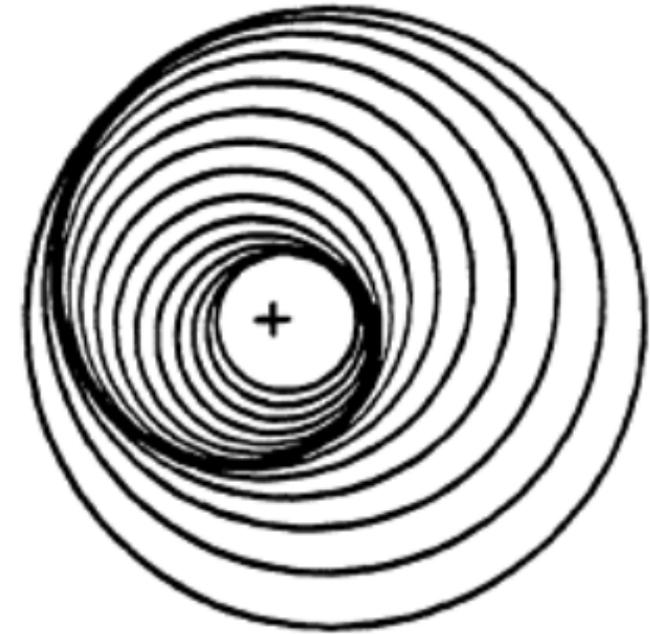
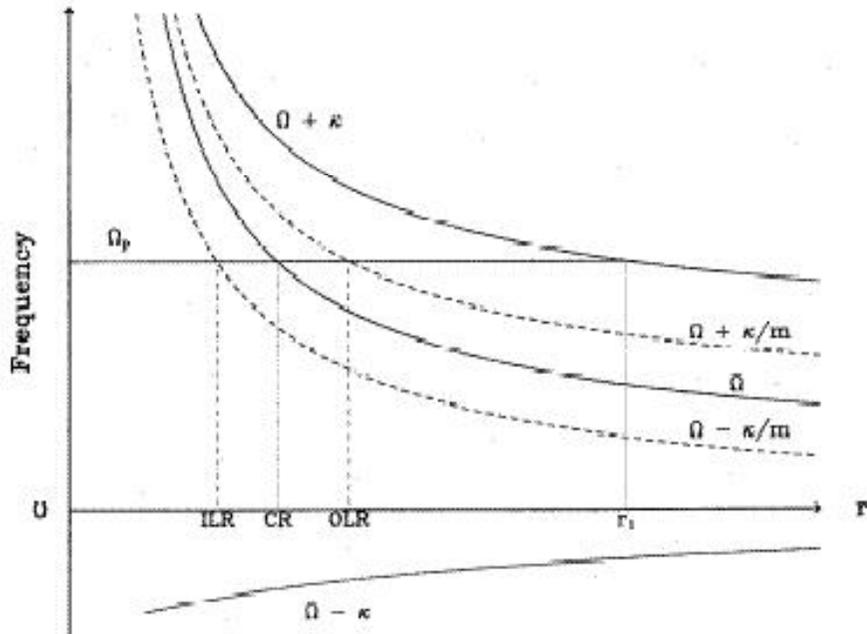
Excepté pour un disque purement Képlérien, potentiel en $1/R$ où $\Omega = \kappa$

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

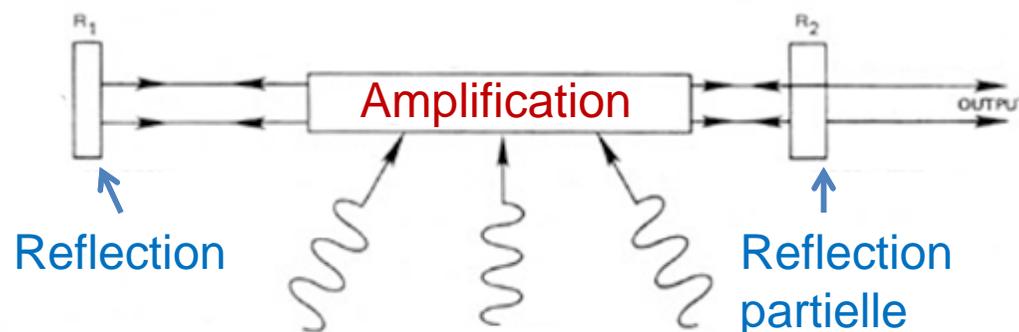
Energie et Moment angulaire de l'onde sont:

- 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

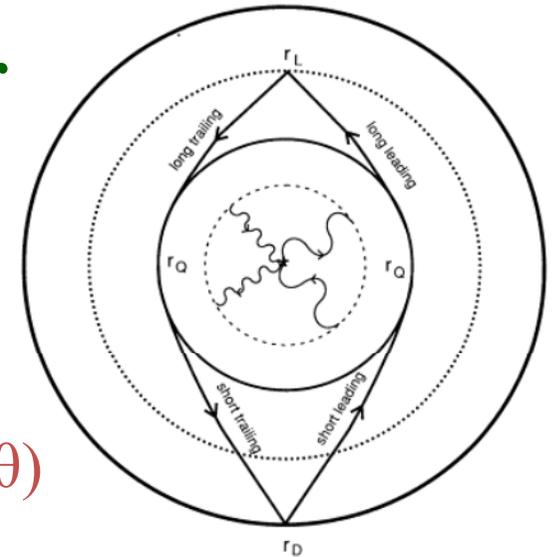
Si cette amplificateur est couplé à une réflexion aux résonances ou aux frontières, on a un WASER, *comme dans une cavité Laser*



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

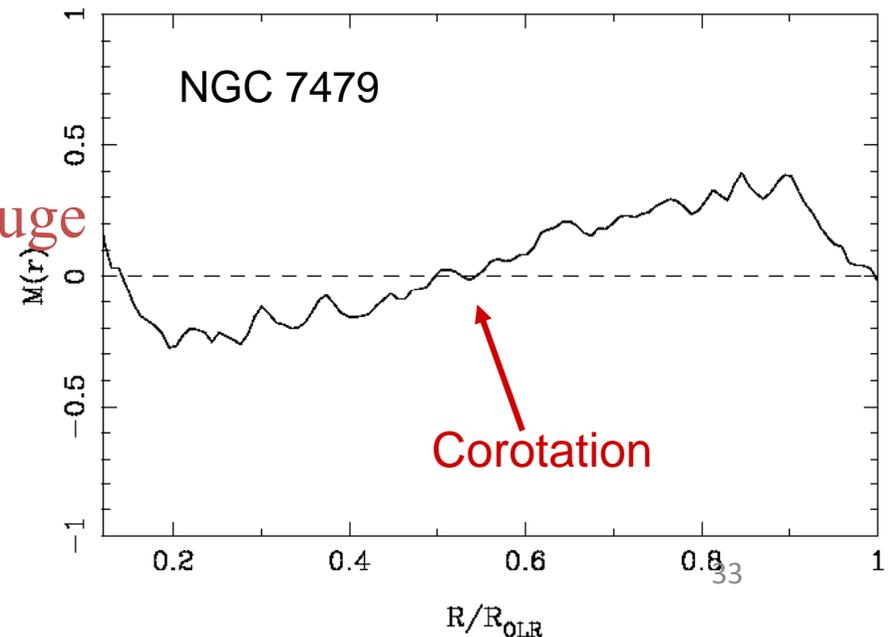
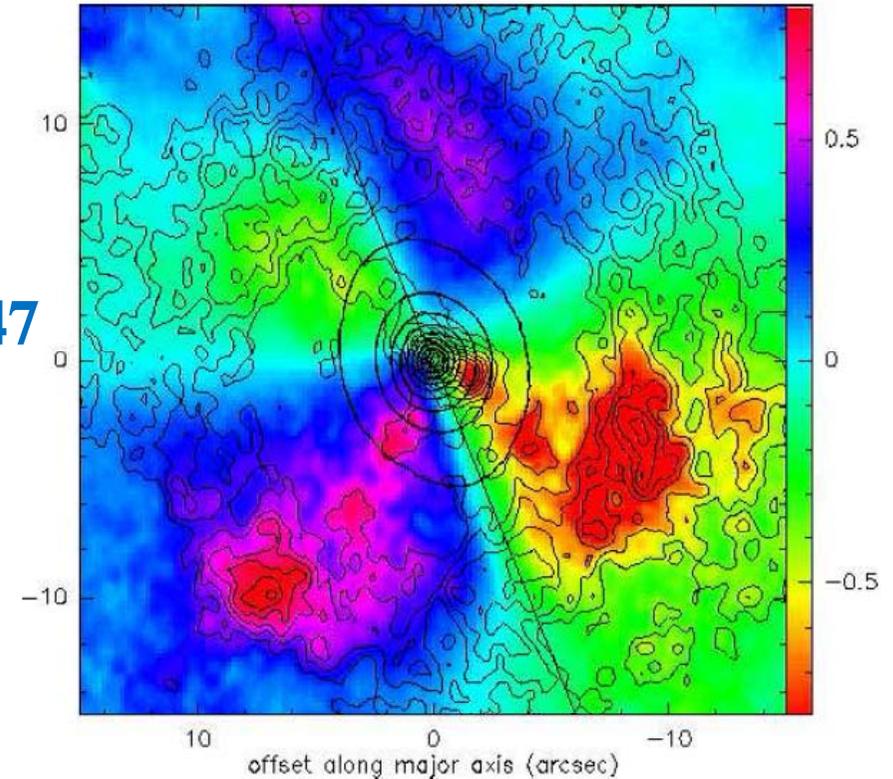
Carte des couples pour NGC 3147

Casasola et al 2008

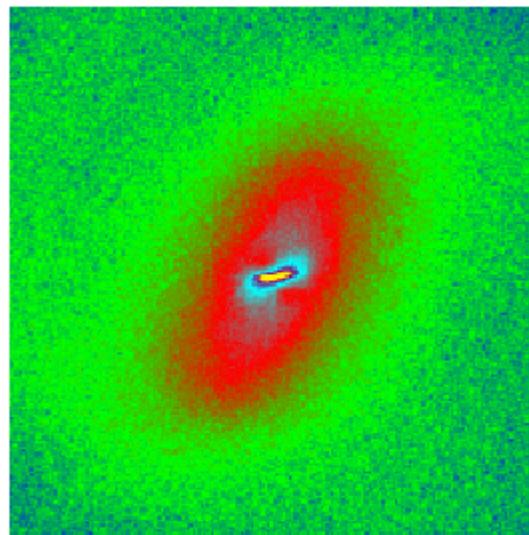
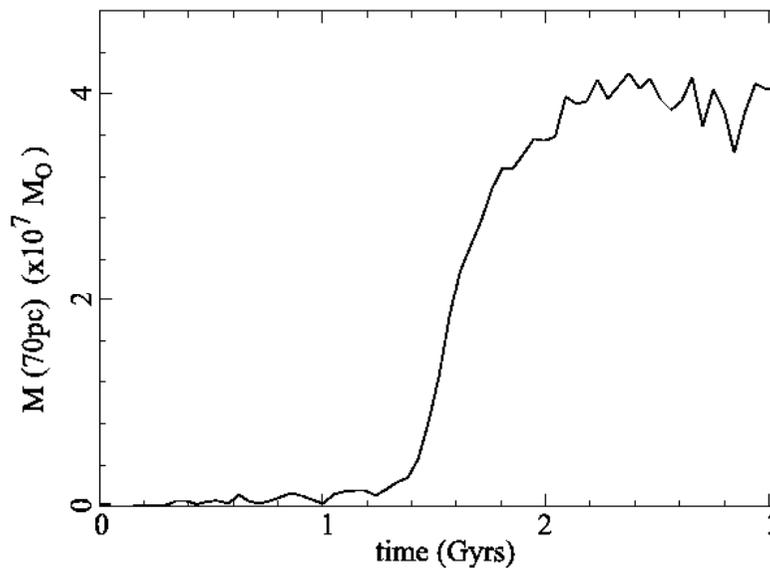
Action sur le gaz: signe des couples, dépend du déphasage entre le gaz et le potentiel dû aux étoiles

