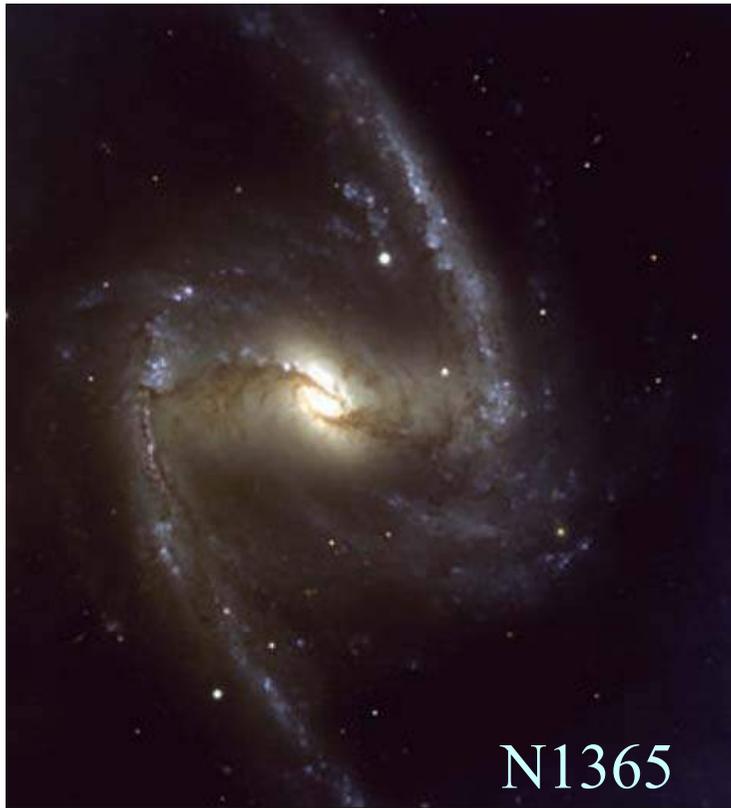




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Formation et évolution des barres



Françoise Combes



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

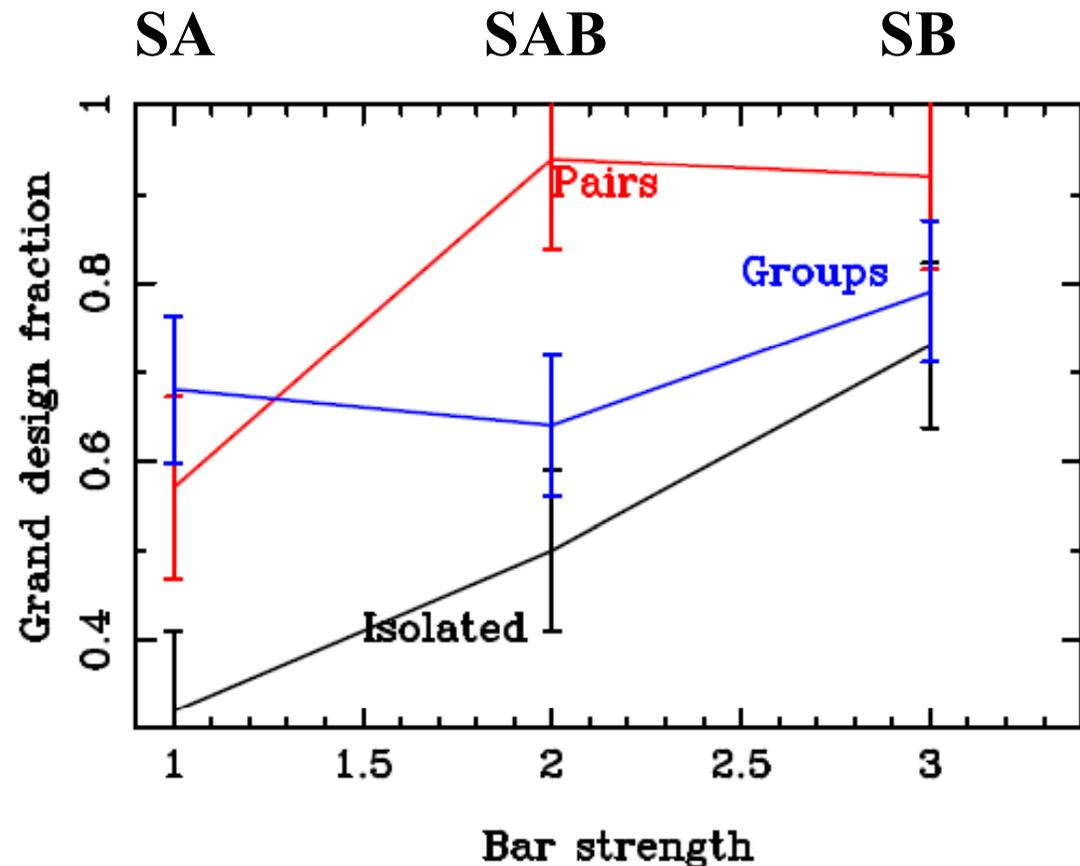
Galaxies Barrées

La majorité des galaxies sont barrées (2/3)

Environ 1/3 fortement SB, et 1/3 plus modérément (SAB)

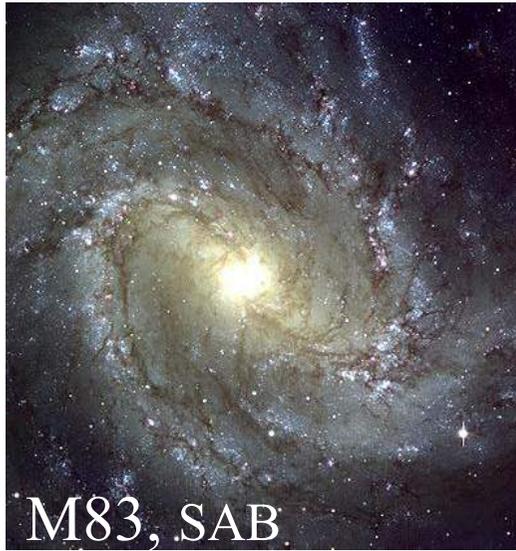
Les barres favorisent les **structures spirales cohérentes**
ou « **Grand Design** »

L'interaction de galaxies
facteur déterminant



Elmegreen 1983





Les galaxies spirales peuvent être considérées comme des disques d'accrétion

Les disques sont en évolution perpétuelle: destruction & reformation. La tendance est à concentrer la masse (tend vers l'état de moindre énergie)

La gravité est le principal moteur

Mais la rotation empêche la masse de se concentrer

→ Le moment angulaire doit s'échapper

• La dissipation d'énergie (gaz) réduit la dispersion de vitesses,
Mais les couples visqueux sont insuffisants

• Formation de spirales/ barres pour évacuer le moment angulaire

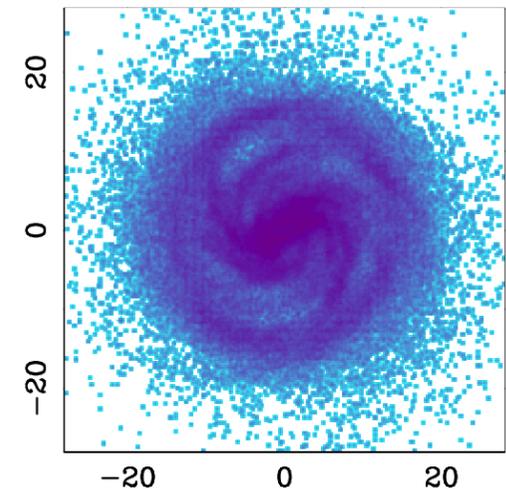
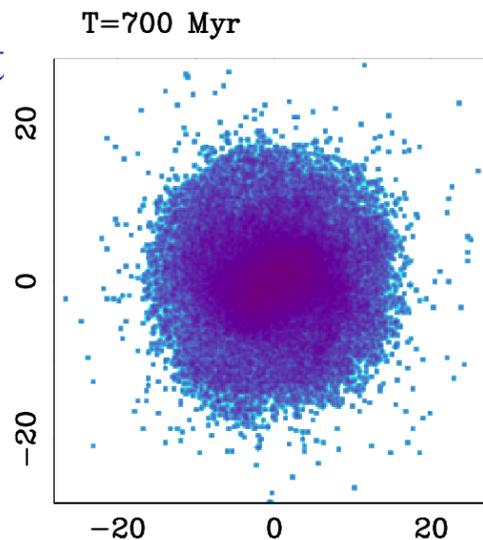
Formation des barres

Les barres sont des **ondes de densité**, et peuvent être considérées comme la combinaison de paquets leading et trailing

Elles sont plus stationnaires que les spirales (pas de couples, si seulement stellaire) → **quasi mode**

Les premières simulations numériques N-corps (Hohl 1971, Miller et al 1970) ne trouvent pas de spirales, **mais des barres**

robustes sur un temps de Hubble, car uniquement stellaires



Orbites dans un potentiel barré

Bisymétrique $m=2$ (composante de Fourier)

Dans le référentiel tournant, à la vitesse de la barre Ω_b

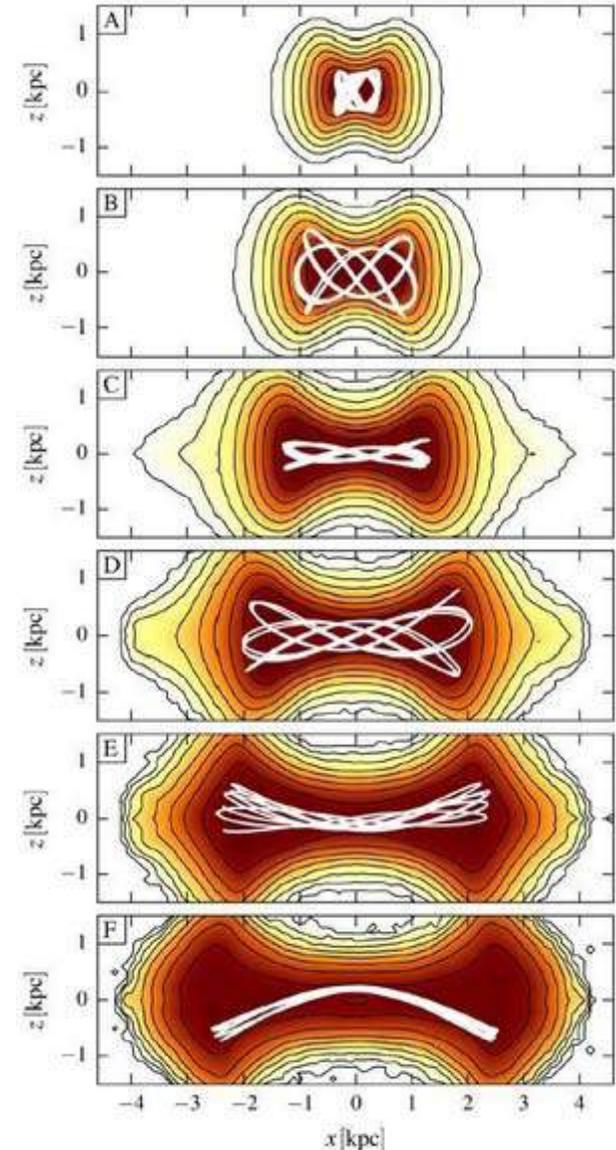
$$\Phi_{\text{eq}} = \Phi(r, \theta, z) - \Omega_b^2 r^2/2$$

Intégrale du mouvement (Jacobien)

Energie dans ce référentiel:

$$E_J = v^2/2 + \Phi(r, \theta, z) - \Omega_b^2 r^2/2$$

L_z non conservé bien sûr, puisque potentiel non-axisymétrique (coupes)



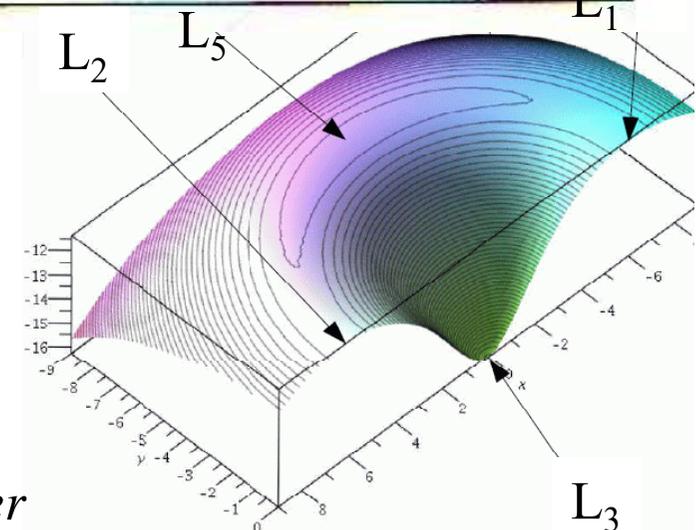
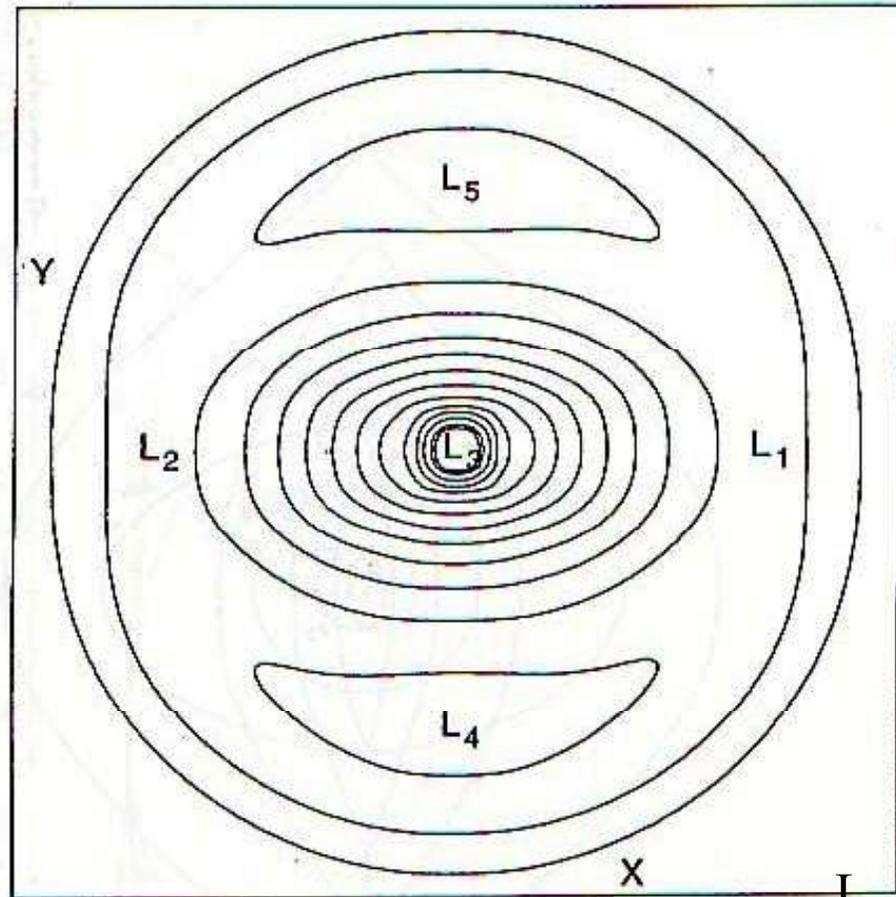
Portail et al 2015

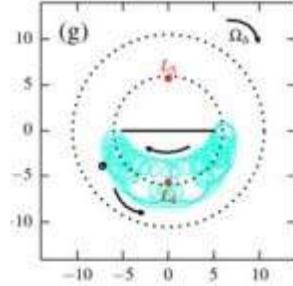
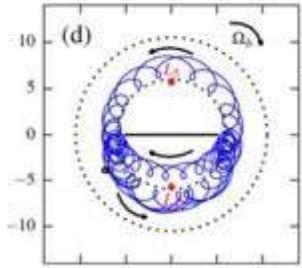
Forme du potentiel
équivalent, dans le référentiel
tournant
Barre parallèle à Ox

Points de Lagrange: points
stationnaires
L4 et L5 maxima,
L1 et L2 point de selle

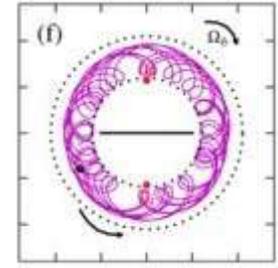
Autour de la corotation

Orbites calculées précisément
(cf *Contopoulos & Papayannopoulos 1980*)





Familles d'orbites



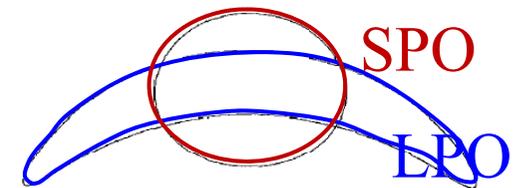
Les orbites périodiques sont le **squelette**; elles attirent et piègent les autres orbites (sauf les orbites chaotiques)

(1) très près du centre, les orbites sont // barre, **famille x1**

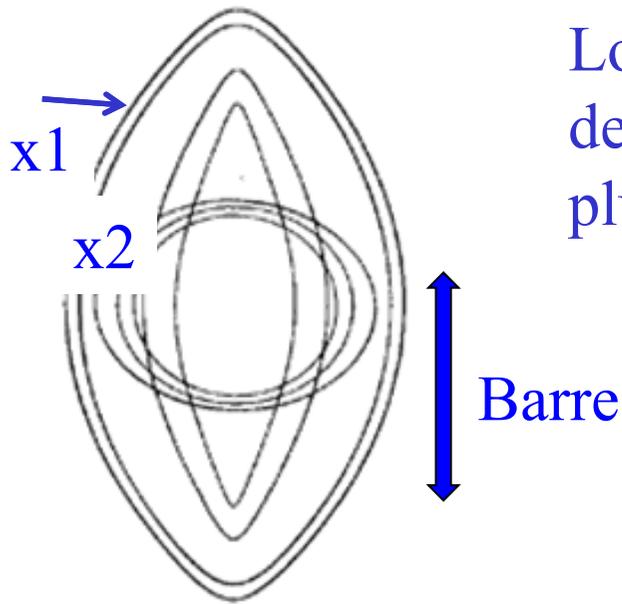
(2) Entre les deux ILR, si elles existent, on trouve **les x2**,
perpendiculaires à la barre, directes et stables
x2 disparaît si la force de la barre est trop grande (supprime les ILR)

(3) entre ILR et corotation, à nouveau des **x1**, // barre

(4) à CR, autour des L4 et L5, orbites stables



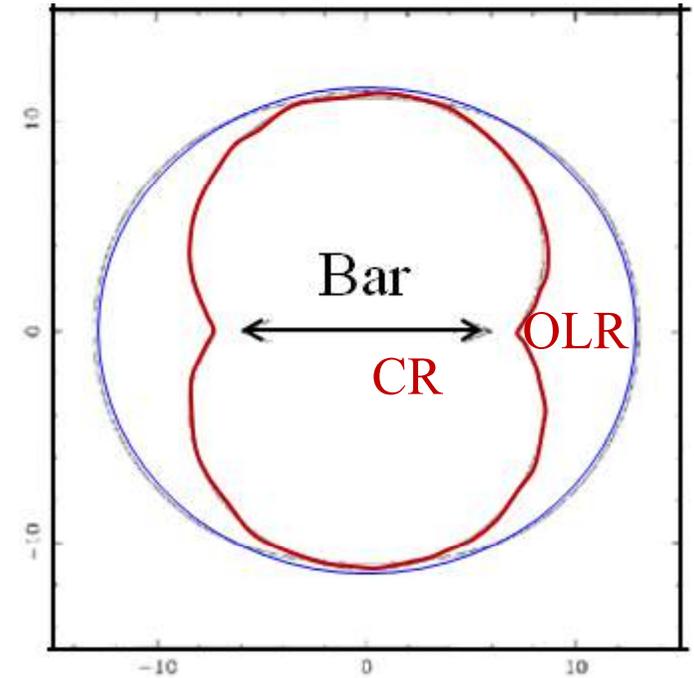
(5) après CR, à nouveau les orbites changent d'orientation



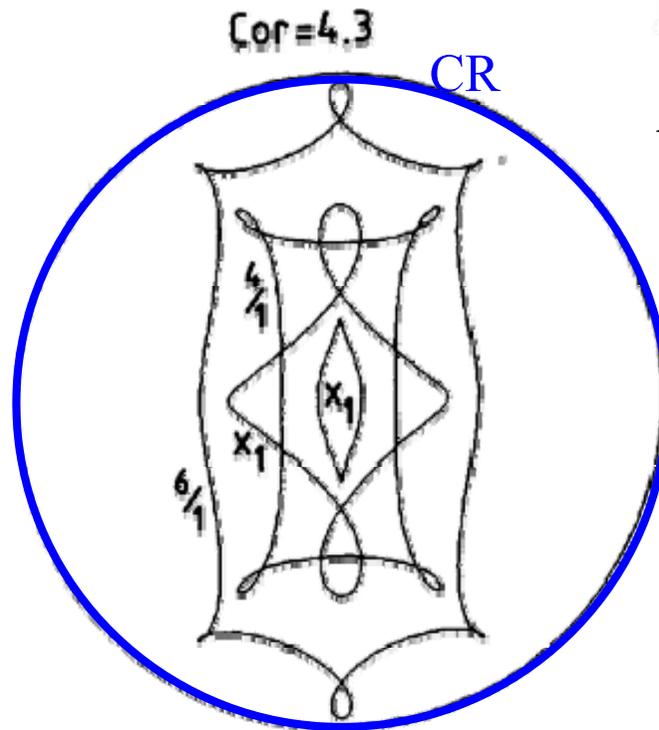
Lorsque l'on s'approche de CR, résonances de plus en plus élevées

Familles x_1 et x_2

x_1 parallèles
 x_2 perpendiculaires



Au-delà de la corotation



Contopoulos & Papayannopoulos 1980

Bien sûr les orbites x1 supportent la barre, alors que les orbites x2 l'affaiblissent, et peuvent aller jusqu'à la détruire

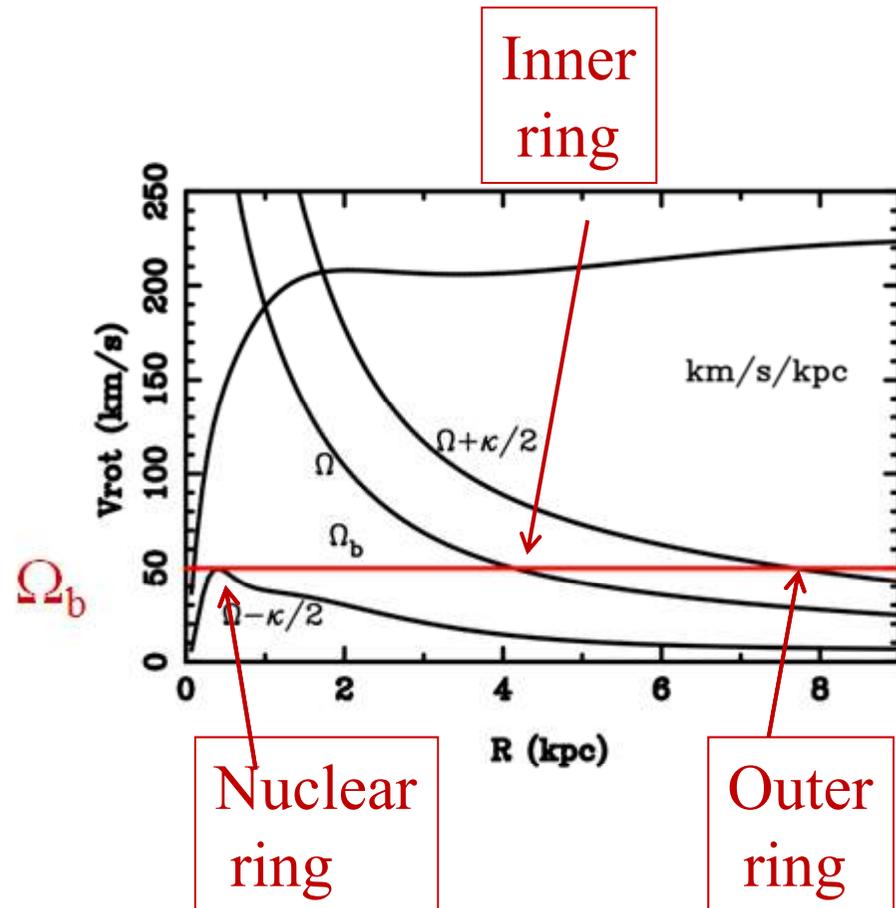
➔ Auto-régulation

La présence d'ILR entame le processus

Les orbites ne supportent plus la barre au-delà de la corotation

Une barre se termine en général juste à l'intérieur de sa corotation

➔ excellent diagnostic pour connaître Ω_b



Simulations N-corps et barres

Les calculs analytiques des ondes de densité

WKB → ondes très enroulées

Le contraire des barres!

