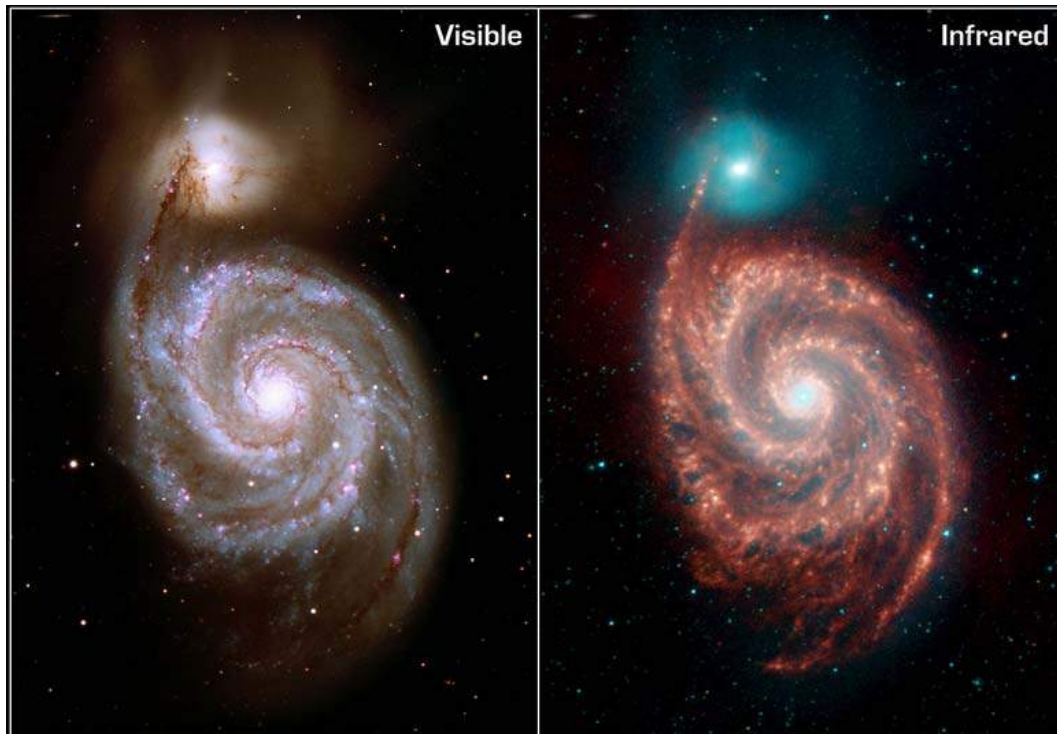




COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Instabilités et amplification des ondes



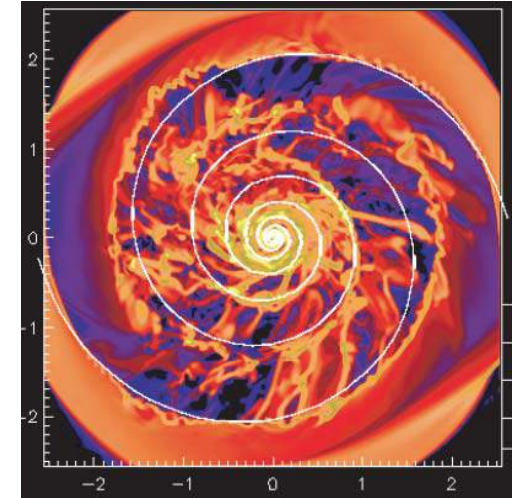
**Françoise Combes**



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

# Evolution par les spirales

- Les ondes de densité servent de base
- Plusieurs ondes se superposent  
→ variations temporelles



- Le composant gazeux: branchements, nouvelles étoiles
- Champ magnétique et instabilités
- Les champs de vitesse: des perturbations dans tous les cas  
preuves des ondes de densité?
- **Ondes spirales et migration radiale**
- **Disques épais**
- **Pourquoi les disques exponentiels?**

# Le Swing

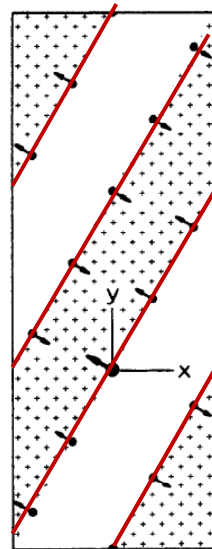
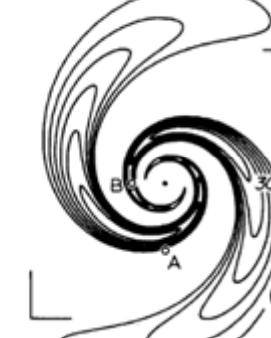
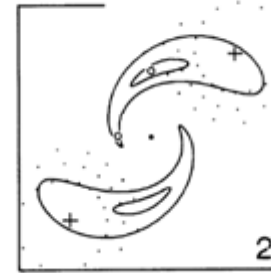
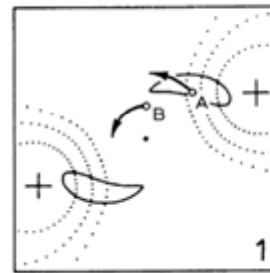
Amplification des ondes lorsque le paquet leading se transforme en trailing

→ balancement

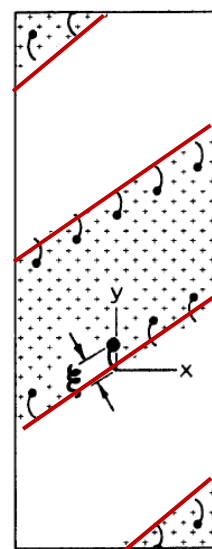
- Rotation différentielle
- self-gravité
- mouvement épicyclique

Les particules sont piégées dans le bras

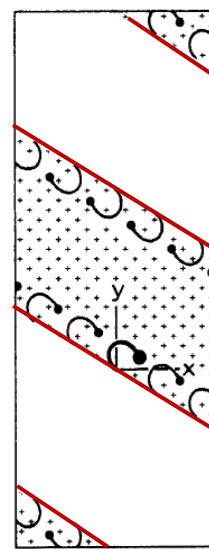
1% with self-G



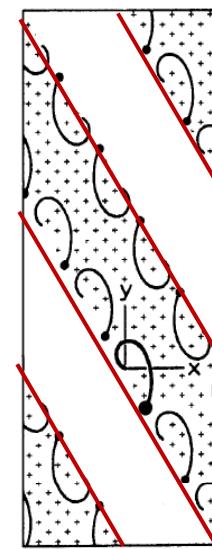
-60°



-30°



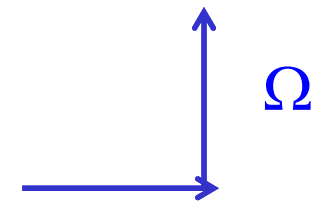
+30°



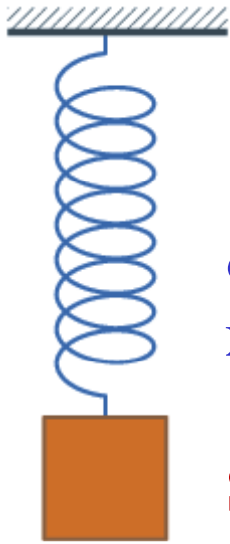
+60°

angle  $\gamma$

Tangente



Rayon

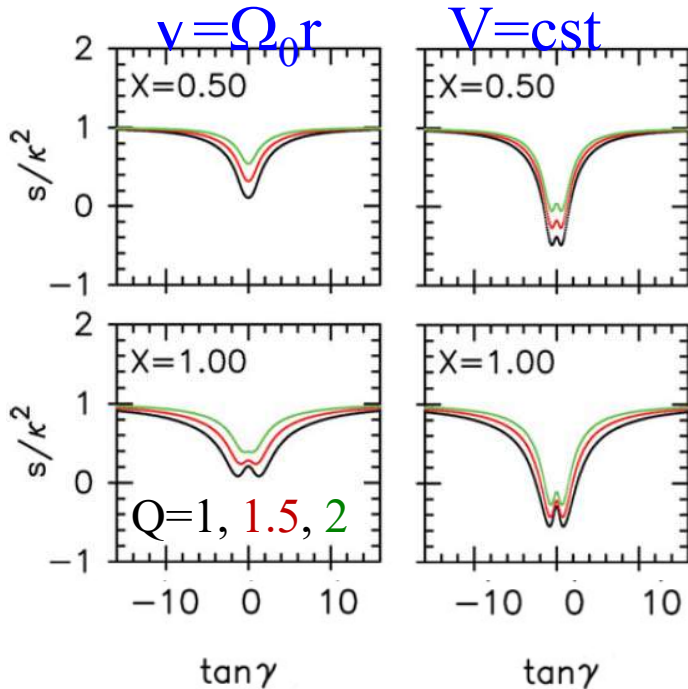
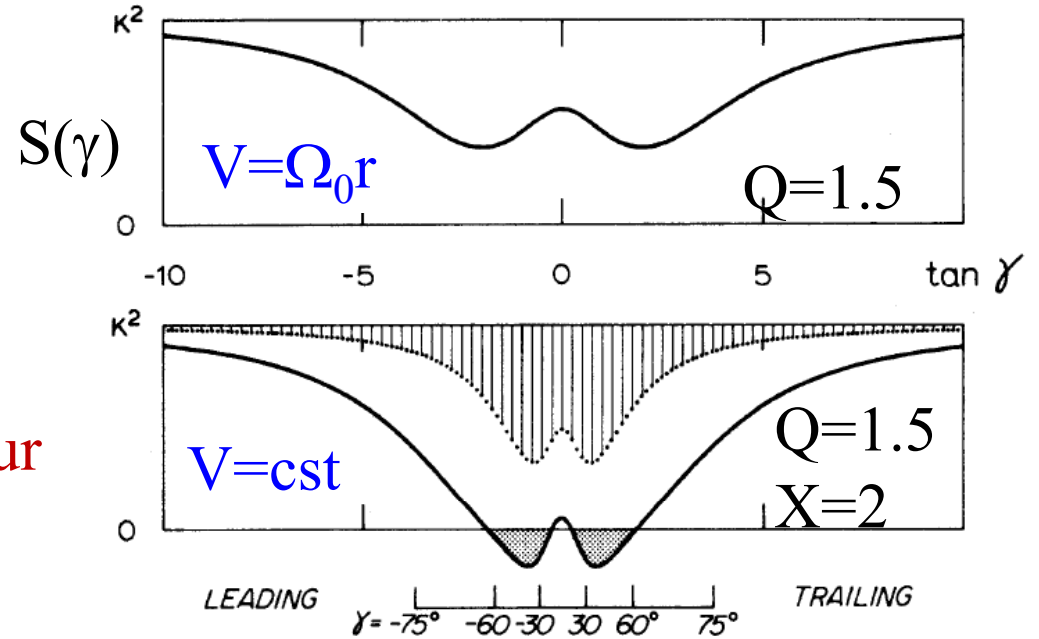


$$\ddot{\xi} + S(\gamma) \xi = 0$$

$$\xi = x \sin \gamma + y \cos \gamma$$

$x = \text{radial}, y = \text{tangential}$

$S(\gamma)$  ressort de l'oscillateur  
 $S(\gamma) = \kappa^2 (1 - \lambda_{\text{crit}}/\lambda)$

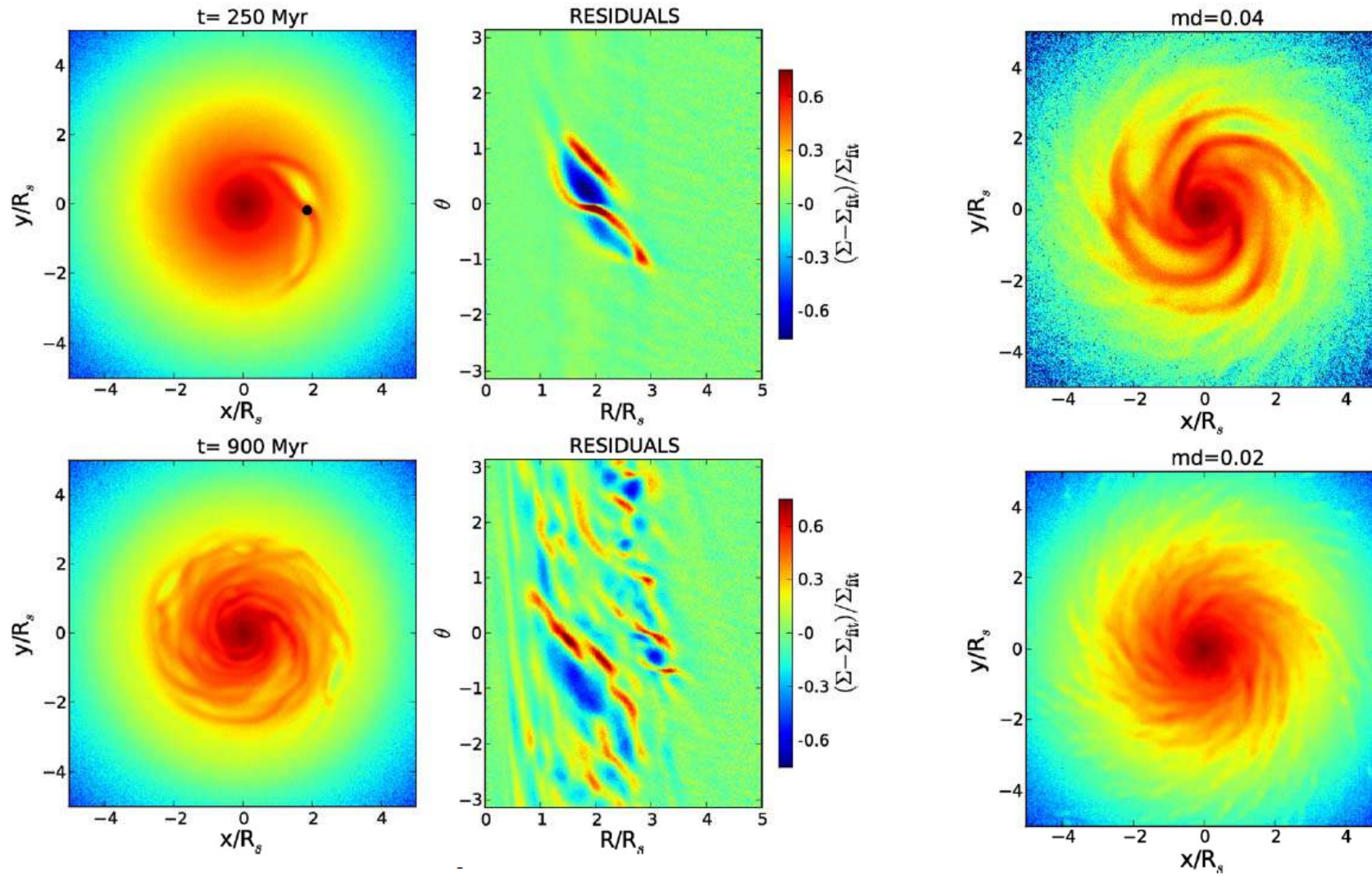


Lorsque le ressort  $S(\gamma)$  prend des valeurs négatives  $\rightarrow$  amplification

Cela ne se produit pas, sans rotation différentielle ( $V = \Omega_0 r$ , rotation rigide)