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

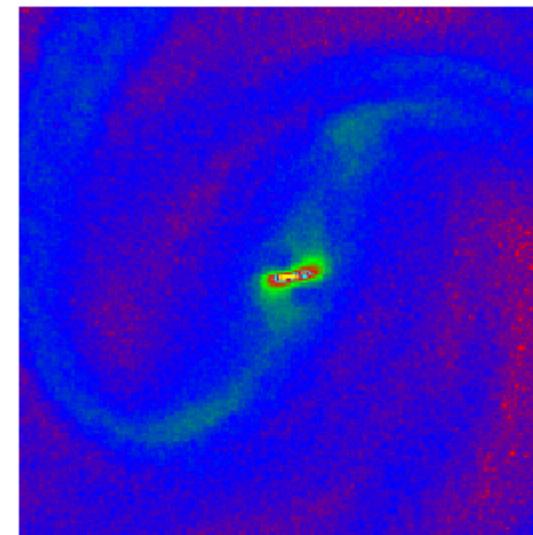
Le gaz donne L aux étoiles
→ Affaiblit ou détruit la barre



Flux de gaz avec deux barres



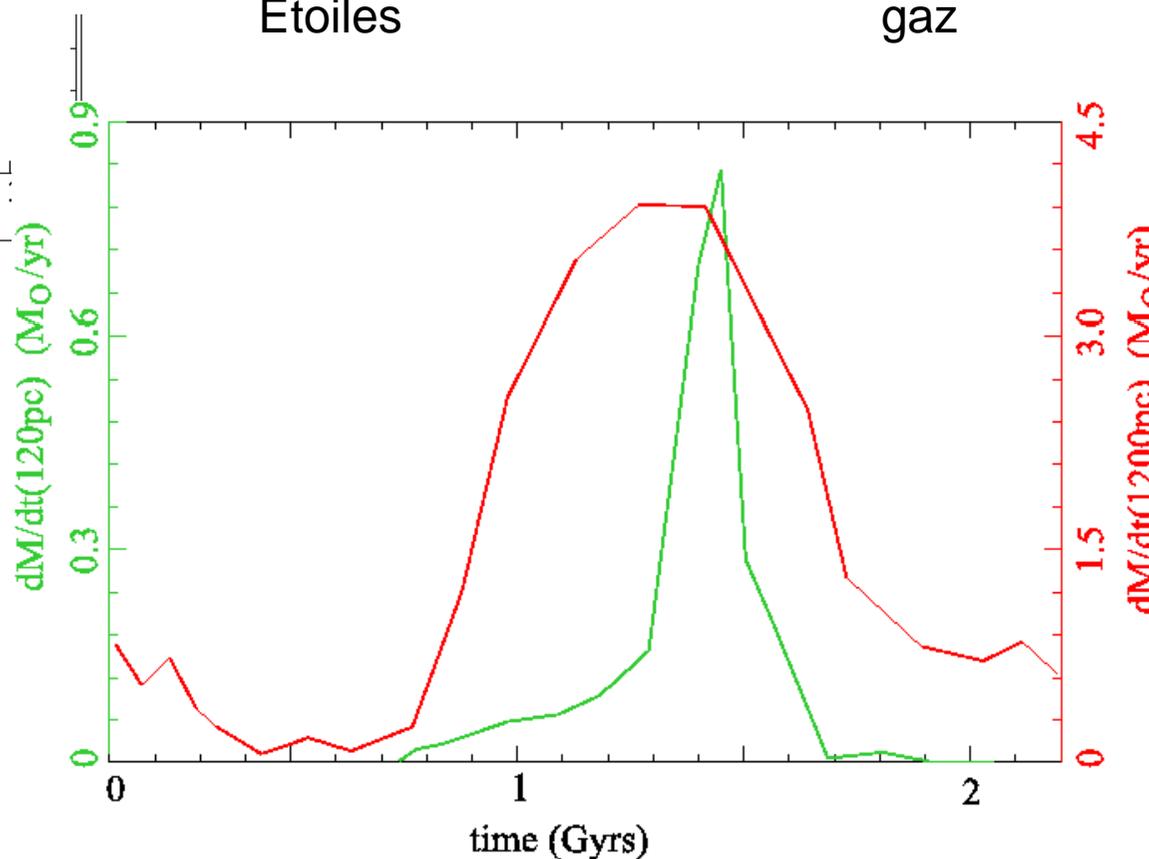
Etoiles



gaz

Flux de gaz cumulé (70pc)

Flux dans 20pc et dans in 200pc



NGC2782:

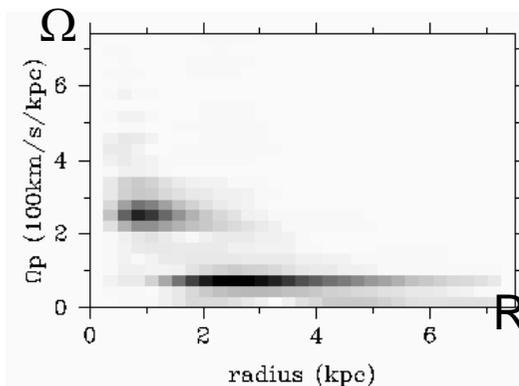
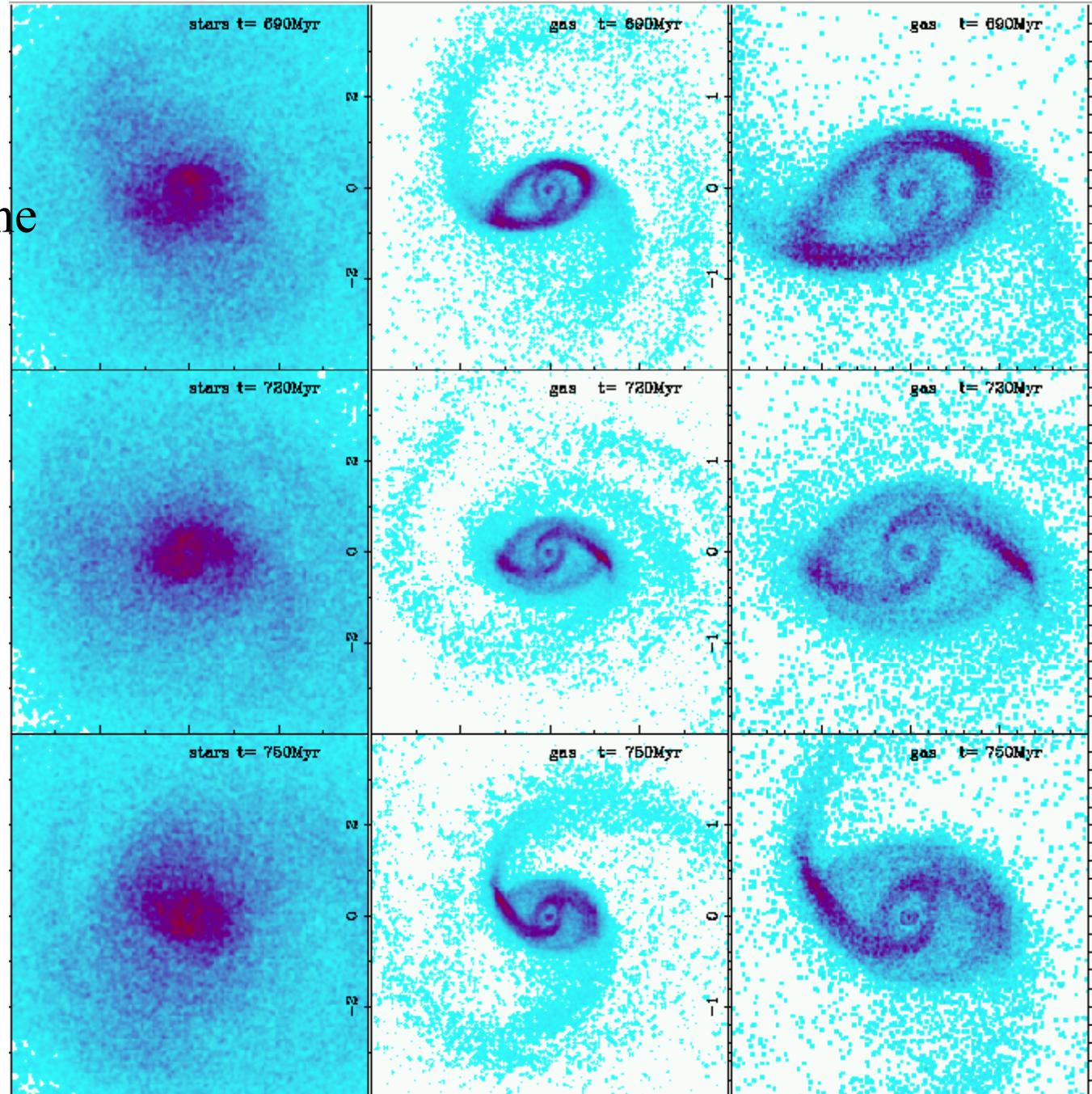
Formation d'une
barre primaire et d'une
2ème découplée
dans une simulation
N-corps+hydro

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

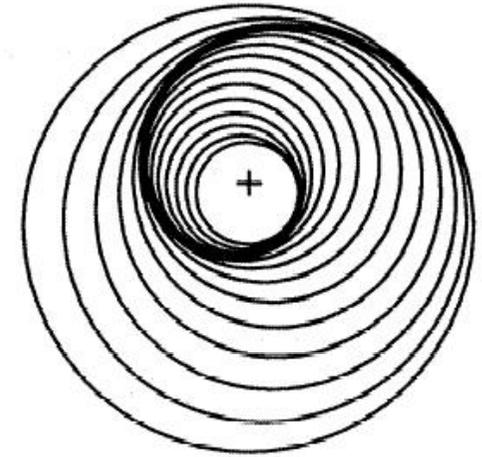
Etoiles

Gaz

Zoom



Instabilités $m=1$



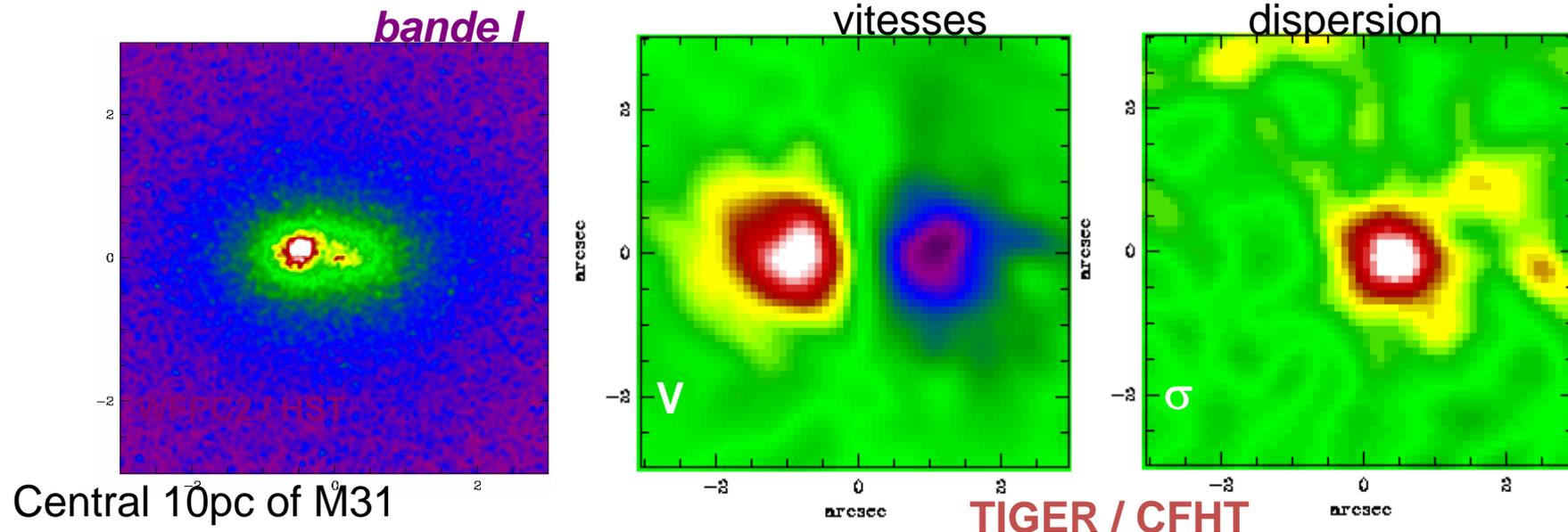
Précession différentielle très rapide $\Omega - \kappa$