→ Surprise dans les premières simulations numériques (1970-78)

Self-gravité, effets collectifs, **interactions**
en N^2 $N = 10^{11}$

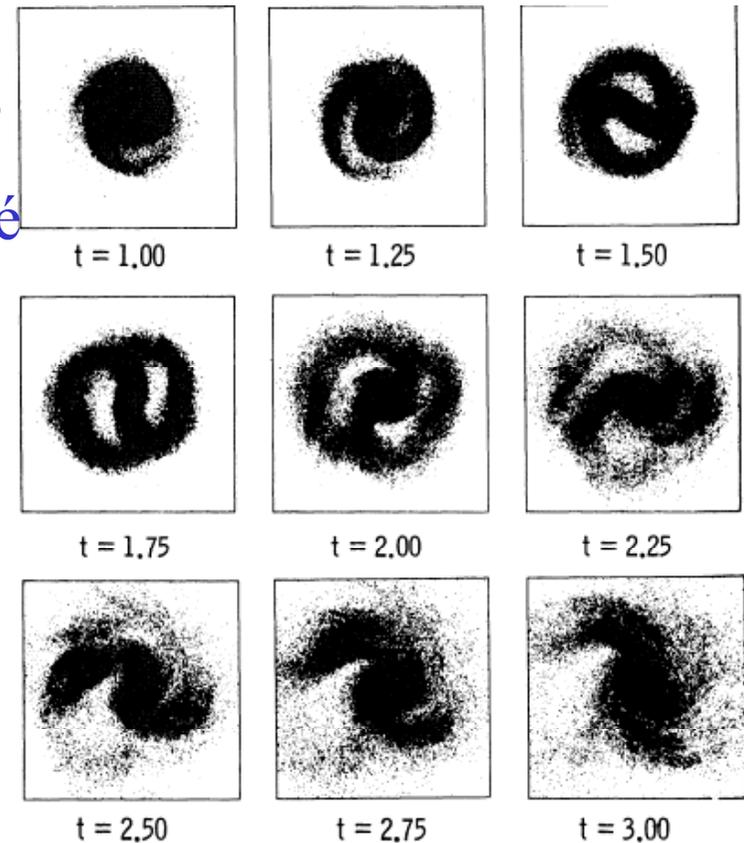
Astuces: **FFT rapides**

Le potentiel est la convolution de $1/r$ par la densité

A chaque dt , on calcule la TF de la densité, puis on multiplie dans l'espace de Fourier, la **TF($1/r$)** et la **TF(ρ)** puis → TF inverse

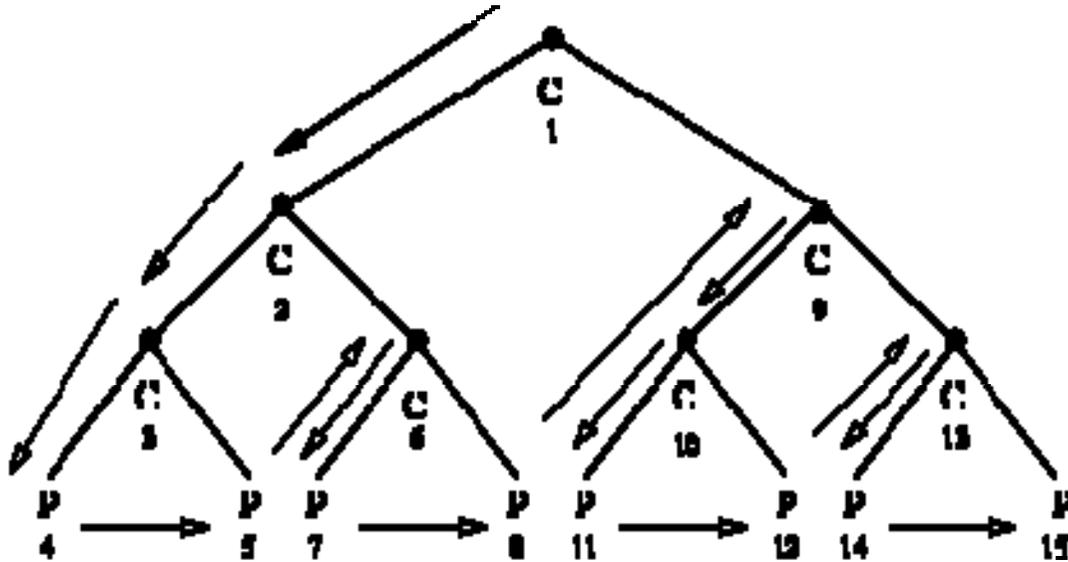
Softening $1/(r^2 + a^2)^{1/2}$, pour éviter la relaxation à 2 corps

→ Donne la résolution spatiale



Q-1 --Hohl 1978

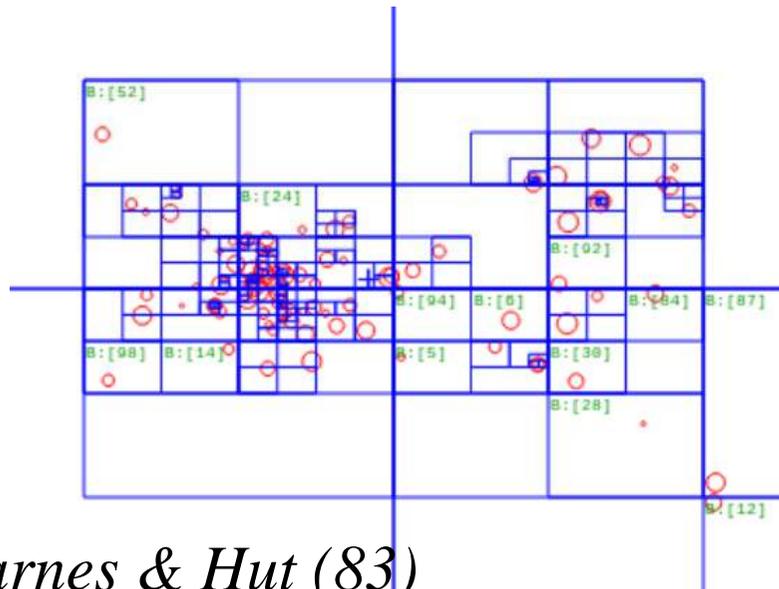
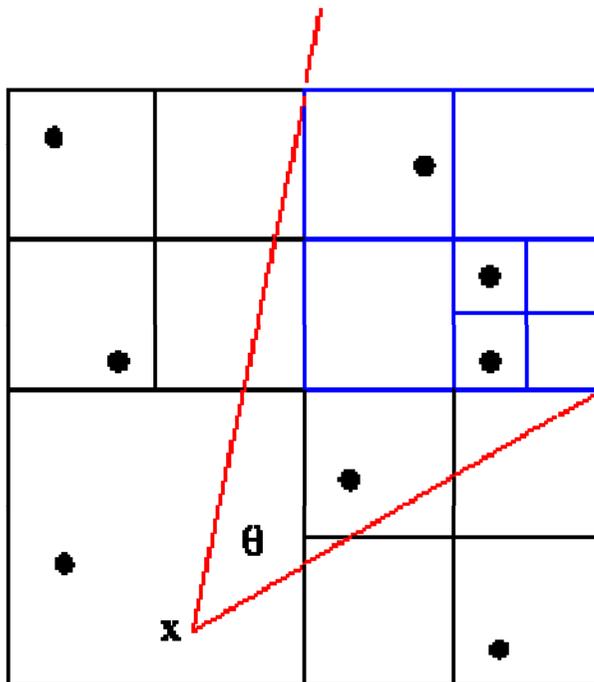
Résolution adaptative: Tree-code



Approx: monopole +
quadrupole, selon critère
d'ouverture

Avantage: pas de grille

Résolution variable



Gaz par SPH
Particules de
fluide

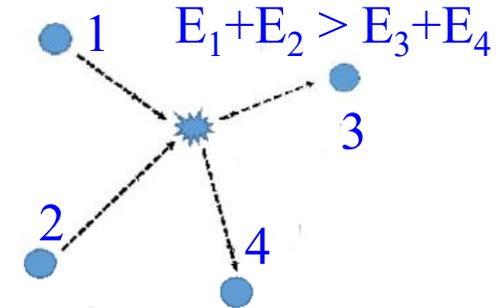
Aussi: AMR
FFT + fluide
sur grille

Barnes & Hut (83)

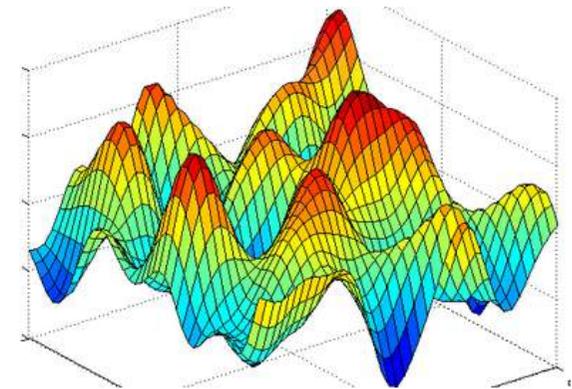
Hydrodynamique: collisions ou SPH

Pour l'hydrodynamique du gaz, l'essentiel est une **faible dissipation**

Collisions entre particules ("**sticky-particules**")
ou bien différences finies (code fluide)



Ou bien à résolution spatiale variable: **SPH**
"Smoothed Particules Hydrodynamics"
(*Lucy & Monaghan 77*)

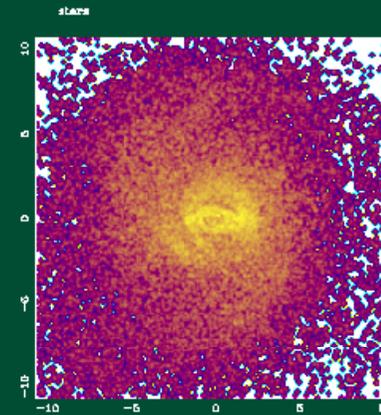
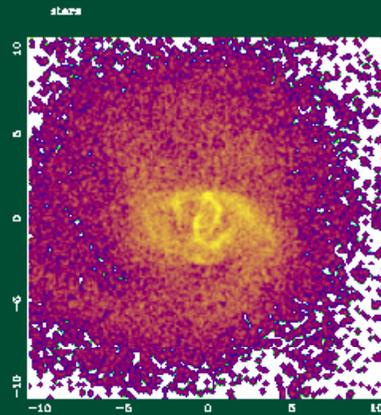
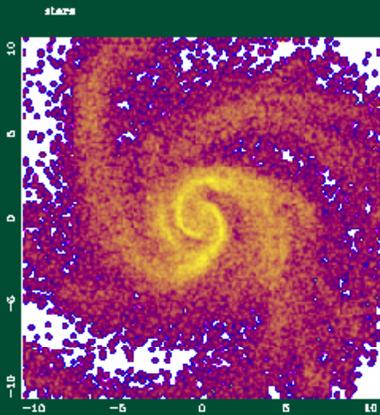


Principe: fonction noyau
dont **la taille est variable**, et doit contenir un nbre fixe de voisins

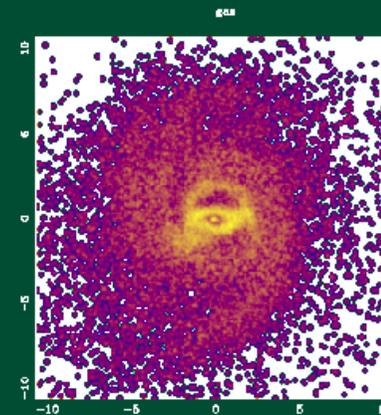
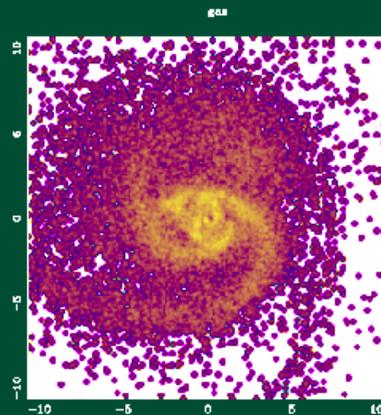
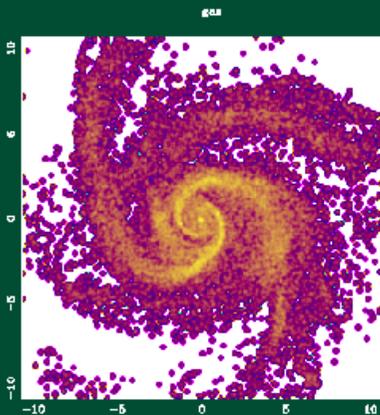
On calcule la densité en moyennant sur les voisins (30-50 voisins)
et toutes les autres quantités et dérivées de même

Formation d'une barre

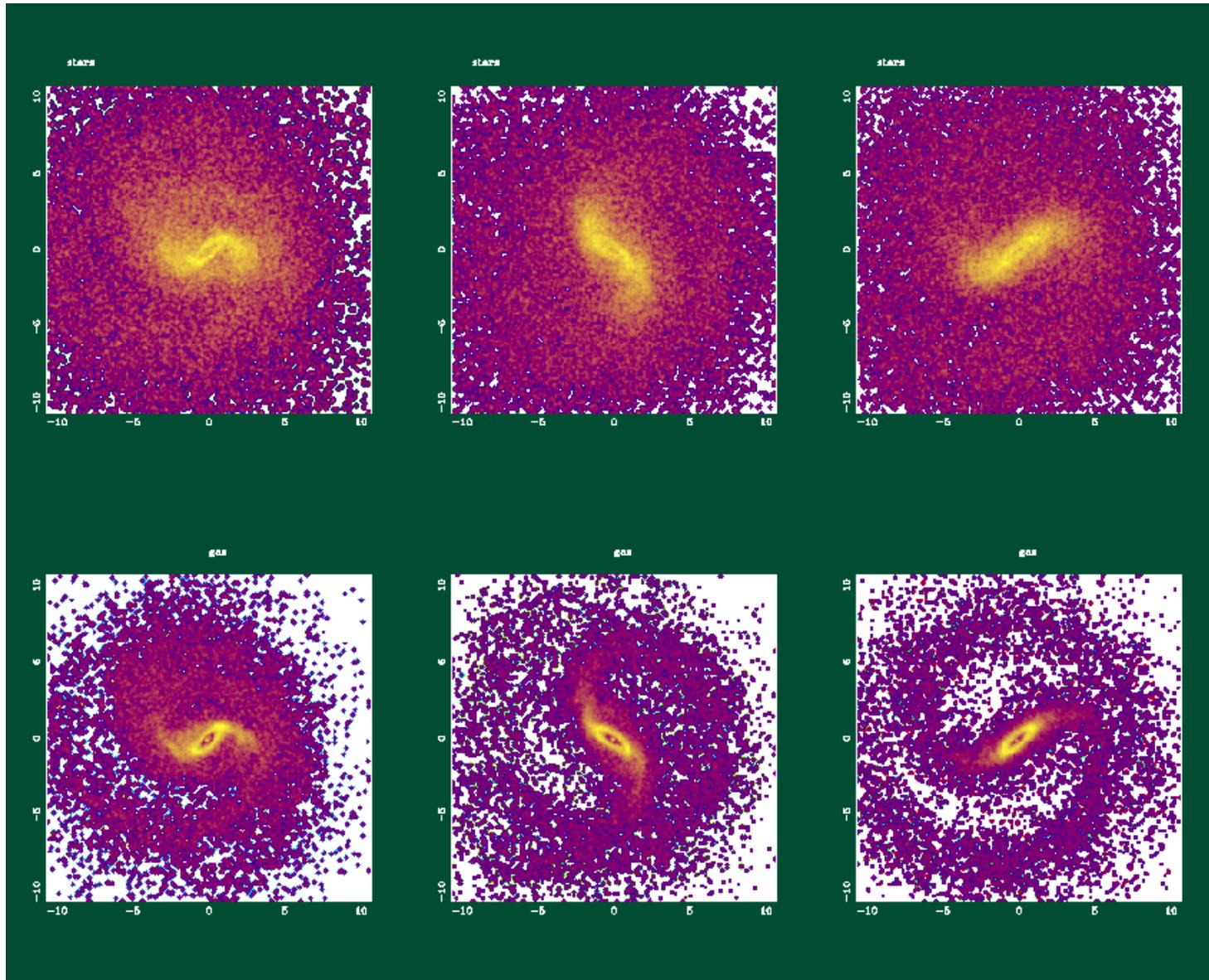
étoiles



gaz

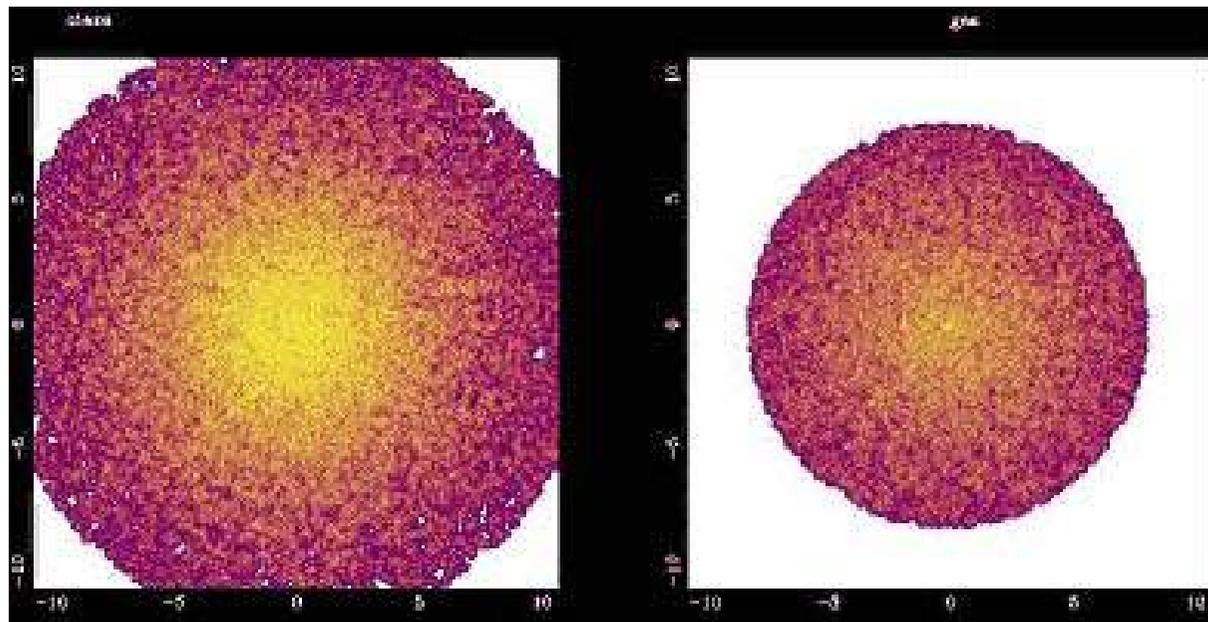


Temps total: 1.2 Gyr



Formation d'anneaux aux résonances

Formation d'une barre: animation



Réponse du gaz à un potentiel barré

Le gaz tend à suivre les orbites périodiques

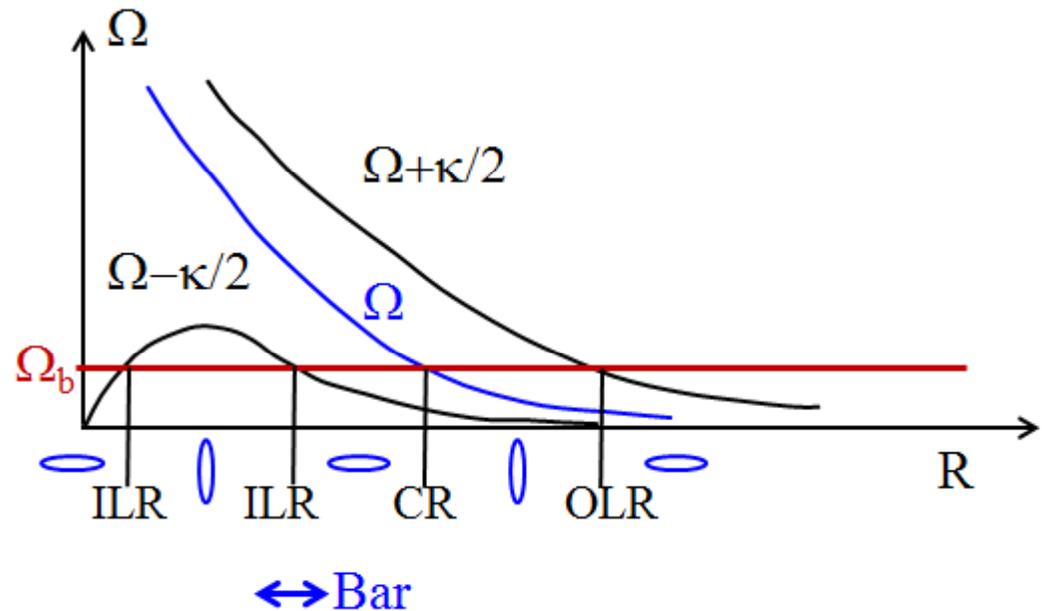
Mais les orbites ne **peuvent se croiser**

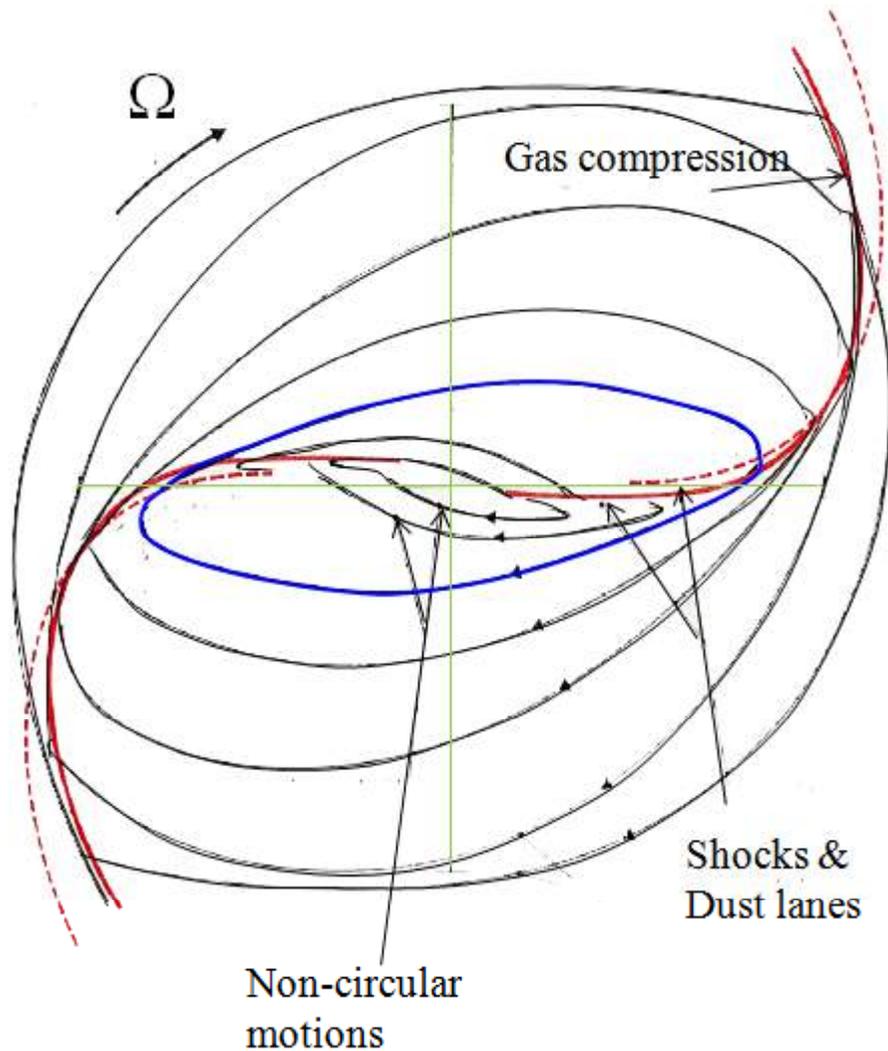
→ collisions, dissipation

→ la réponse du gaz tourne **graduellement** à chaque résonance

→ spirales

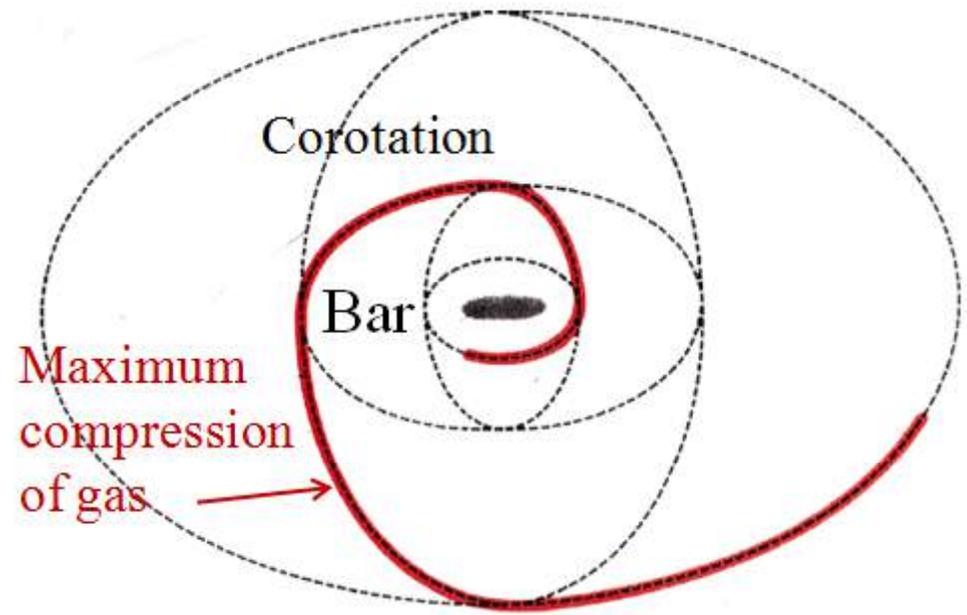
Les familles d'orbites tournent de 90° à chaque résonance

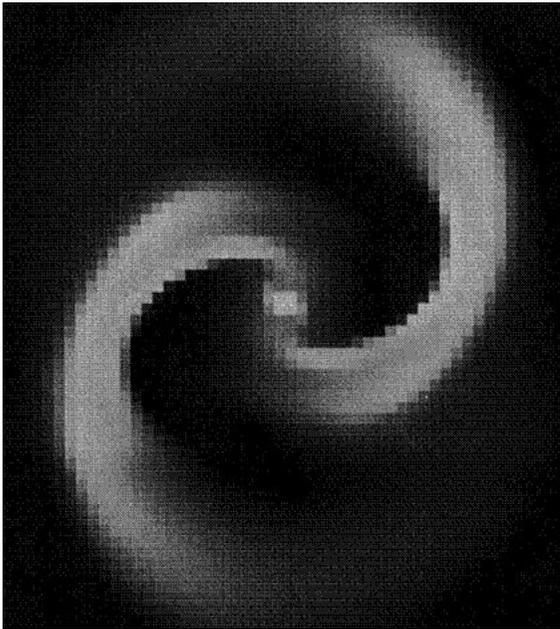




La rotation des orbites
 périodiques à chaque résonance
 conduit à une précession
 progressive des lignes de courant
 du gaz

La spirale est ouverte
 Rotation de 180-360°





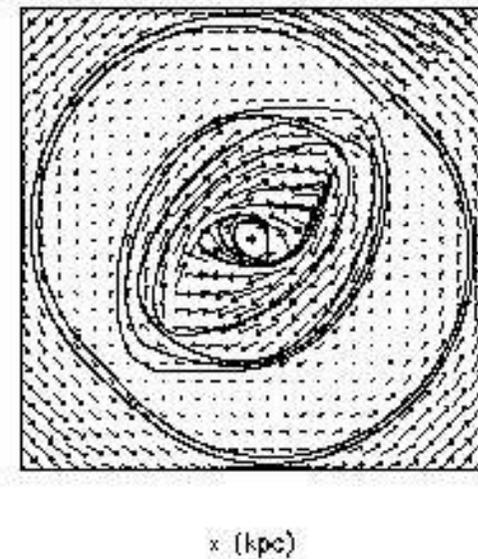
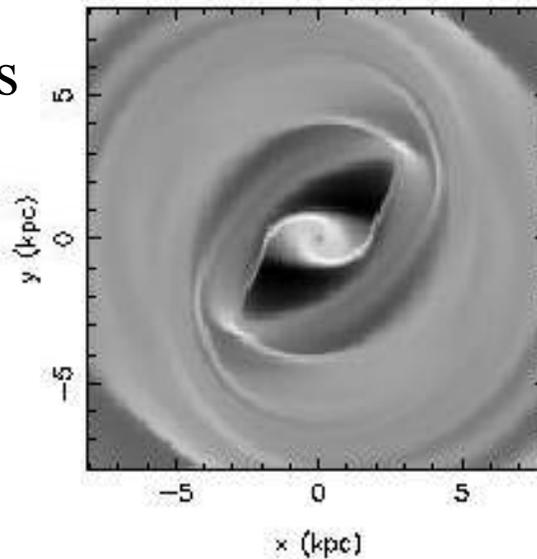
Le nombre de tours de la spirale est relié au nombre de résonances
Sanders & Huntley 1976

Selon la nature du gaz, la réponse change de morphologie
Ondes de choc, si gaz fluide



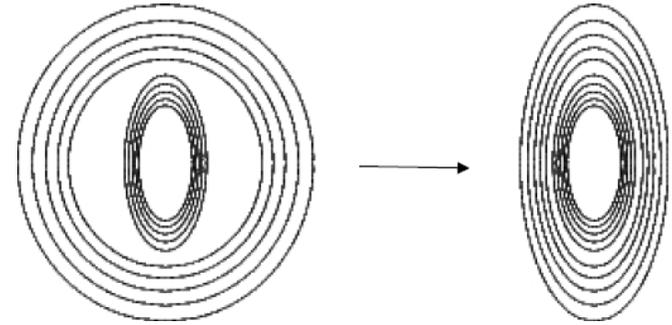
barre à 45°
La présence de 2 résonances
ILR \rightarrow orbites x2
 \rightarrow Ondes de choc

Athanassoula 1992



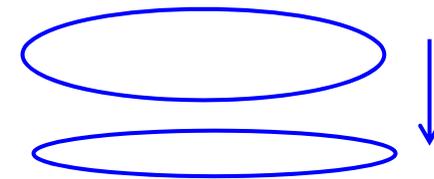
Vitesse Ω_b de la barre

La taille de la barre, R_b toujours
légèrement inférieur au $R_{\text{corotation}}$