# Très efficace swing

Il suffit de perturber par un nuage de  $10^7 M_{\odot}$  pendant une rotation



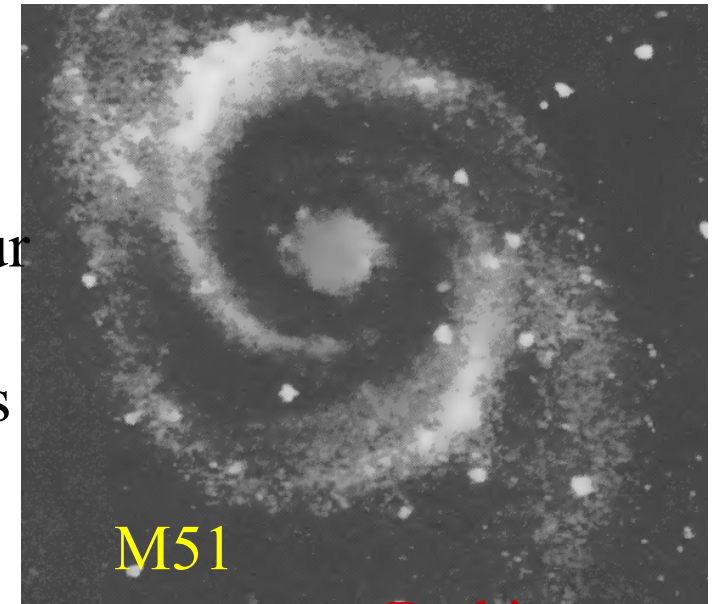
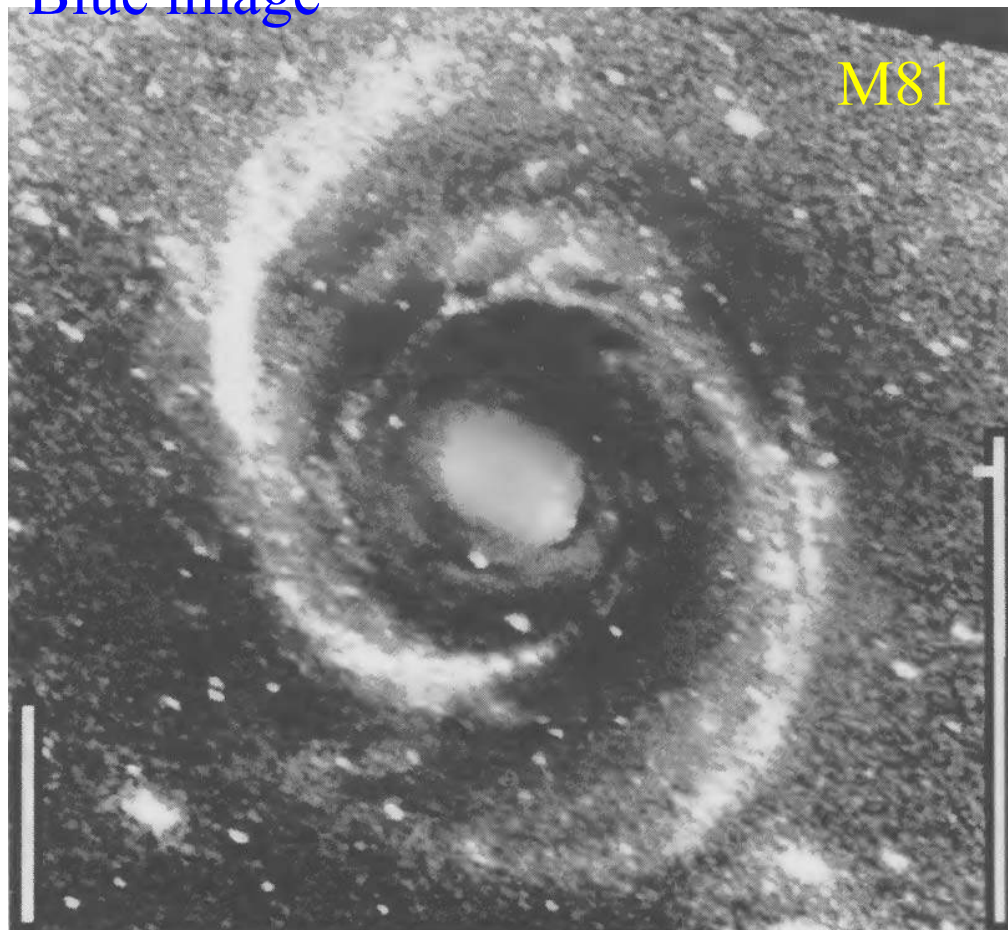
Persistance sur plusieurs rotations

*D'Onghia et al 2013*

# Modulation d'amplitude

Modulation régulière, quelle que soit la couleur  
→ Correspondent à la superposition de deux systèmes d'ondes, avec des  $\Omega_p$  différents

Blue image



Red image

Résonances en commun ILR

→ Corotation

Battements entre les ondes

Modes résonants

$m=4$ ,  $m=2$

**Ou bien modes:  
ondes stationnaires**

*Elmegreen et al 1989*

# Ondes de densité au centre

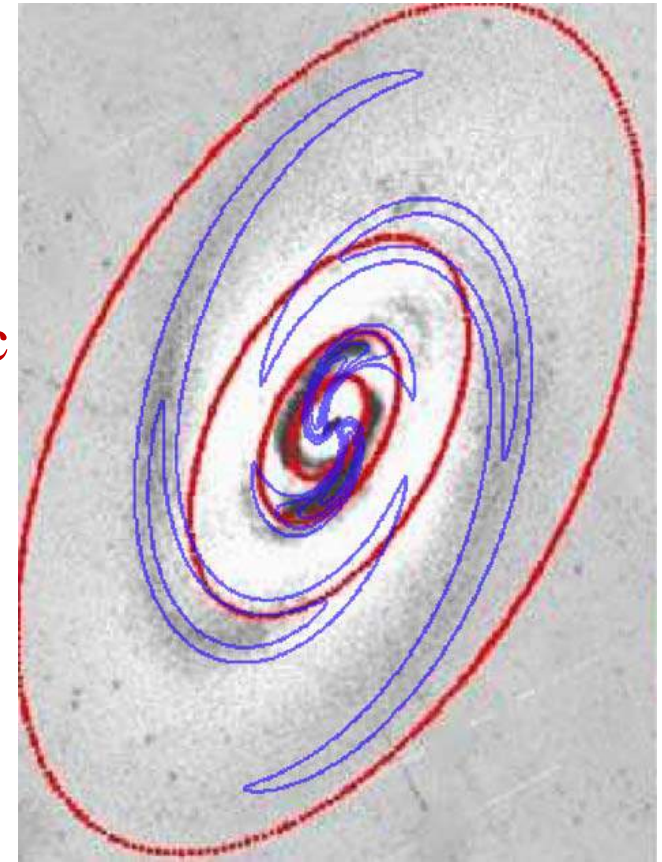
Découverte d'une onde de densité à l'intérieur du bulbe,  
Semble indépendante → en fait, une seule spirale de  $\Omega_p = 25.5 \text{ km/s/kpc}$   
Corotation à 9.0 kpc, compatible avec la théorie



Modes spiraux  
trouvés dans M81  
1.3, 2.5, 5, 11.2 kpc  
*Feng et al 2014*

Interactions avec  
N3077, M82?

3.6 $\mu$ , *Kendall et al 2008*



# Modes propres ou ondes de densité?

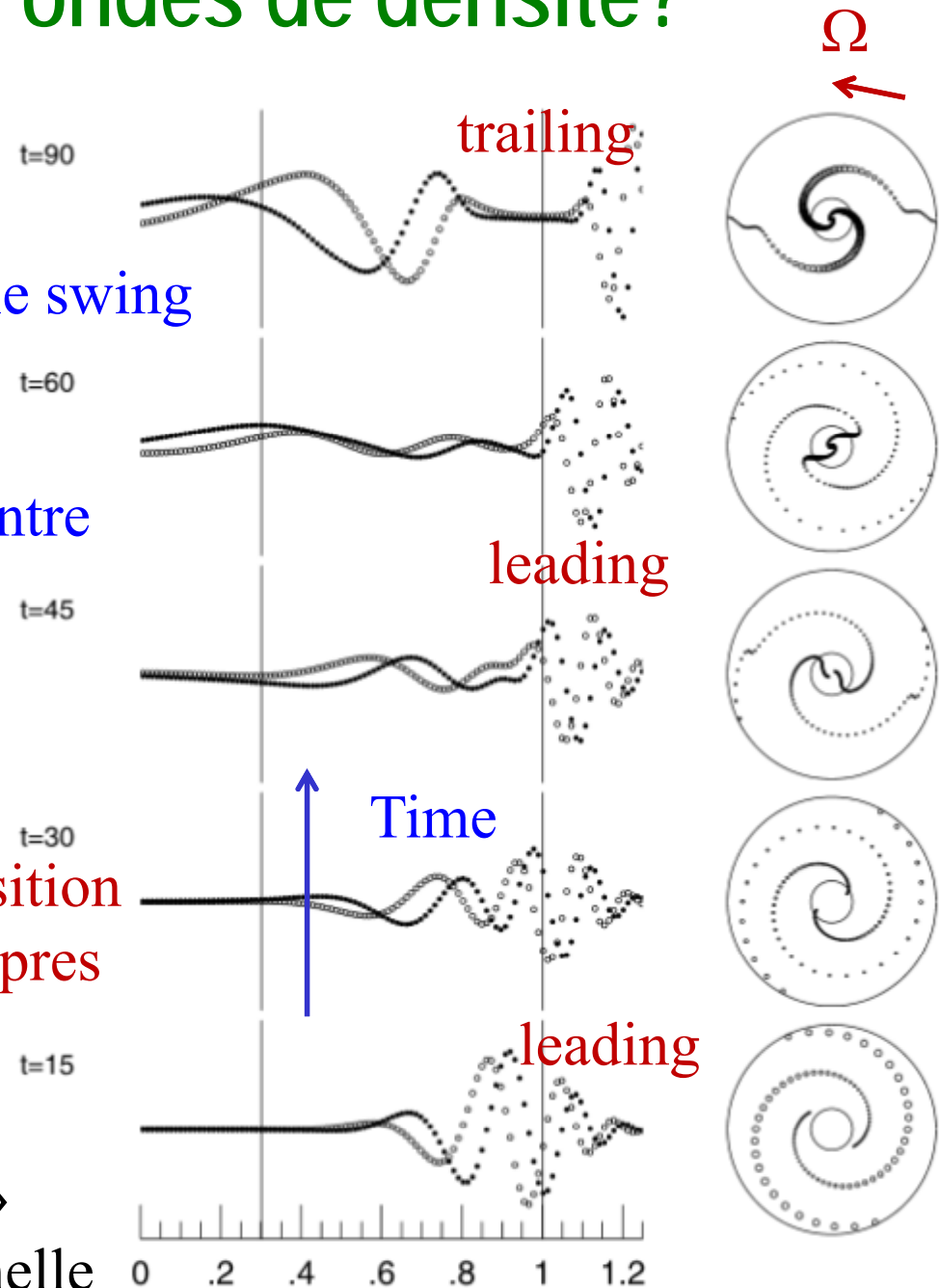
## Théorème de réciprocité:

Une galaxie qui peut amplifier par le swing des ondes venant de l'extérieur ont les capacités de développer des modes propres avec réflexion au centre (*Shu et al 2000*)

→ En règle générale, il y a superposition d'ondes se propageant + modes propres

SID= « Singular Isothermal Disks »