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

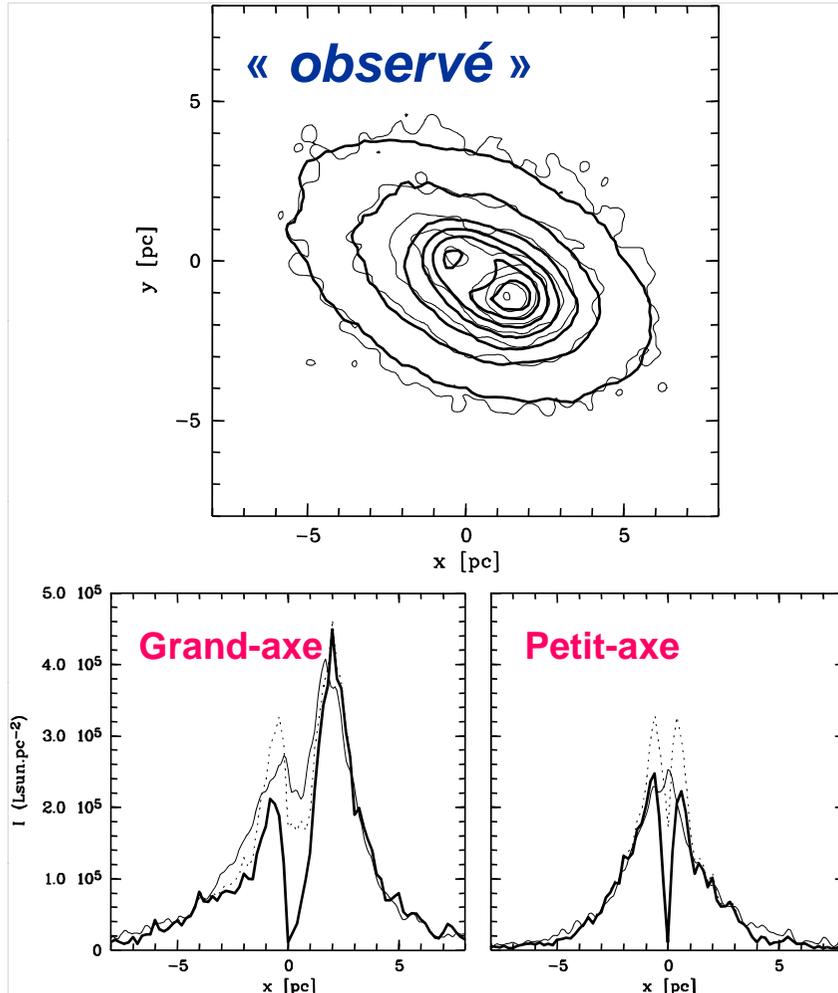
→ Ce mode permet au disque interne de perdre du moment angulaire,
Et au gaz de tomber vers le trou noir (*cf Reichard et al 2009*)



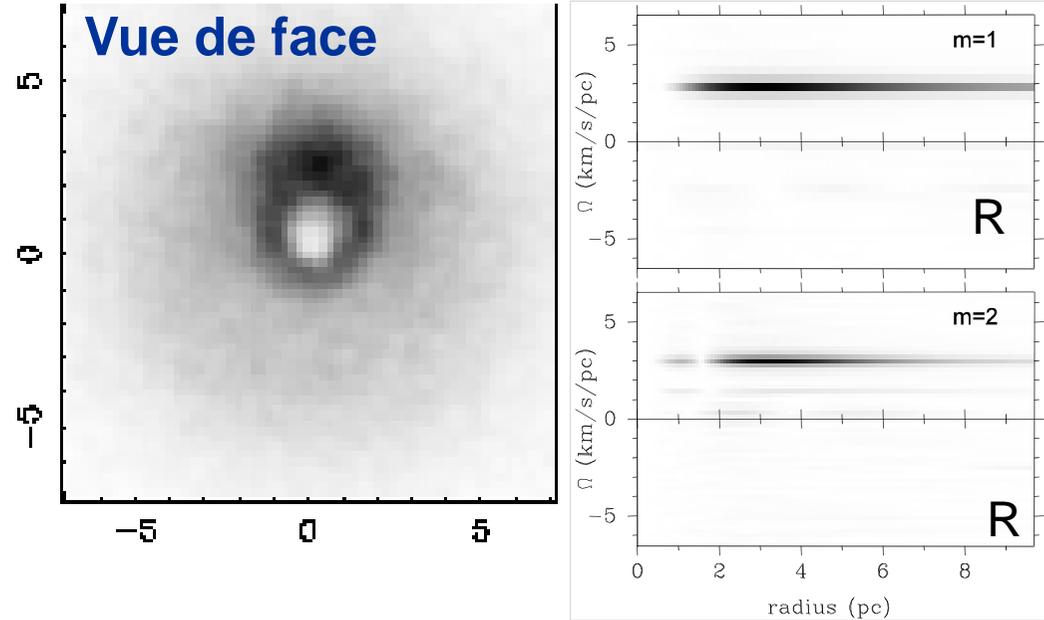
Un mode $m=1$ képlérien dans M31

Vitesse de l'onde

Ω



Linear cuts

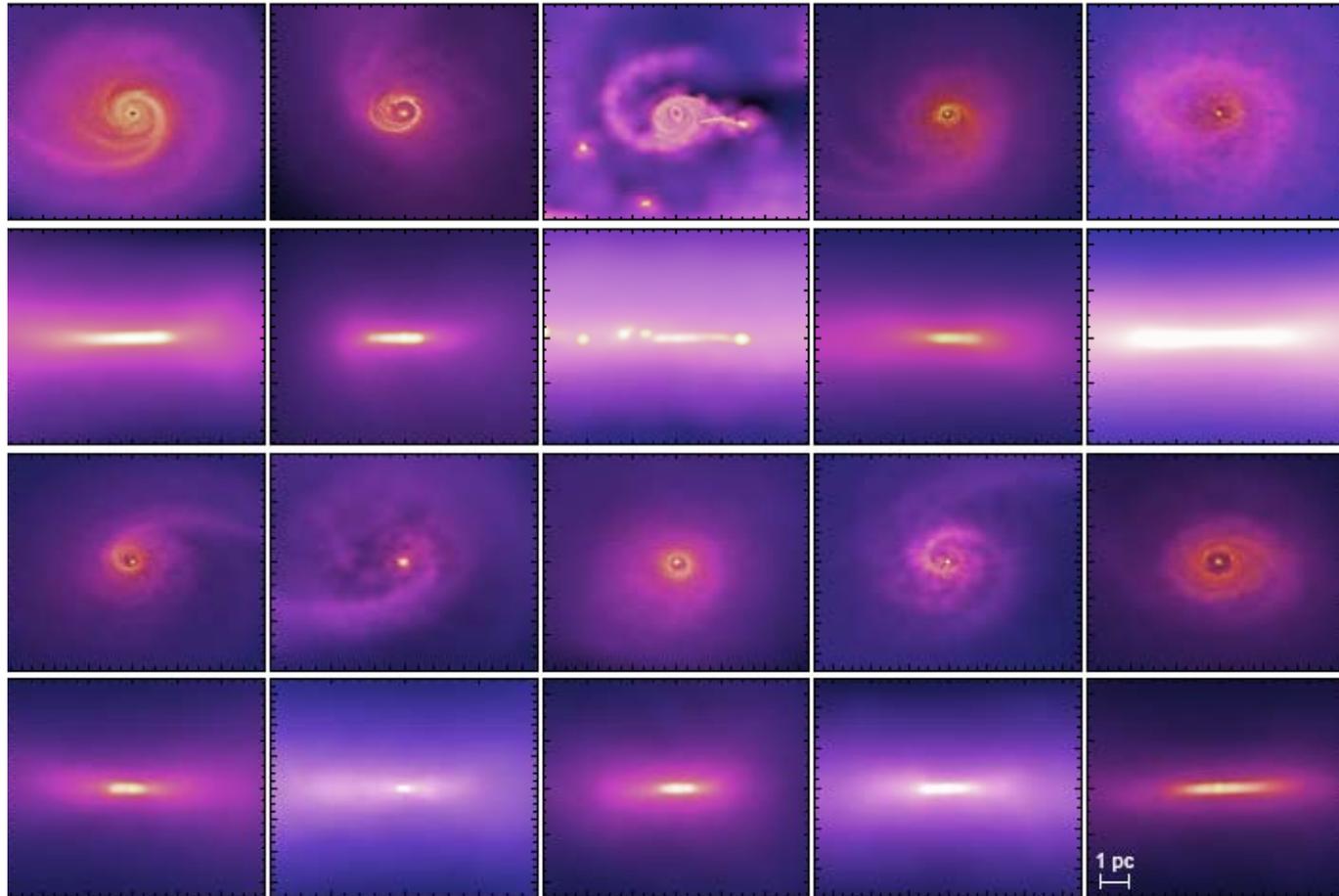


- ✓ **BH:** $7 \cdot 10^7 M_{\text{sol}}$
- ✓ **Disque:** 20-40% de la masse totale
- ✓ **Vitesse de l'onde:** 3 km/s/pc
(fréquence orbitale: 250 km/s/pc)
- ✓ **Durée de vie:** > 3000 rotations
 $\sim 4 \cdot 10^8 \text{ yrs}$

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_{gas} est grand

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

Fragmentation

Warp, twist

torsion

→ Disques épais

→ Friction

dynamique sur un

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

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

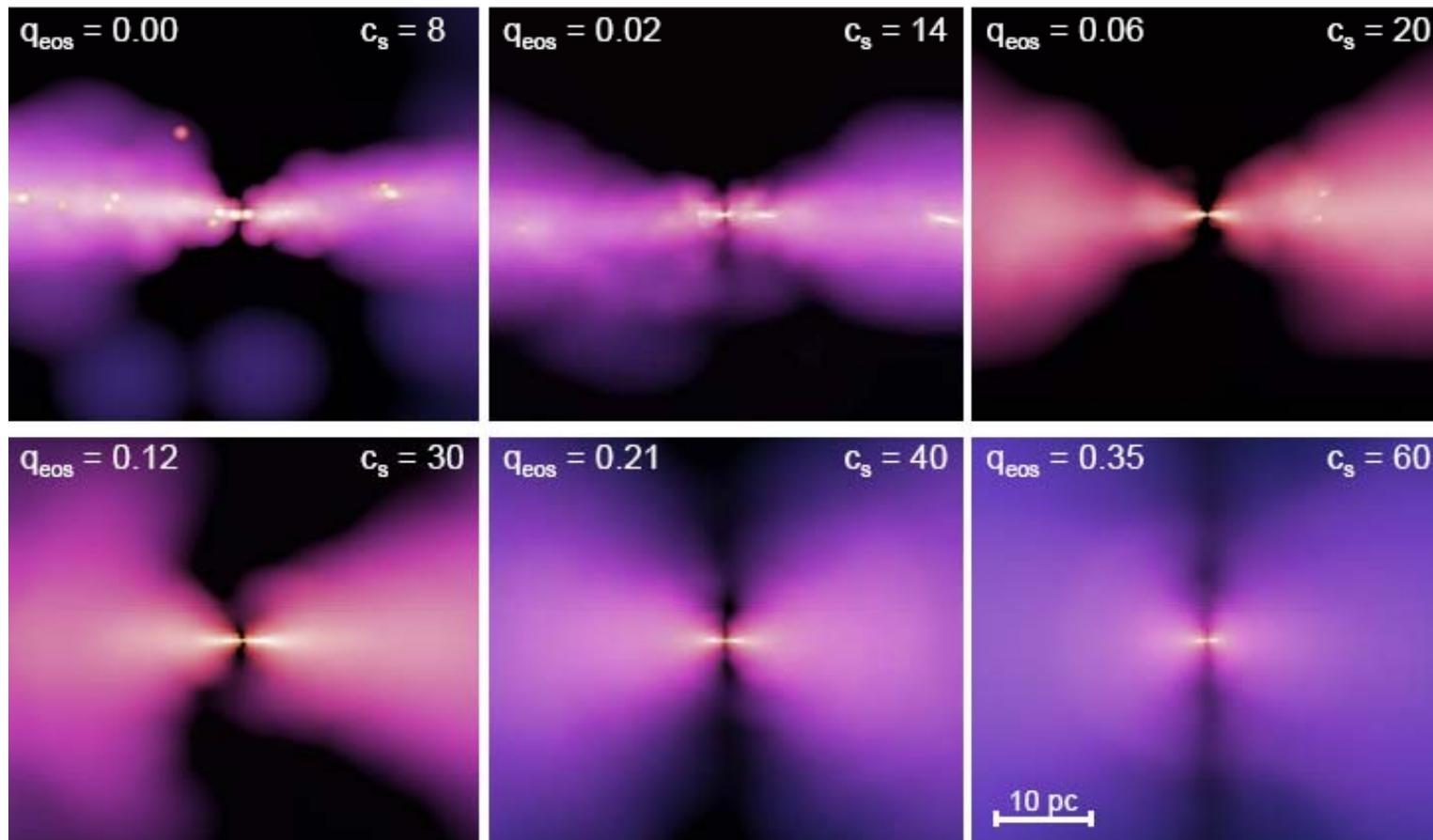
varie en $1/M$

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

Formation du tore moléculaire ?