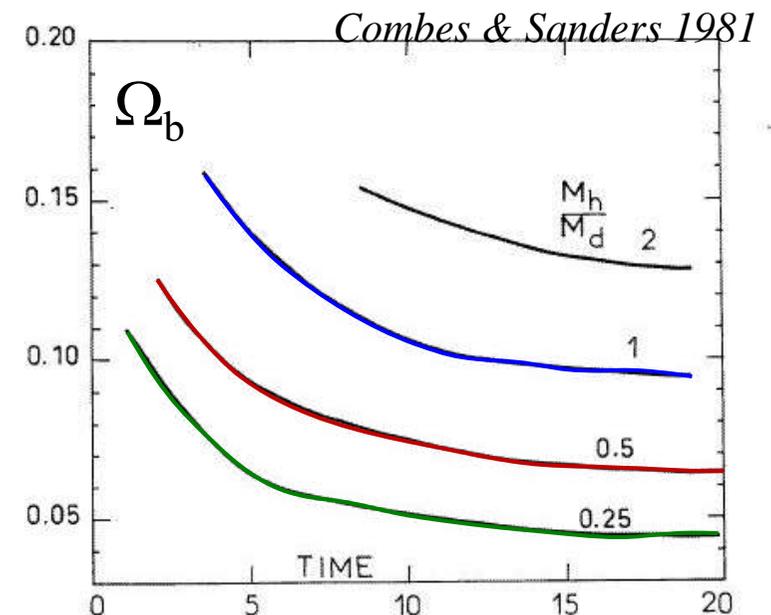
Durant sa croissance la barre se ralentit, perd du **moment angulaire**

- Les bras spiraux transitoires stellaires emportent du moment angulaire
- la barre se renforce, les orbites sont plus allongées
- La précession équivalente est plus faible



Ceci en négligeant les effets de la friction
dynamique sur le halo

La rotation des barres devrait être très
ralentie par la **matière noire**
Debattista & Sellwood (2000)



Friction sur la matière noire

Les modèles cosmologiques de matière noire ont tous un pic de densité au centre (cuspside, profil NFW, $\rho \propto 1/R$)

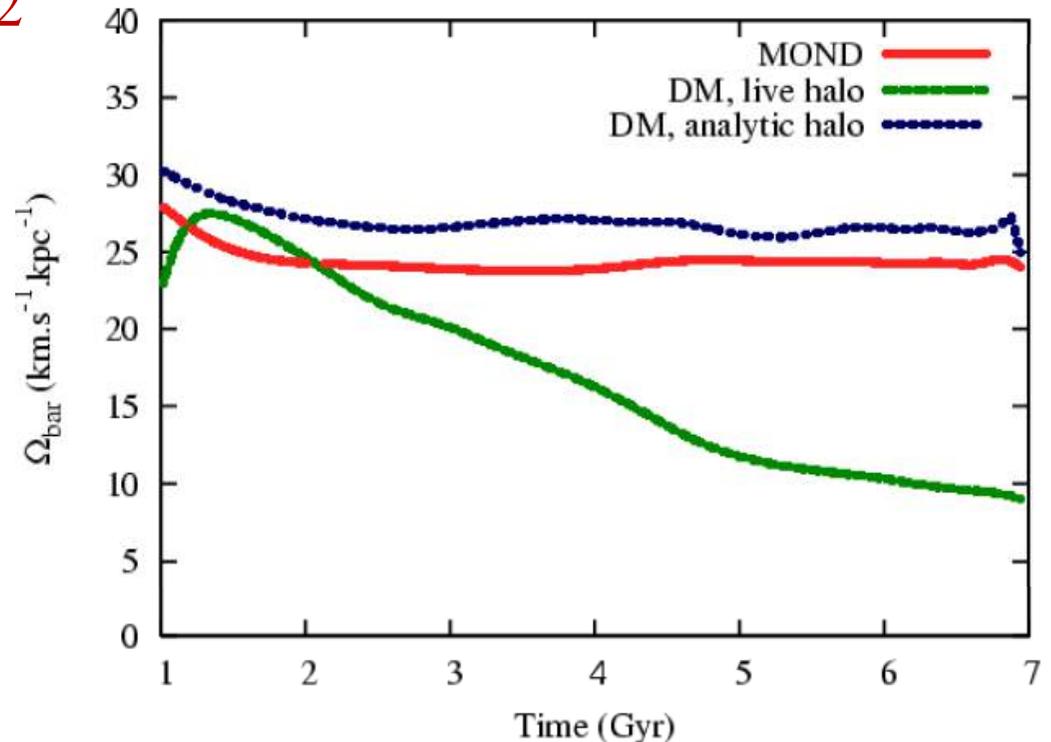
La barre tournante est freinée par friction, et perd toute sa vitesse

→ La corotation devrait être renvoyée hors du disque

→ L'observation $R_{CR}/R_{bar} \sim 1.2$ contraint la présence de matière noire au centre
Debattista & Sellwood (2000)

Ou bien changement complet de modèle?

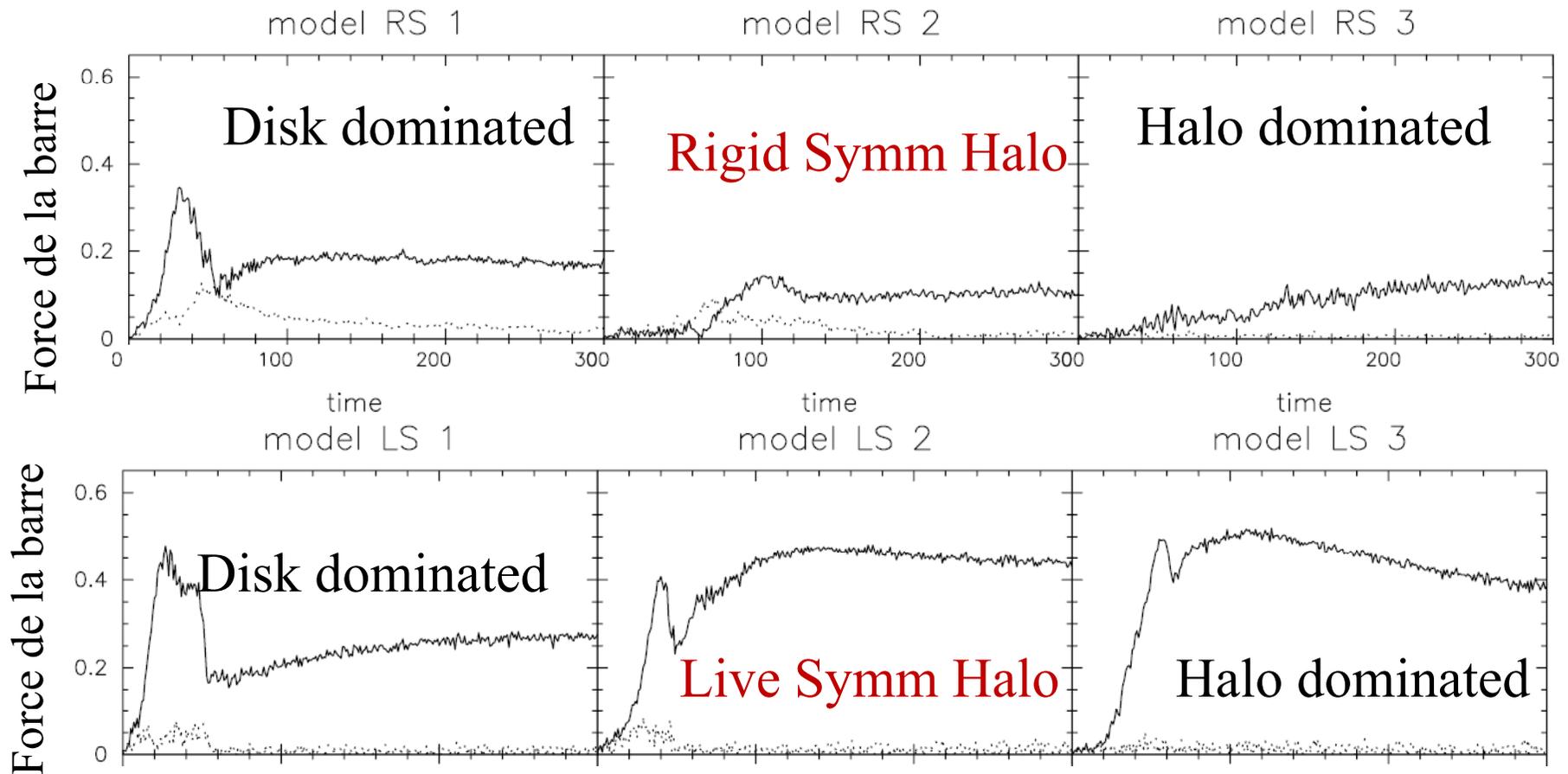
→ Gravité modifiée
(Tiret & Combes 2007)



Matière noire et barres

Ostriker & Peebles 1973: les galaxies sont stabilisées et les barres supprimées par le **halo de matière noire**

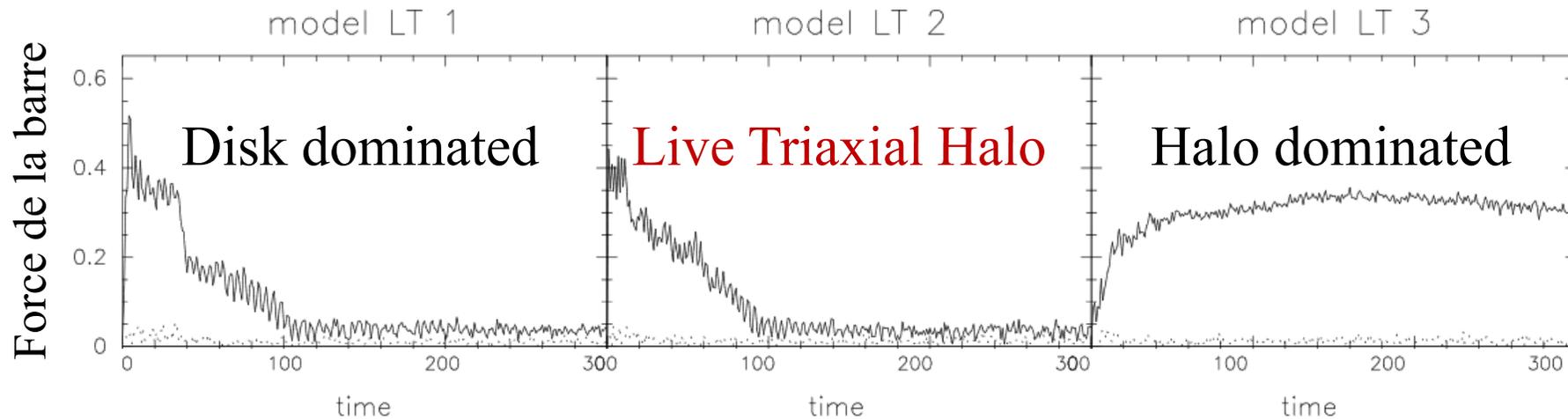
+Critère de Toomre $Q = c_r / c_{\text{crit}}$ $c_{\text{crit}} = 3.36 G \Sigma / \kappa$ $Q \gg 1$ stabilise



Athanassoula 2002, 03, Berentzen et al 2006

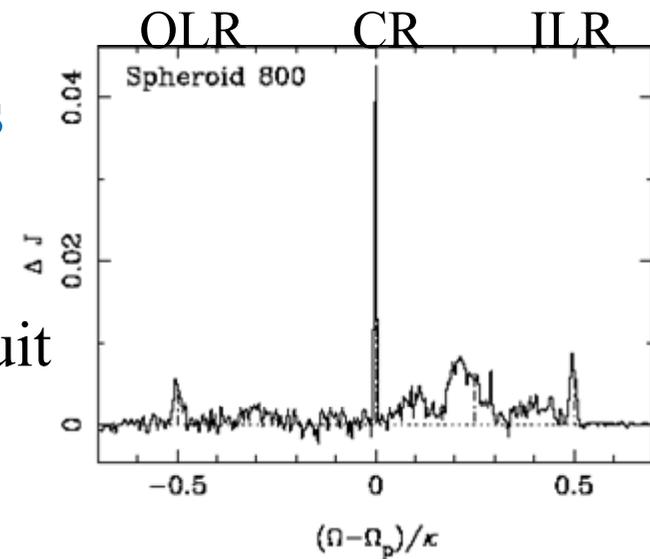
Les halos noirs de forme triaxiale

Par contre, si les halos ne sont pas axi-symétriques, ils peuvent affaiblir les barres



Les structures triaxiales produisent du chaos (affaiblissent les résonances)

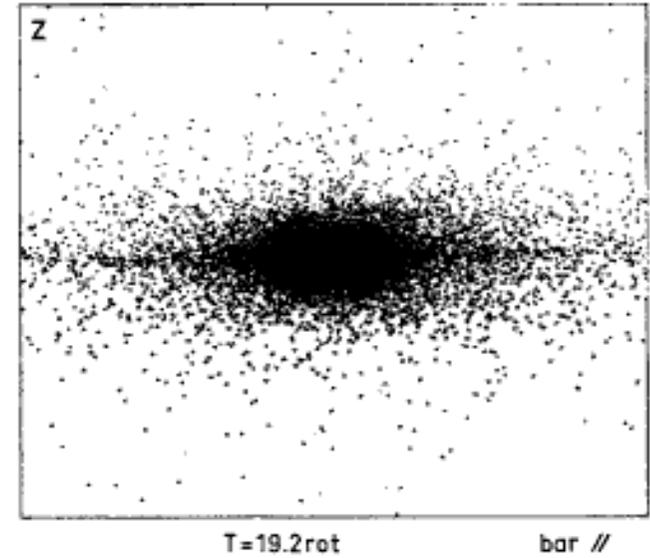
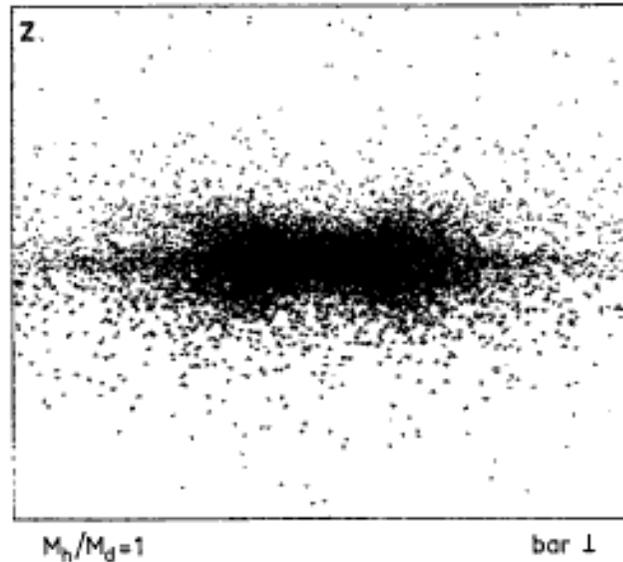
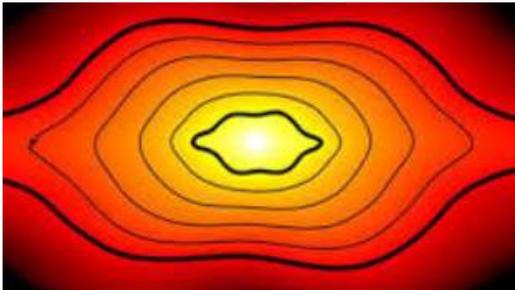
L'interaction du disque avec le halo se produit aux résonances *Athanassoula 2003*



Profil vertical: cacahuètes

Résonance en z
(Combes & Sanders 81
Combes et al 90)

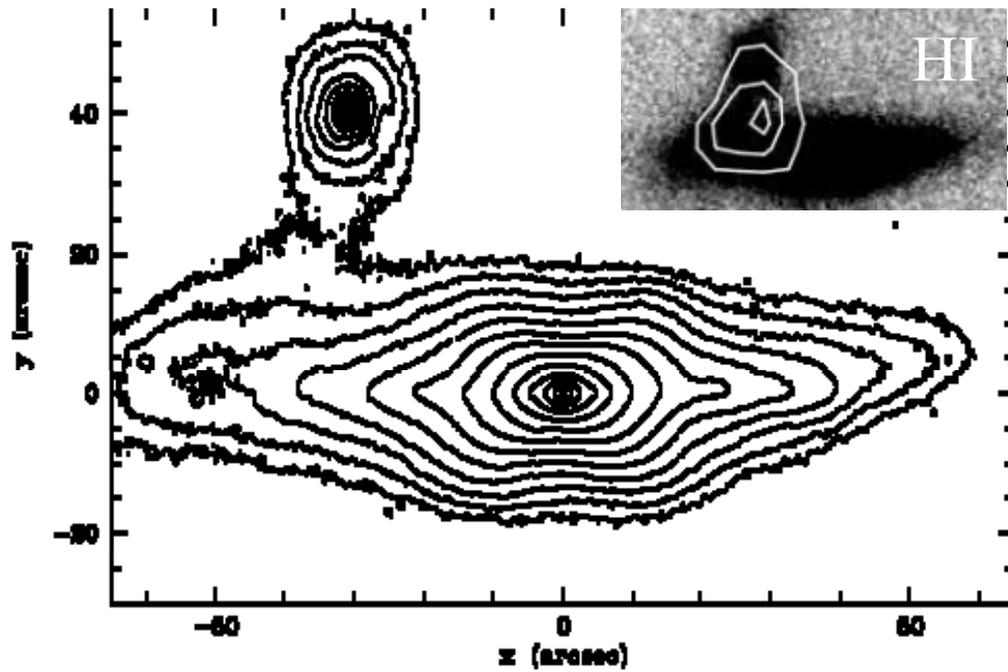
N128



ESO 597-G036

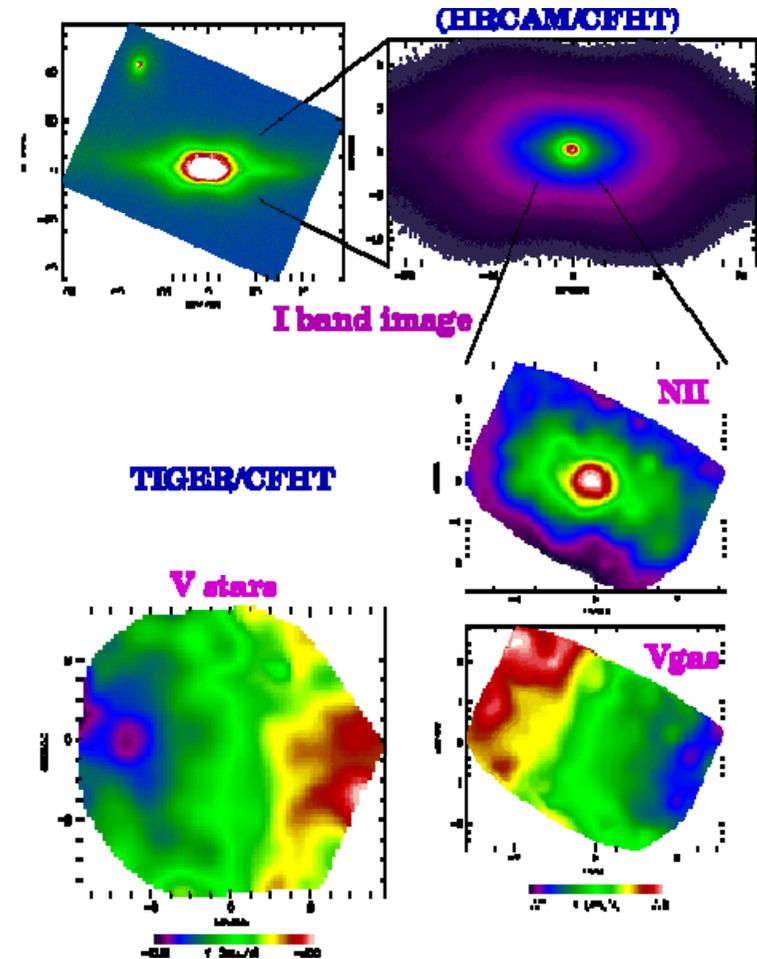


La barre dans la direction
verticale se développe
toujours en "peanut"
au bout de qqes Gyr
Forme de boîte dans l'autre
orientation



NGC 128

Galaxie cacahuète

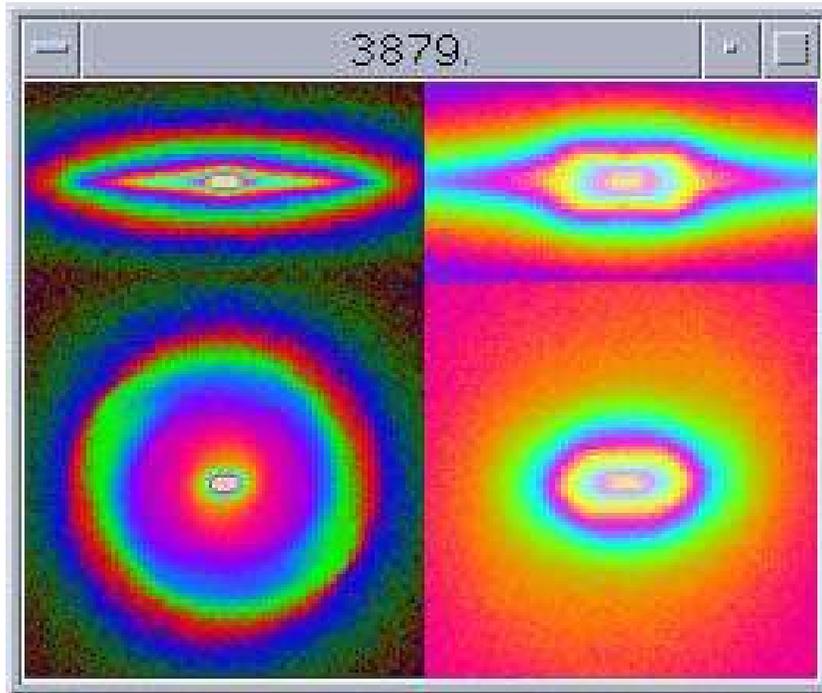


COBE, DIRBE Voie Lactée

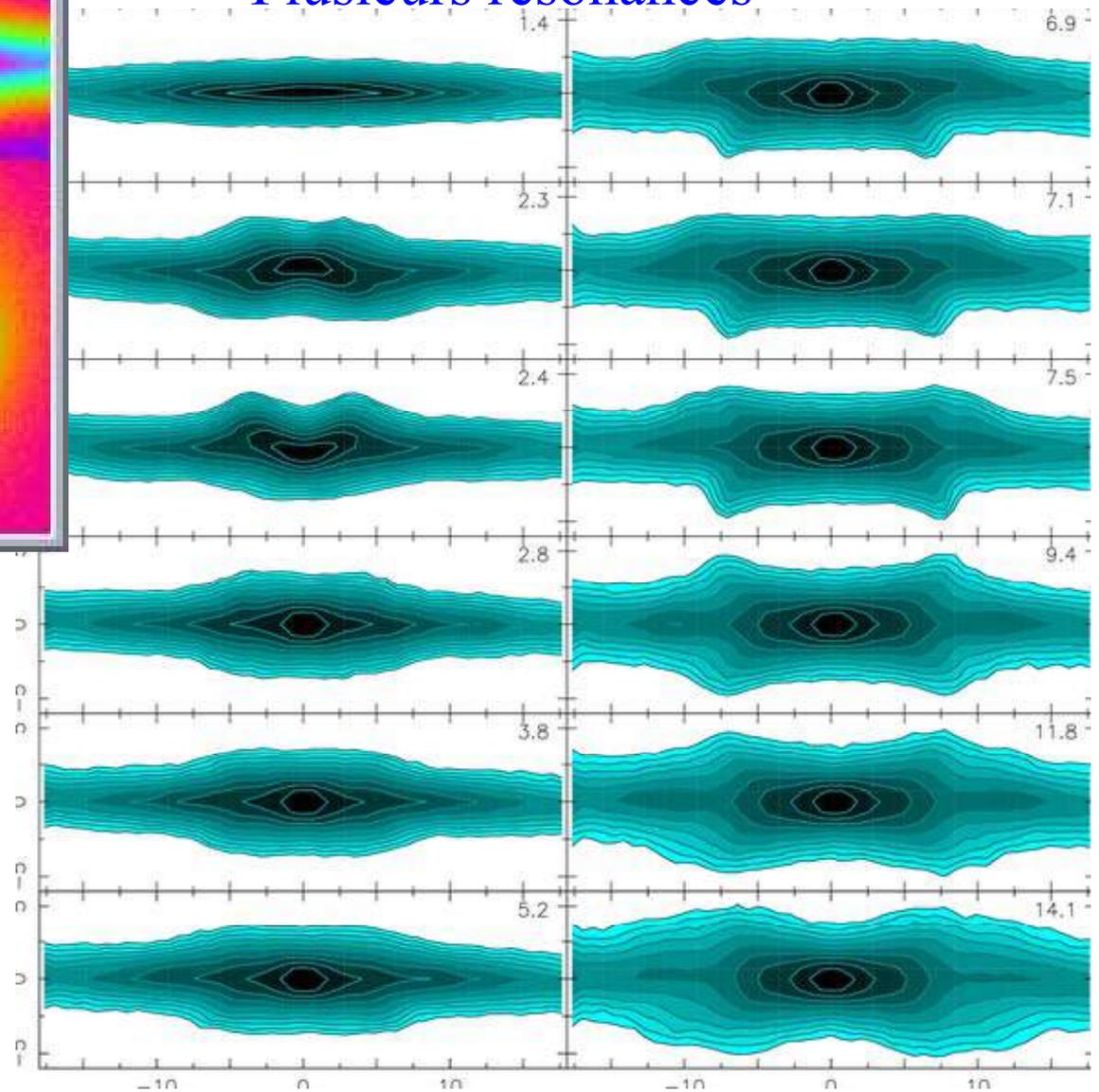


Chung+2012, Emsellem+1997

Formation des bulbes/peanuts



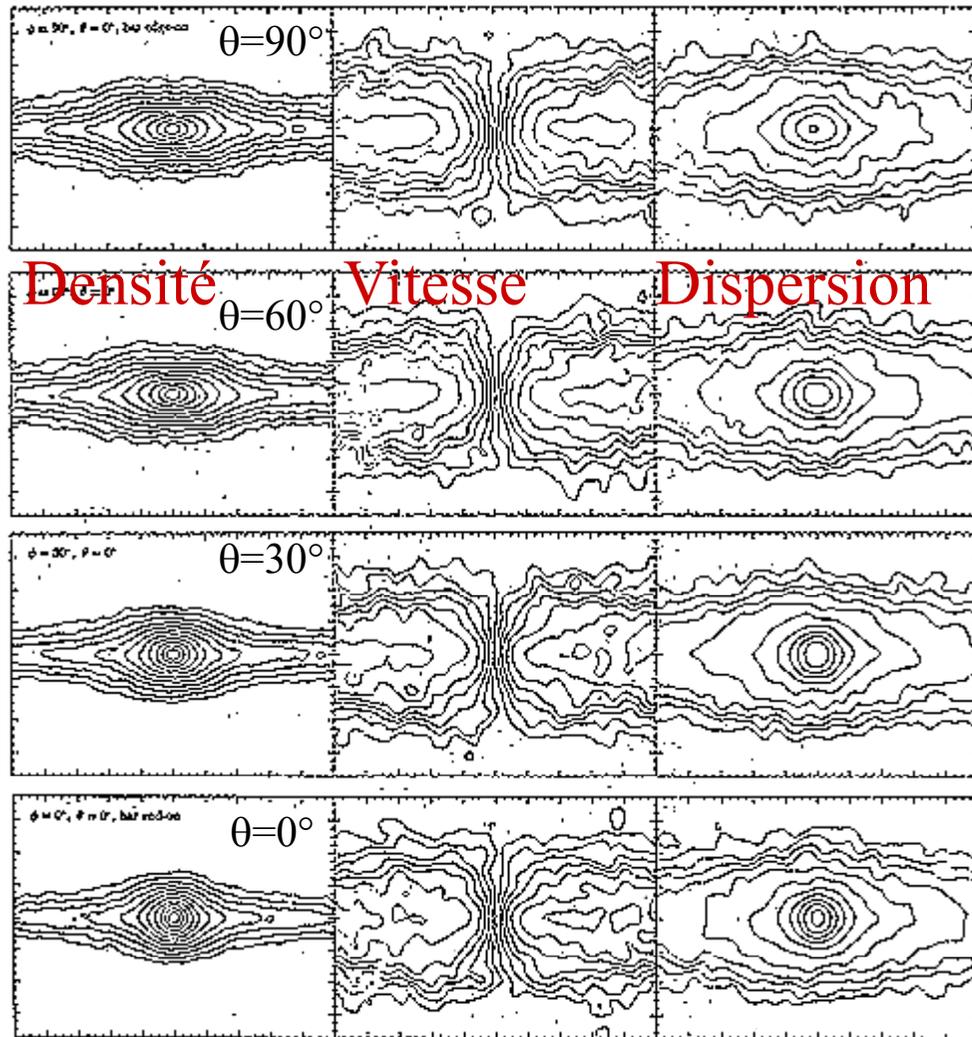
Plusieurs résonances



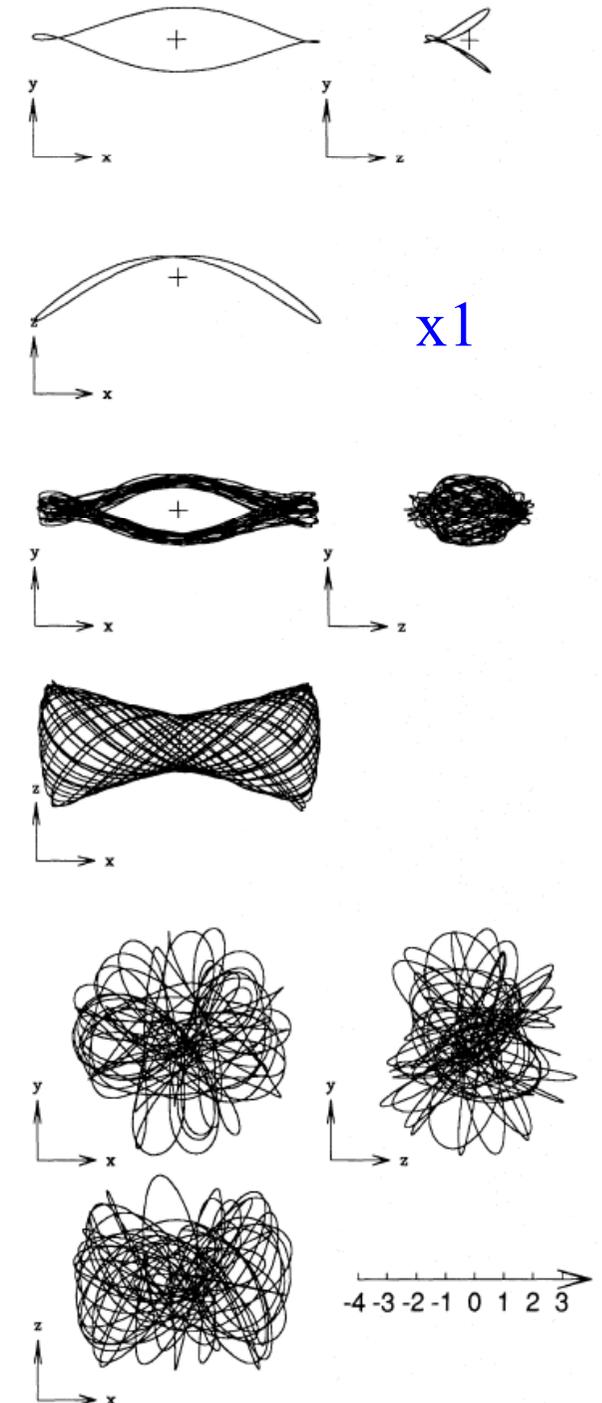
*Simulations de
Pfenniger, Martinez-Valpuesta*