$V = Cst$   $\Sigma \sim 1/R$ , indépendant d'échelle

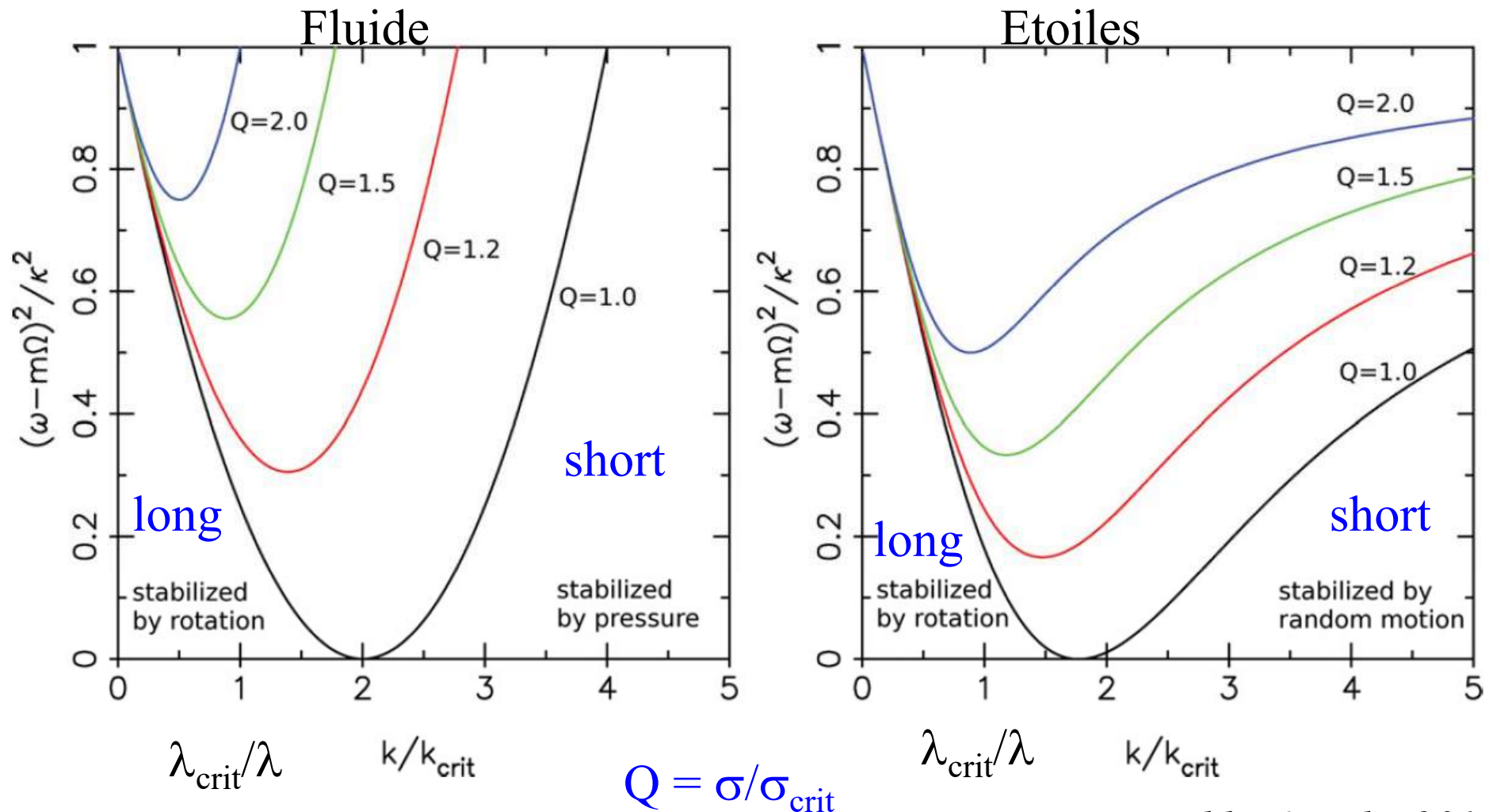




# Relation de dispersion avec gaz

$$k_{\text{crit}} = 2\pi/\lambda_{\text{crit}} = \kappa^2 / (2G\pi\Sigma_0)$$

A petite échelle, les étoiles non collisionnelles, n'ont pas de pression



# Deux composants couplés

Couplage entre étoiles et gaz

Le résultat est **plus instable** que chacun des composants isolé

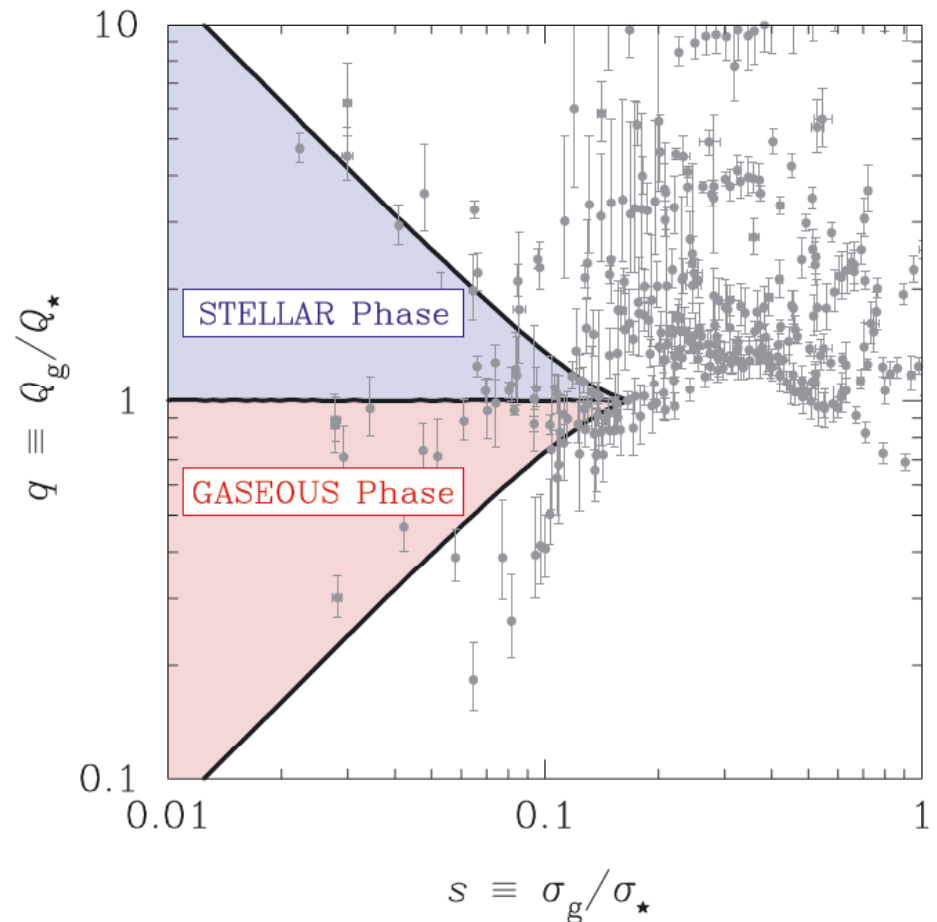
Estimation du critère de stabilité: approx  $1/Q = 1/Q_g + 1/Q_*$

$$Q_g = \kappa \sigma_g / \pi G \Sigma_g \quad Q_* = \kappa \sigma_* / \pi G \Sigma_*$$

Meilleure approximation

$$\frac{1}{Q} = \begin{cases} \frac{W}{Q_*} + \frac{1}{Q_g} & \text{if } Q_* \geq Q_g \\ \frac{1}{Q_*} + \frac{W}{Q_g} & \text{if } Q_g \geq Q_* \end{cases}$$

$$W = \frac{2\sigma_*\sigma_g}{\sigma_*^2 + \sigma_g^2}$$

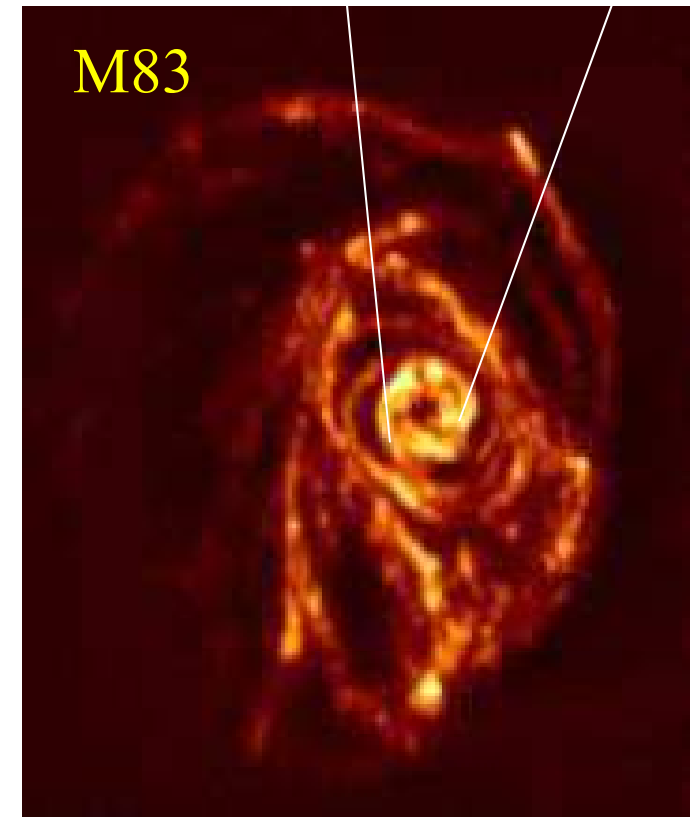
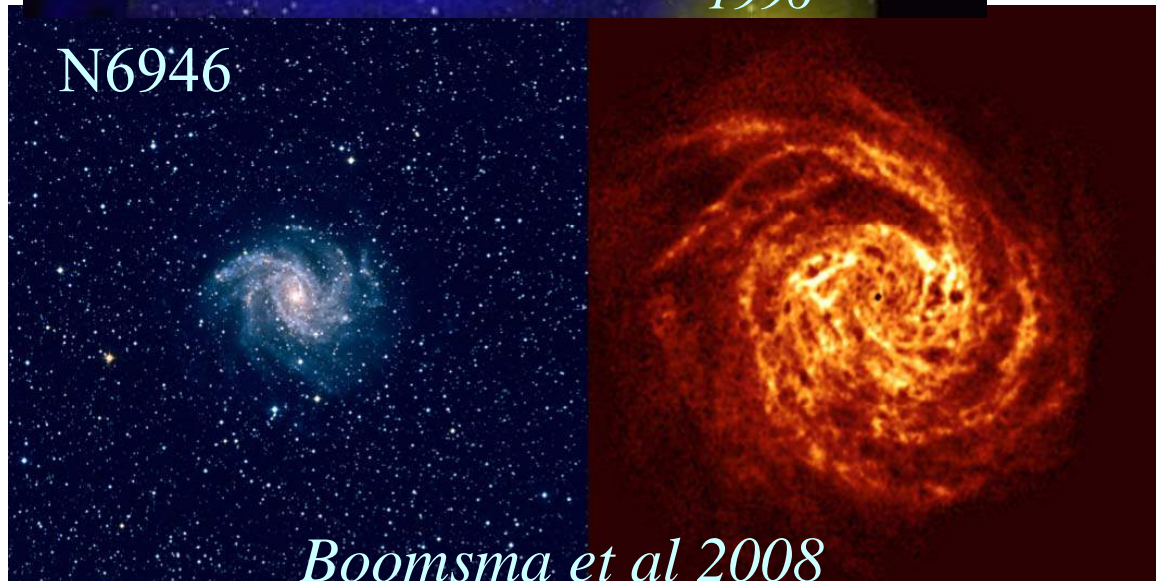


Romeo & Wiegert 2011

# Ondes spirales en dehors du disque stellaire

Normalement, les ondes de densité s'arrêtent à l'OLR au bord du disque stellaire

M83: optique



# Ondes de densité à l'extérieur

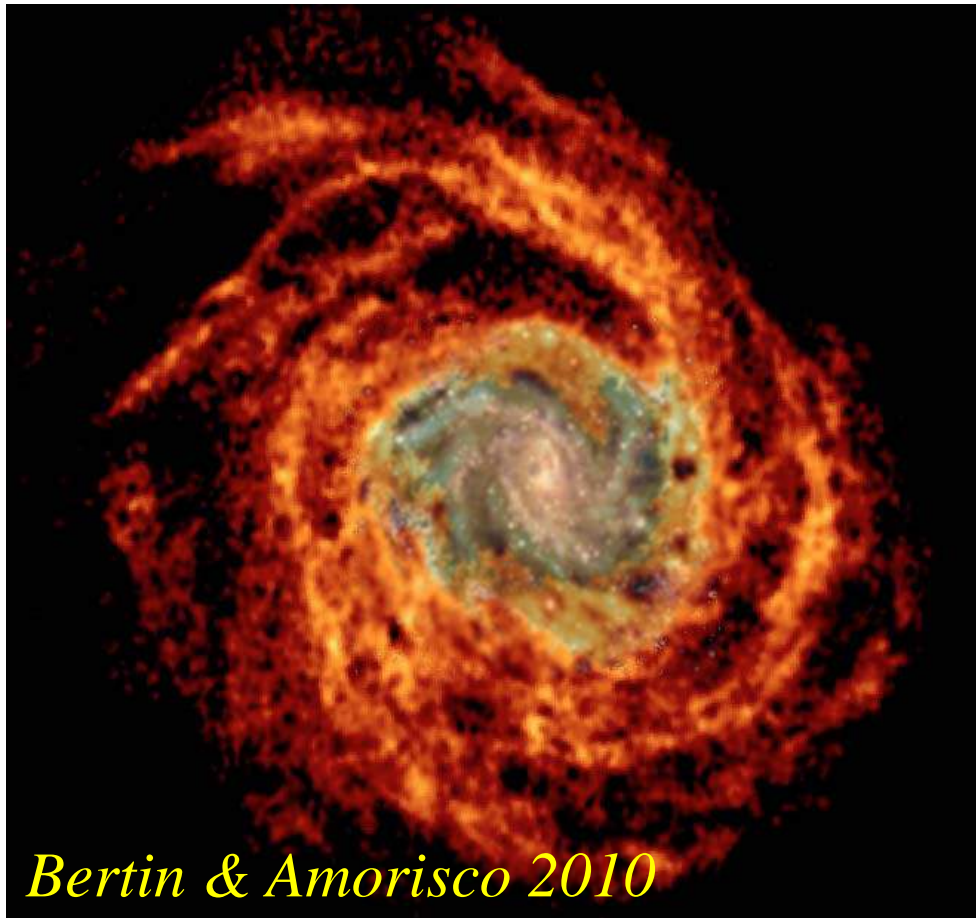
Dans les parties externes, le disque devrait être stable, car léger et non-autogravitant (matière noire dominante, sphérique)

Mais les ondes spirales semblent dire le contraire

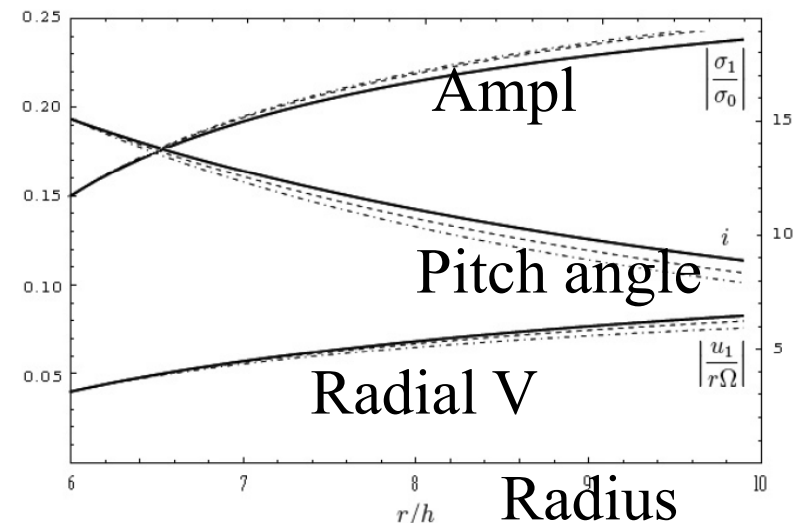
Les ondes trailing peuvent se propager dans le gaz externe, et même croître en amplitude

Inversement proportionnelle à la densité de surface

Conservation de densité de l'action



*Bertin & Amorisco 2010*



# Propagation des ondes dans le gaz

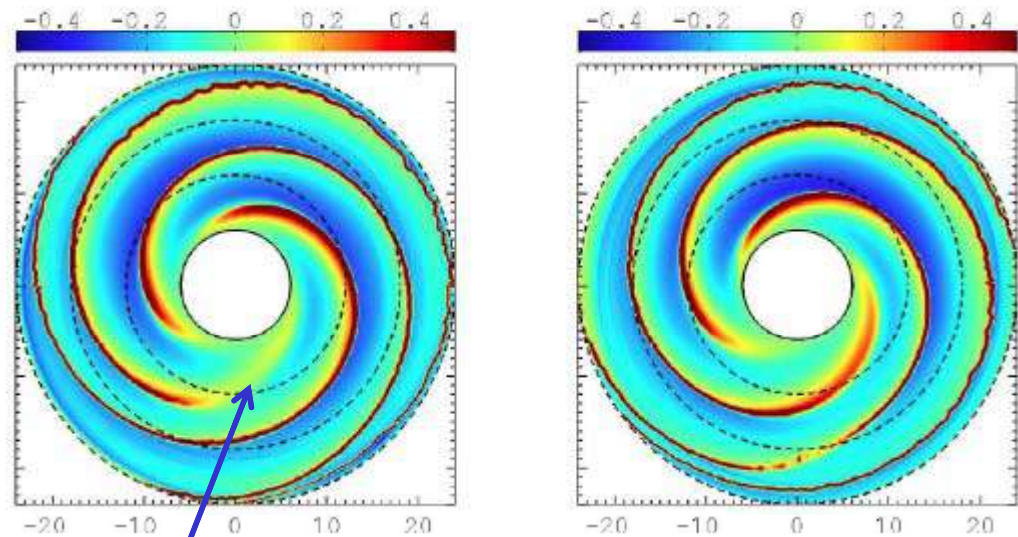
→ Simulations de la propagation des ondes, à travers l'OLR  
Et dans le disque gazeux, à grande distance

Amplitude faible des perturbations: ondes quasi-linéaires  
Compatibles avec WKB

Au-delà de 2 rayons optiques  
l'onde devient non-linéaire

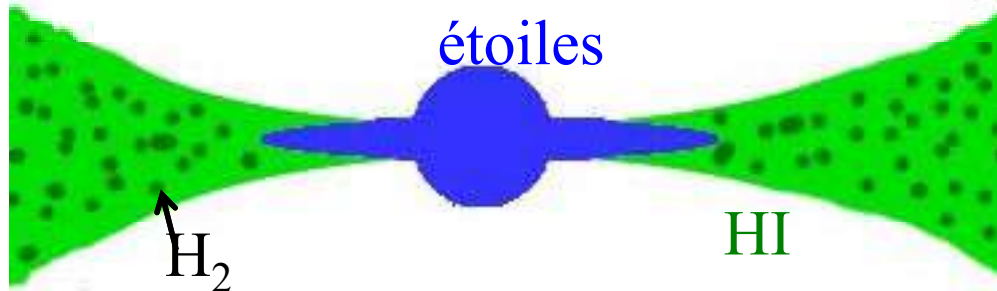
L'observation pourrait  
contraindre la matière noire

*Khoperskov & Bertin 2015*



R=6h, 12h, 18h, 24h

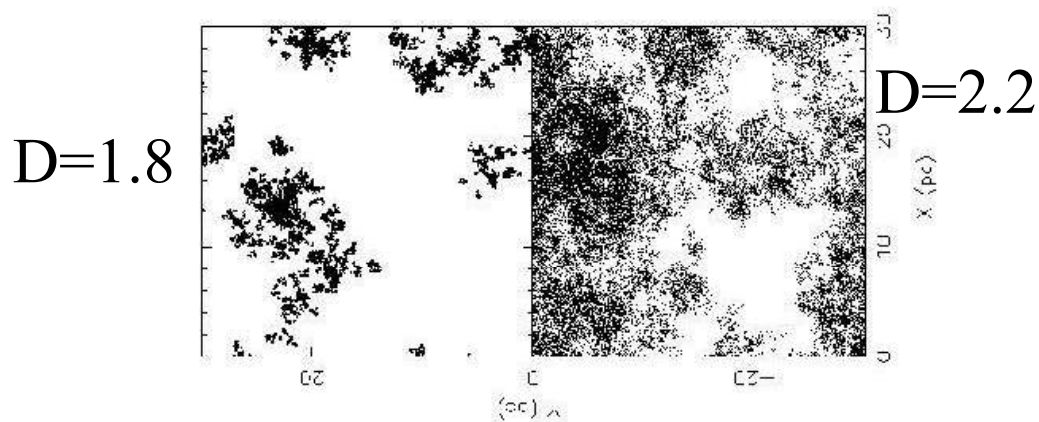
# Disques gazeux plus lourds?