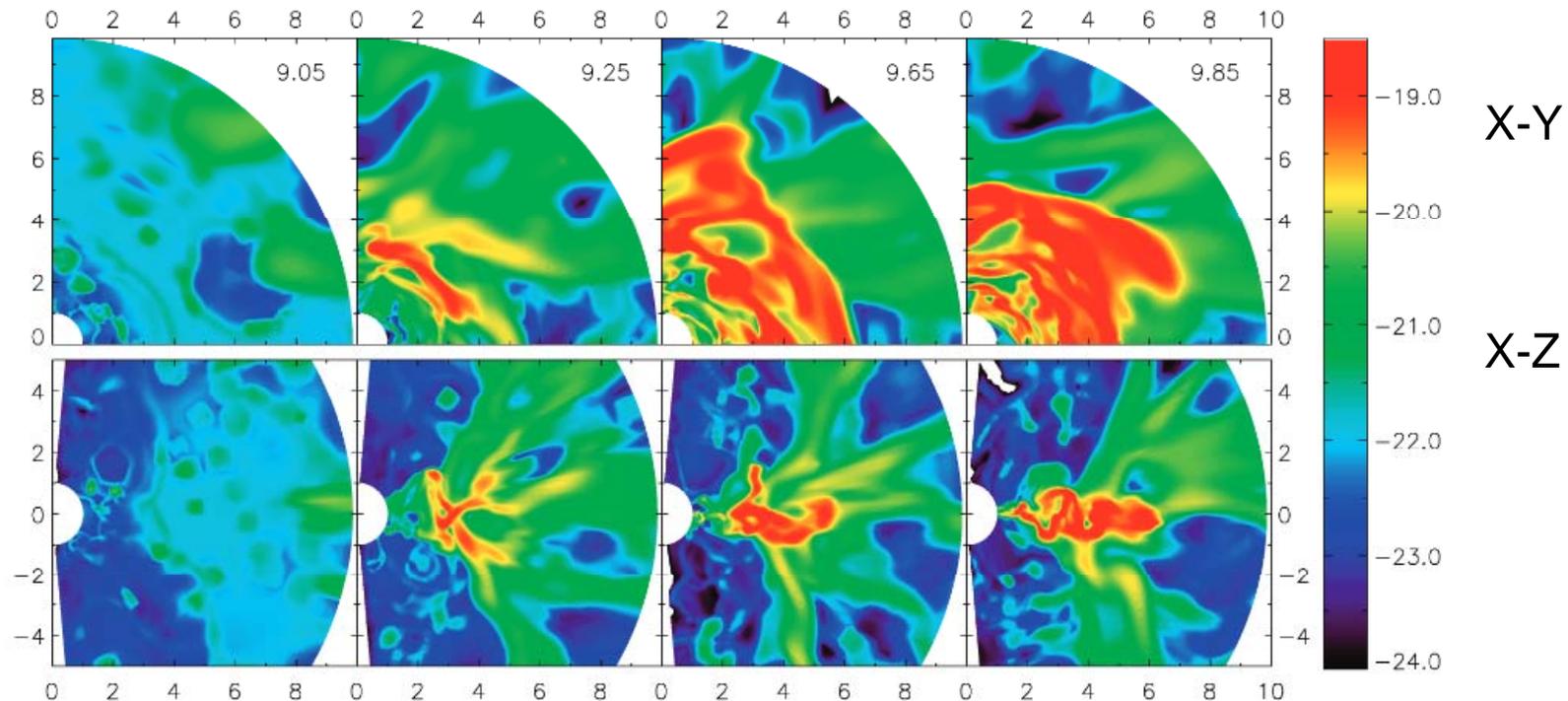
Même simulation, mais plot en coordonnées R, z , variation de C_z , et pression sous-maille. Equation d'état du gaz \rightarrow feedback des supernovae

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



Disques minces et épais

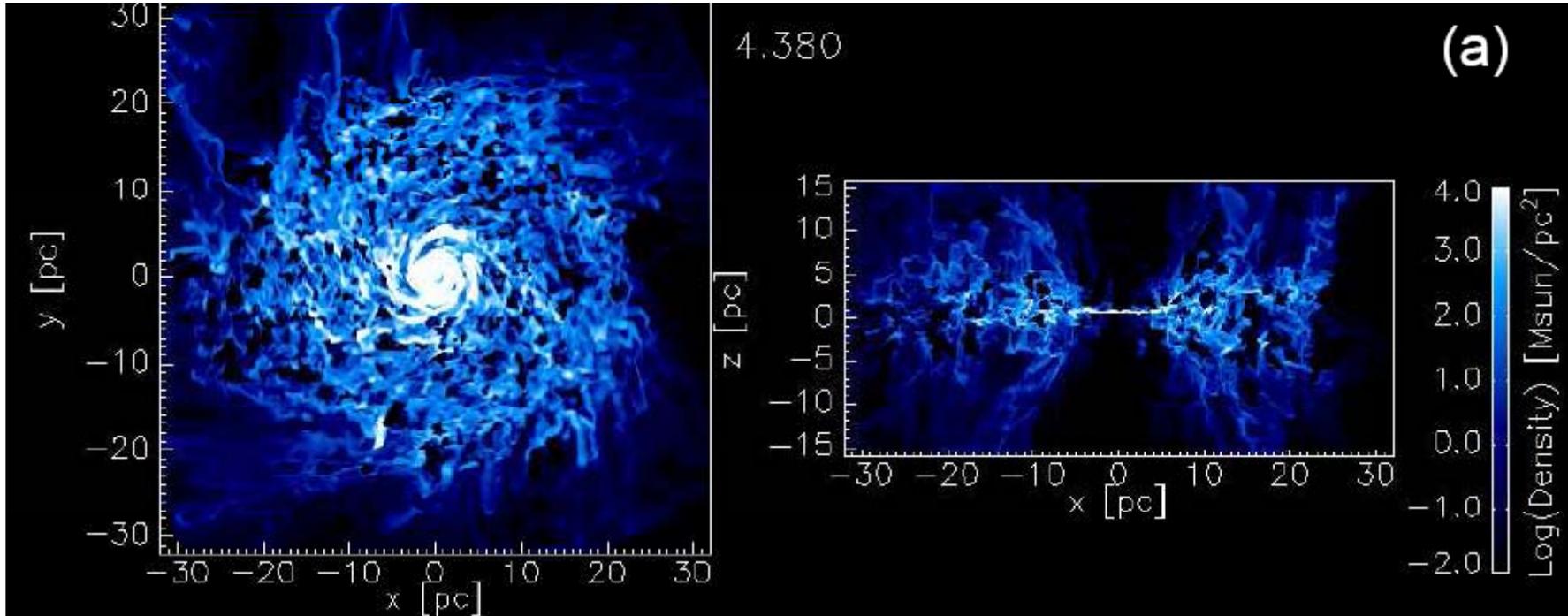
Un disque chaud et mince, puis froid et épais, turbulent, co-existent
Le milieu multi-phase se développe avec les vents stellaires, à partir
d'un amas nucléaire d'étoiles –filaments froids, et milieu chaud diffus



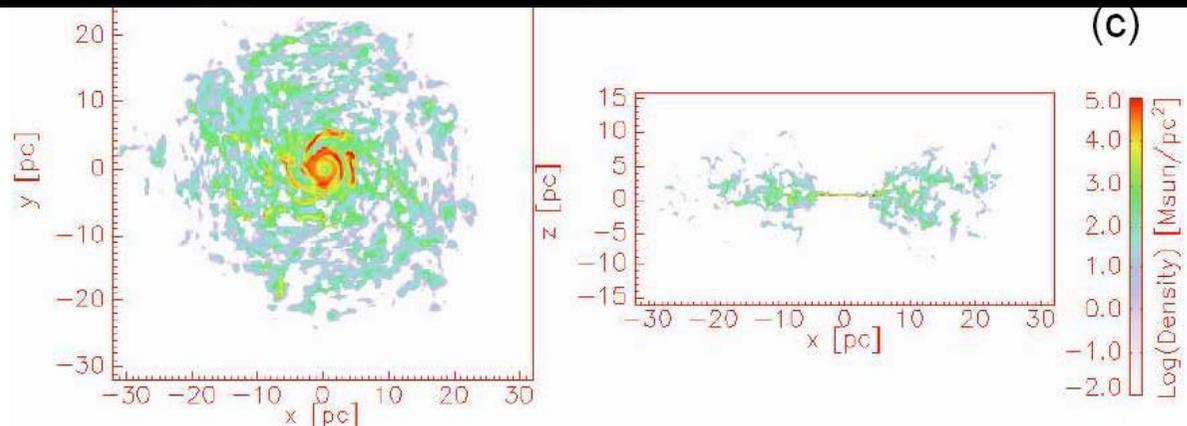
Temps en orbites, échelles en pc, densités en g/cm^3