Orbites périodiques à 3D: résonance Linblad en z explique l'existence des peanuts

→ Vitesse de rotation cylindrique



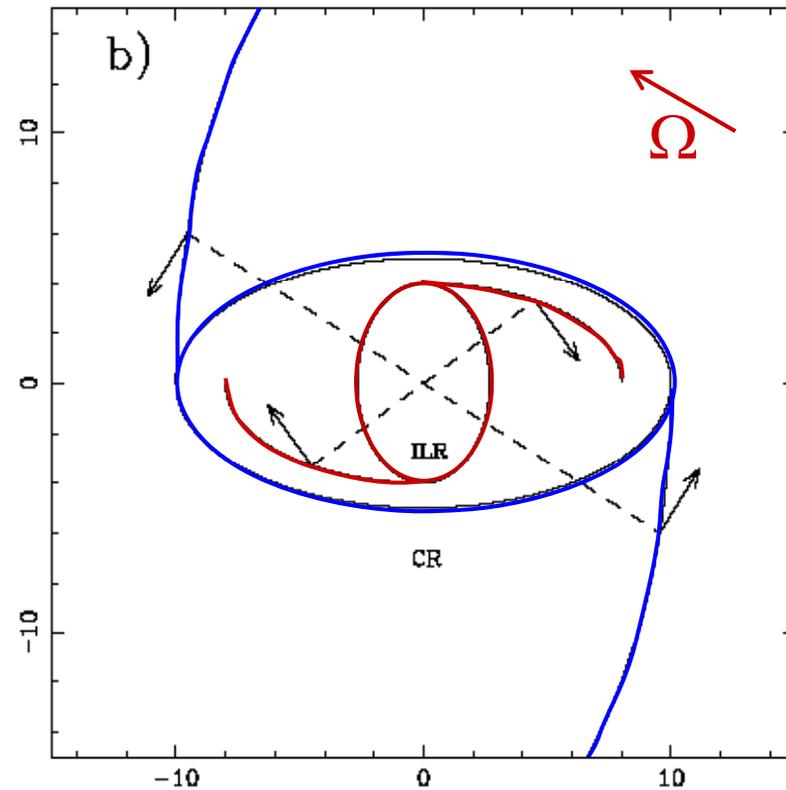
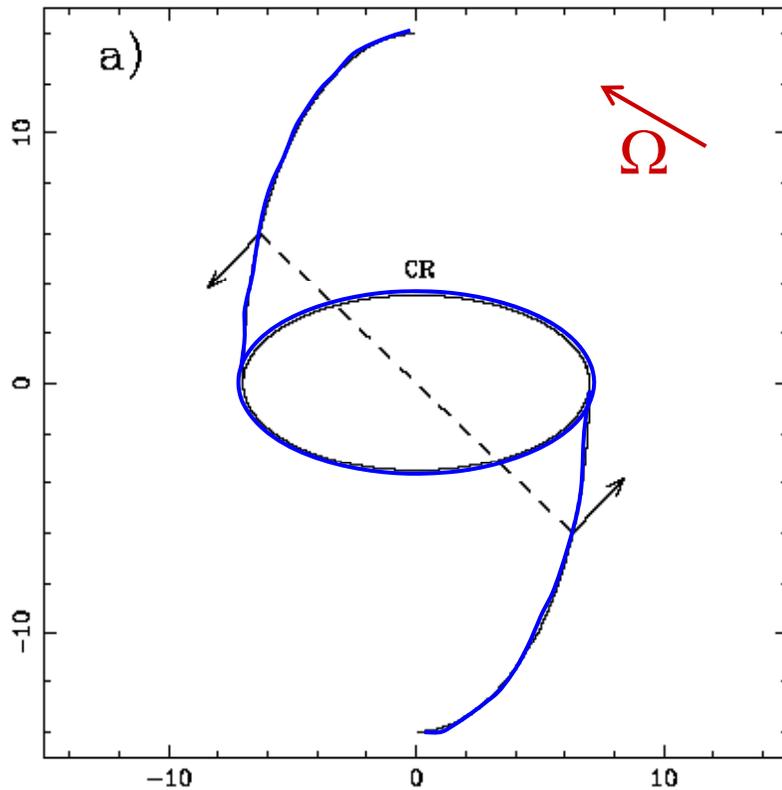
Combes et al 1990



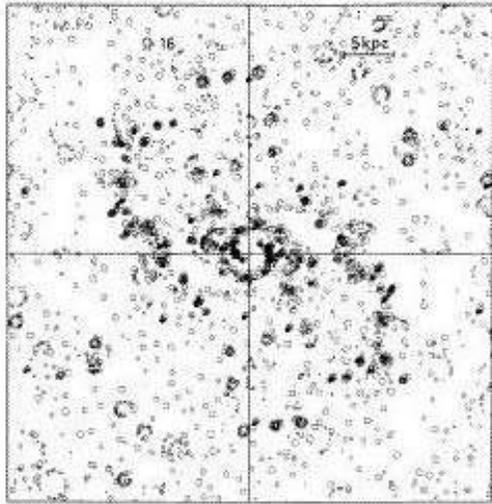
Couples exercés par la barre sur le gaz

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

Le gaz à l'intérieur de la CR va perdre son moment, **tombe vers le centre**
A l'extérieur de la CR, au contraire, le gaz **s'accumule à l'OLR**

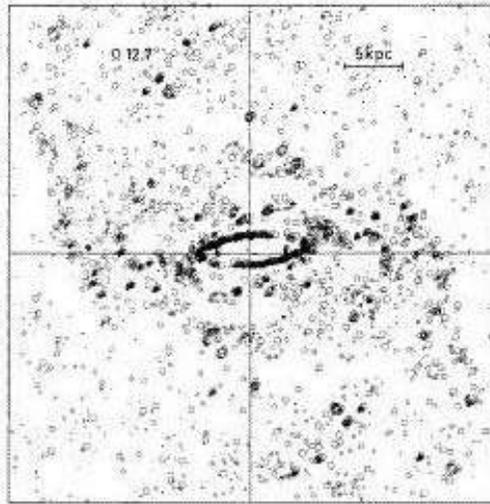


Formation d'anneaux

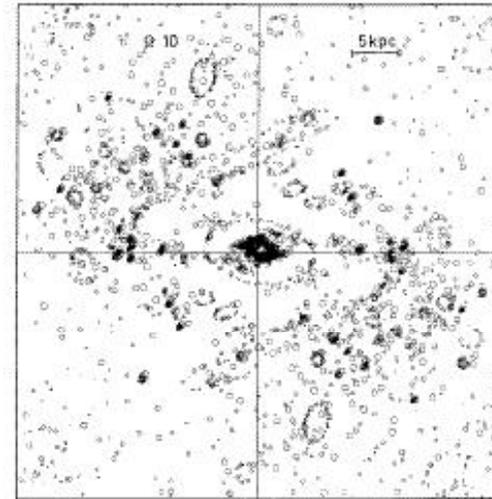


$\Omega_b = 16 \text{ km/s/kpc}$

ILR Combes & Gerin 1985

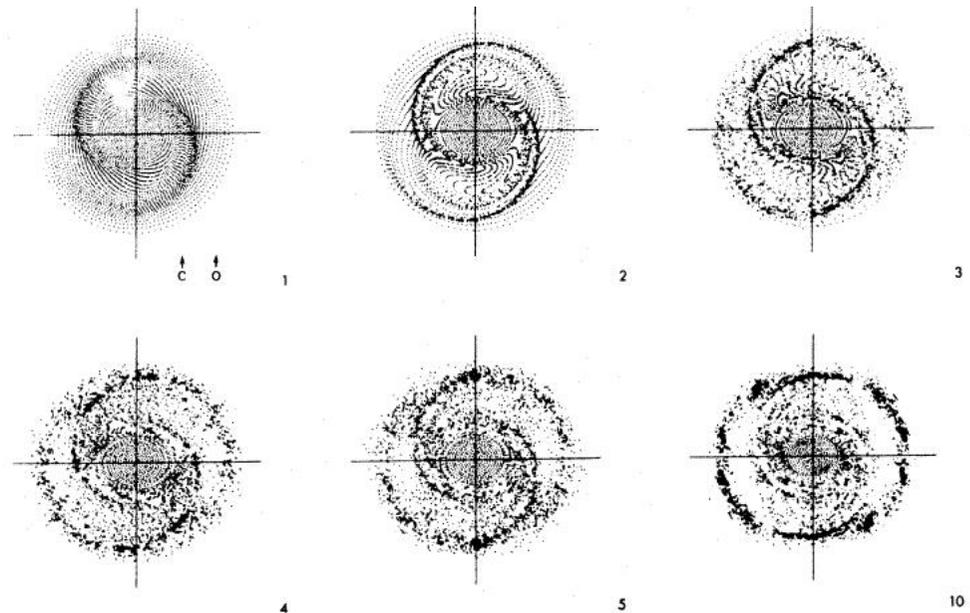


$\Omega_b = 13 \text{ km/s/kpc}$



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

Formation d'un anneau
à l'OLR
Schwarz, 1981



Formation d'anneaux aux résonances

Donne une idée de V_s

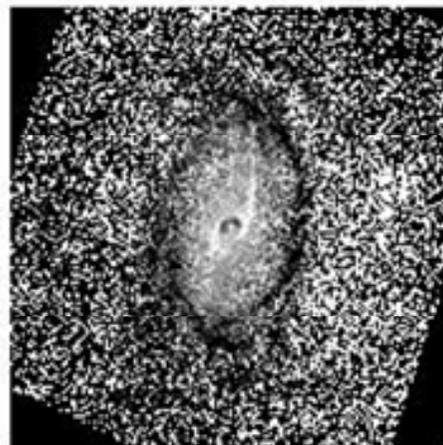
→ pas trop de viscosité

Les couples de
gravité changent de
signe à chaque résonance

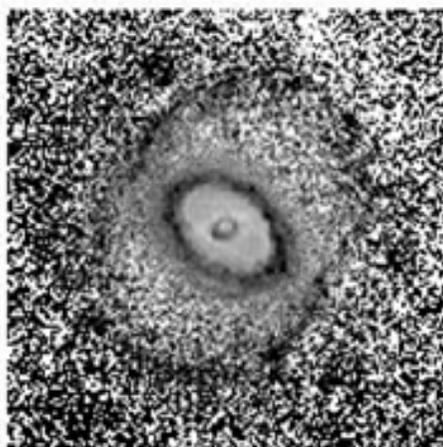
Le gaz provient de chaque
côté

→ Relatif équilibre

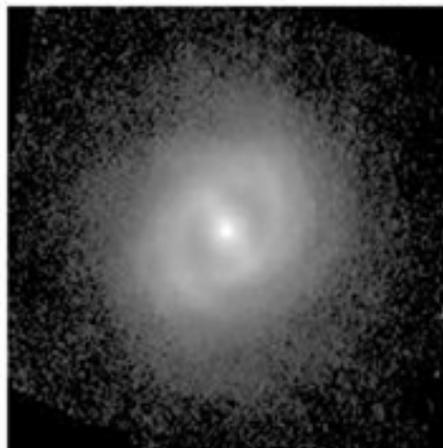
Buta & Combes 2000



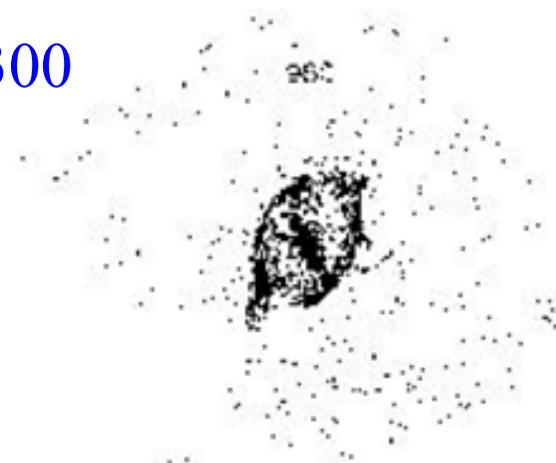
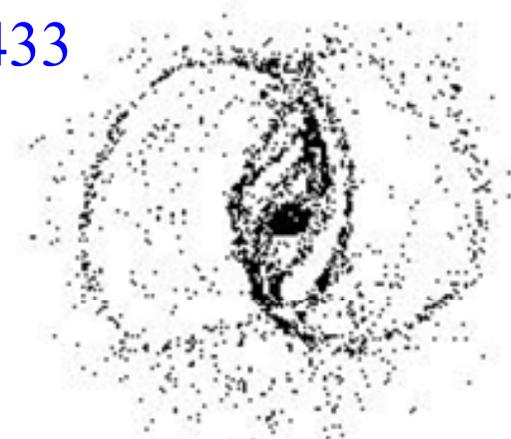
N1433



N3081



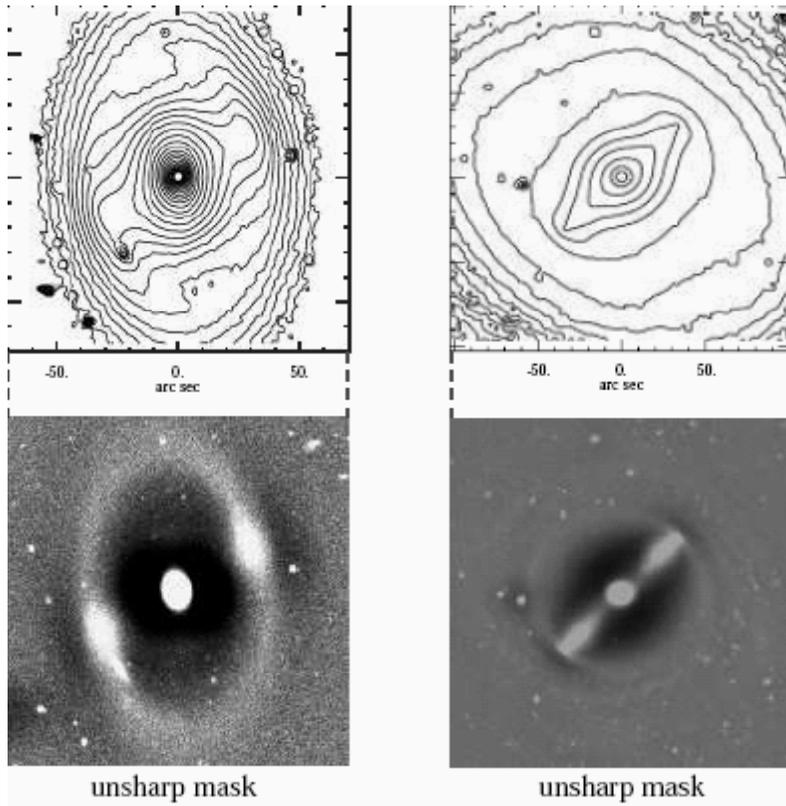
N6300



Barres nucléaires

Phénomène observé depuis longtemps,
mais expliqué que
depuis quelques années

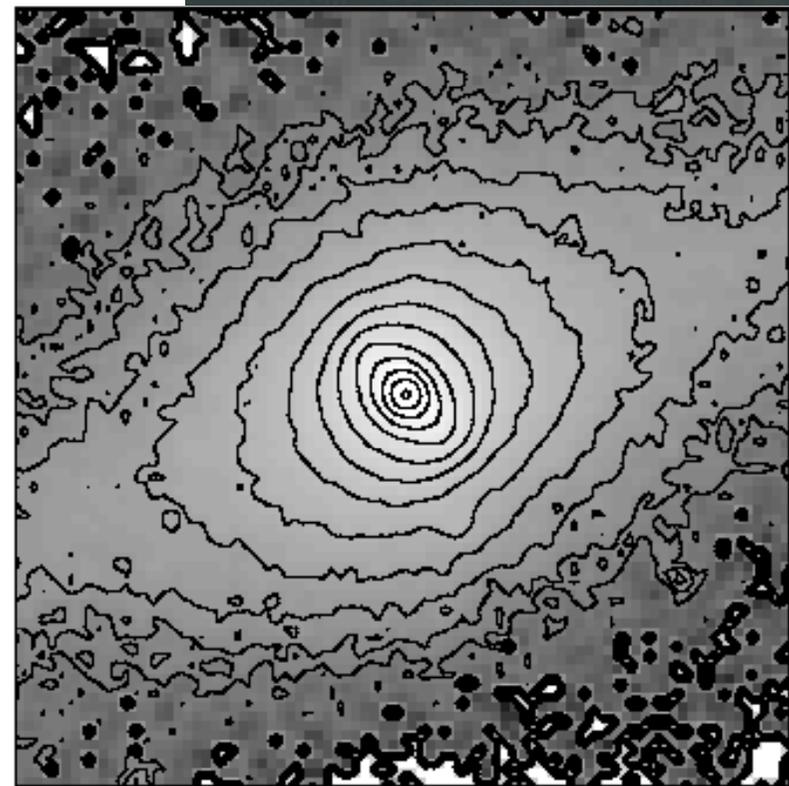
NGC 4314



NGC 5850

Erwin 2004

Contours + B-V colors



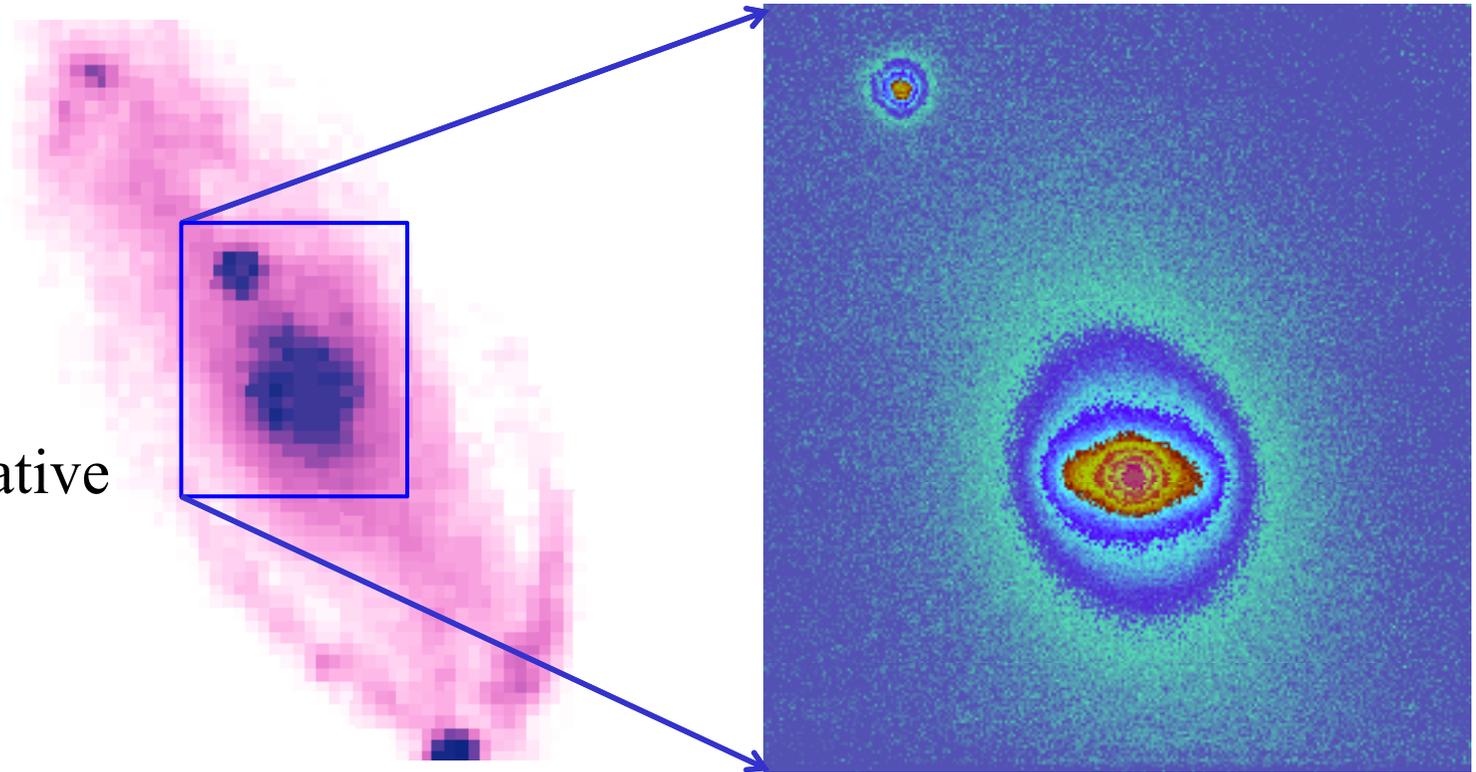
NGC 5728

DSS

+CFH

Optique Adaptative

NIR

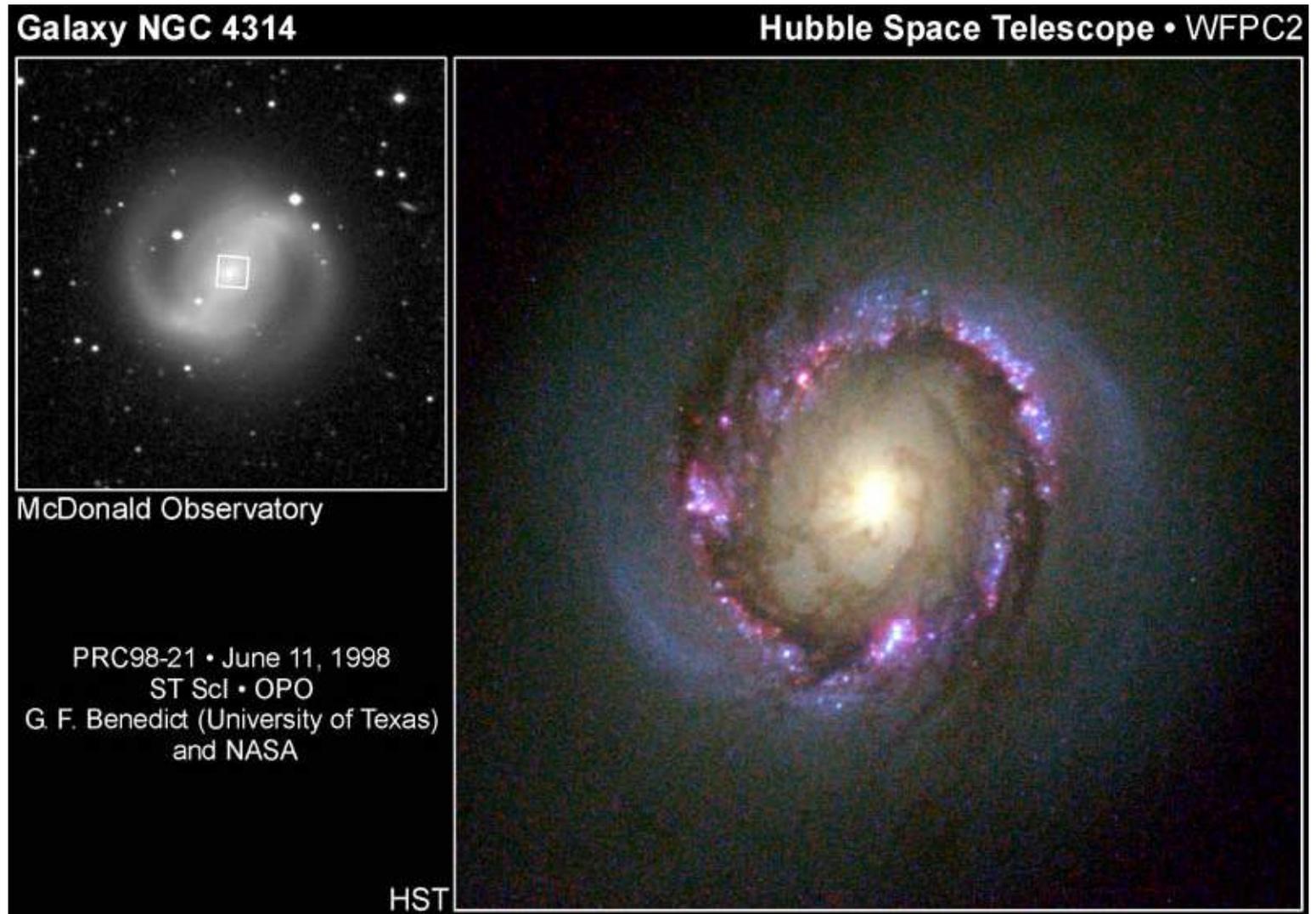


Il peut se former deux barres emboîtées, comme des poupées russes. Ici une **barre nucléaire** (droite, champ de 36") au sein de la barre primaire (gauche, champ de 108"). Noter l'étoile en haut à gauche de la barre nucléaire, qui se retrouve dans les deux images et donne l'échelle relative. La barre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