Le gaz pourrait être plus auto-gravitant

Il se pourrait que le gaz d'hydrogène H<sub>2</sub> soit sous-estimé dans ces régions, car métallicité très faible, pas de CO

La stabilité de ce gaz H<sub>2</sub> froid est dû à sa structure fractale



Clumps de  
masse  $\sim 10^{-3} M_{\odot}$   
densité  $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$   
taille  $\sim 20 \text{ AU}$

$N(\text{H}_2) \sim 10^{25} \text{ cm}^{-2}$

$t_{\text{ff}} \sim 1000 \text{ yr}$

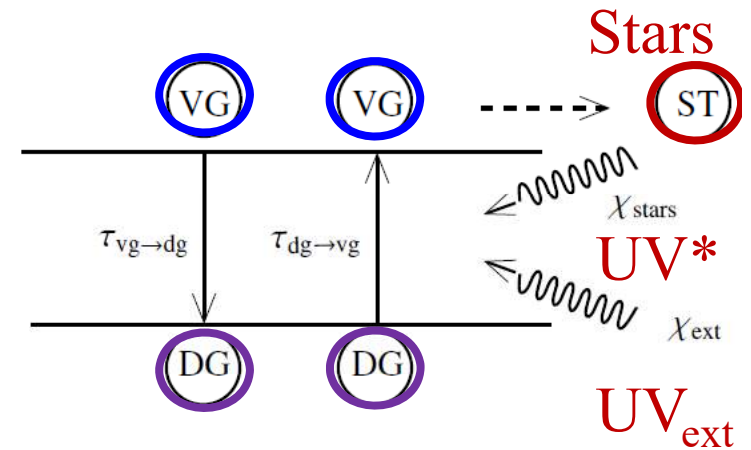
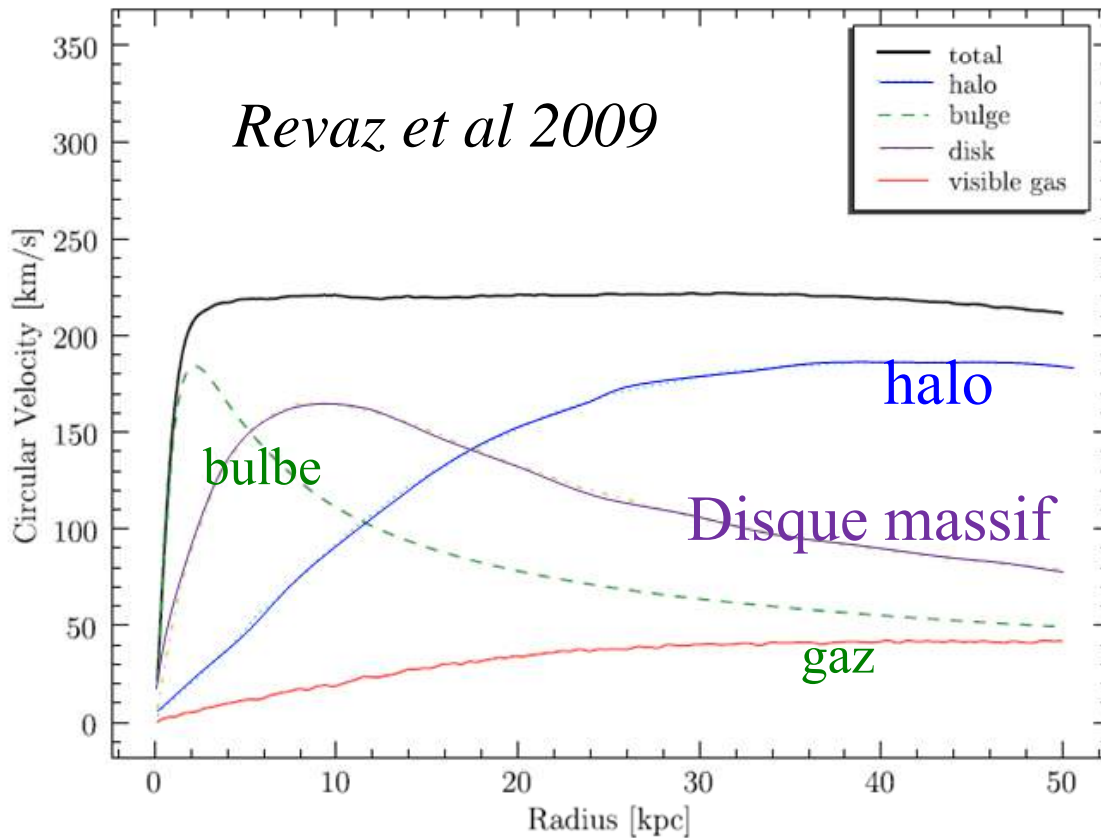
Régime adiabatique:

Durée de vie plus longue

**Fractal:** collisions  
puis coalescence,  
chauffage, impliquant  
équilibre statistique  
(Pfeiffer & Combes 94)

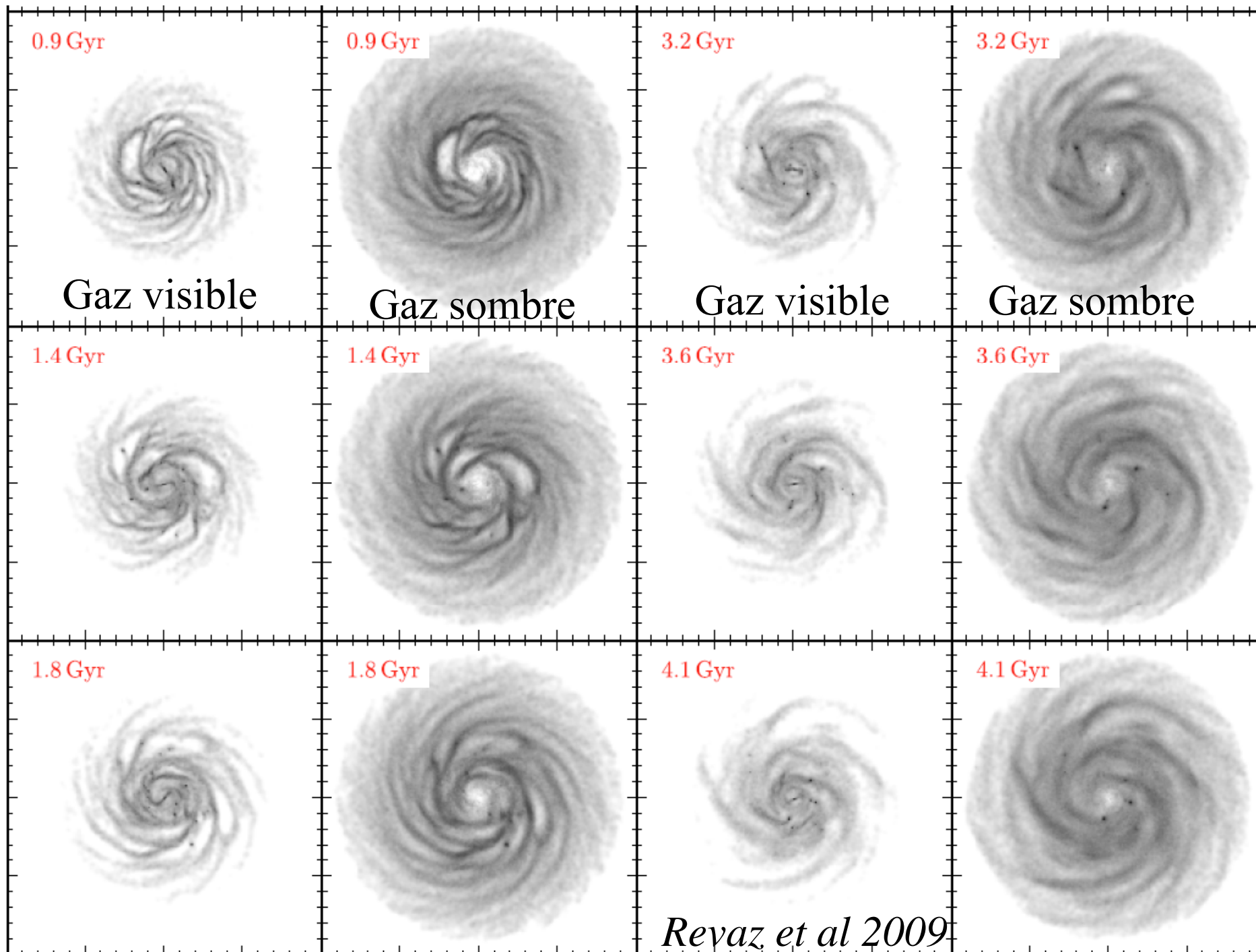
# Simulations avec un disque massif

Le disque de gaz externe est composé de gaz visible (**VG**) + gaz sombre (**DG**), 5 fois plus massif



Des transitions de phase entre les deux gaz, selon la formation d'étoiles, le flux UV..

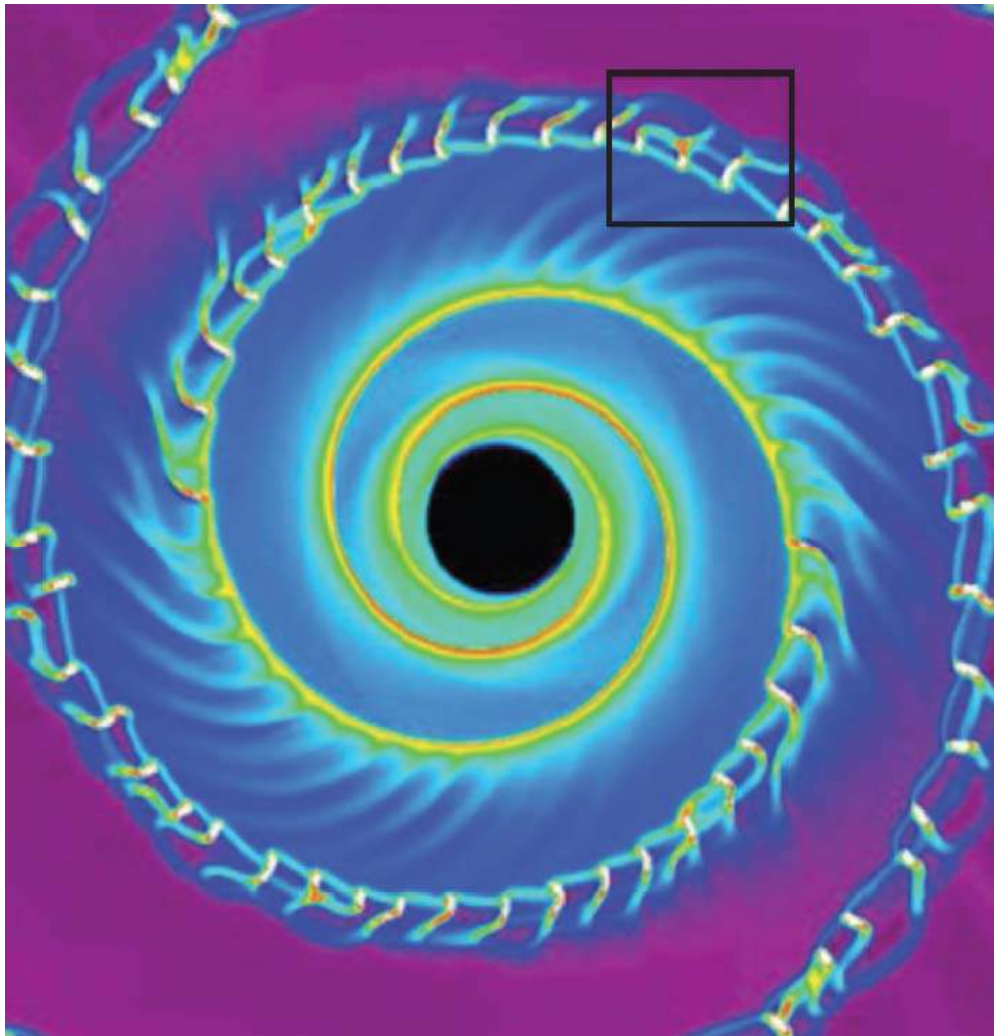
Les étoiles ne se forment que dans le gaz visible, très dissipatif





# « Feathers »: instabilités en plumes

Avec champ magnétique,  $P_g/P_B=1$ , Forcing de la spirale 10%  
Espacement 3-5  $\lambda_{\text{Jeans}}$ ,  $10^7 M_{\odot}$



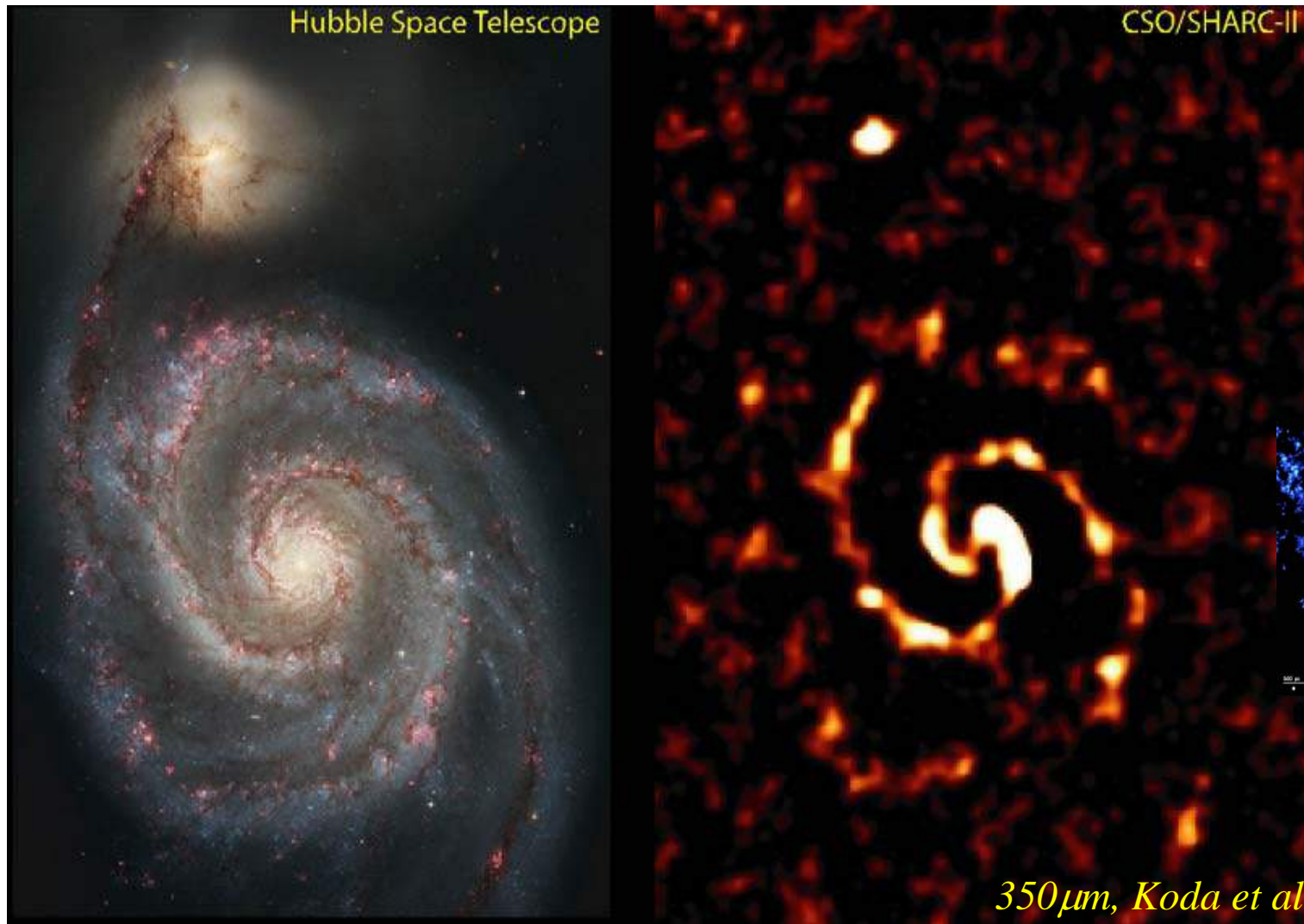
Au début dans le bras,  
éperons « leading », puis  
par la rotation différentielle  
→ Trailing