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



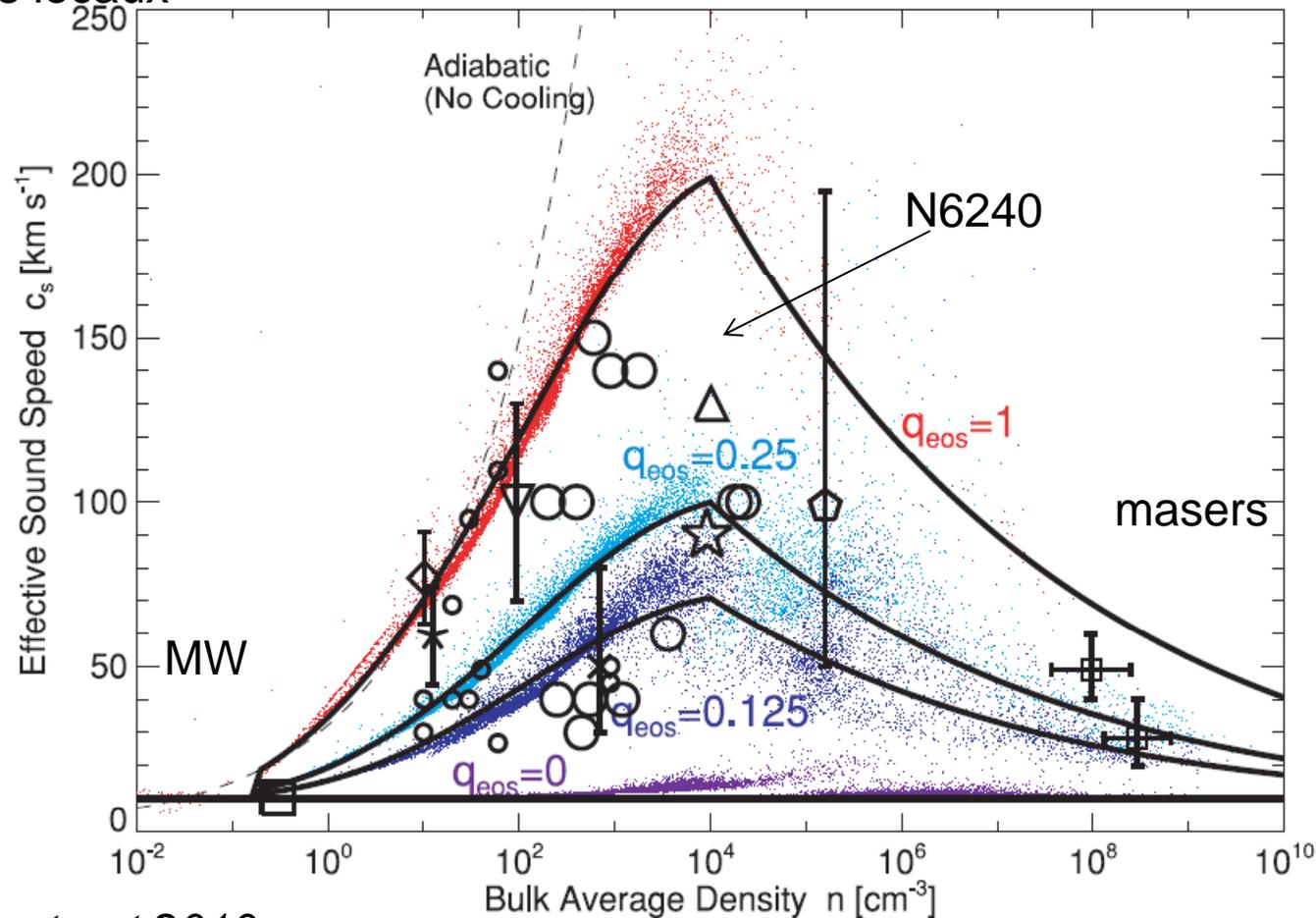
Wada et al 2009

Influence du feedback stellaire

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

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

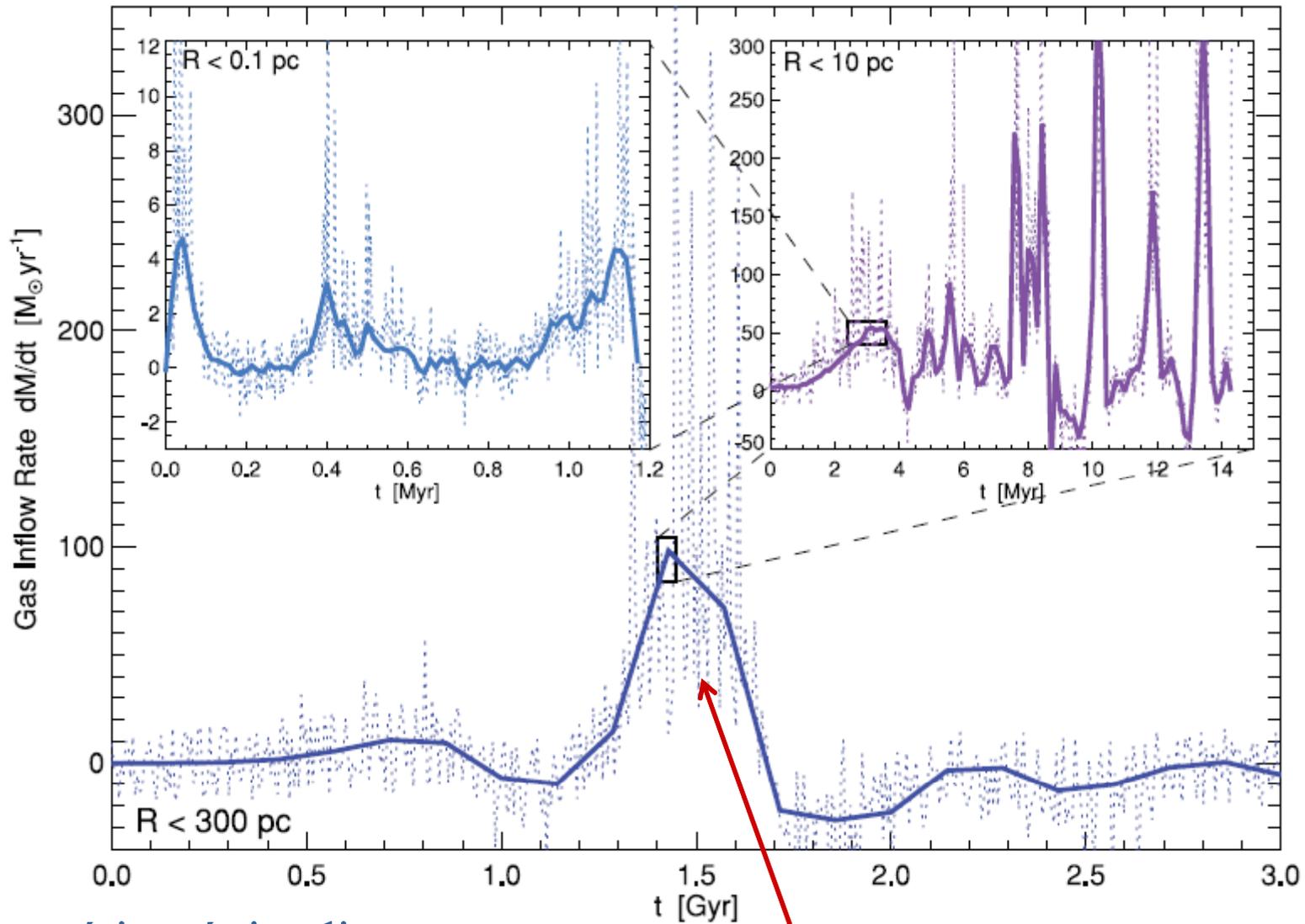
O starbursts locaux



Taux d'accrétion, fusion

2^{ème} resimulation

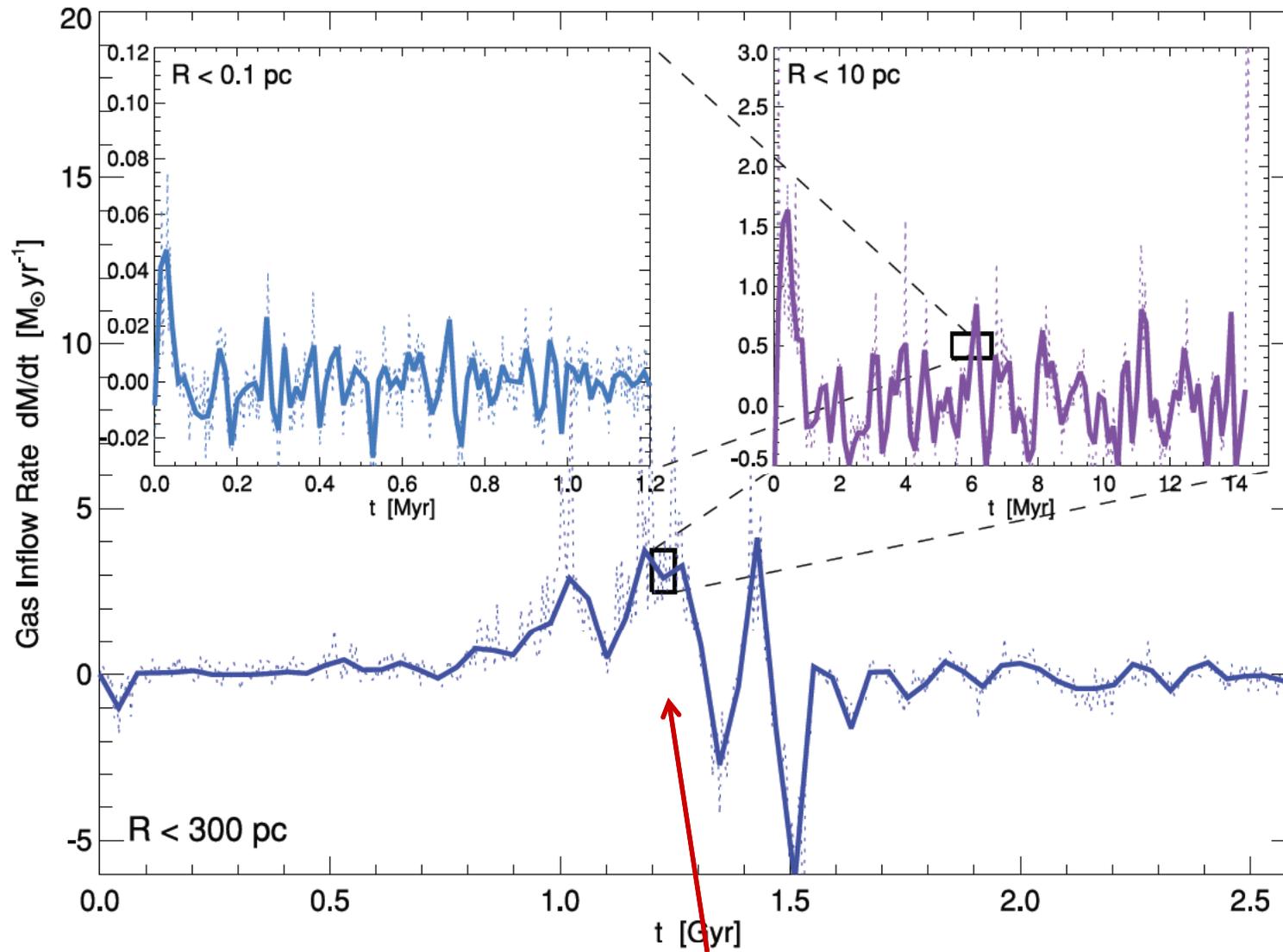
1^{re} resimulation



→ 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

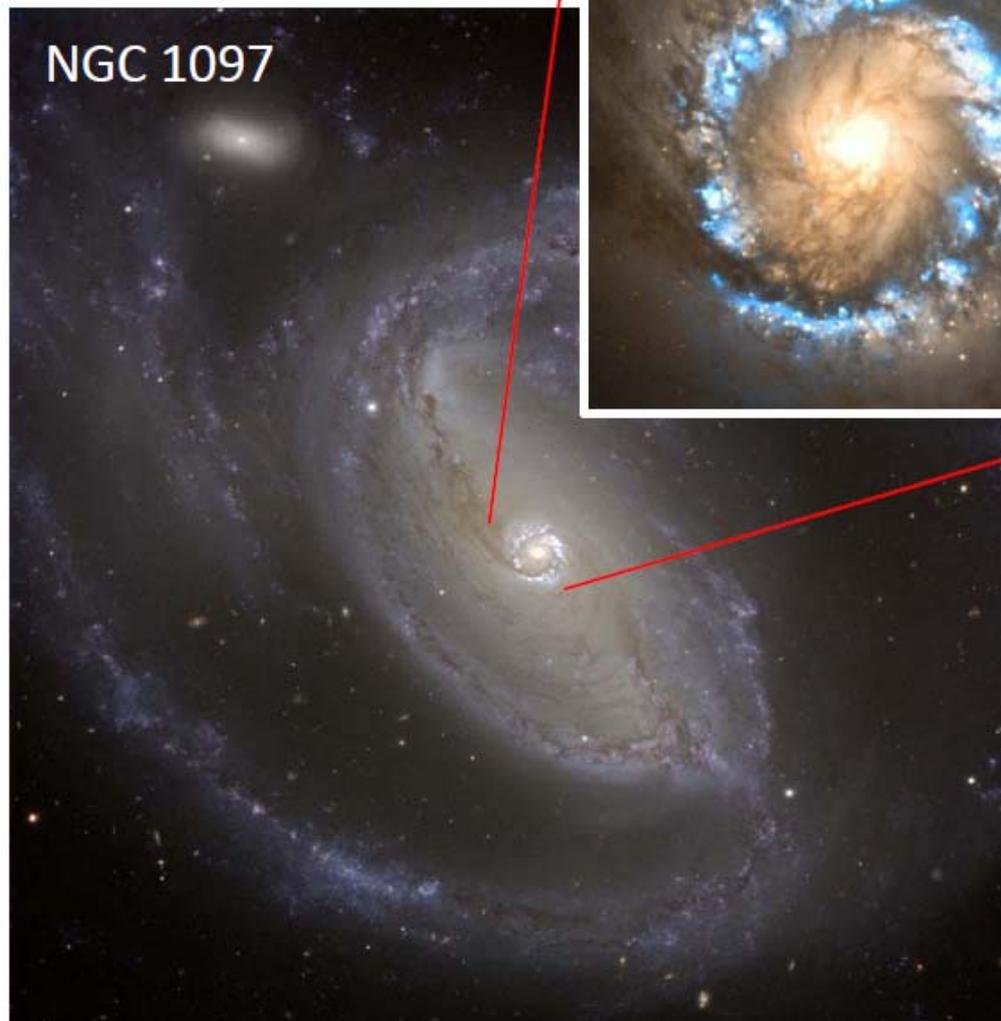
→ Phases d'alimentation courtes, qq 10^7 yrs, à cause du feedback?