Combes et al. 2001

NGC4314

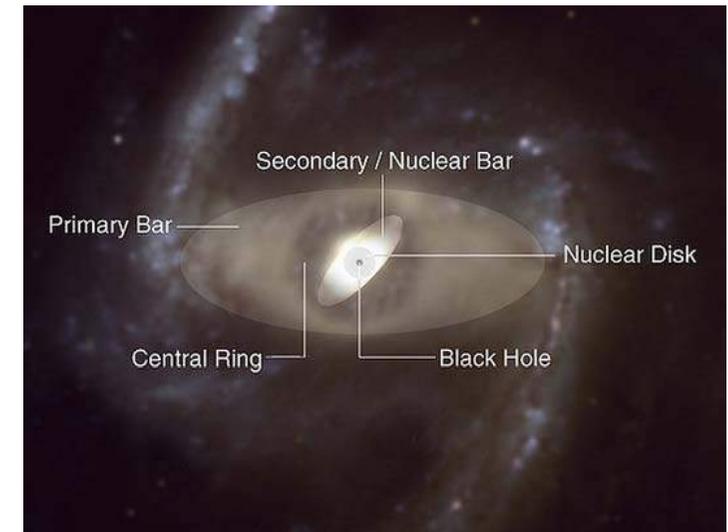
Formation
d'étoiles dans
l'anneau
entourant
la barre
nucléaire



Les barres nucléaires sont surtout visibles en proche-infrarouge (NIR), non perturbé par l'extinction, et les étoiles jeunes

Découplage de barres nucléaires

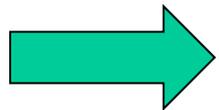
Evolution naturelle d'un disque barré, avec gaz: **accumulation de masse vers le centre, couples de gravité**



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 ($\Omega - \kappa/2$)

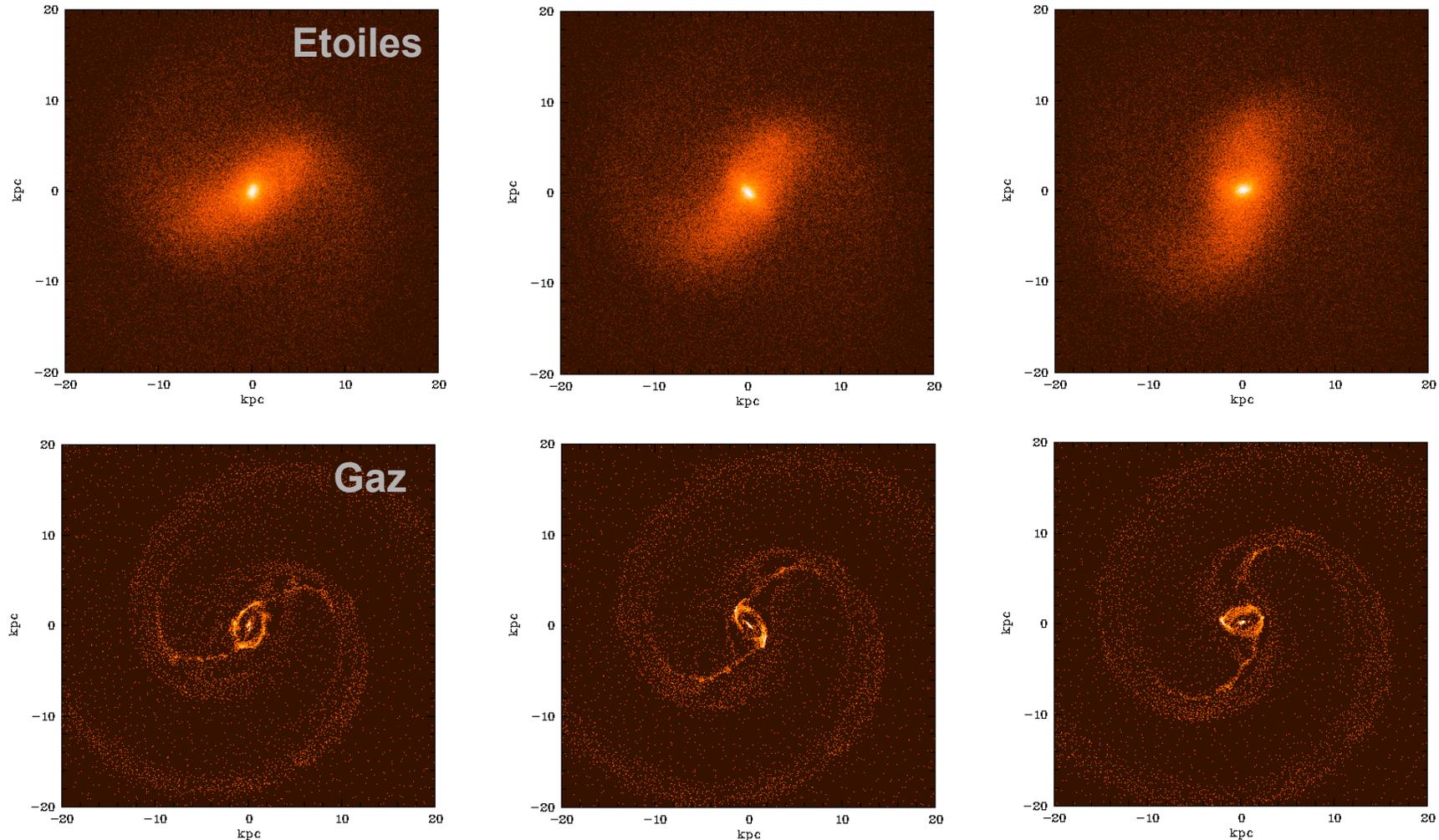
La matière du centre ne peut plus suivre le reste du disque

 découplage

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

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

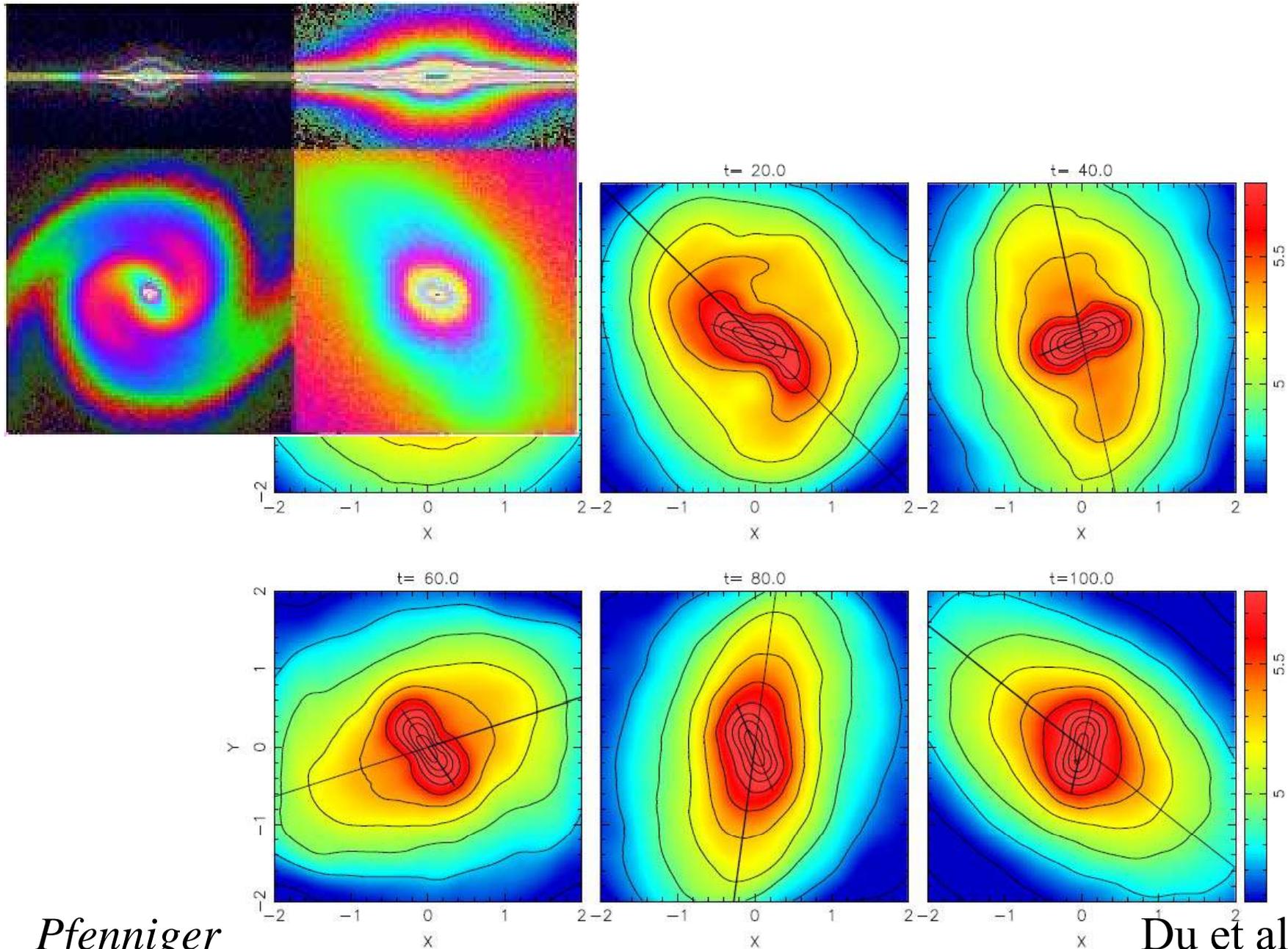
Barres secondaires: à l'intérieur de l'anneau ILR



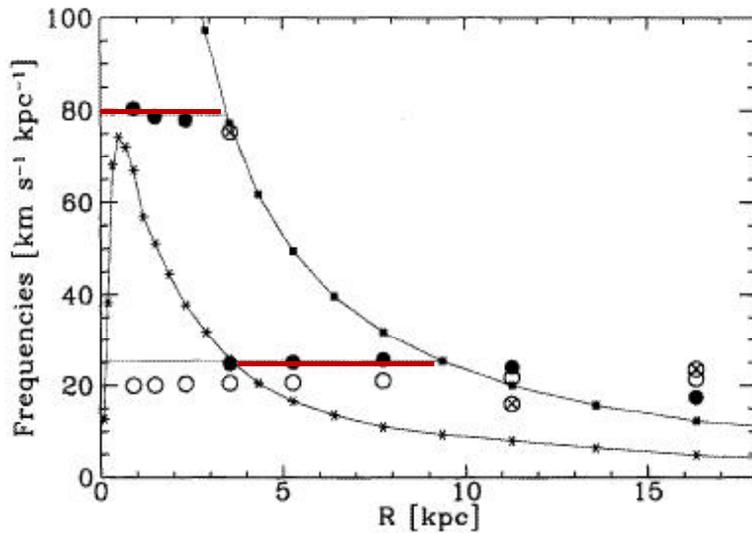
N corps + SPH (D. Friedli)

t

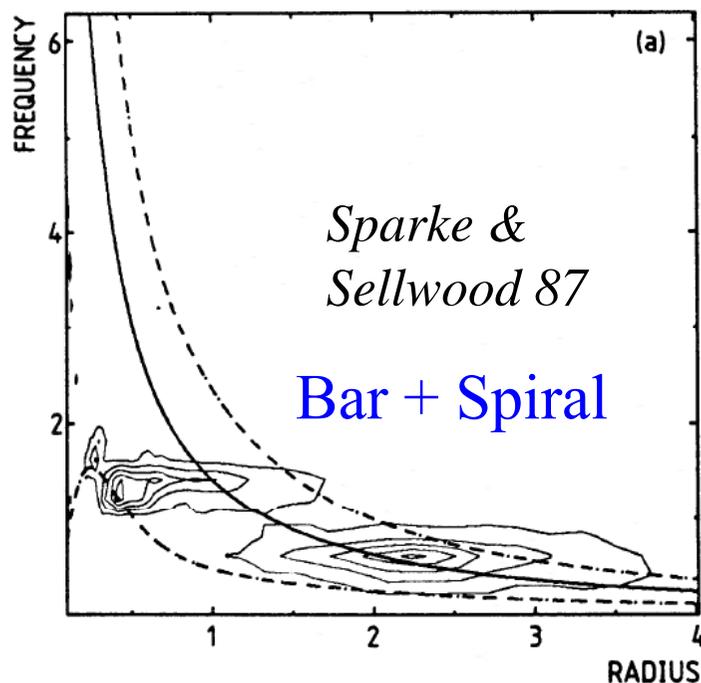
Barres et doubles barres



Vitesse angulaires comparées des deux barres



Couplage non linéaire entre les deux ondes $\Omega = \omega/m$
 Entretien et échange d'énergie? ω_1, ω_2



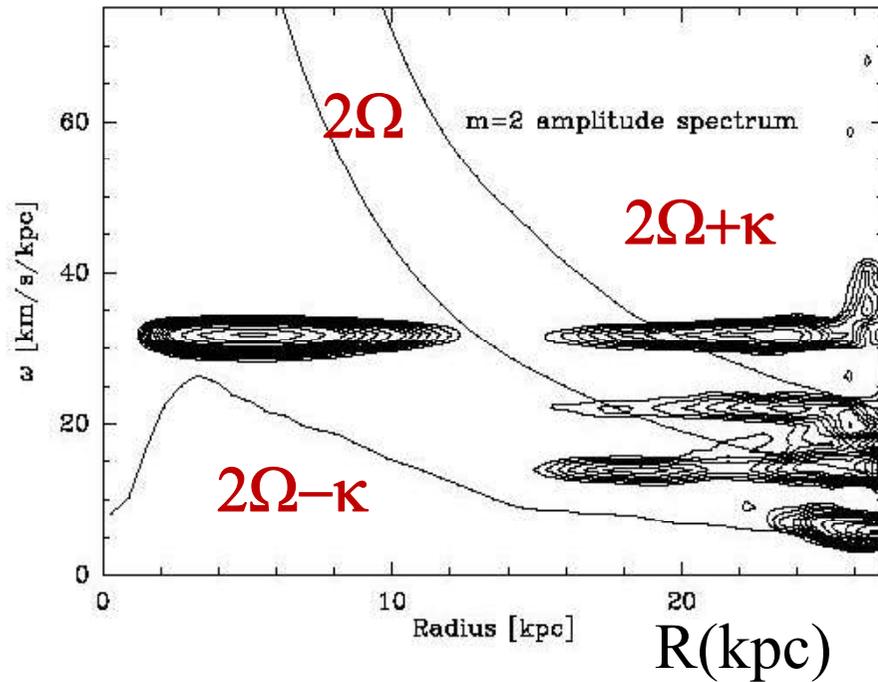
$$\xi_{1,2} \propto e^{i(\omega_{1,2}t - m_{1,2}\theta)}$$

Produit $\xi_1 \xi_2^*$ avec $V \text{ grad } V$
 ou bien $\rho \text{ grad } \Phi$, etc...

$$\xi_B \propto e^{i[(\omega_1 \pm \omega_2)t - (m_1 \pm m_2)\theta]}$$

battement $m_b = m_1 \pm m_2$

$$\omega_b = \omega_1 \pm \omega_2$$



Battement Barre-spirale

Spectre d'amplitude pour le mode $m=2$ *Masset & Tagger 97*

$2\Omega \pm \kappa$ versus r
 donne le lieu des résonances de
 Lindblad ILR, OLR à $t=8$ Gyr

Spectre $m=4$

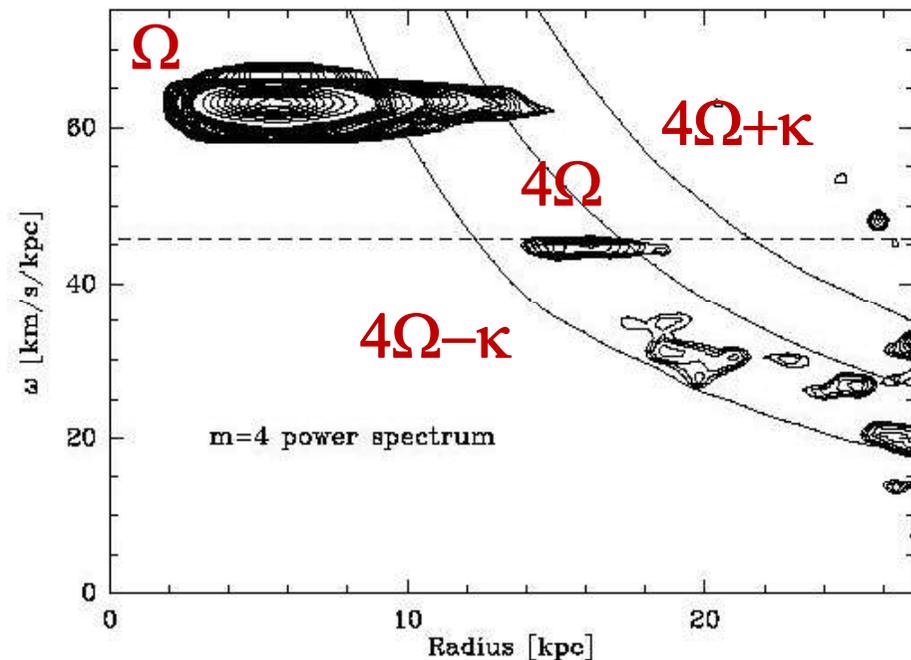
Les courbes $4\Omega \pm \kappa$ versus r

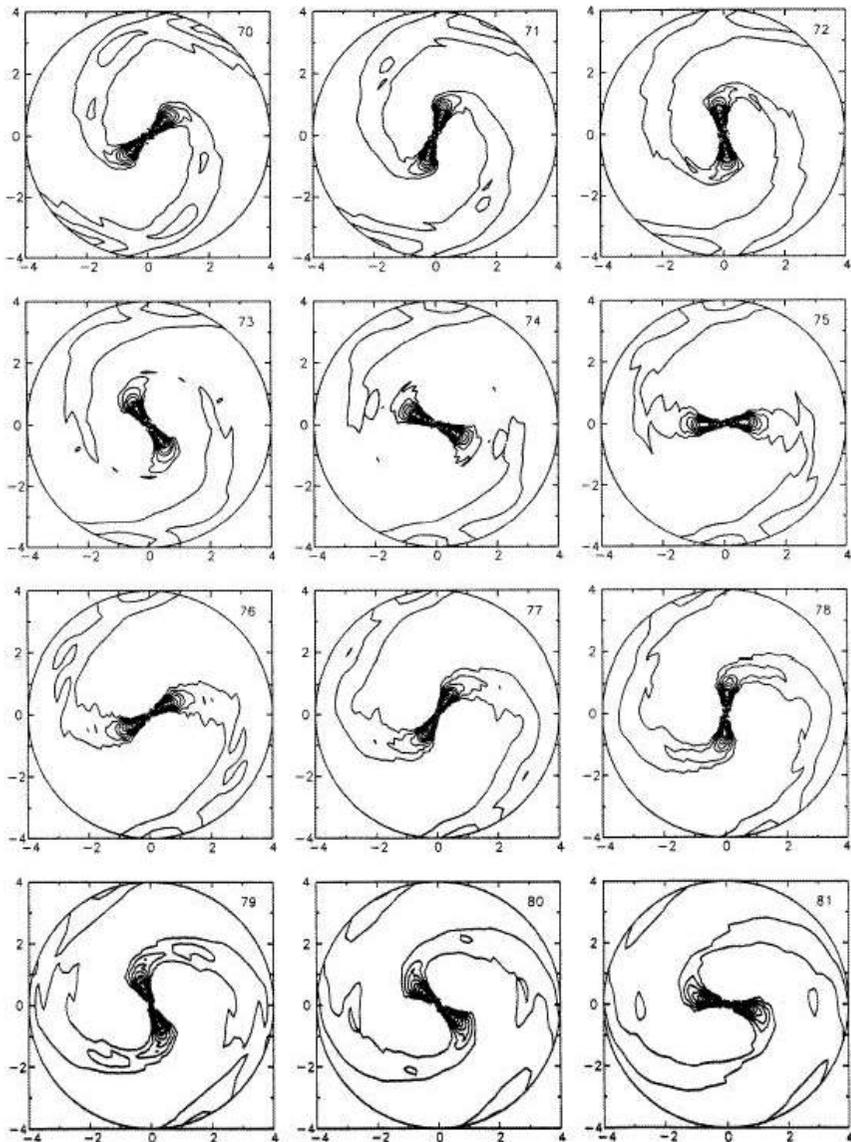
onde de battement $m=4$

obtenue à la bonne fréquence

$$\omega_b + \omega_s$$

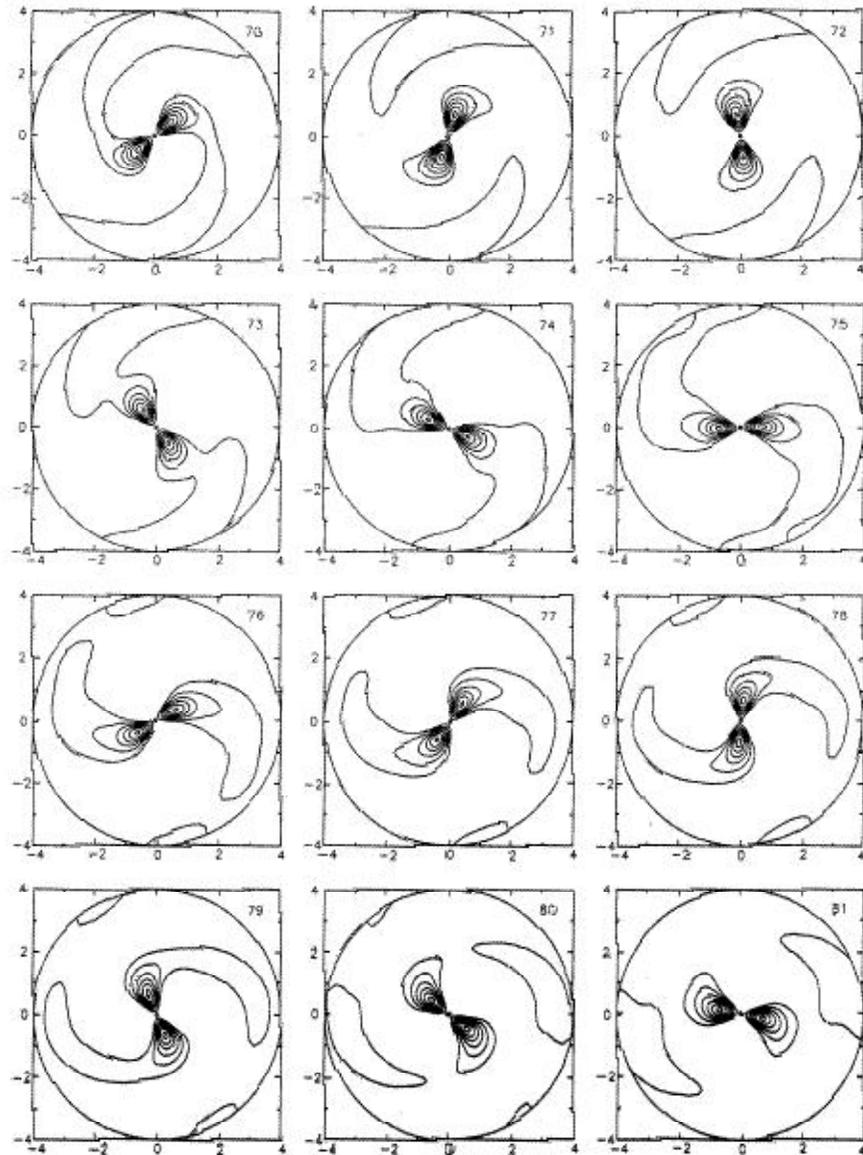
$$31.8 + 13.9 = 45.7 \text{ km/s/kpc}$$





(a)

densité



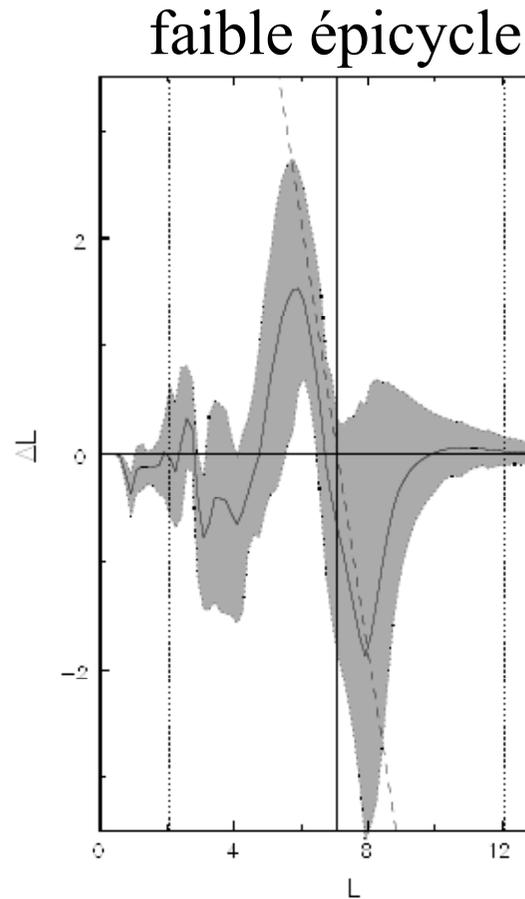
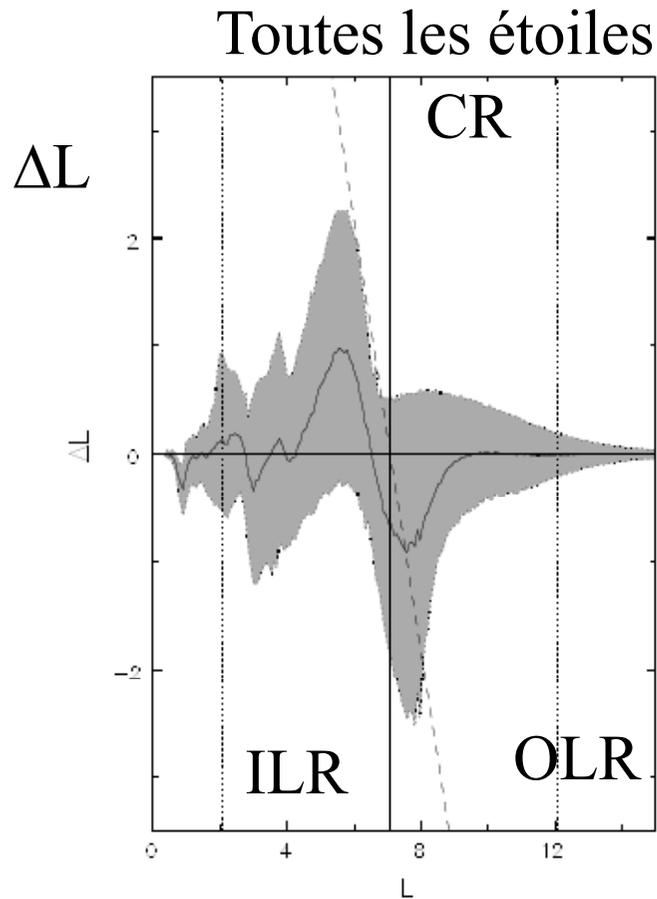
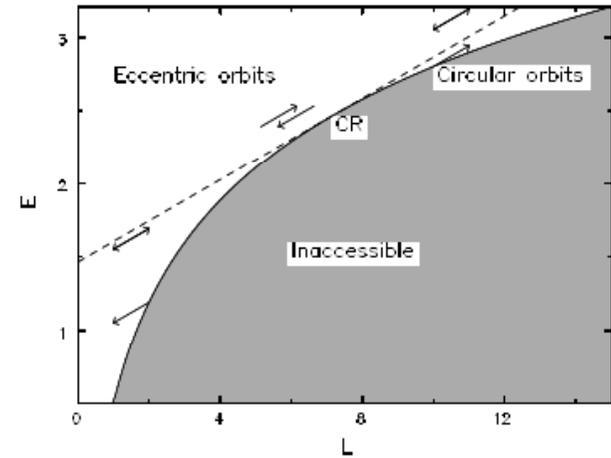
(b)