éperons = Instabilité de  
Kelvin-Helmholtz



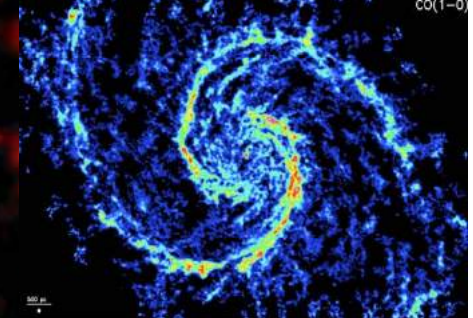
$R < CR$ , éperons en dehors  
 $R > CR$ , éperons en dedans

*Shetty & Ostriker 2006*



Eperons et  
plumes

Gaz moléculaire



*Schinnerer et al*

Les éperons (« spurs ») vus dans la brillance des étoiles (durables)  
Les plumes dans la poussière (absorption, et aussi **émission dans l'infrarouge lointain 350µm**)

# Formation d'étoiles dans les bras

Le gaz dans le puits de potentiel du bras spiral est accéléré, choqué, et forme des étoiles. Des instabilités multiples (KH, plumes) prolongent le bras, par des branchements, des ponts, parfois jusqu'au bras suivant



M51 Hubble  
Heritage

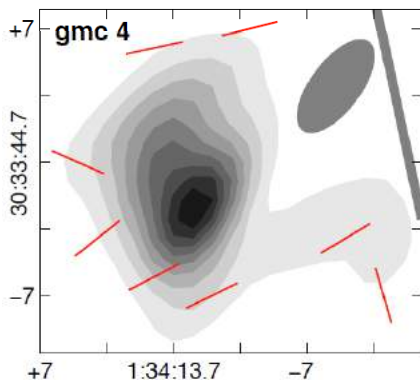
Il existe aussi comme des perles sur un collier  
→ Instabilité de Parker?



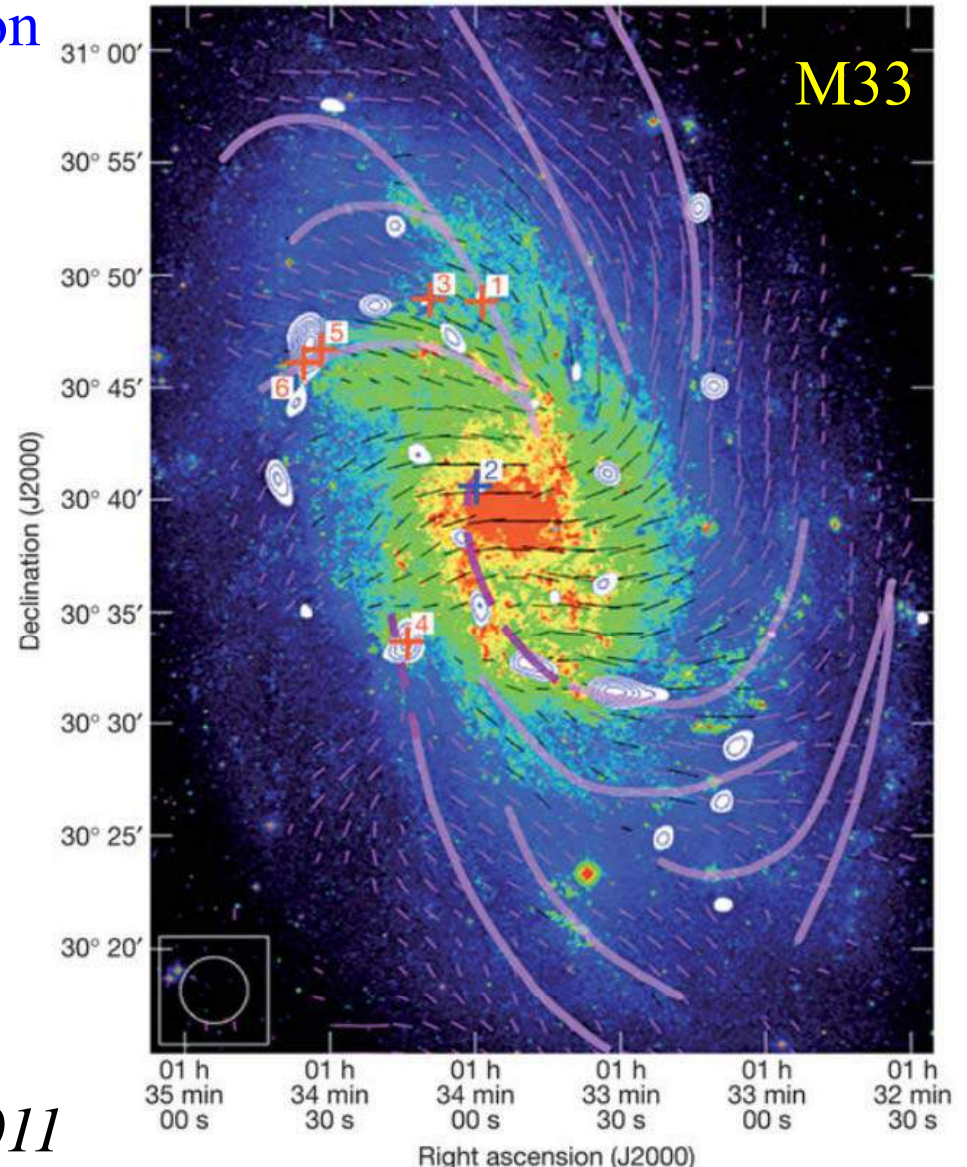
# Instabilité de Parker ?

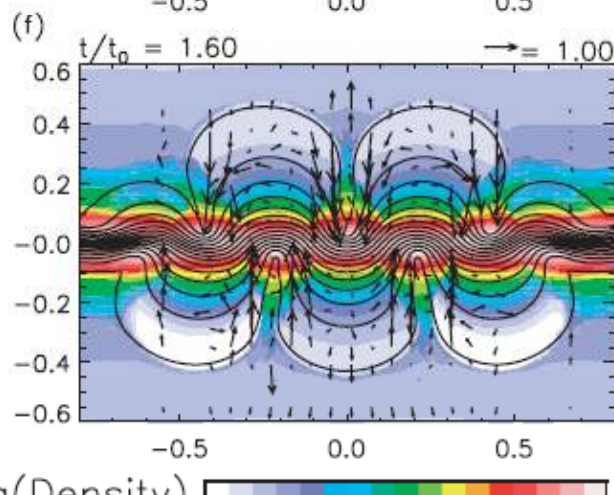
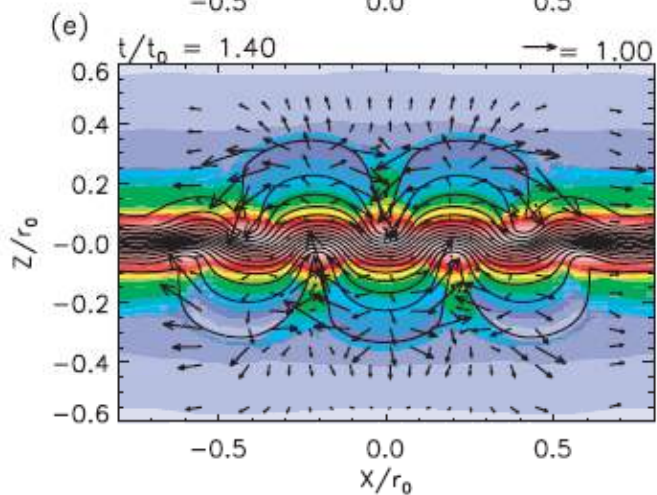
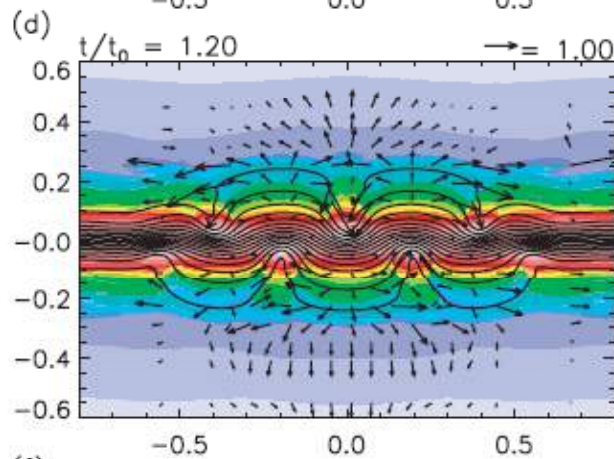
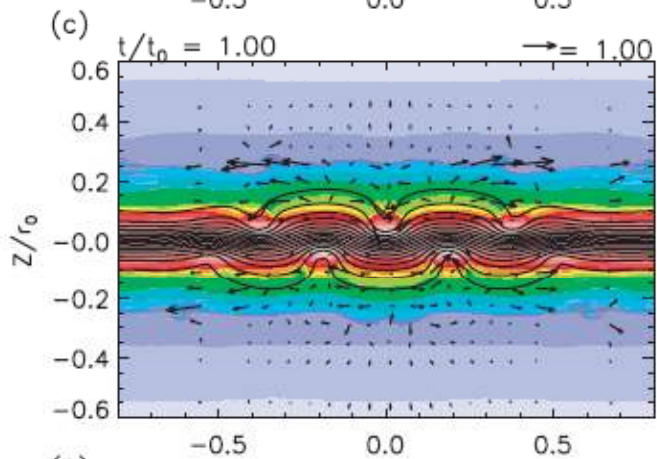
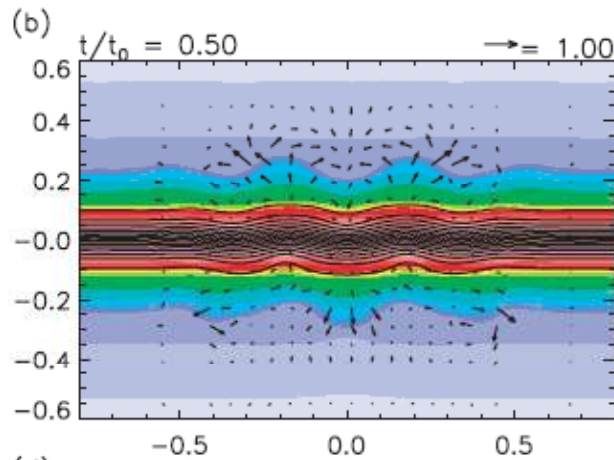
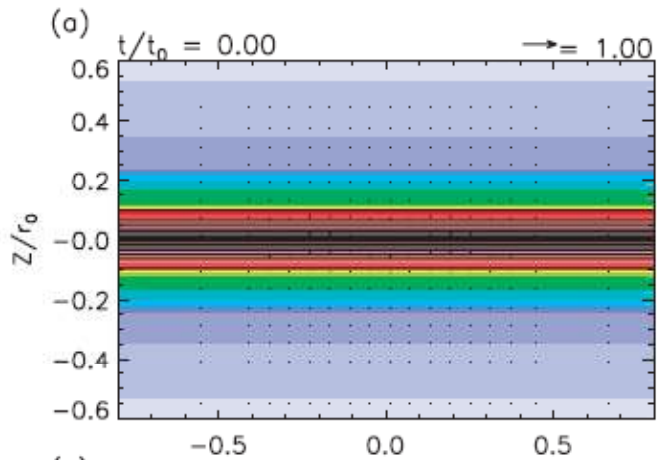
Le champ magnétique a-t-il une action?  
Ou bien la turbulence randomise son orientation?

Le cas de M33 (D=900kpc) où les nuages moléculaires peuvent être résolus (15pc) montre que **B** est aligné avec les bras spiraux  
Polarisation des raies de CO  
Les nuages de  $n = 10^4 \text{cm}^{-3}$  ont  $B \sim 100 \mu\text{G}$ ,  $100 B_{\text{ISM}}$  (synchrotron)  
→ Turbulence sub-Alfvénique

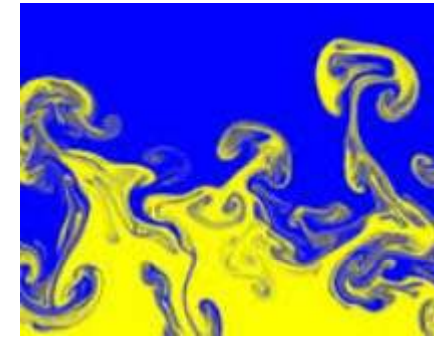


*Li & Henning 2011*





Instabilité où les bulles magnétiques s'élèvent (Archimède) // Rayleigh-Taylor

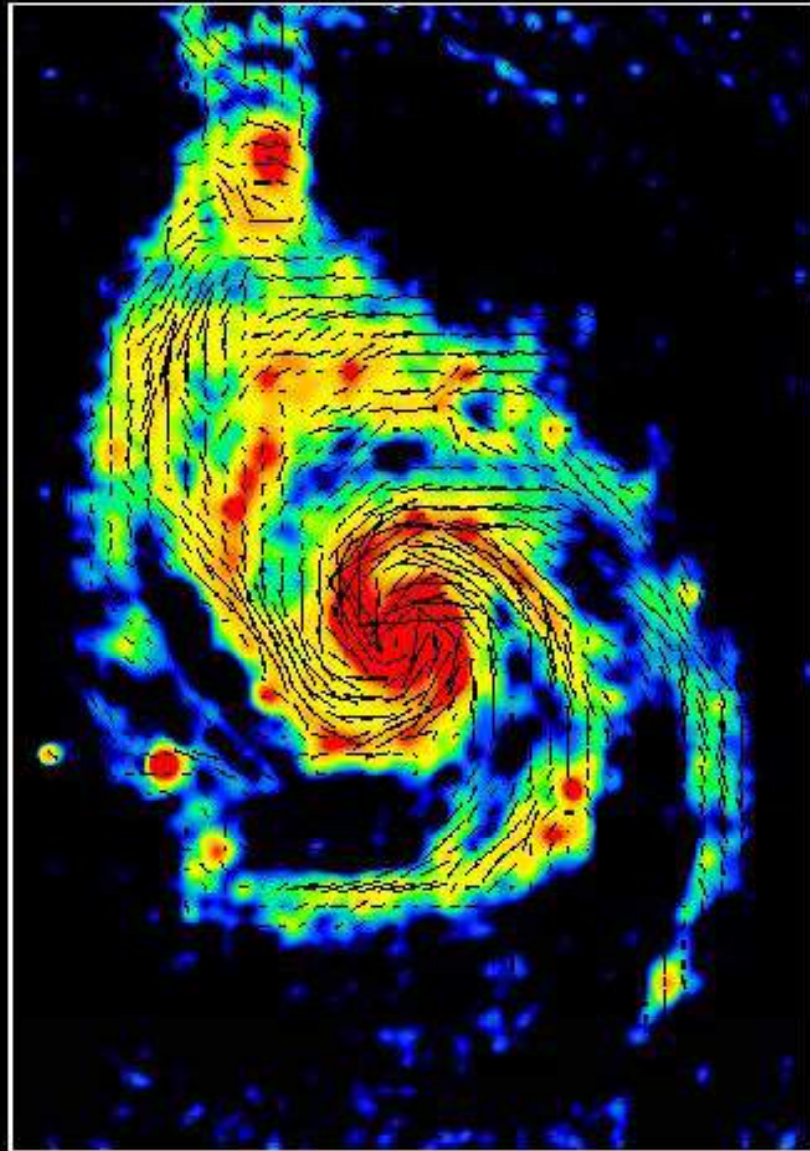


La taille des régions dans le plan ~épaisseur ~200pc  
Le champ B va être vertical  
 $P_{CR} > P_{mag} > P_{gas}$