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

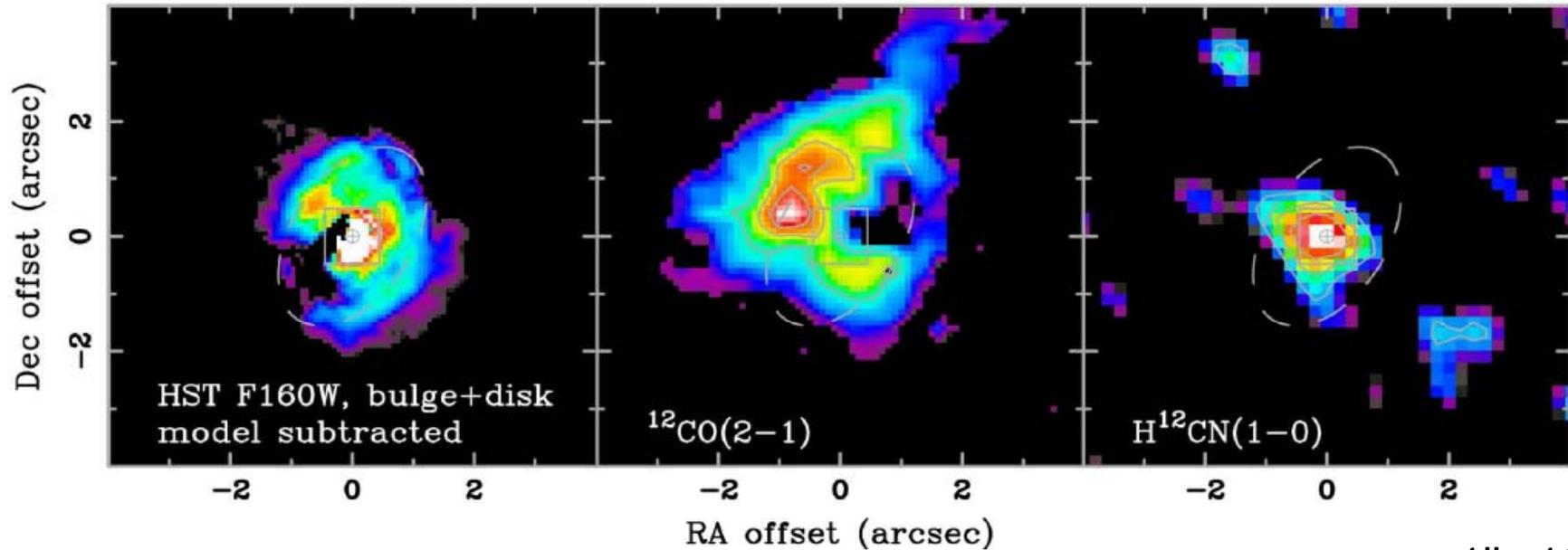
En route le gaz fragmente et forme des étoiles

Une partie alimente l'AGN

La perte de masse des étoiles jeunes est aussi accrétée

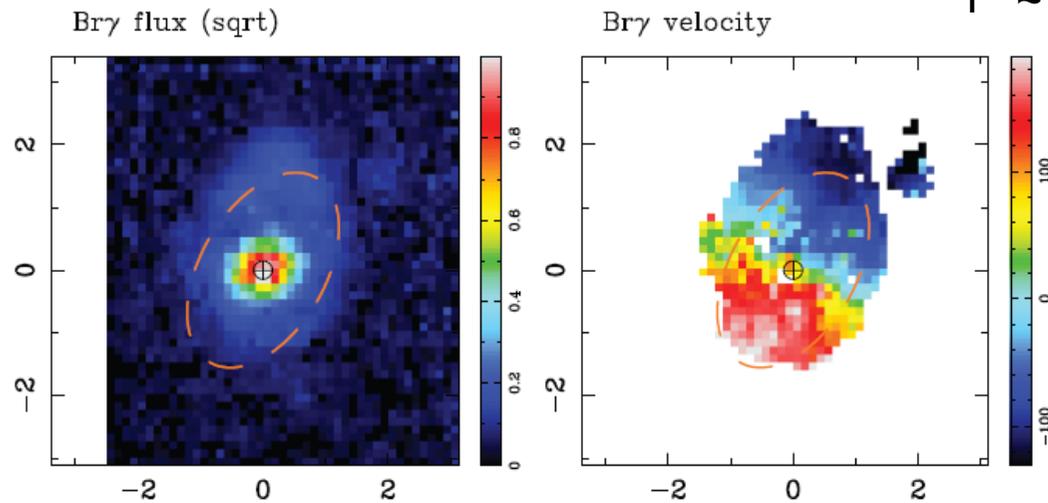
Echelles de temps ~ 10 pc
 $t \sim 20\,000$ ans

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

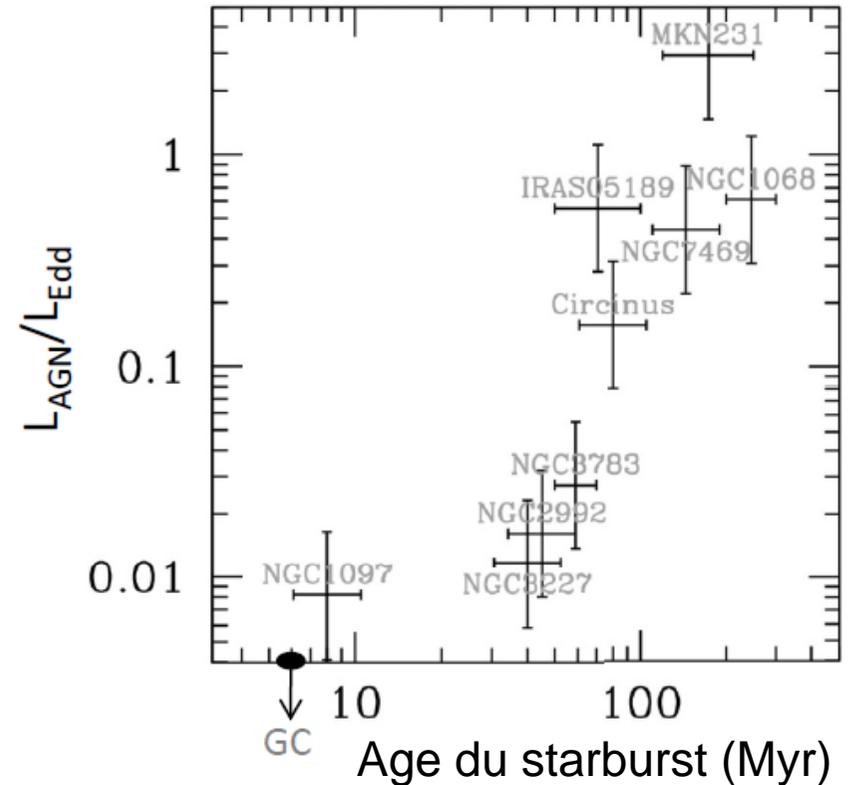
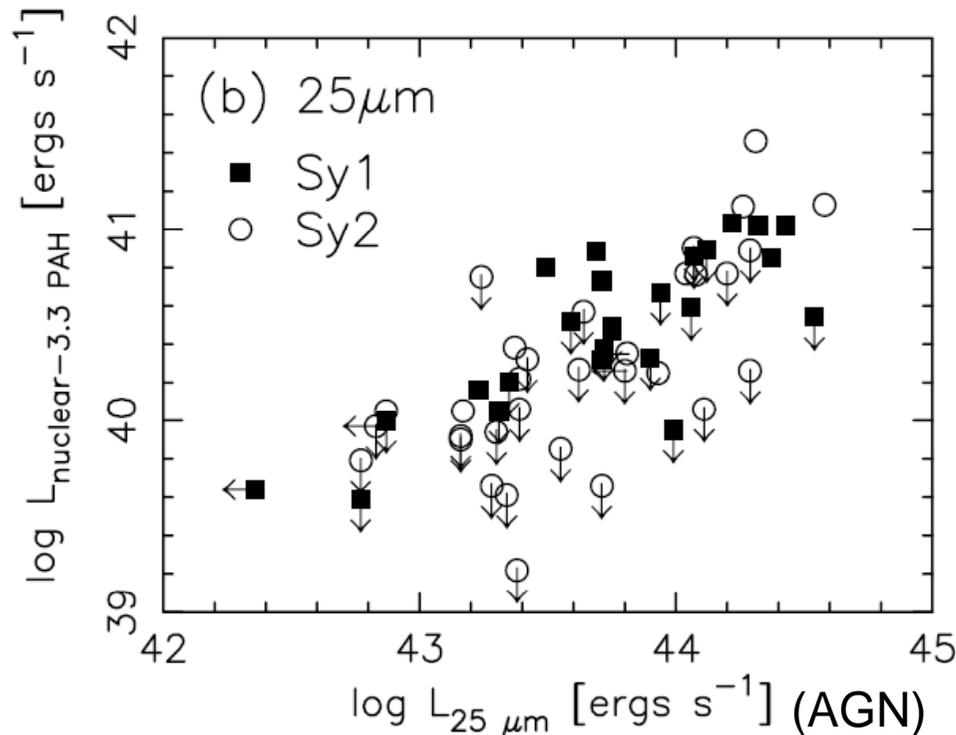


20% des galaxies à disques ont des anneaux nucléaires

Présence d'un starburst nucléaire

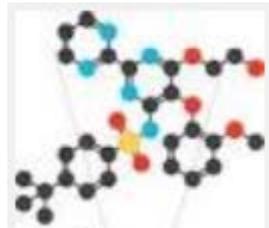
Dans la moitié des cas: formation d'étoiles dans le torus

Délai 50-100Myr?



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

Polycyclic Aromatic Hydrocarbon



*Imanishi & Wada 2004*⁴⁸

Rôle des interactions entre galaxies

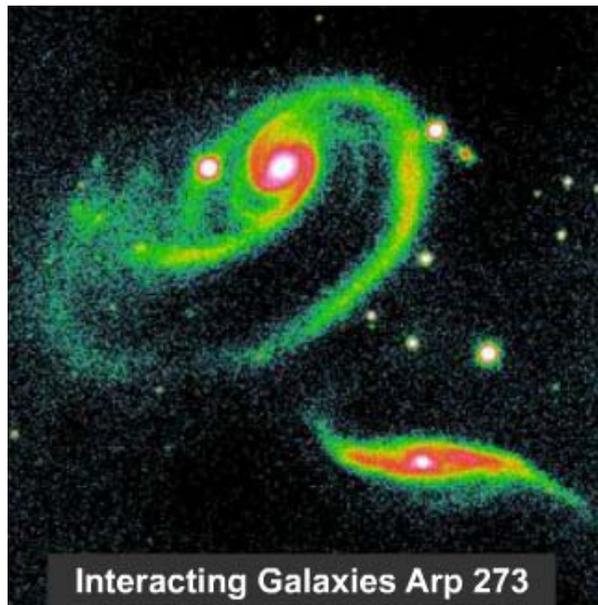
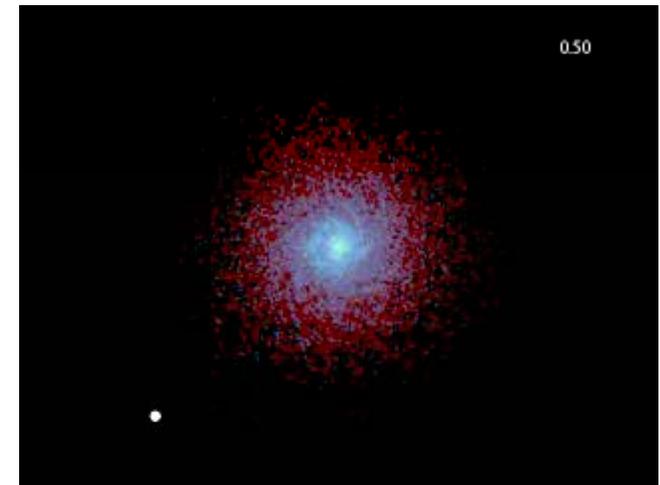
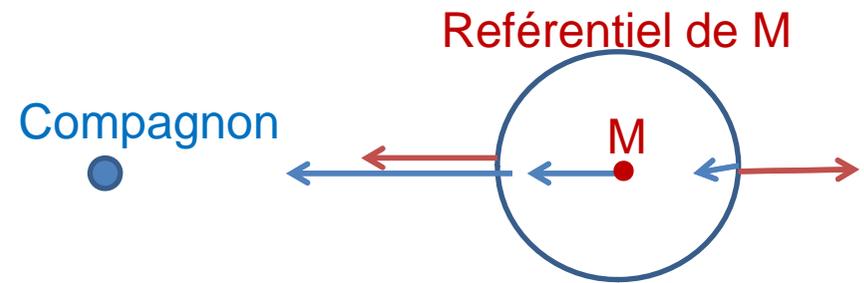
Événement plus violent