potentiel

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

Migration des étoiles et du gaz

Diffusion résonante à la corotation



$$\Delta J_R = (\Omega_p - \Omega) / \kappa \Delta L$$

Echange de L sans
Chauffage

Etoiles résonantes
Spirale éphémère

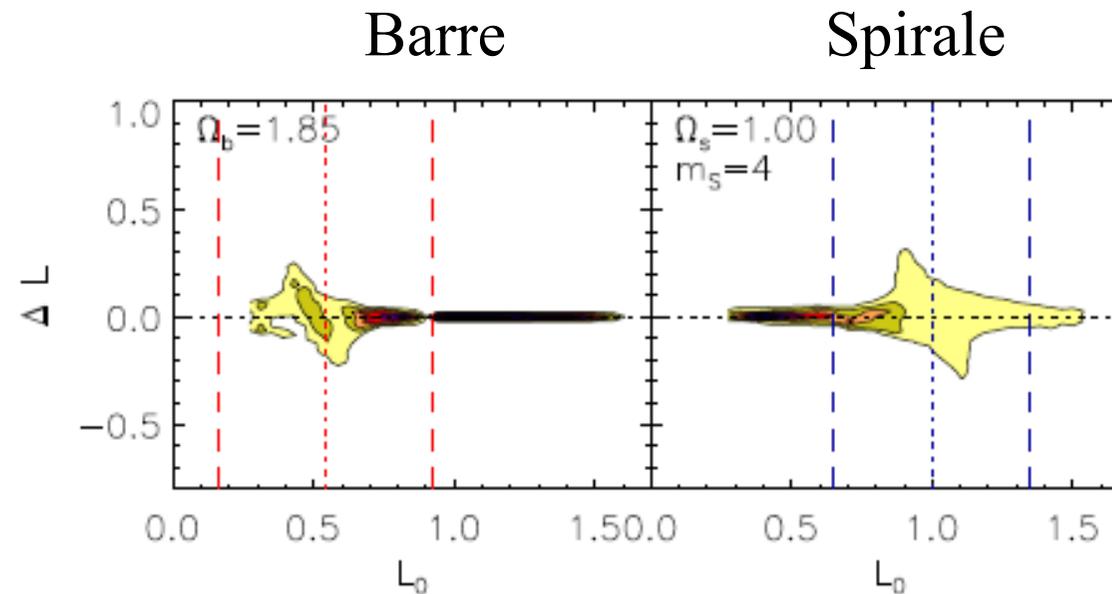
Sellwood & Binney 2002

Transfert de L, et migrations

Les barres et spirales peuvent transférer L à la Corotation

Le transfert se multiplie si plusieurs ondes avec résonances en commun

→ Migration très accélérée, avec une barre + spirale

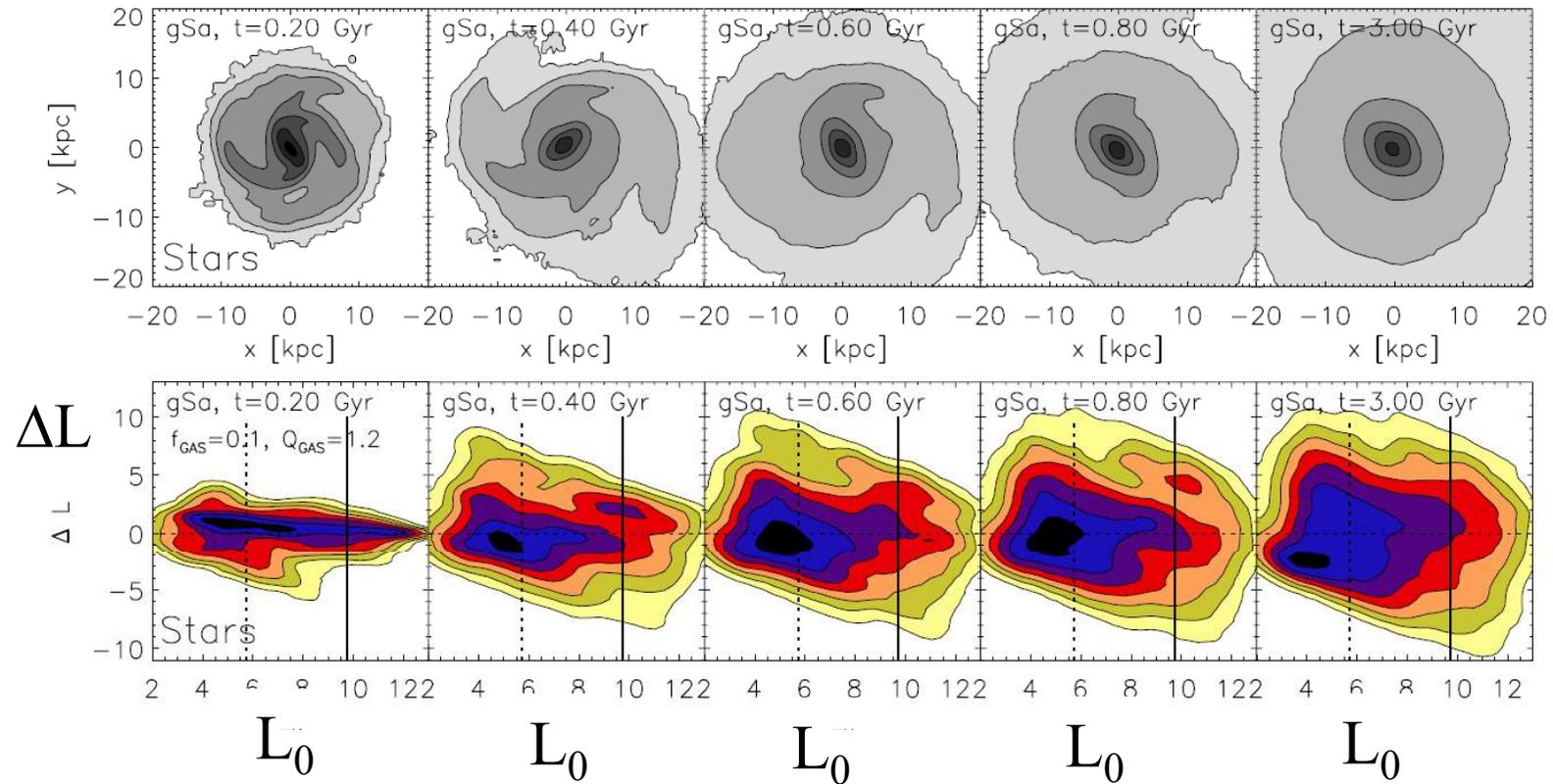


Minchev & Famaey 2010

Effet des ondes couplées

Evolution temporelle du transfert de L avec barre et spirale à 4 bras, dans la Voie lactée: **Recouvrement des résonances**

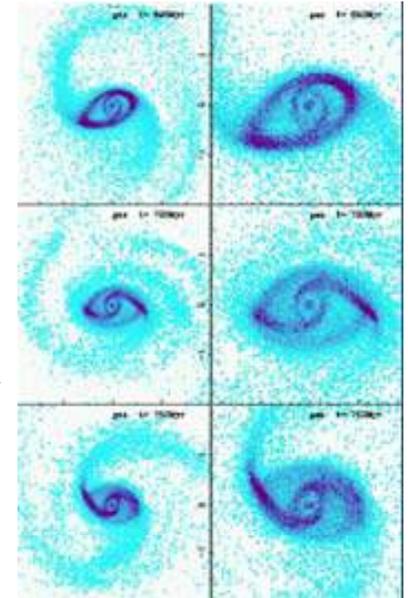
Densité de surface des étoiles



Echange de L très amplifié

Minchev, Famaey, Combes et al 2010

Alimentation des noyaux actifs (AGN)

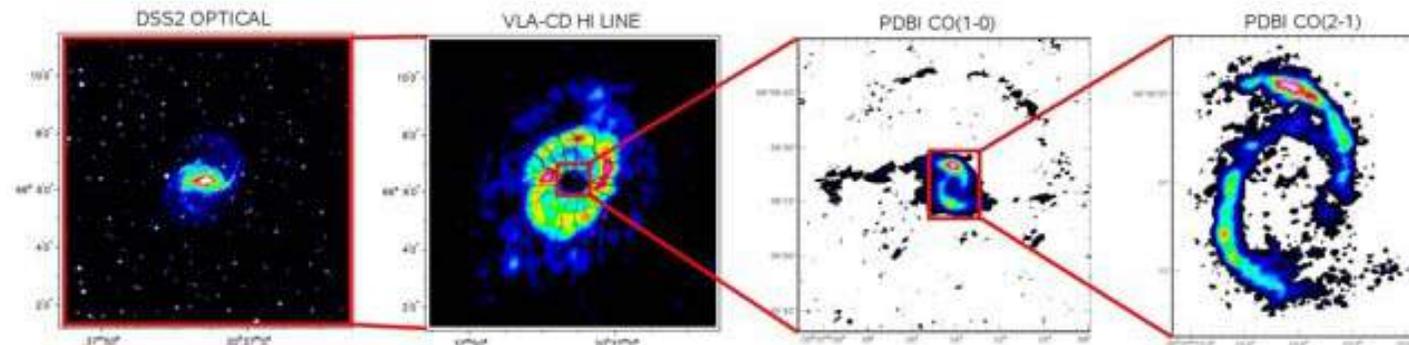


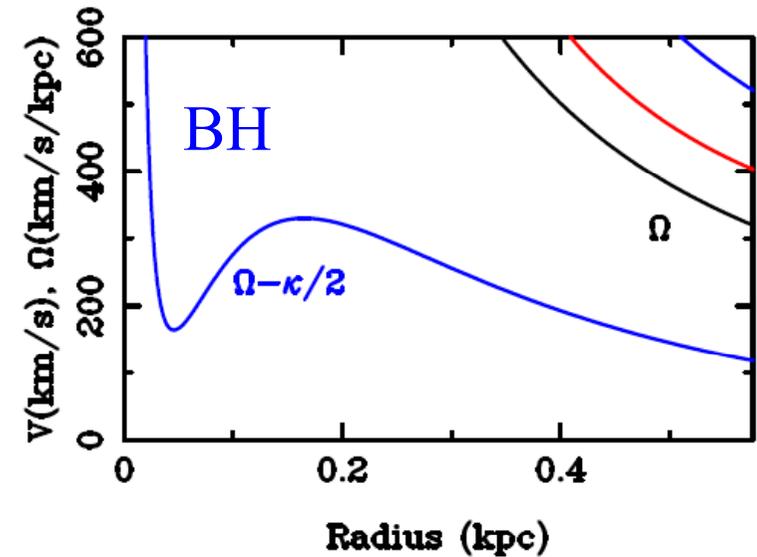
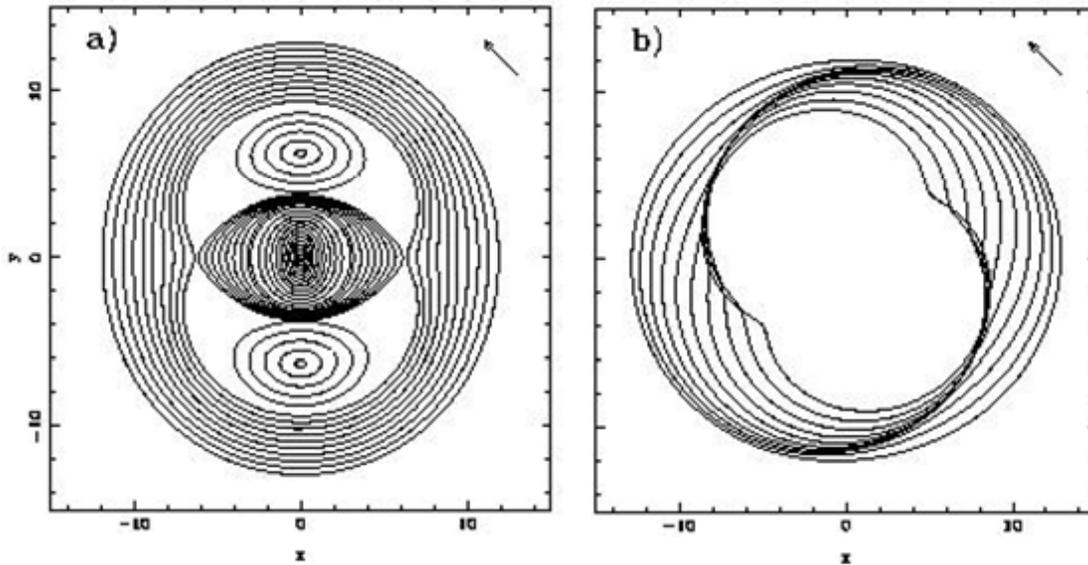
Les barres sont un moyen de précipiter le gaz vers le centre pour alimenter les starbursts, mais aussi les AGN

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?



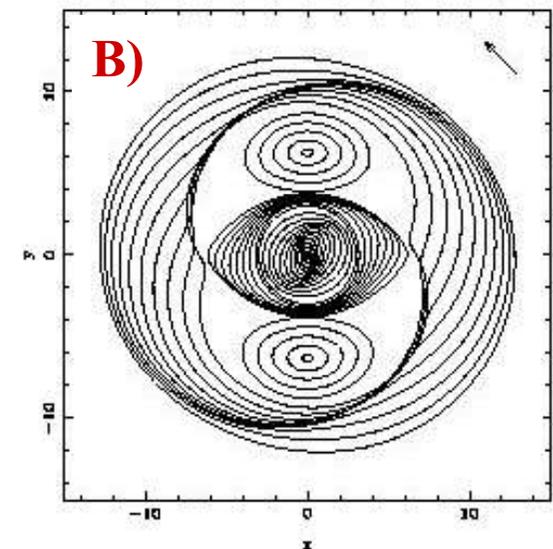
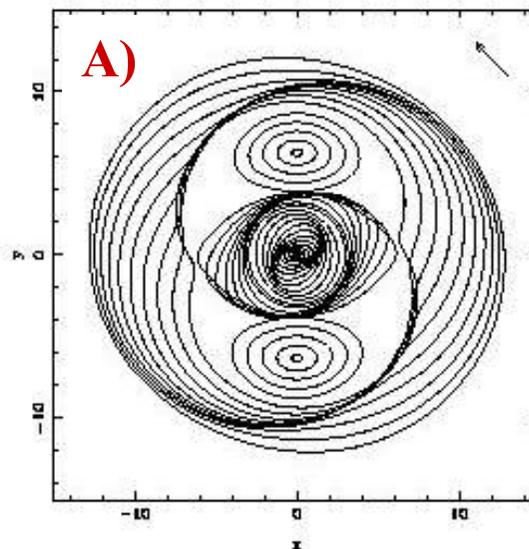


Orbites périodiques dans un potentiel en $\cos 2\theta$

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

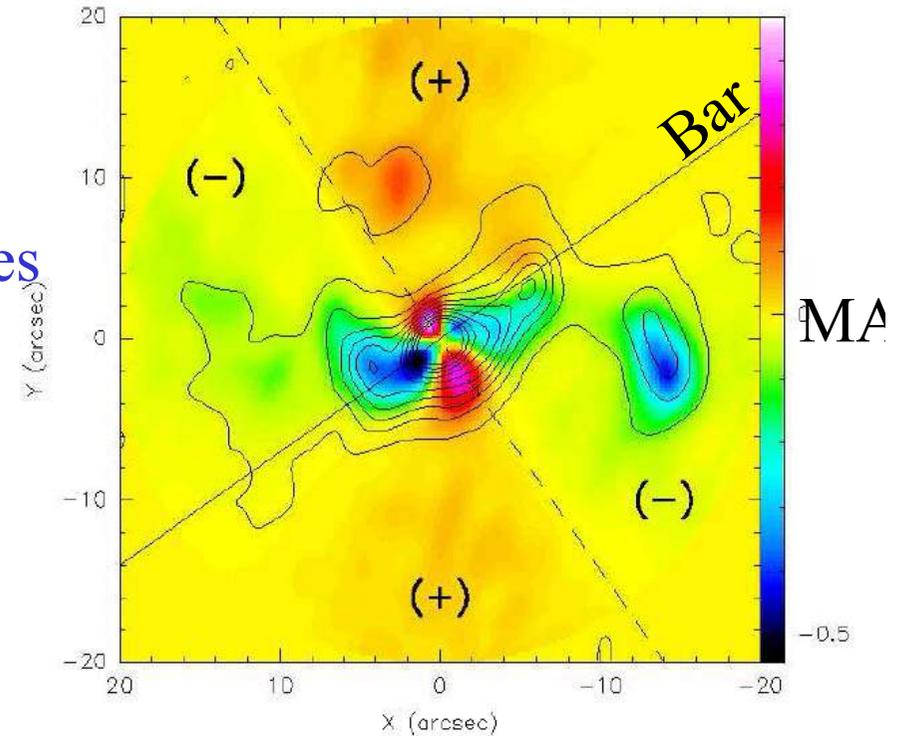
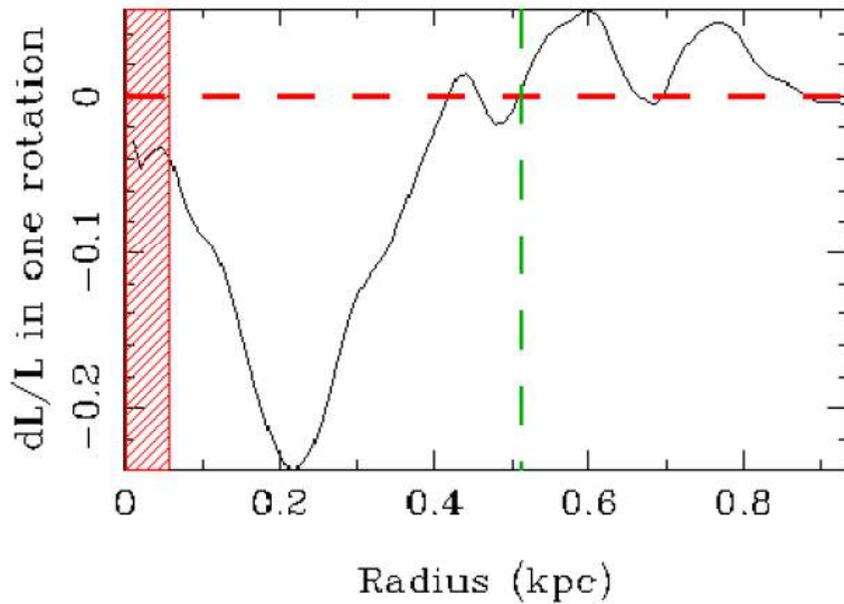
**A) sans BH,
leading**

**B) avec BH,
trailing**



Couples de gravité

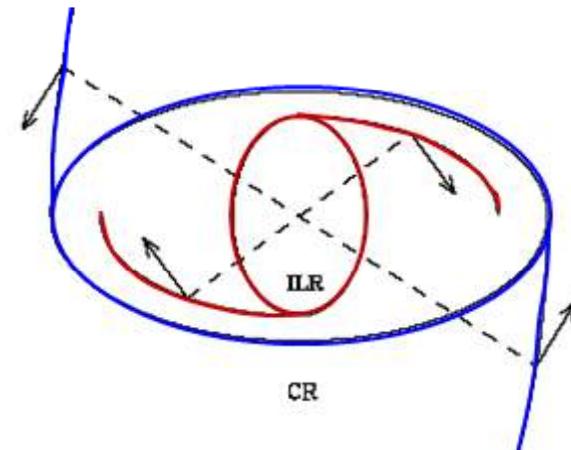
Potentiel/forces calculés avec des images rouges (HST), agissant sur le gaz



Carte des couples de NGC 3627

(Casasola et al 2011)

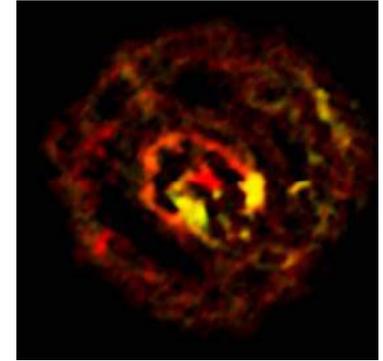
Contours= densité du gaz



→ Correlation entre barres et AGN

Schawinski et al 2010, Cardamone et al 2011

Feedback dans des AGN faibles



NGC 1433: spirale barrée, **gaz CO avec ALMA**

Gaz moléculaire: outflow le long du petit axe



$M_{\text{H}_2} = 5.2 \cdot 10^7 M_{\odot}$ dans 800pc

Flot de 100km/s

7% de la masse, soit $3.6 \cdot 10^6 M_{\odot}$

Le plus petit flot détecté

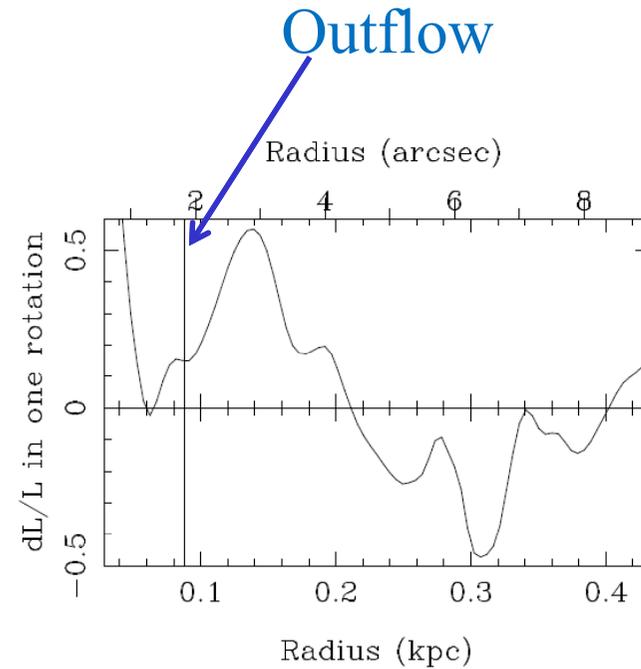
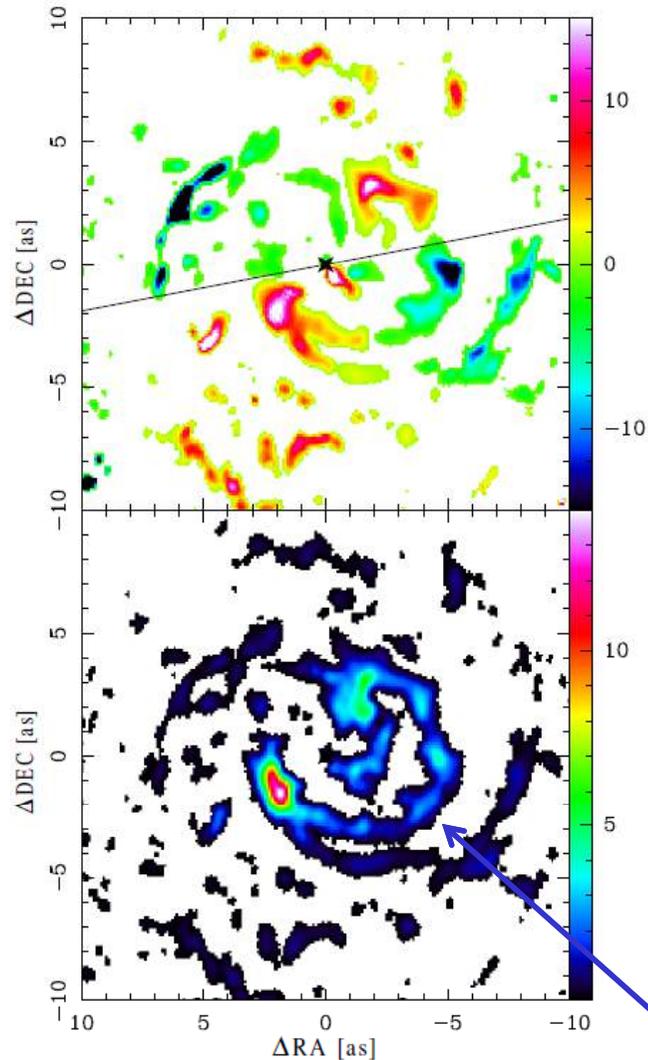
$\rightarrow L_{\text{kin}} = 0.5 \text{ dM/dt } v^2 \sim 2.3 \cdot 10^{40} \text{ erg/s}$

$L_{\text{bol}} (\text{AGN}) = 1.3 \cdot 10^{43} \text{ erg/s}$

Moment du flot $> 10 L_{\text{AGN}}/c$

Combes et al 2013

Carte des couples dans NGC1433



Couples positifs à l'intérieur de 200pc
et négatifs en dehors

→ Le gaz s'accumule dans le 2^e anneau

Smajic et al 2014

2^e anneau à 200pc= ILR de la barre nucleaire

Cas de NGC1566, galaxie de Sy1

N1566 SAB Sy1

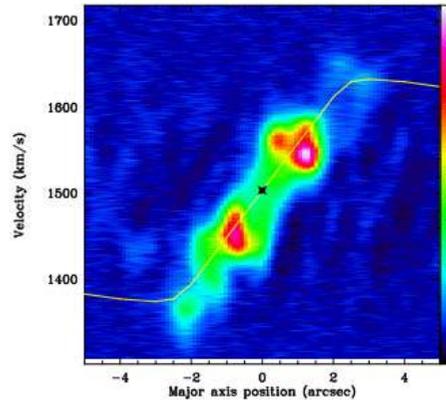


4 arcmin

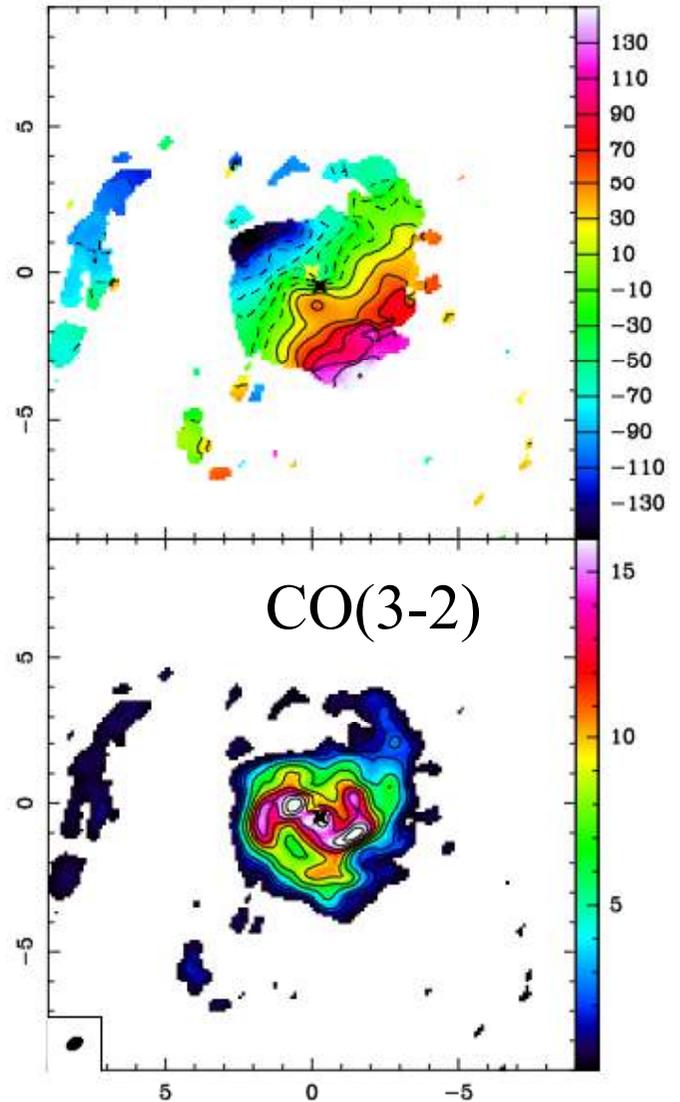
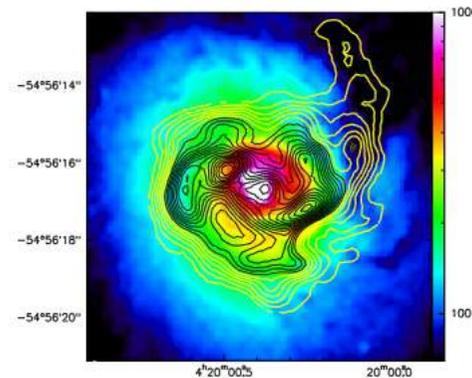
FOV=18''