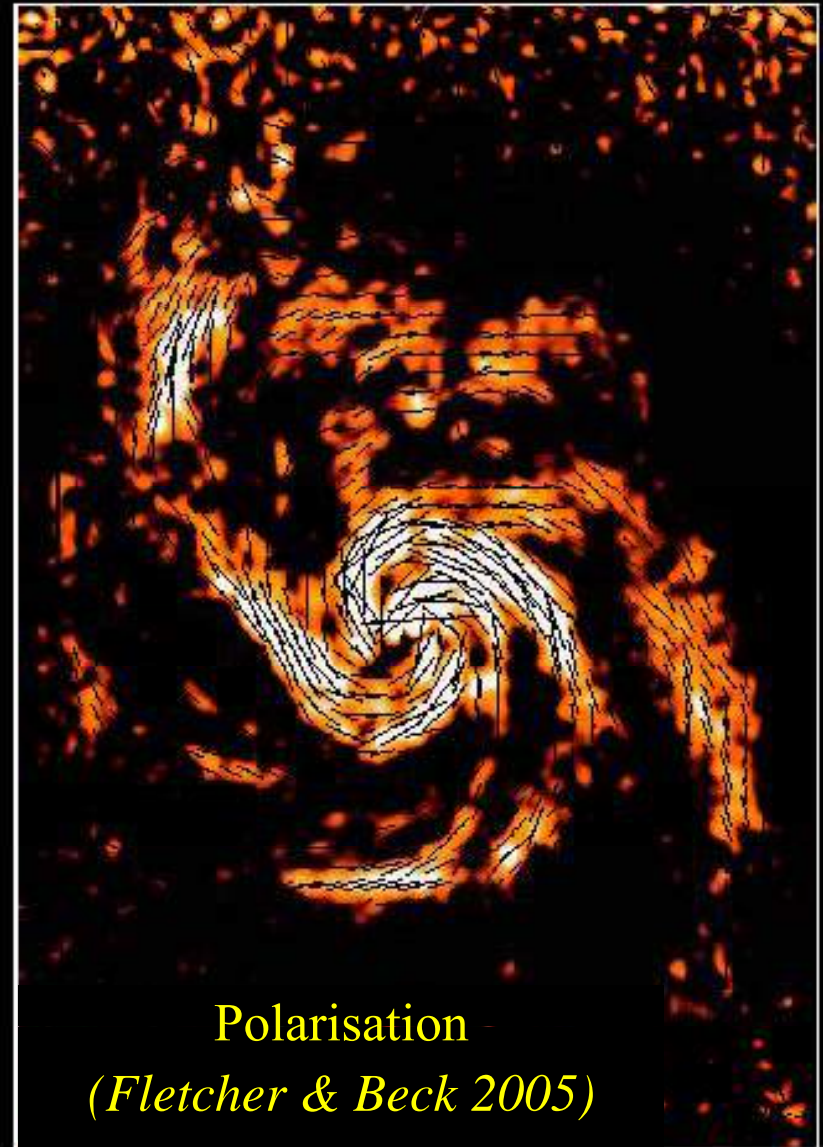
*Takahashi et al 09*

# M51 Synchrotron

M51 6cm Tot.Int.+D-Vectors (VLA+Effelsberg) M51 6cm Pol.Int.+D-Vectors (VLA+Effelsberg)

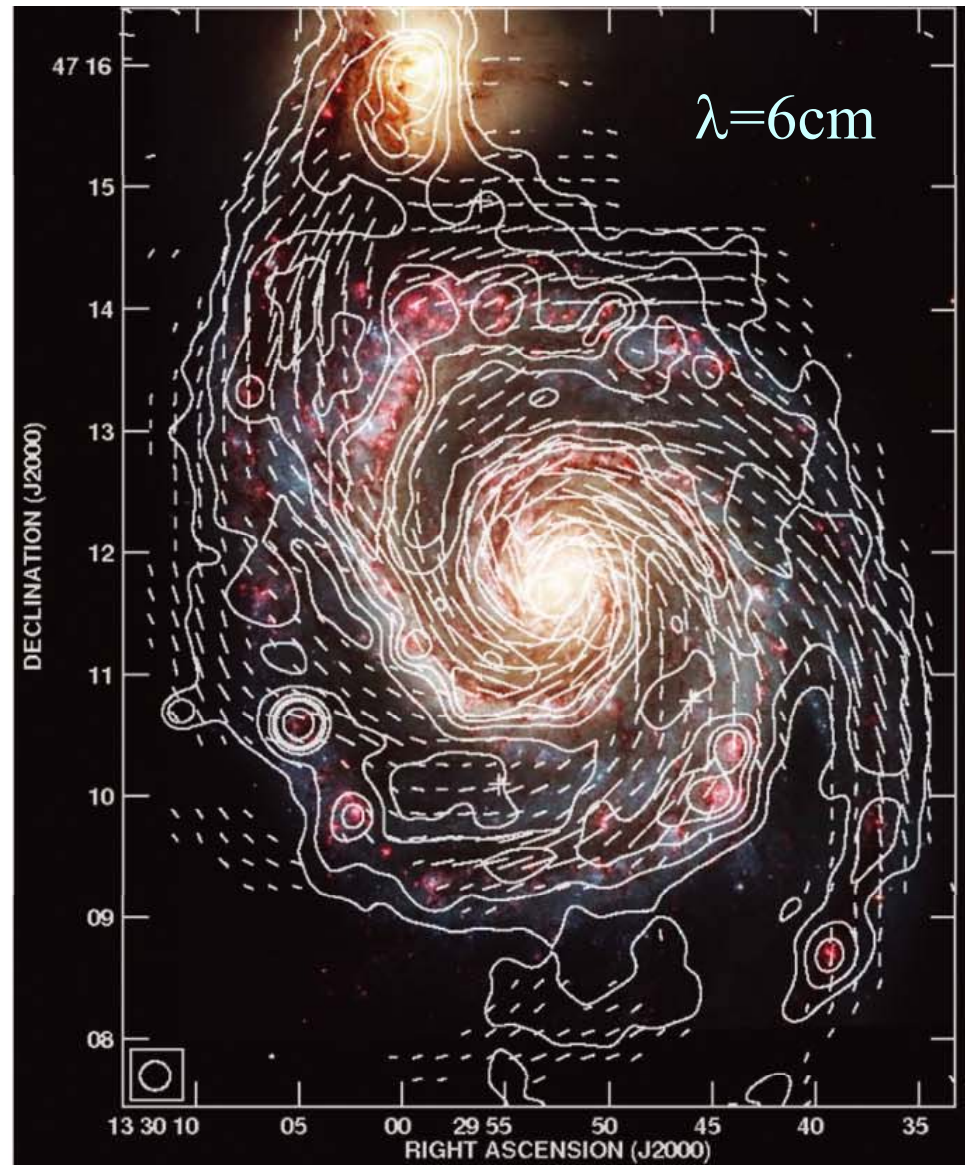
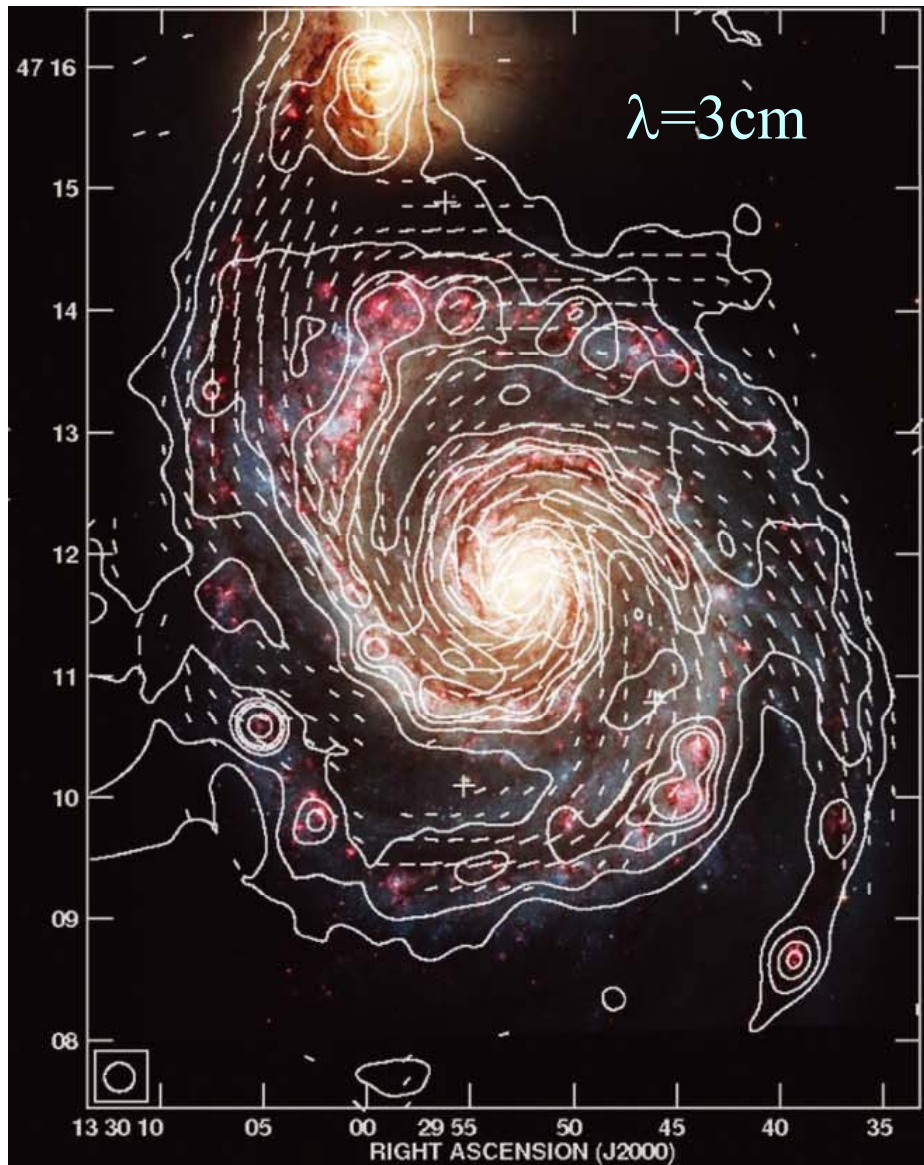


Copyright- MPIR Bonn (A.Fletcher & R.Beck)



Copyright- MPIR Bonn (A.Fletcher & R.Beck)

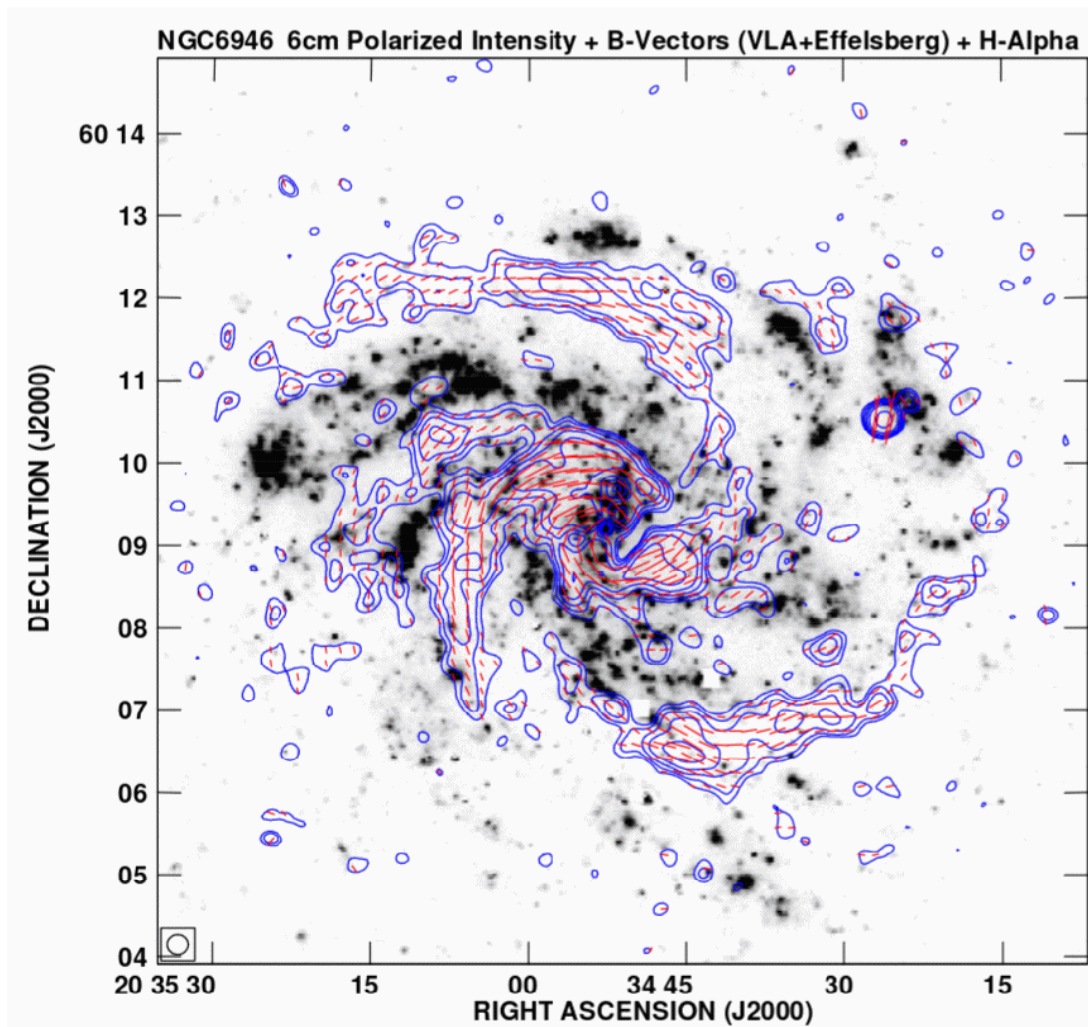
L'intensité du champ est maximum dans les bras,  
mais la polarisation y est minimum