Echange efficace de moment angulaire

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

Le gaz est précipité vers le centre

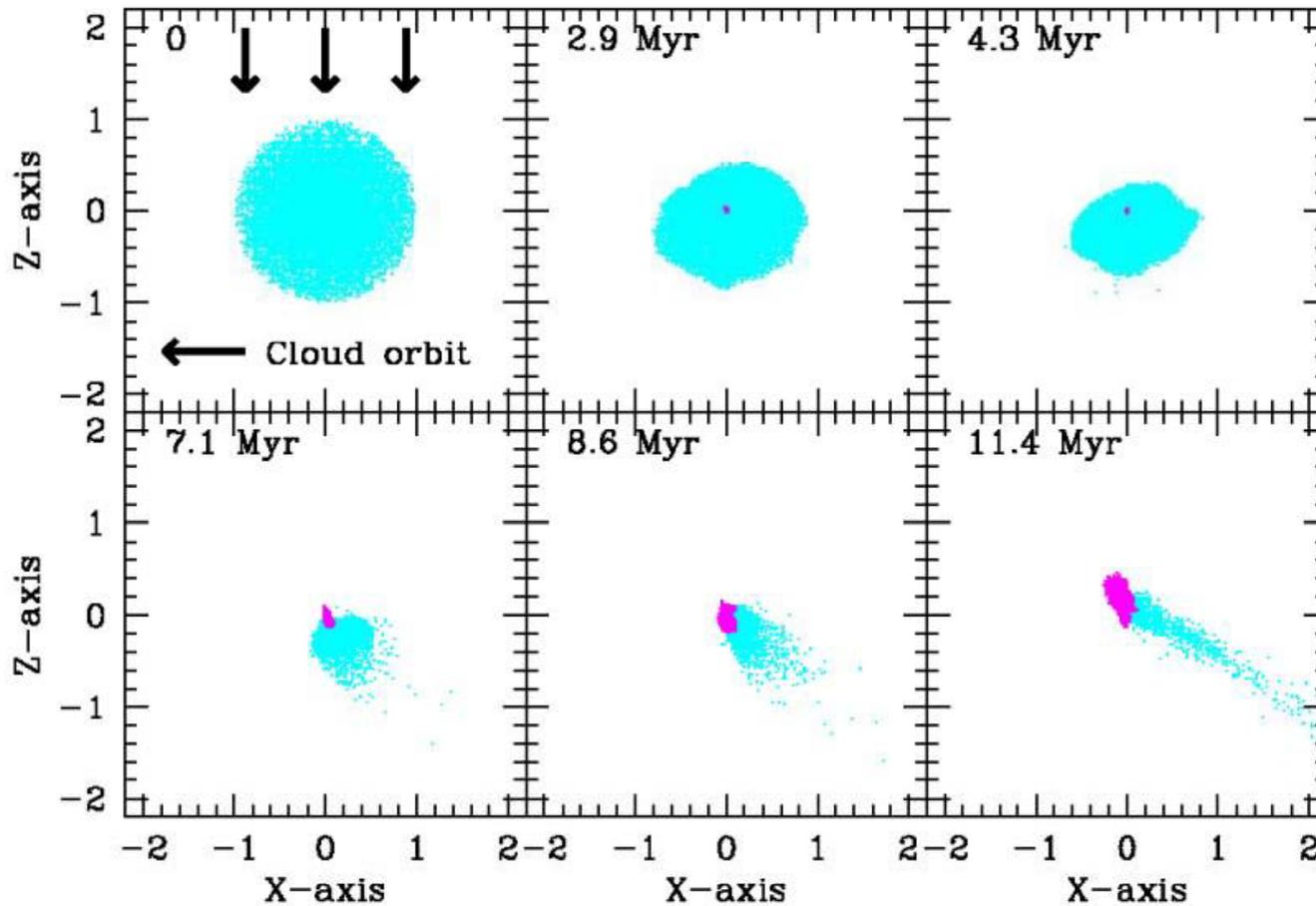
→ starburst et après un délai, AGN?



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)

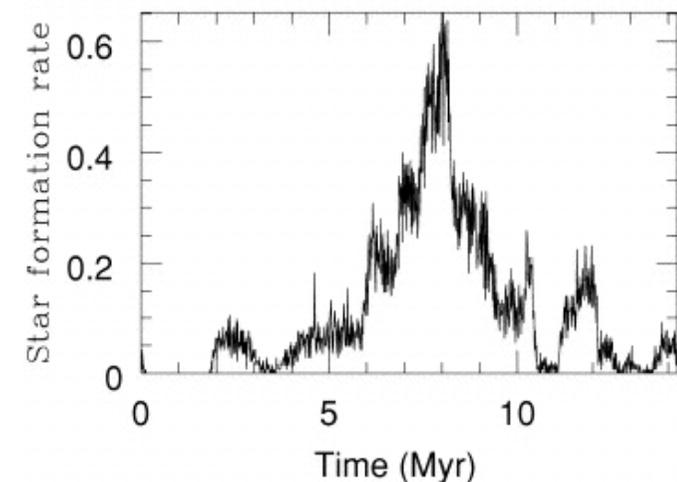


Pression
dynamique
dans un amas

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 H₂ (plus d'émission CO)
Le gaz H₂ est aussi plus concentré

En moyenne, le contenu H₂ 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

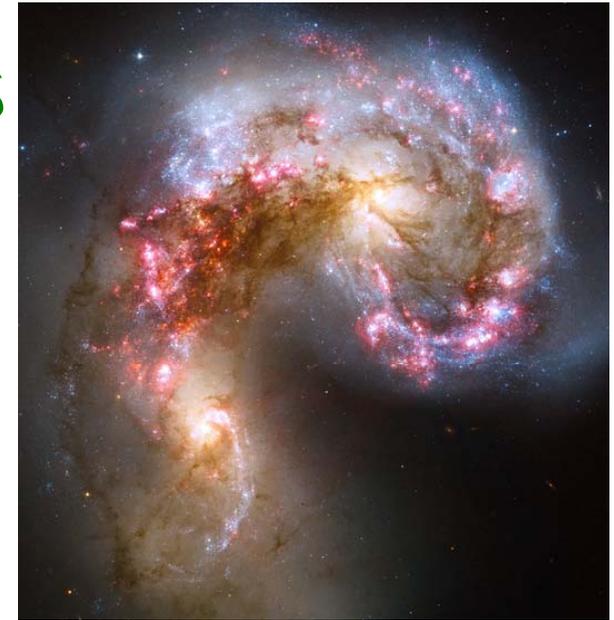
Longueur critique de self-gravitation $\lambda_{\text{crit}} \sim 200\text{pc}$

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

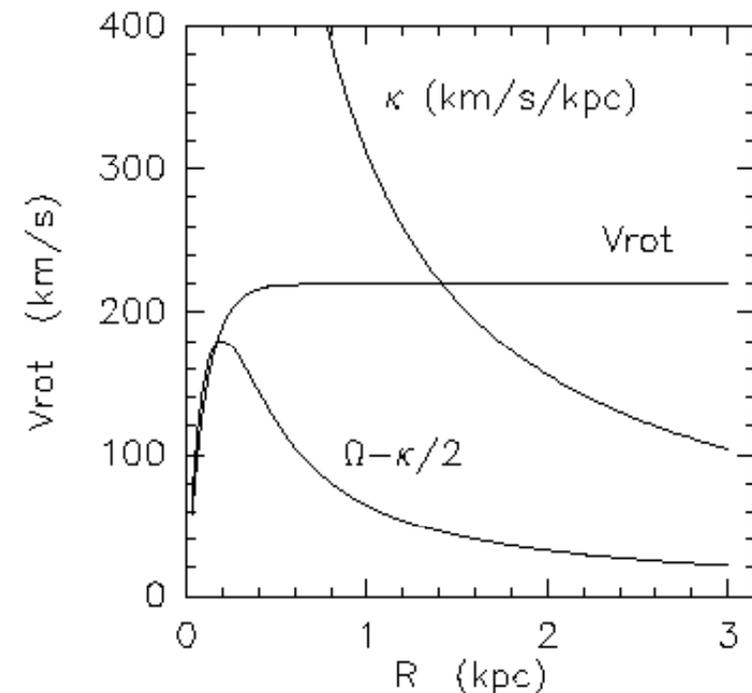
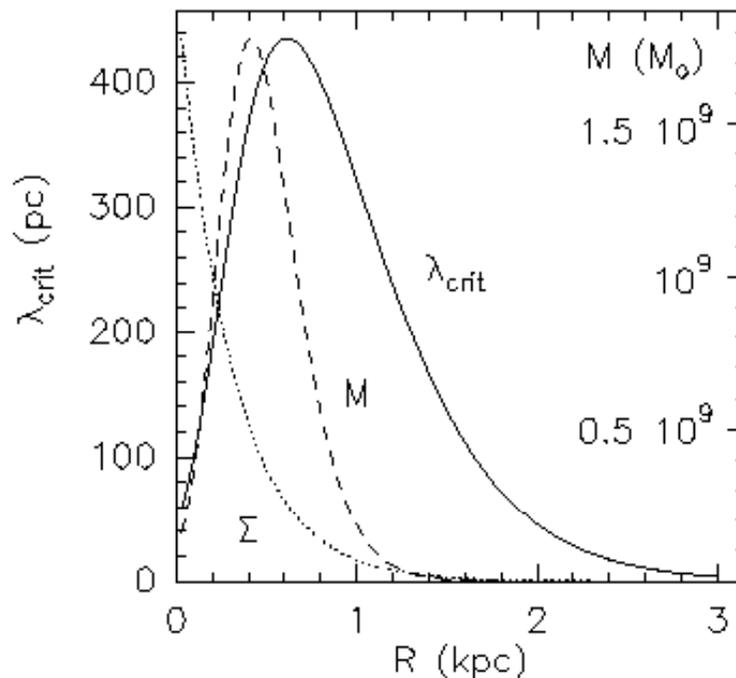
pour une densité surfacique de gaz Σ

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

Σ assez fort pour former des super-amas



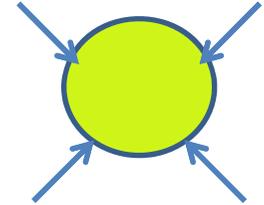
Les Antennes



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

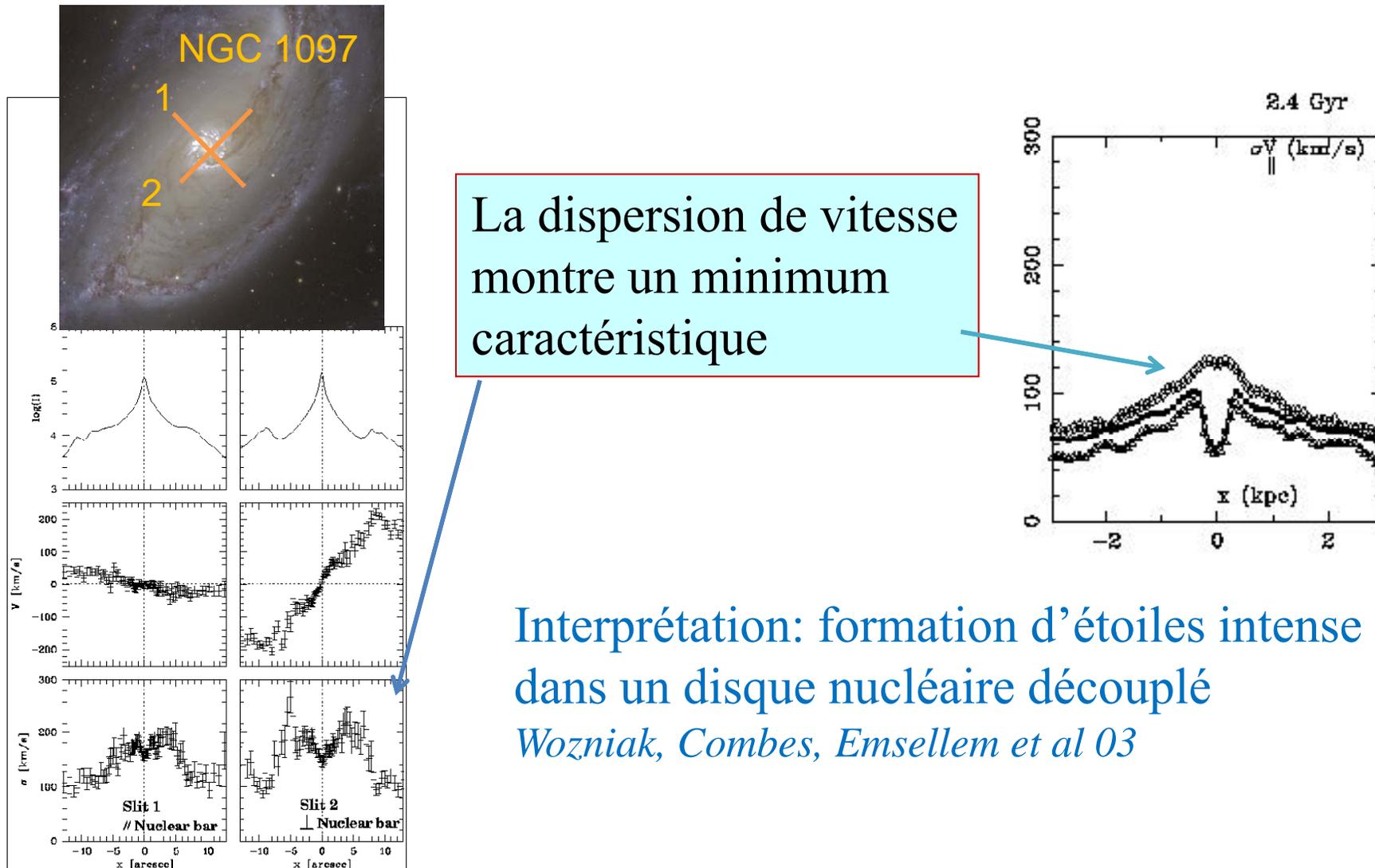
Cela peut aussi expliquer la formation de starbursts nucléaires et celle de disques d'étoiles nucléaires