Résolution spatiale
0.5 arcsecond ~25pc

Combes et al 2014

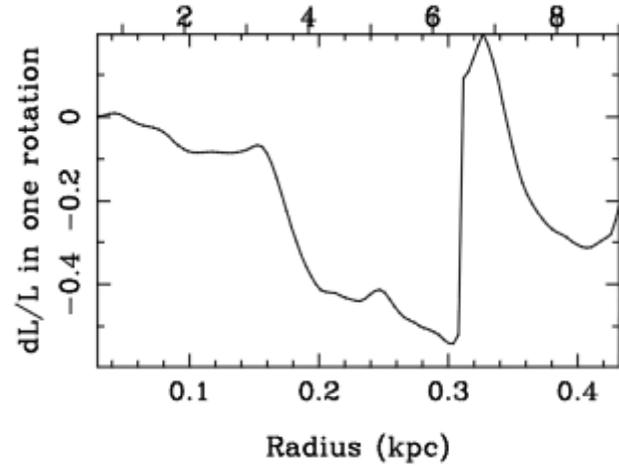


PV grand axe
Pas de flot



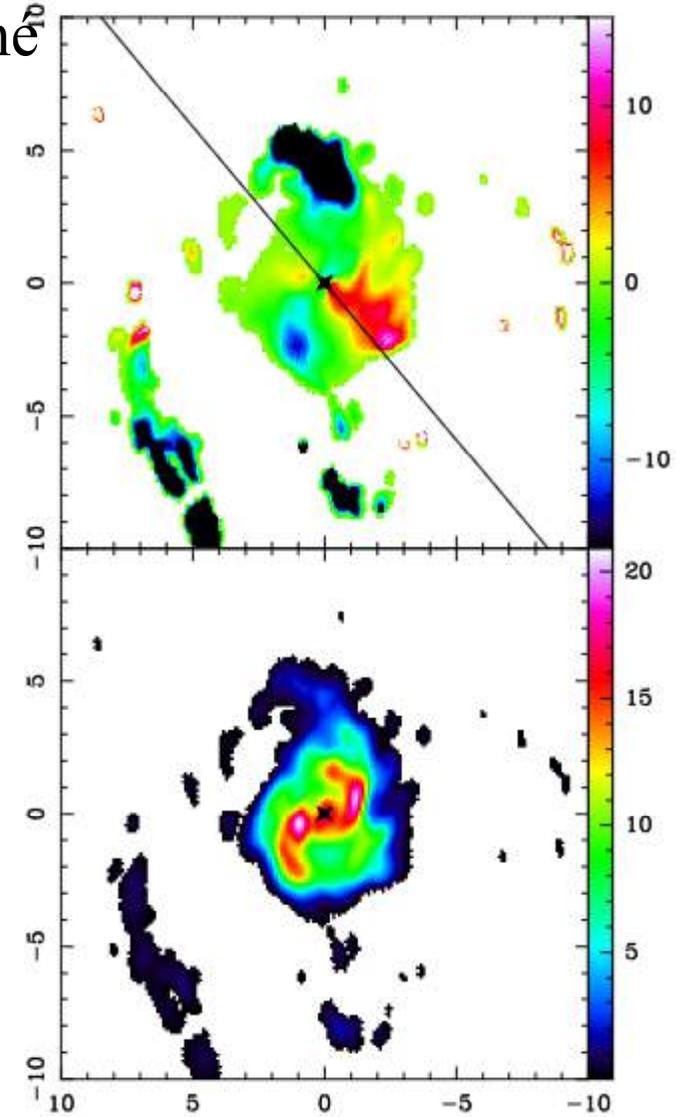
Contours CO(3-2) ALMA
sur image HST

NGC1566: couples gravitationnels



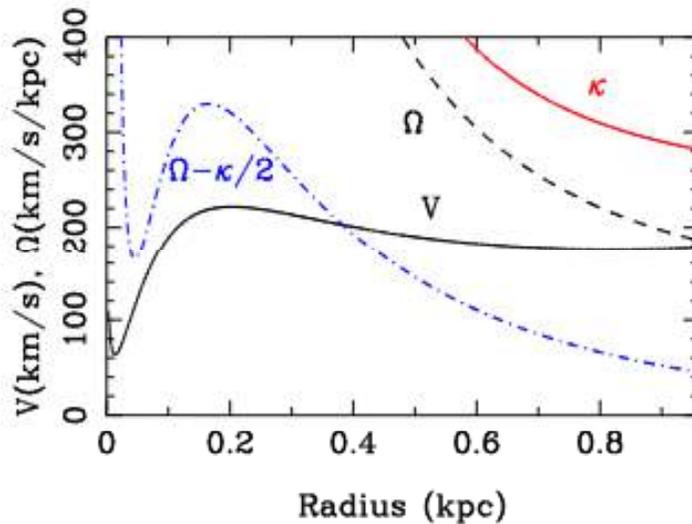
Le gaz est entraîné vers le centre

Couples sur l'image déprojetée



Spirale trailing à l'intérieur de l'ILR

→ Influence du trou noir sur la dynamique



Destruction des barres

Les barres, en faisant arriver la masse vers le centre (gaz) se détruisent

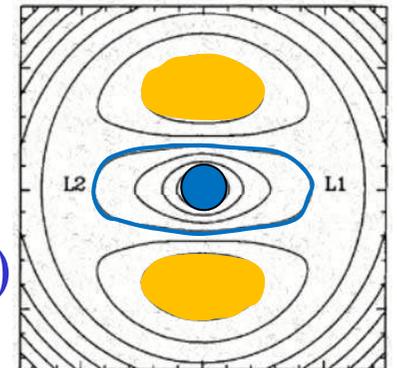


Avec une **concentration de masse centrale** (disque nucléaire, trou noir) de moins en moins d'orbite régulière x1, de plus en plus de chaotiques
déflexion de la masse centrale

Evolution: destruction des orbites périodiques, si évolution rapide
déplacement des résonances

Création des **lentilles/ovales**, diffusion des orbites chaotiques
limitées par leur énergie dans le référentiel tournant
 $\Phi(r) - 1/2 \Omega^2 r^2$

En dehors de la corotation: pas de limite (frontière brutale)



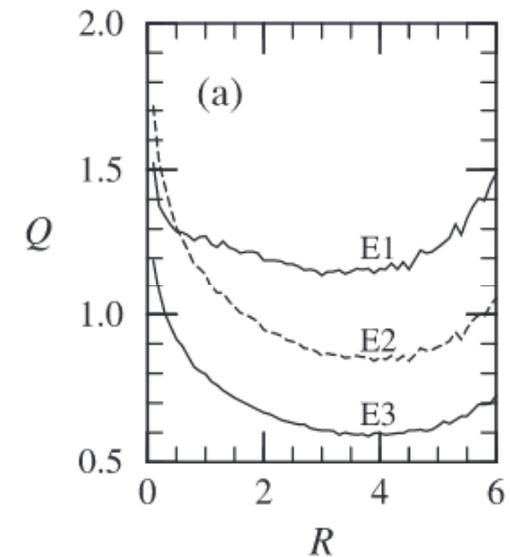
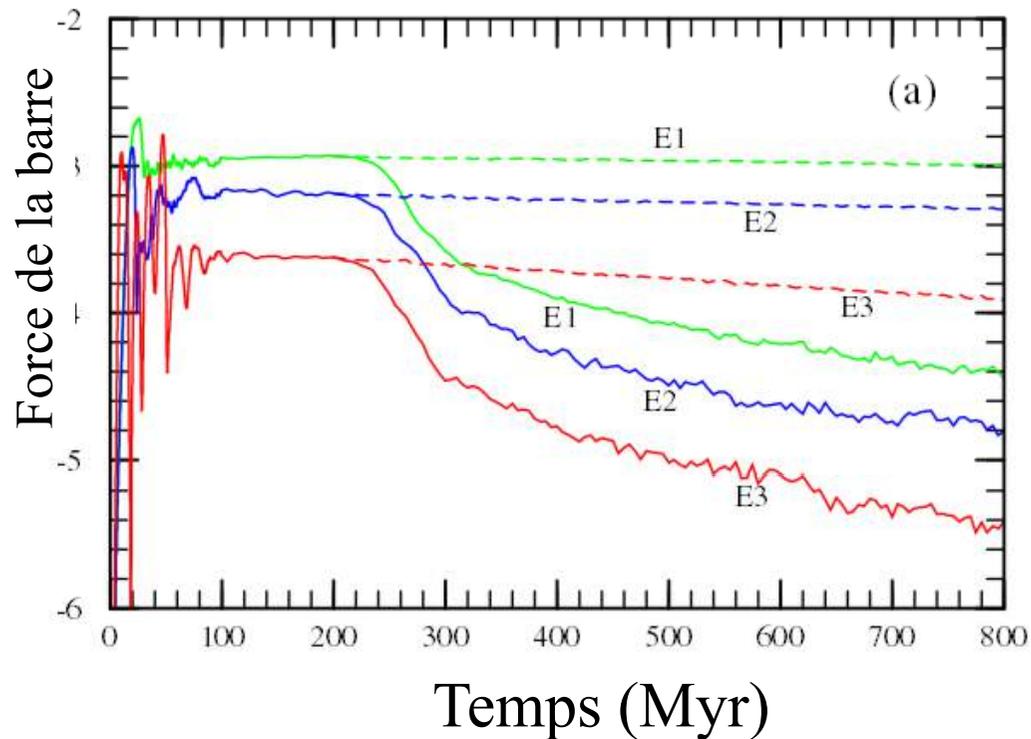
Destruction par une concentration centrale

Destruction de la structure des orbites par un trou noir central

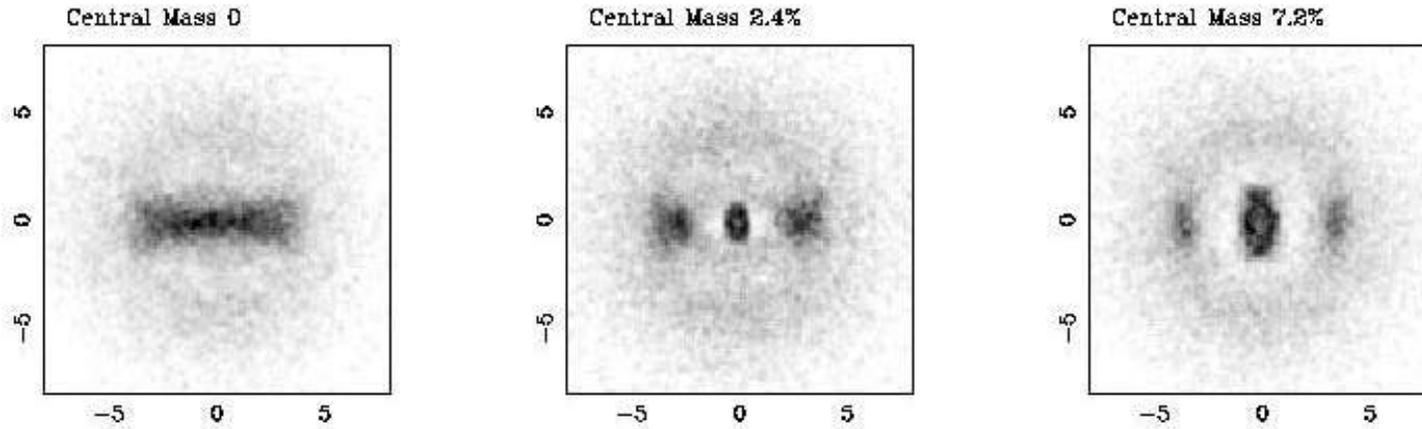
Plus ou moins de masse, de l'ordre de 1%

Shen & Sellwood 2004, Athanassoula et al 2005,

Hozumi & Hernquist 2005



Disque exponentiel avec
1% masse introduit au centre
adiabaticquement
Hozumi 2012



Formation de lentilles, et de "ansae" ou anses
lors de la destruction de la barre

Les premières orbites à devenir chaotiques sont entre ILR et CR
Près du trou noir central, le potentiel devient axisymétrique et
Régulier (**potentiel de Kepler**)

Les lentilles dans les galaxies sont repérables par leur
profil radial caractéristique et abrupt (*Kormendy 1982*)
Elles ressemblent à des barres affaiblies ou détruites

Propriétés des lentilles



N2859

97% des S0 ont des lentilles !

Laurikainen et al 2009

Quasi constant Σ
avec un bord abrupt, et
gradients pentus

N1553 Freeman (1975)

N1291 Kormendy (1982)

Aussi plat que des disques (2D)

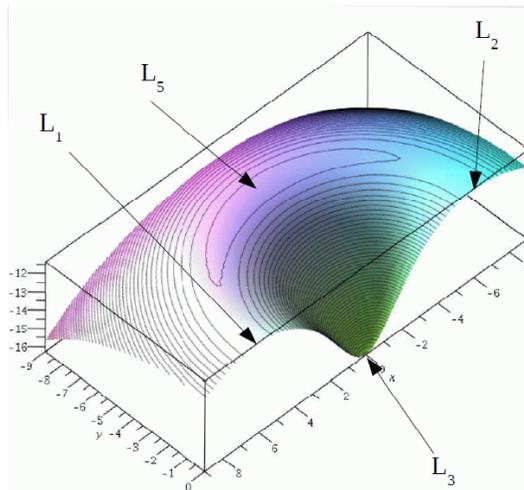
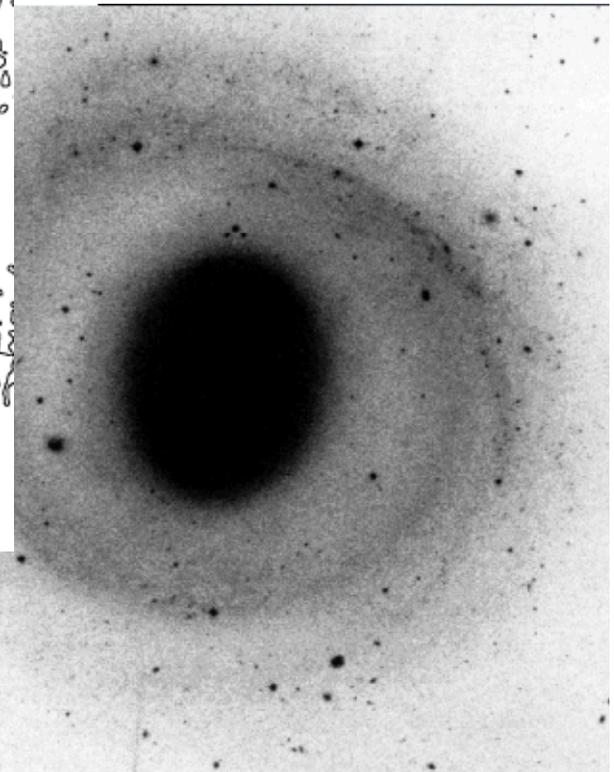
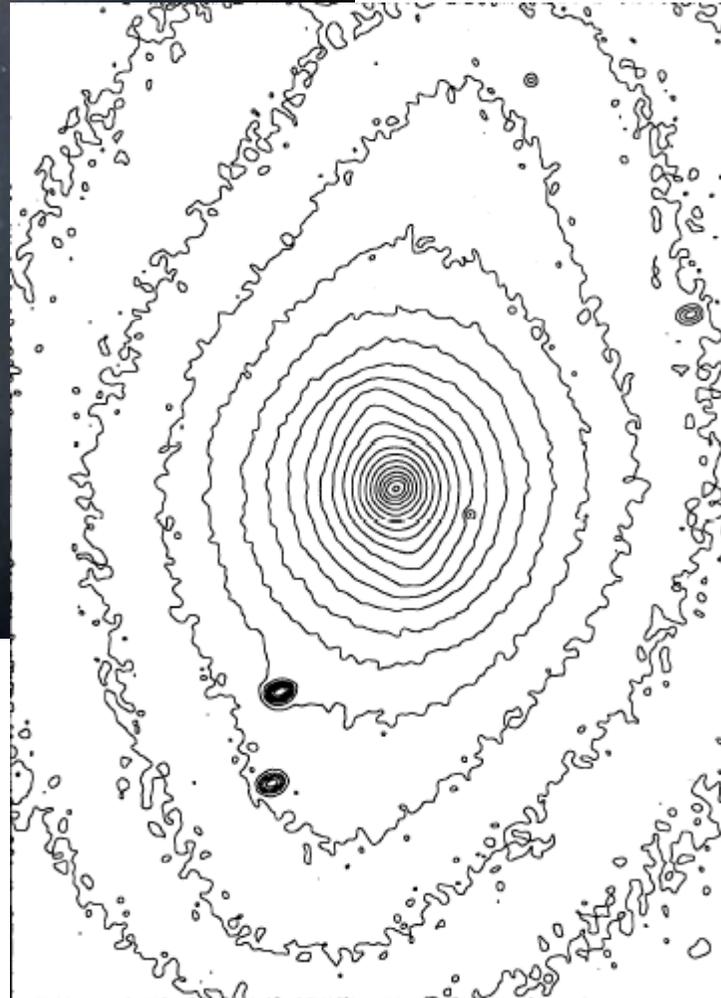
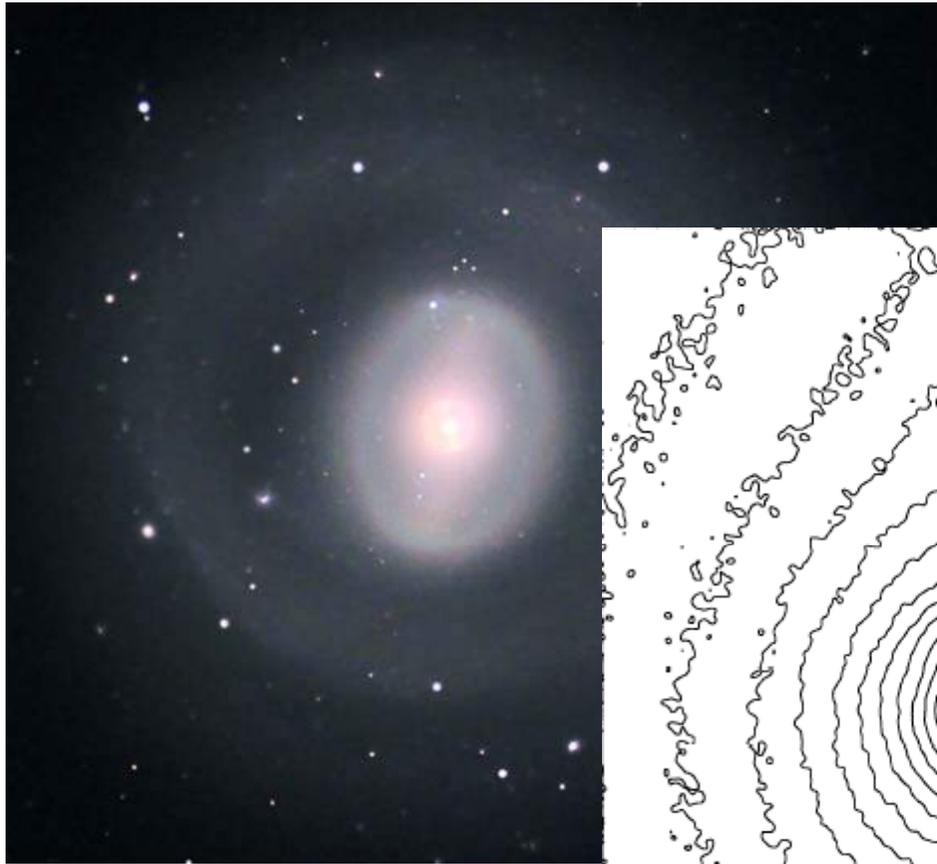
Dispersion forte au centre,
faible au bord

54% des SB0-a ont des lentilles
(*Kormendy 1979*)

La barre remplit la lentille
dans une dimension

→ Forme en \ominus

NGC 1291: prototype de lentille



Avec une barre secondaire

NGC 1291 GALEX, Chandra



SB0a, avec un anneau externe (OLR) bleu, très riche en gaz HI
Gas X très chaud au centre, faible Z ($0.1Z_{\odot}$), à cause du flux de gaz?
Perez & Freeman 2006

Rôle du gaz dans la destruction

Le gaz est amené au centre par les couples
Le moment angulaire est **pris par la barre**

→ **Ceci détruit la barre**

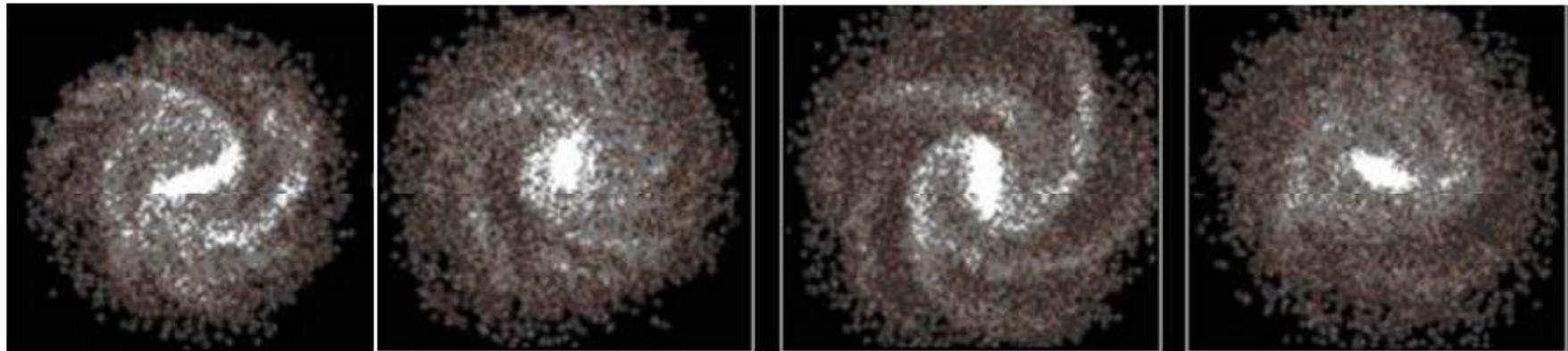
Moment négatif à l'intérieur de la CR, $\sim A_2 (\Omega_b - \Omega)$

Le moment du gaz à l'intérieur de la CR est du même ordre

Pas seulement la présence d'une concentration de masse

1% de CM n'est pas suffisante pour détruire la barre

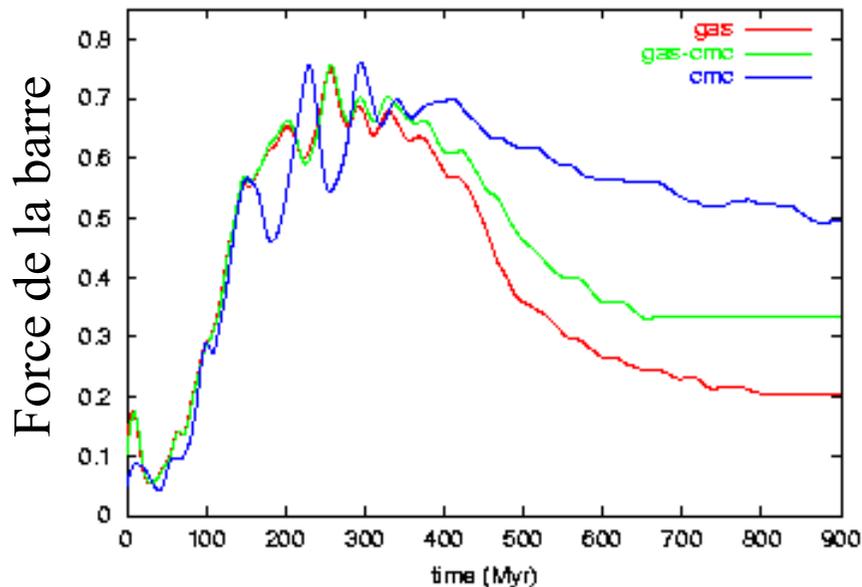
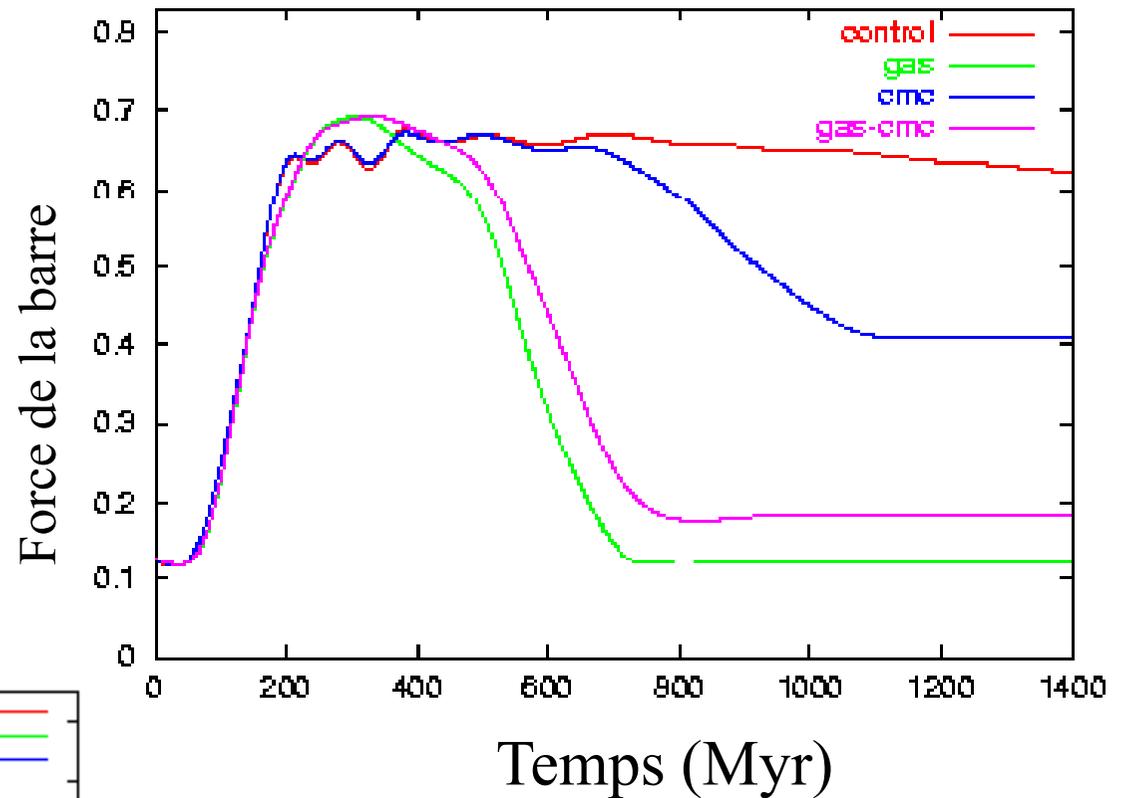
Mais 1-2% de chute de gaz suffit à transformer la barre en lentille
(Friedli 1994, Berentzen et al 1998, Bournaud & Combes 02, 04)



Rôle des couples de gravité

6% masse de gaz
bulbe 25%
Gaz dans 300pc \sim 1%

Plus facile de reformer
la barre!