Fletcher et al 2011

# Champ magnétique et spirale

Le champ B n'est pas moteur dans la formation de la spirale mais il s'amplifie par effet dynamo. Amplitude qqes  $\mu\text{G}$



Dans le plan, le champ B s'aligne avec les bras

Au cœur des bras: densité, formation stellaire, turbulence

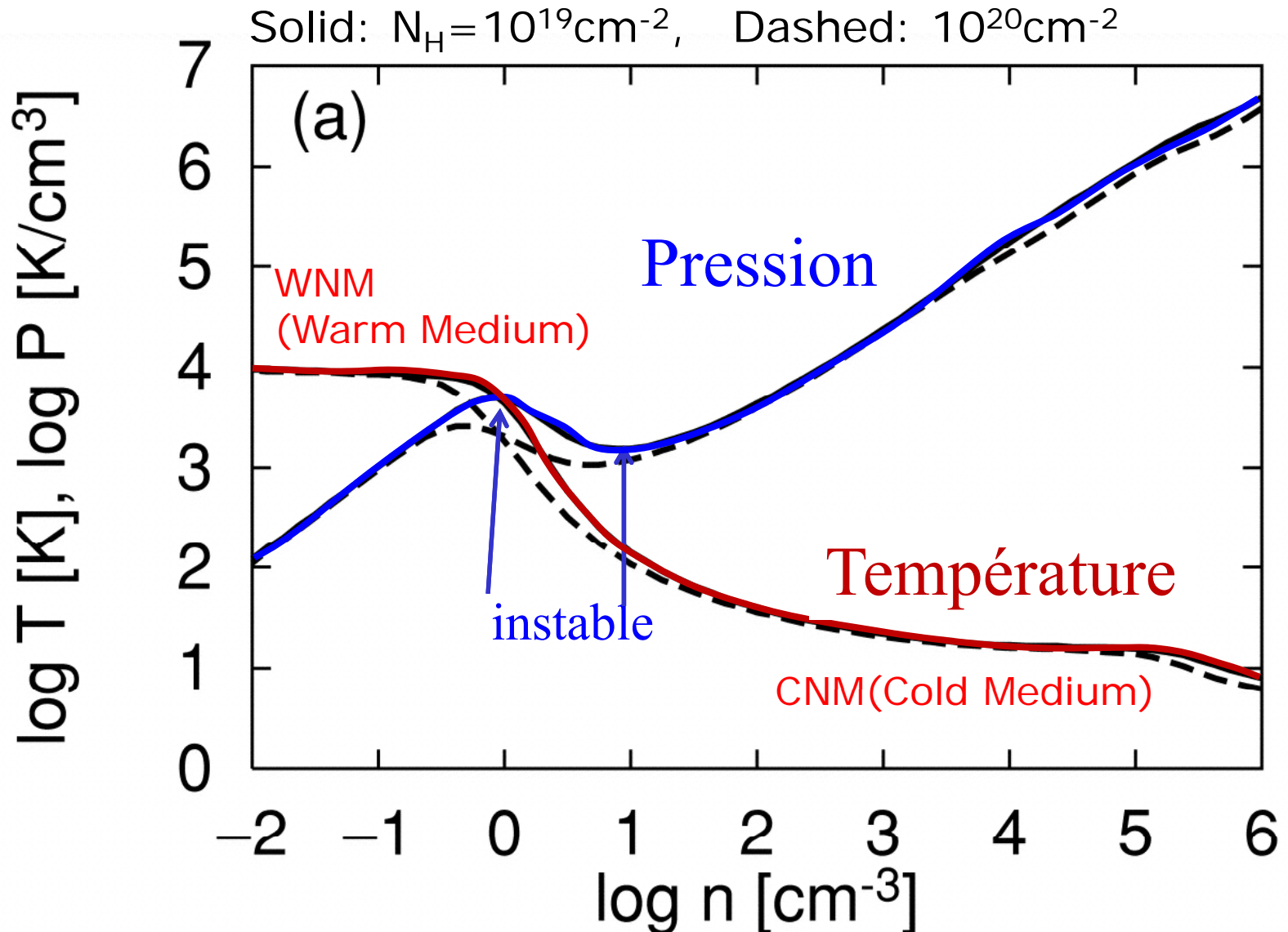
→ Randomisation de B

La polarisation est forte à l'interbras

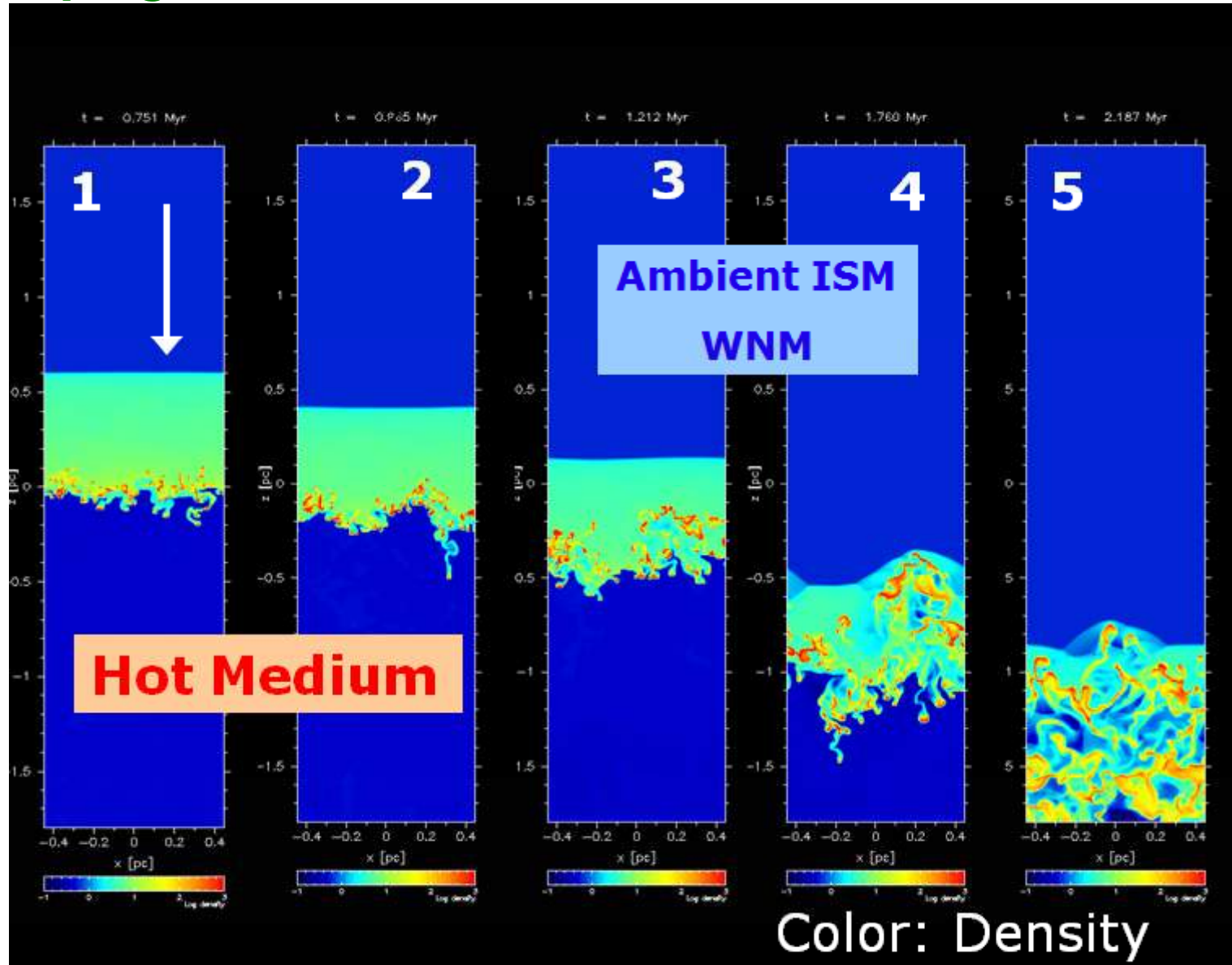
*Beck 2001*



# Les deux phases du milieu interstellaire



# Propagation des chocs dans le milieu chaud

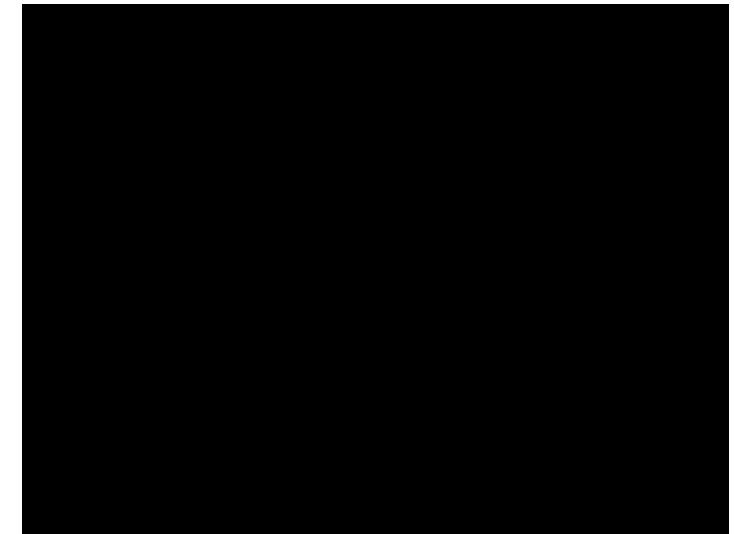
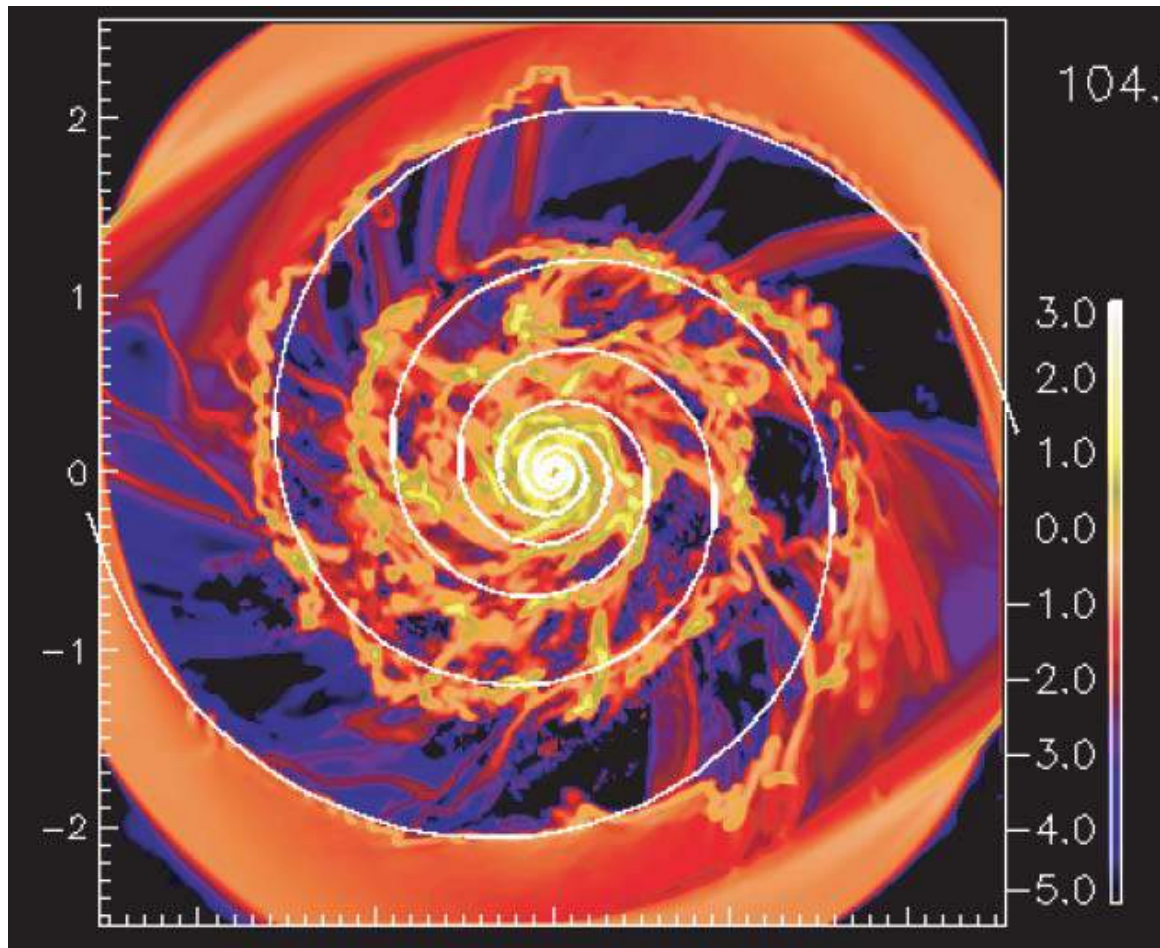


Koyama & Inutsuka, 2002

# Simulations avec spirale forcée

Potentiel fixe (referentiel tournant), le gaz forme des étoiles + feedback  
Hydrodynamique, refroidissement radiatif, auto-gravité..