→ Minima de dispersion de vitesse au centre des galaxies

(Emsellem et al 2001, Wozniak et al 2003)

Disques d'étoiles nucléaires découplés

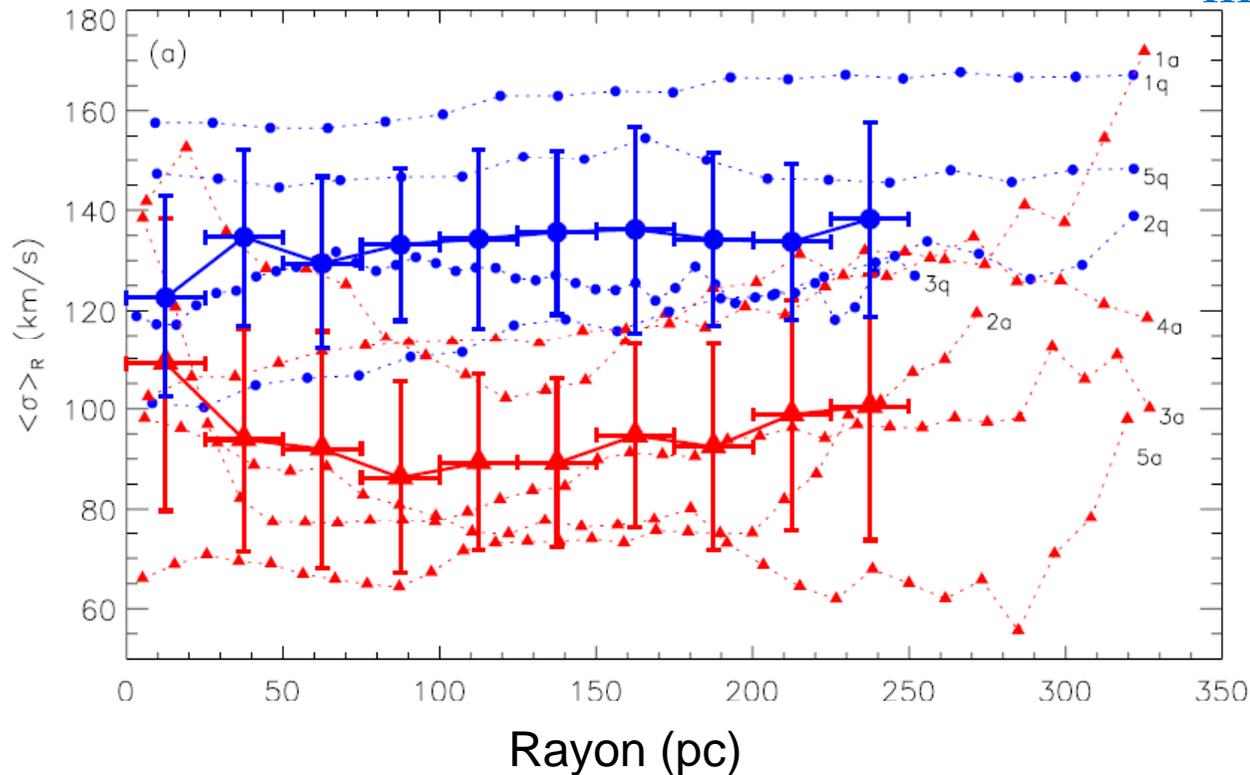
Des disques nucléaires d'étoiles froides sont observés dans les galaxies de Seyfert, avec double barre *Emsellem, Greusard, Combes et al 01*



Seyfert versus galaxies non actives

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

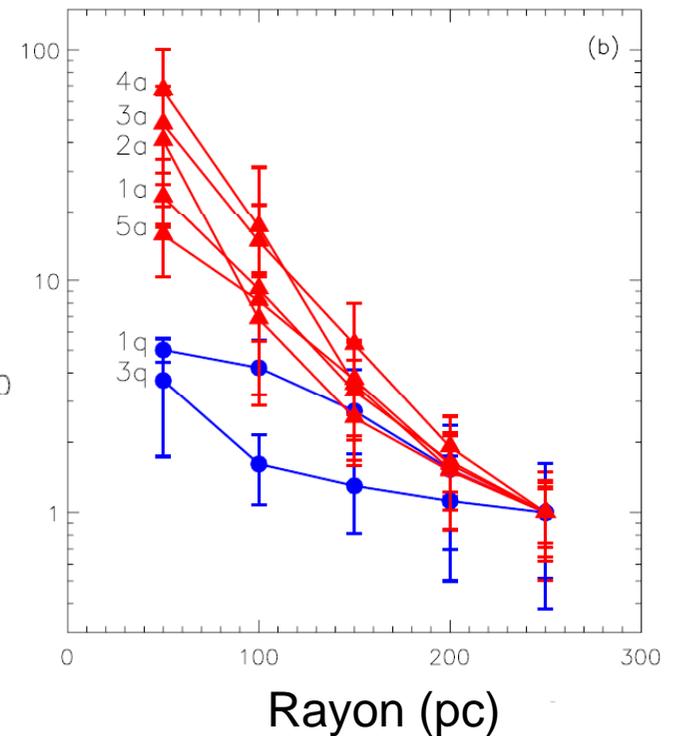
Dispersion de vitesse



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

Hicks et al 2013

Densité H_2



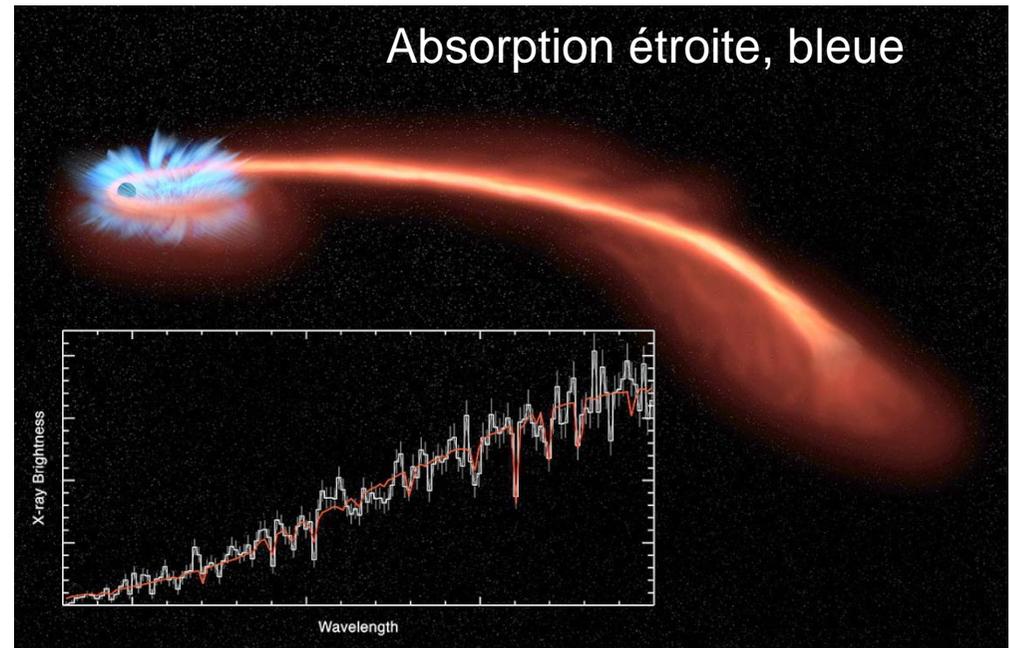
Croissance des trous noirs par les étoiles

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**

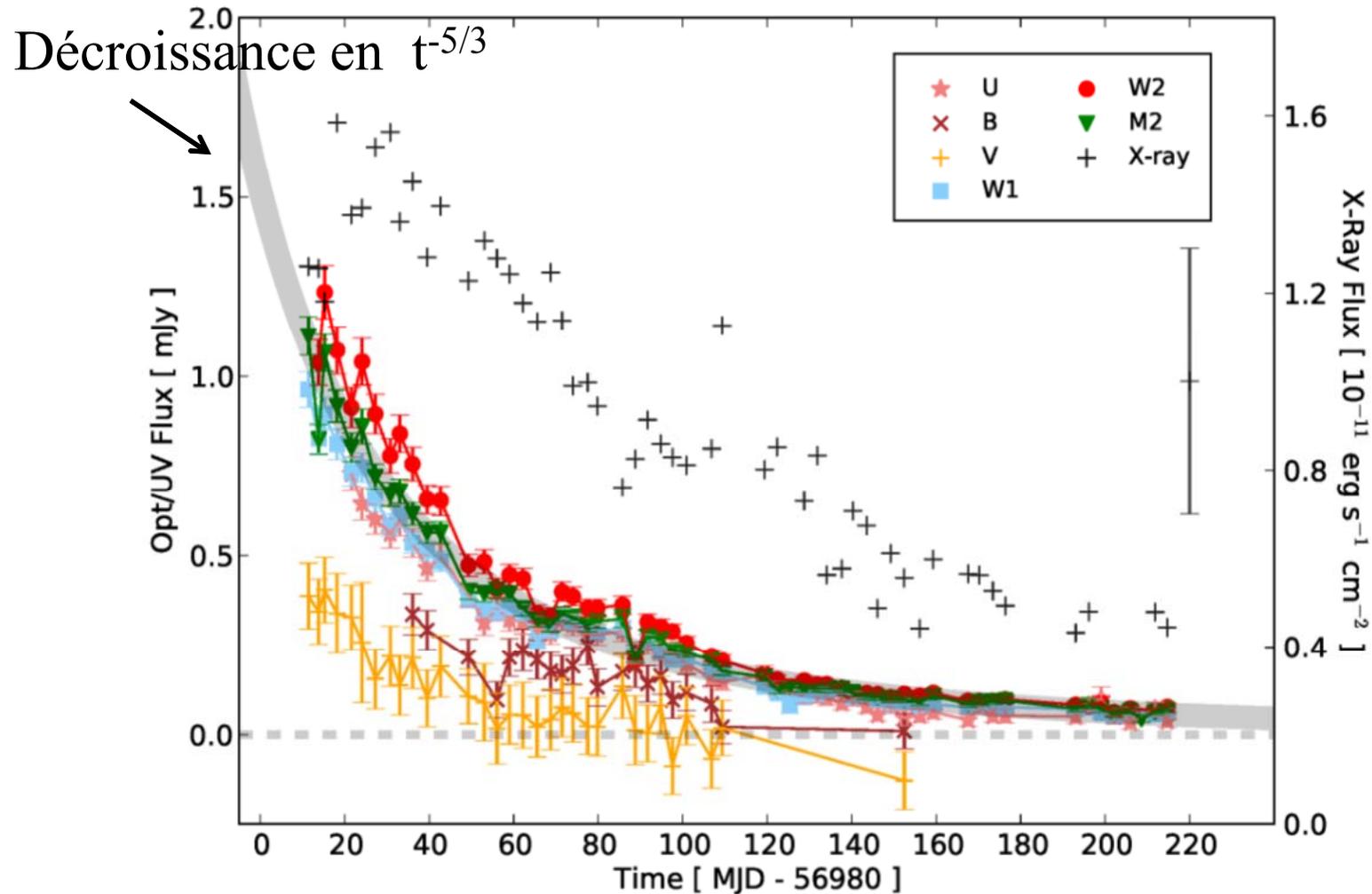
→ Ou bien on pourrait observer le phénomène tous les ans, avec le suivi de 10^4 galaxies

→ 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