4% masse de gaz
bulbe 20%
Gaz dans 300pc \sim 0.8%

Bournaud & Combes 2004

Statistiques sur la force des barres

Les barres s'auto-détruisent, par le flot de gaz vers le centre

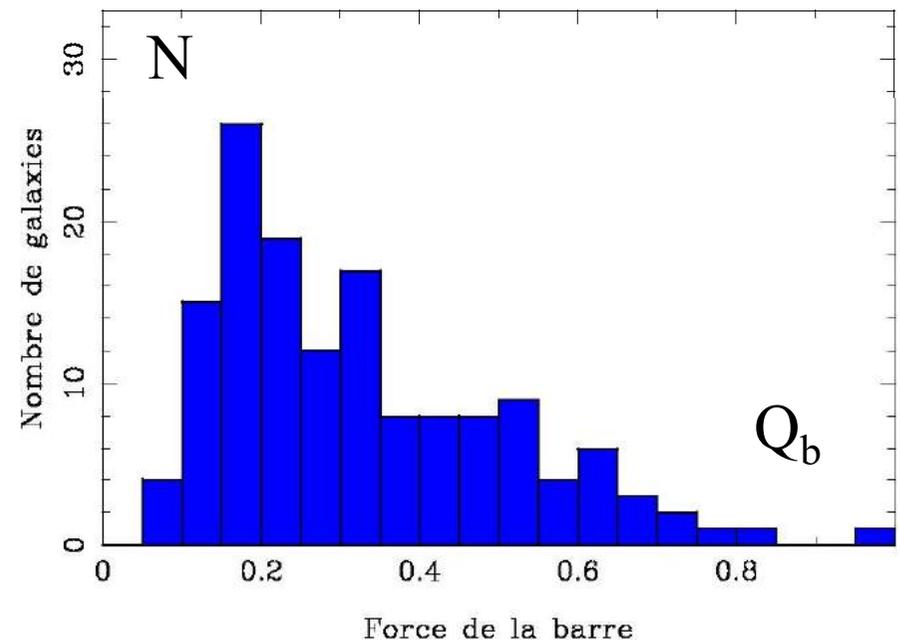
Après 5 Gyr, il ne devrait plus rester de barres?

Encore très nombreuses aujourd'hui (~ 2/3 des galaxies)

Surtout sur les images proche-infrarouges

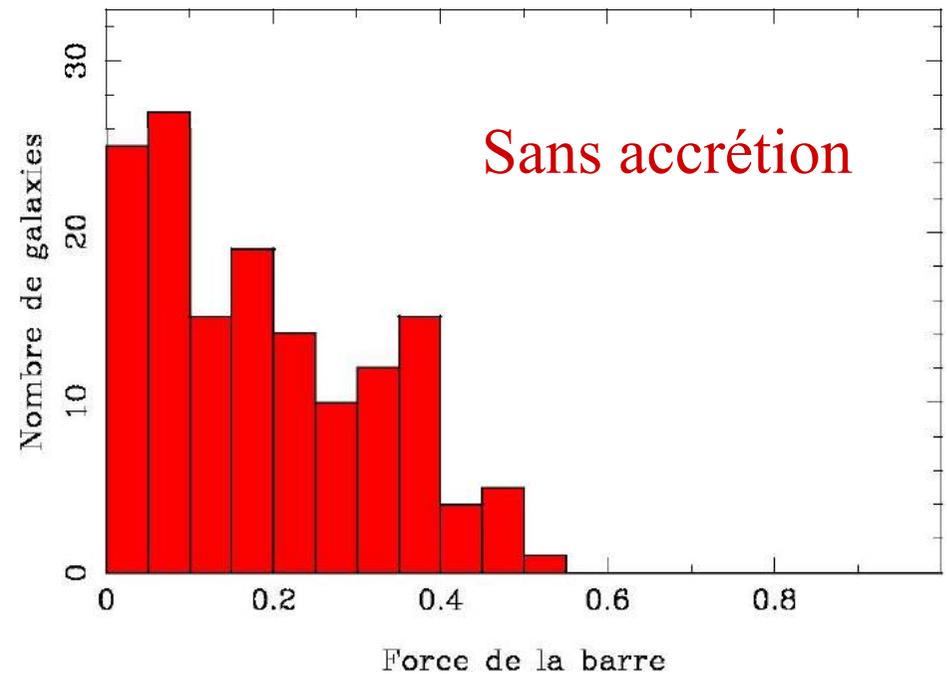
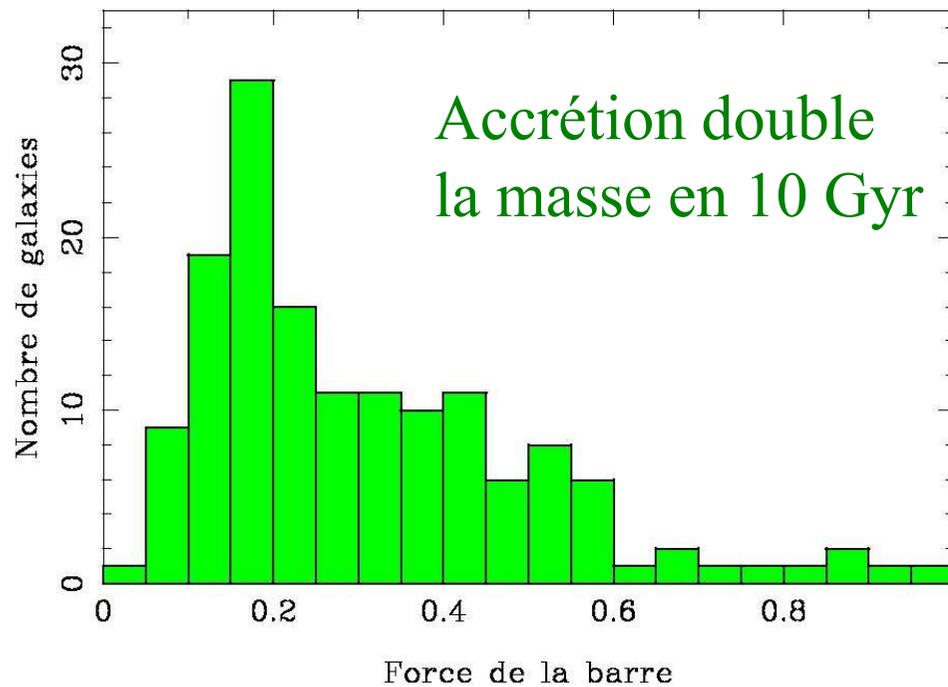
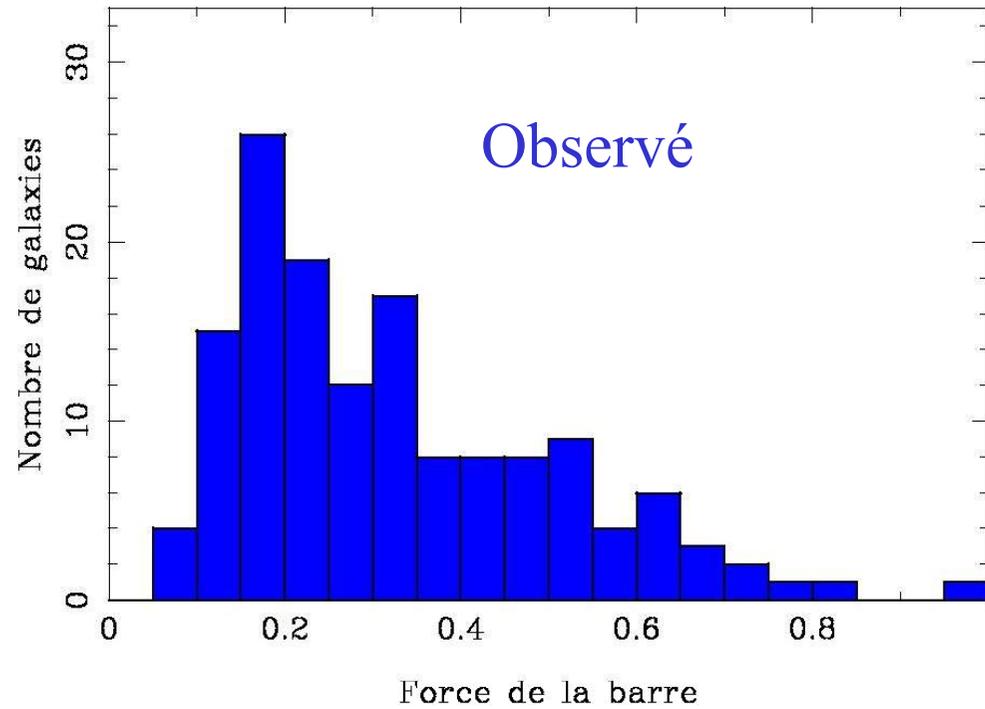
Echantillon de 163 galaxies (Eskridge et al 2002)

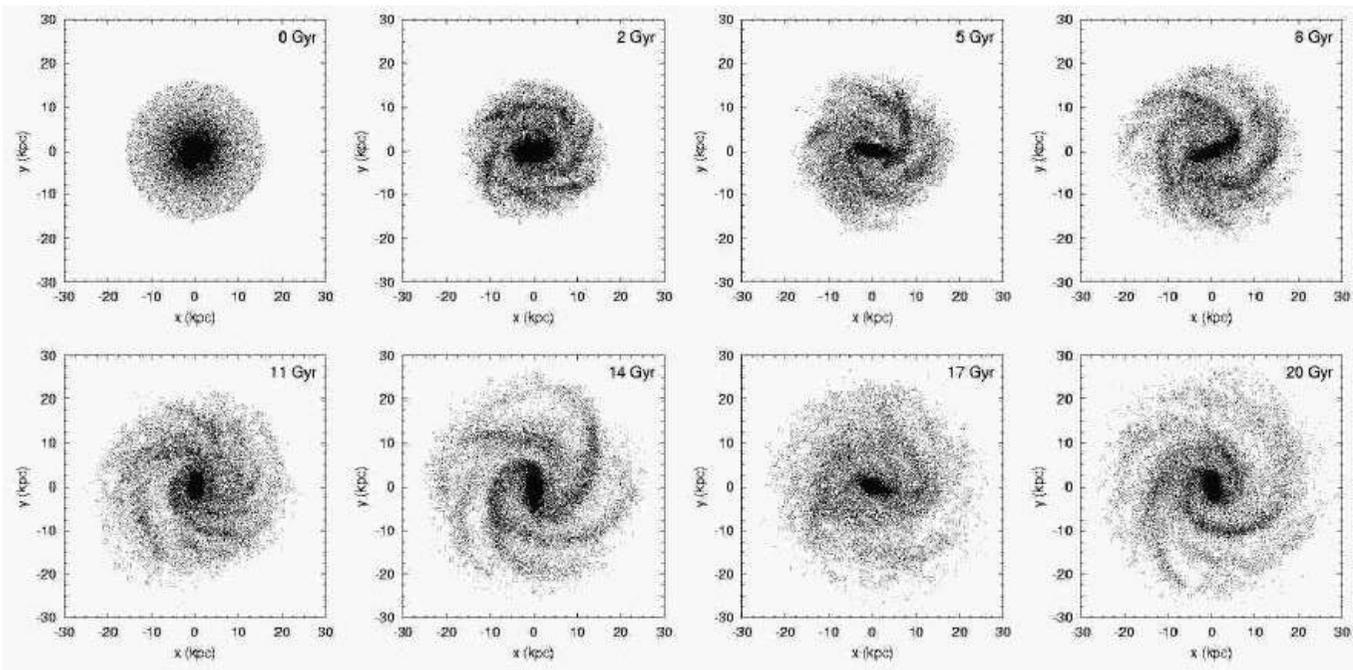
Force de la barre, Q_b , estimée par
la FFT du potentiel (*Block et al 2002*)
aussi rapport d'axes (*Whyte et al 2002*)



Quantification du taux d'accrétion

Block et al 2002



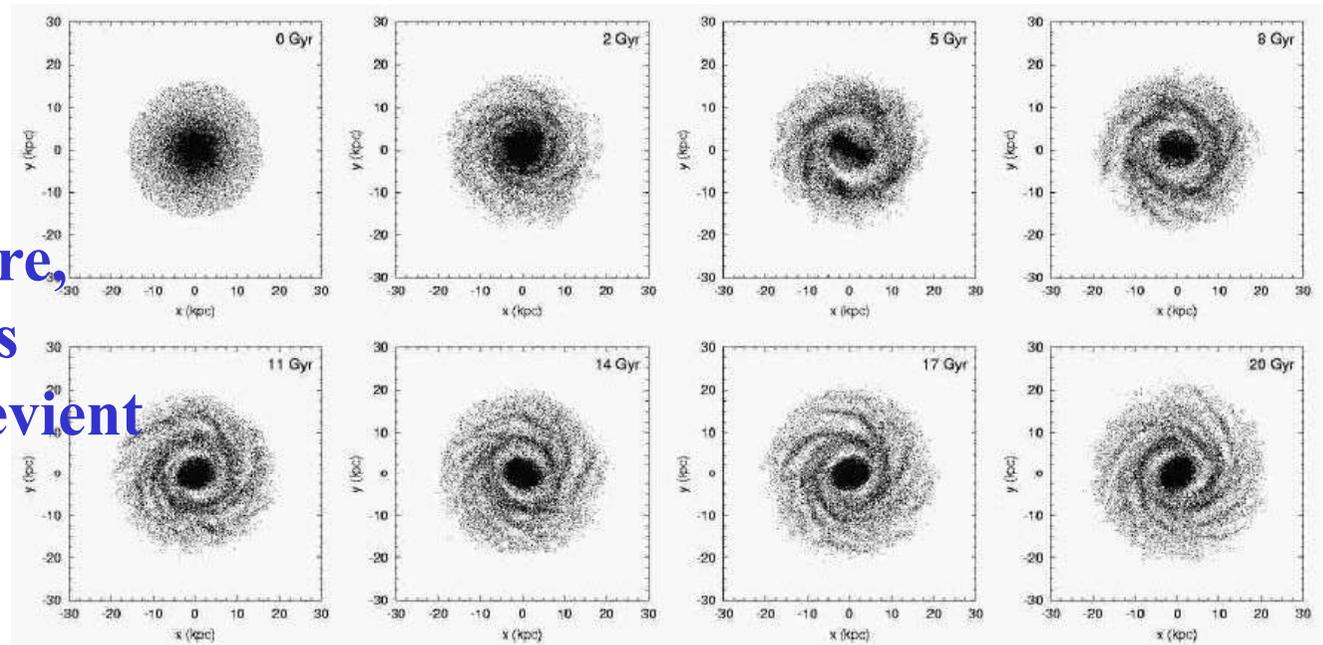


Avec accrétion

**Le gaz est accrété par
intermittence**

**D'abord confiné à
l'extérieur de l'OLR,
jusqu'à ce que la barre,
faiblitse, il entre alors
dans le disque, qui devient
instable à nouveau et
reformé une barre**

Sans accrétion



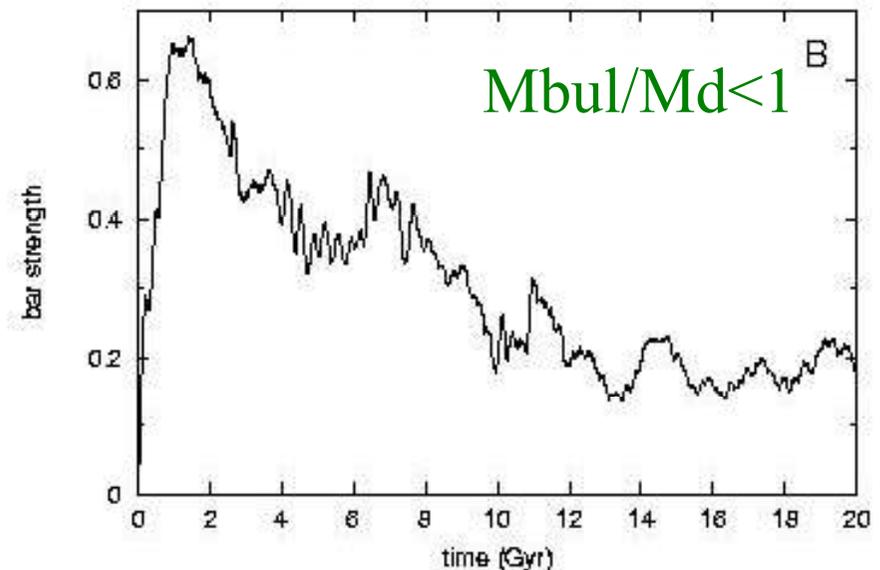
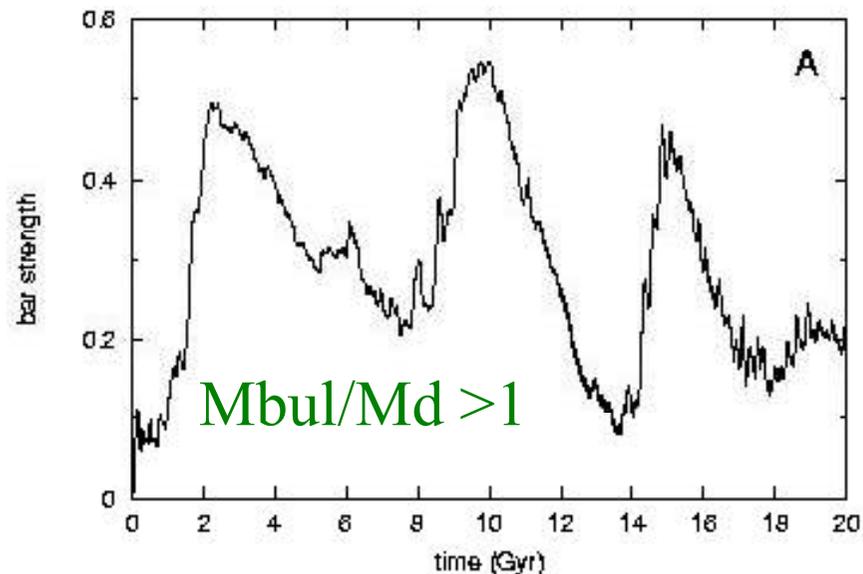
Simulations de l'accrétion de gaz

→ Reformation des barres

Une galaxie est en évolution continue, et accrète du gaz tout au long

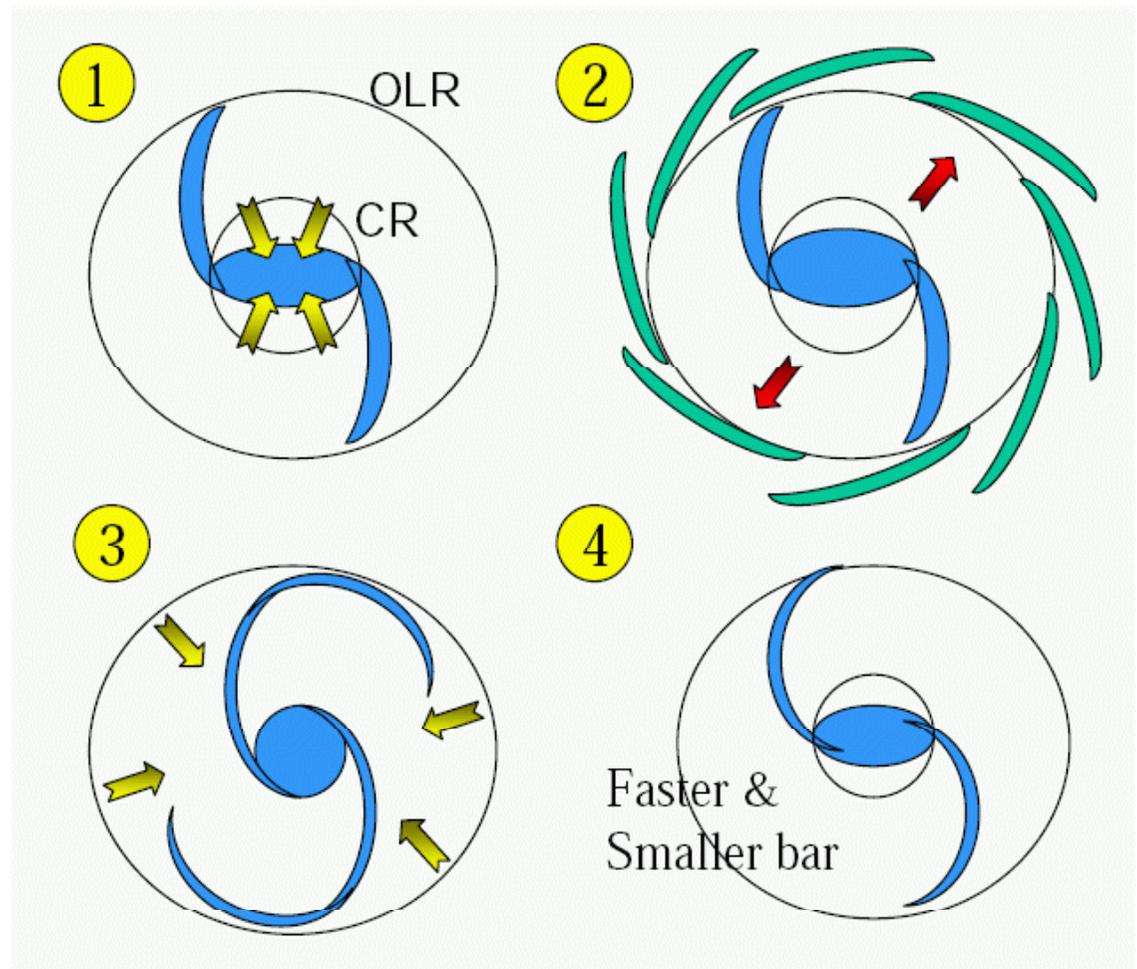
→ 3 ou 4 épisodes barrés dans la vie d'une galaxie

Le rapport $M_{\text{bulbe}}/M_{\text{disk}}$ et la fraction de gaz évoluent et le type morphologique peut osciller



Cycle des barres

*Avec accréation de gaz
les nouvelles barres
sont plus rapides*



Auto-régulation:

→ La barre forme dans un disque froid instable

→ La barre produit un flot de gaz vers le centre

→ La chute du gaz détruit la barre

+accréation de nouveau gaz

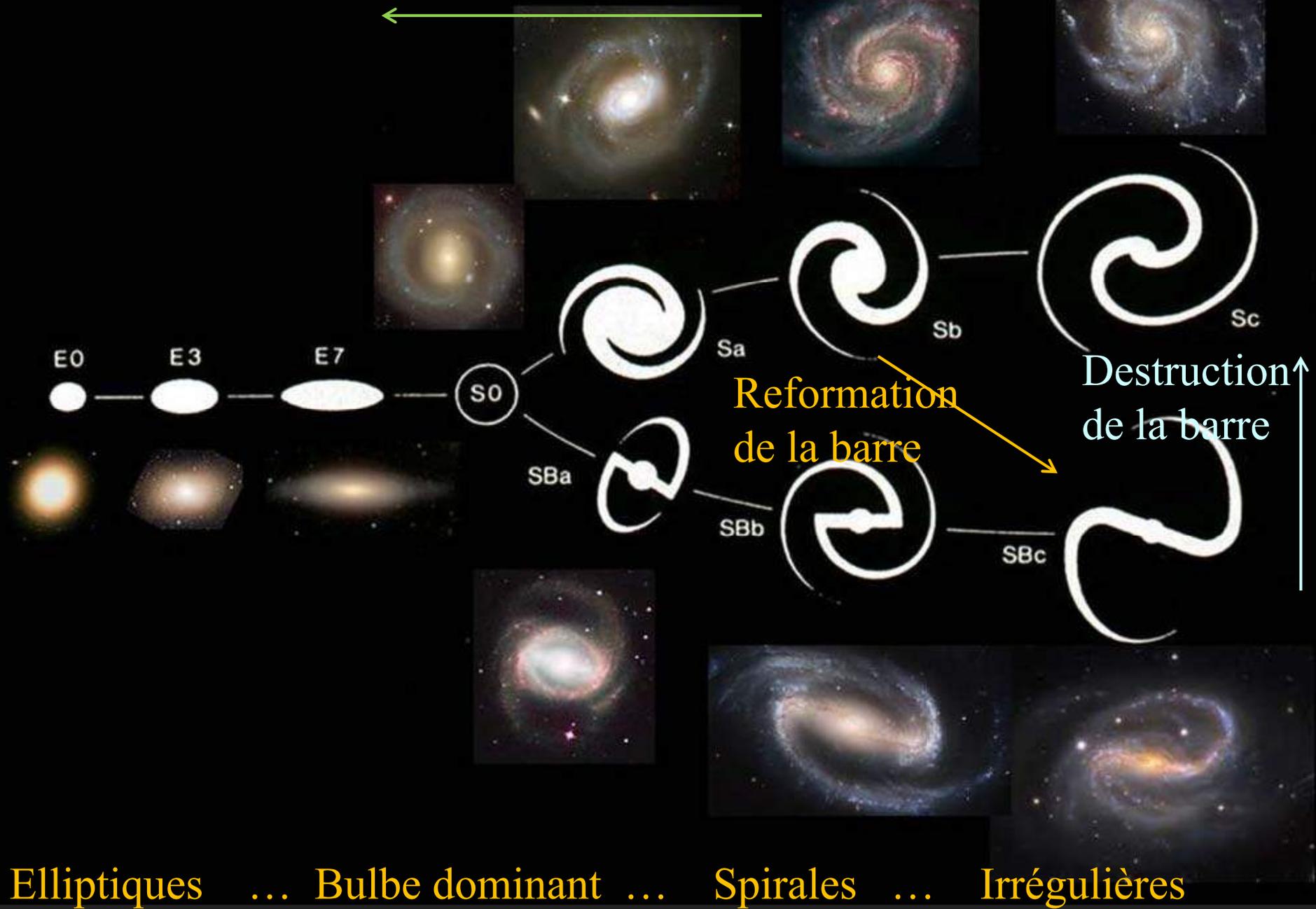
1

2

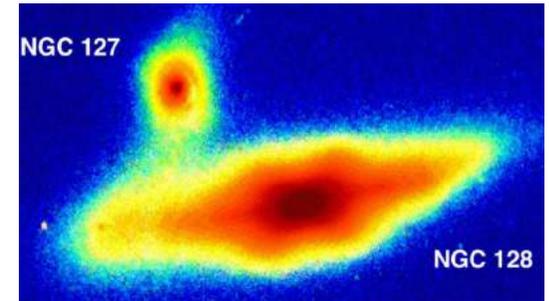
3

4

Evolution sur la séquence de Hubble



Conclusions



Les galaxies ne sont pas réparties sur la séquence de Hubble de façon immuable → tendance à se concentrer, former des bulbes

Les barres apparaissent et disparaissent, **plusieurs épisodes barrés** selon la quantité de gaz accrétée

Les galaxies continuent leur formation tout au long de l'âge de l'Univers:

→ Soit par évolution **séculaire**, interne: **barre+spirale+ barres nucléaires**
bulbe en cacahuète

→ Soit par **interaction** entre galaxies, fusions et accrétions
bulbe classique