Choc instable, branchements extensions



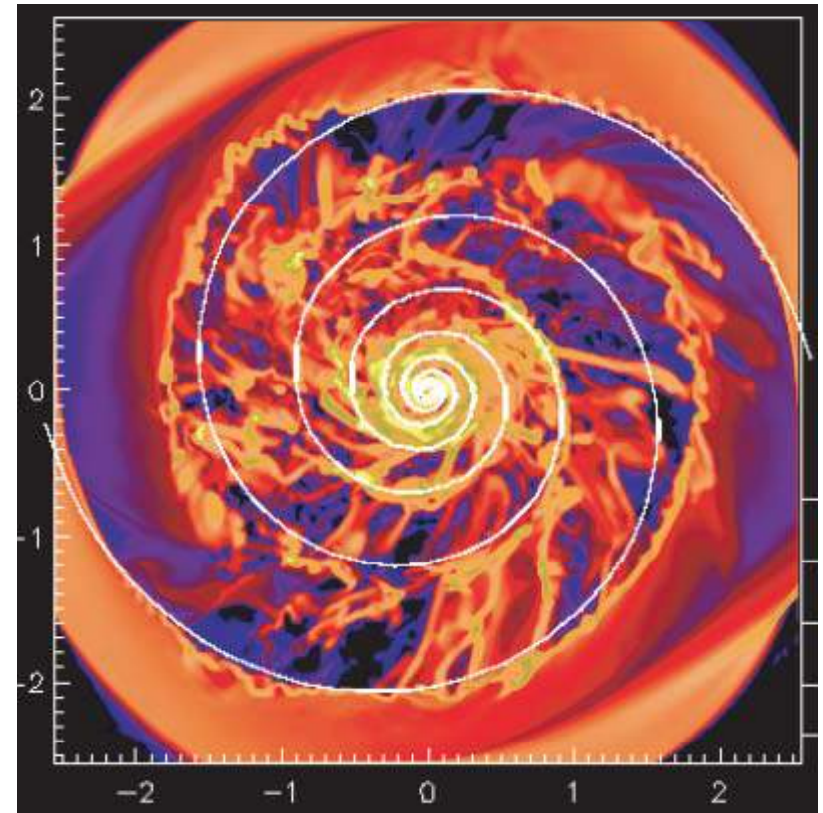
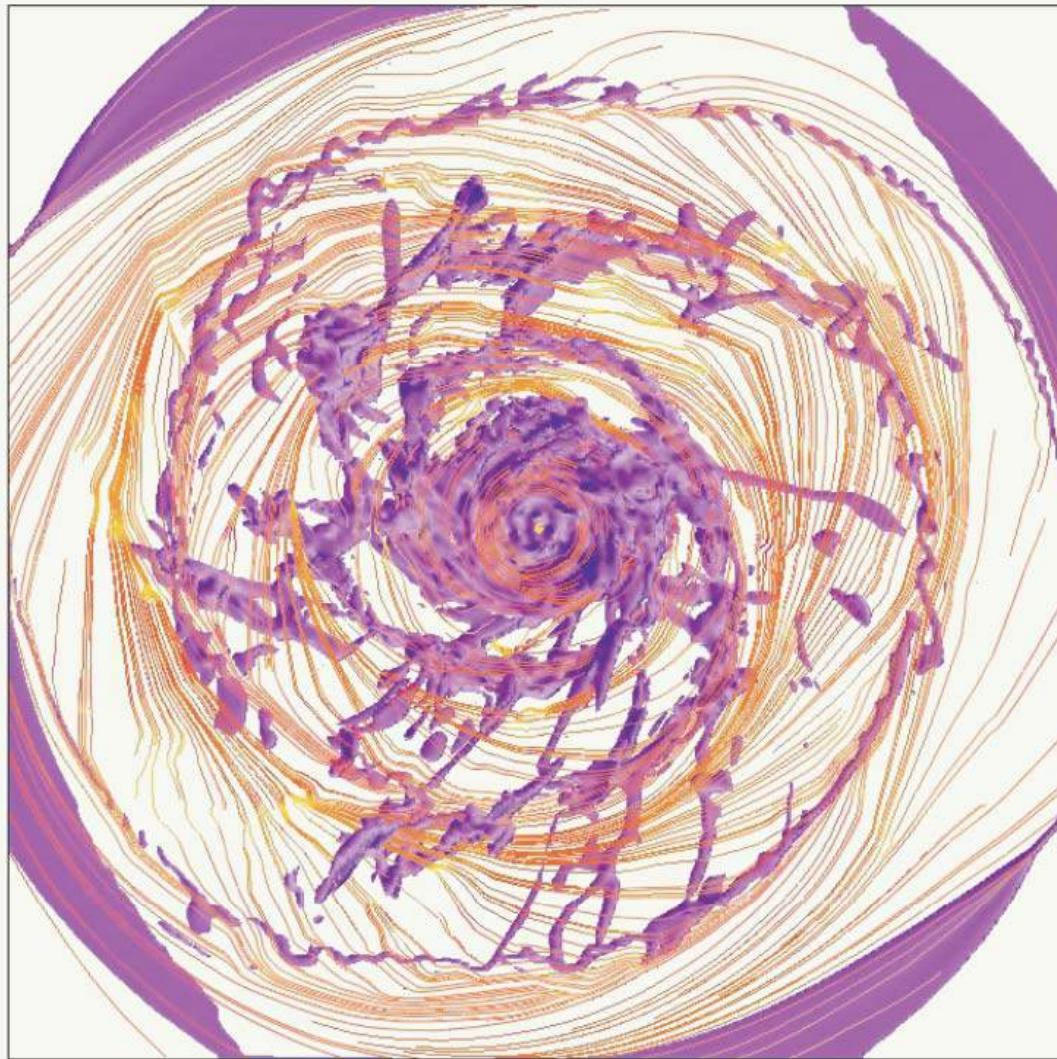
Instabilités verticales

*Wada 2008*

# Ondes de densité

Flux de gaz dans le référentiel tournant

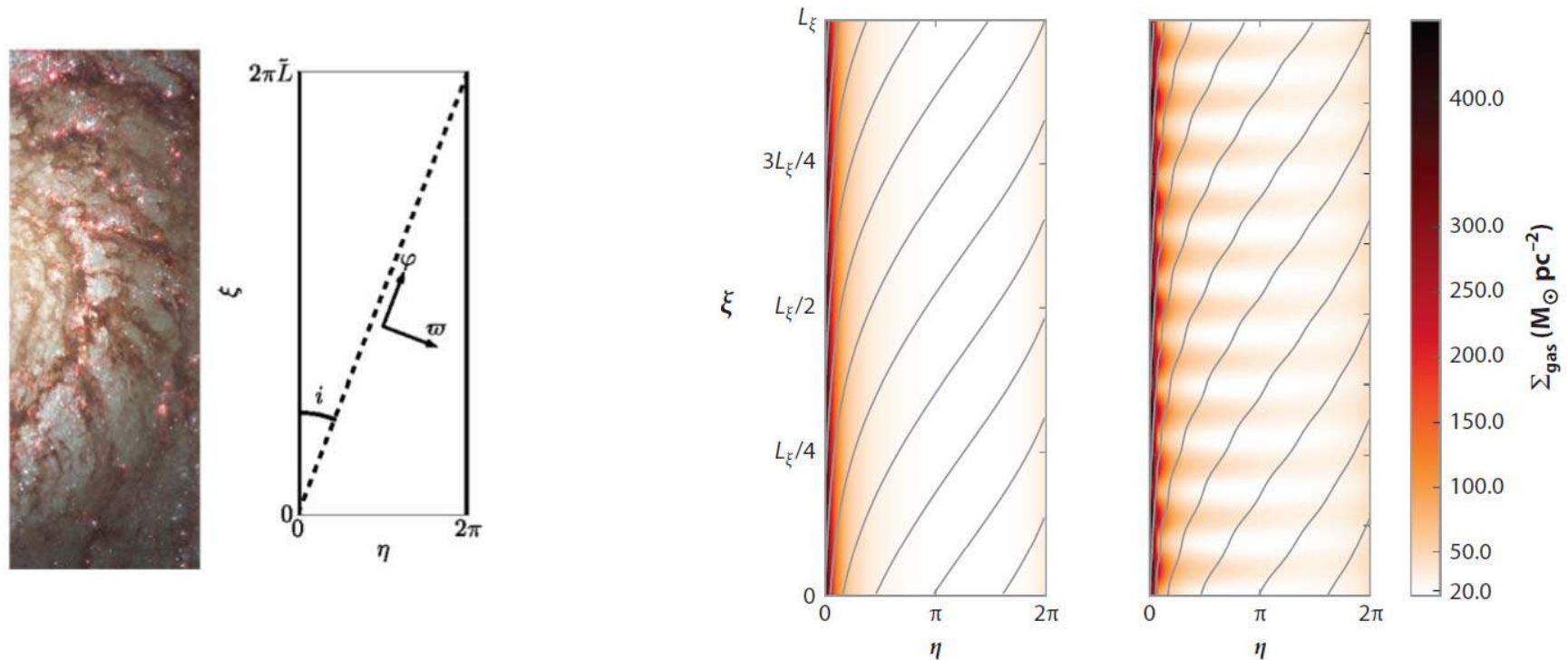
Les sur-densités de gaz ne sont significatives



*Wada 2008*

# Instabilités en plumes avec champ B

Avec champ magnétique,  $P_g/P_B=1$ , Forcing spirale 10%  
La densité de surface (couleur) et le champ magnétique (lignes)  
sont exponentiellement instables



Mode le plus instable:  $\lambda = 530 \text{pc}$

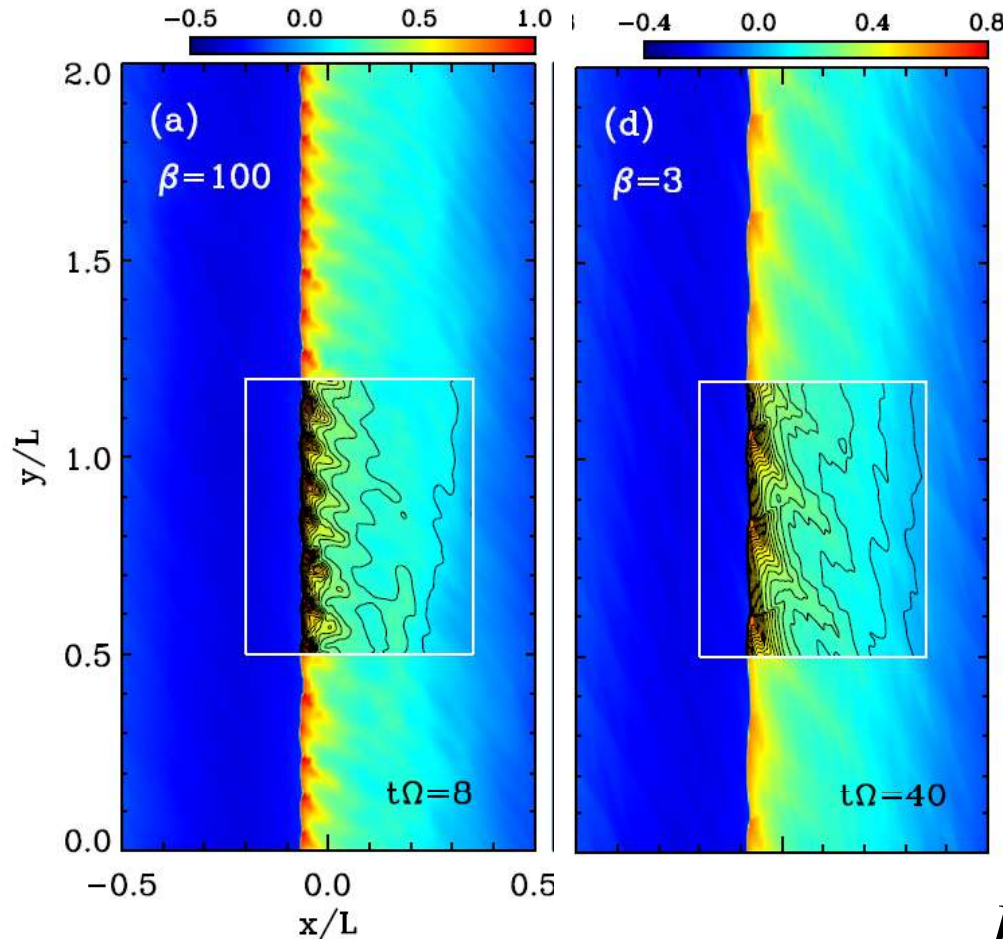
*Lee 2014*

# Instabilité de rides (ou éperons)

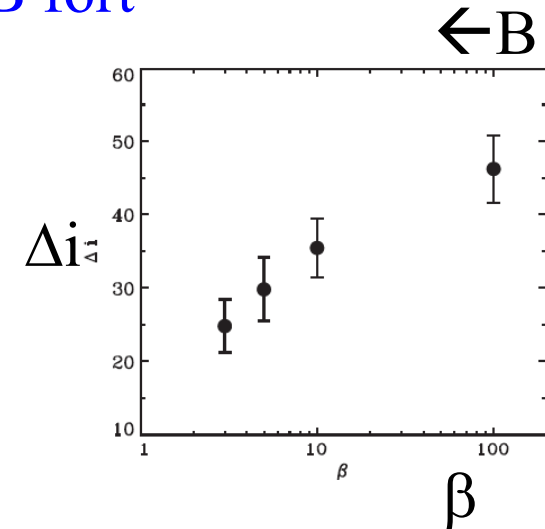
Ressemble plus à une instabilité de cisaillement (Kelvin-Helmholtz)

Le champ magnétique a plutôt tendance à la modérer  $\beta = P_g/P_{mag}$

L'instabilité s'amplifie par vorticité à chaque choc et traversée des bras



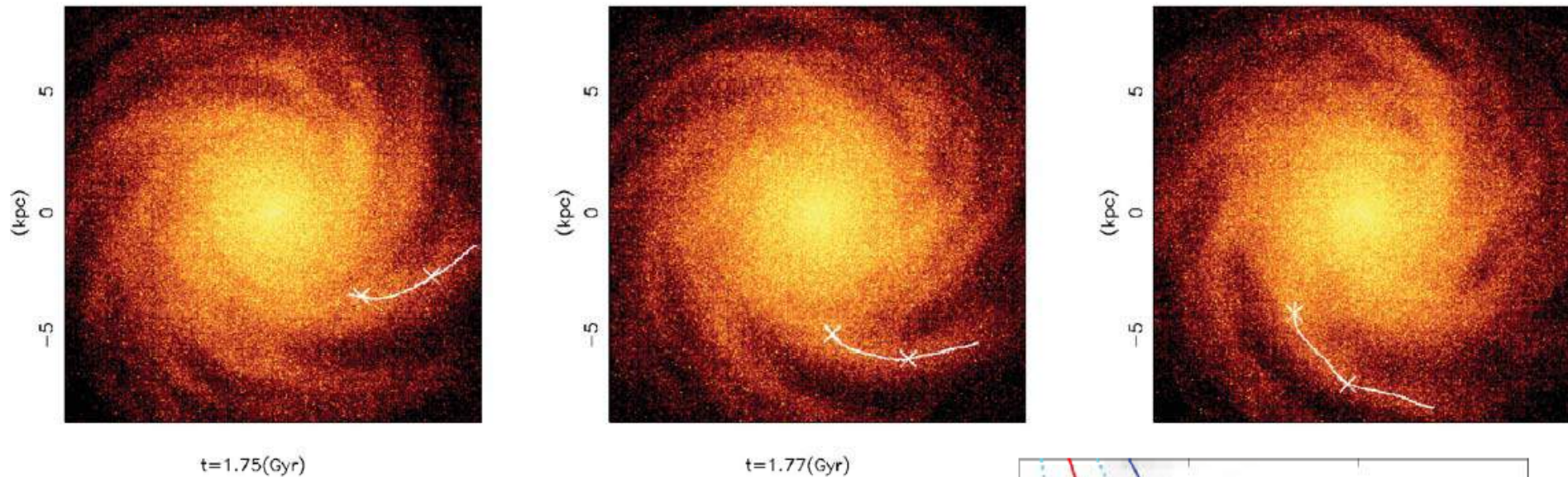
L'instabilité donne des plumes semblables aux observations  
L'angle  $\Delta i_z$  est plus petit en champ B fort



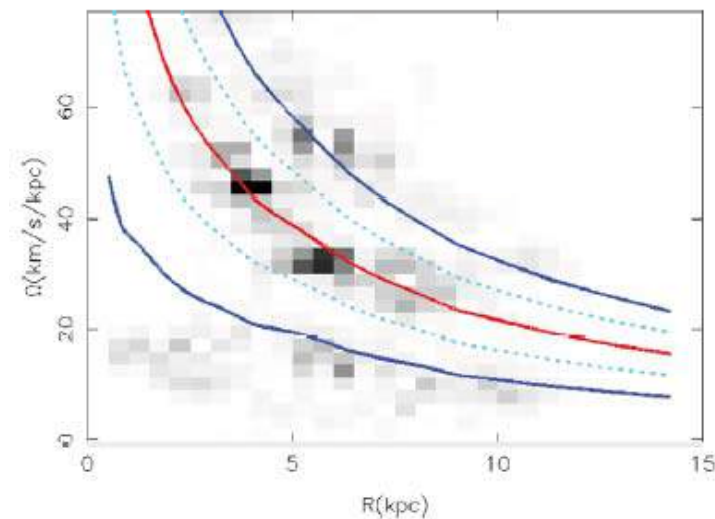
*Kim et al 2015*

# Des spirales flocculentes?

Les simulations de disques purement stellaires dans un halo de matière noire, montrent le développement de spirales transitoires

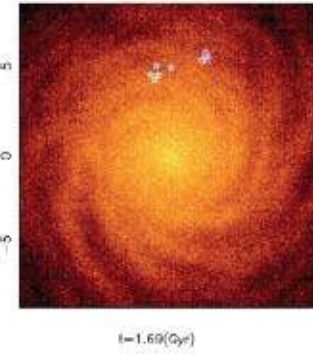
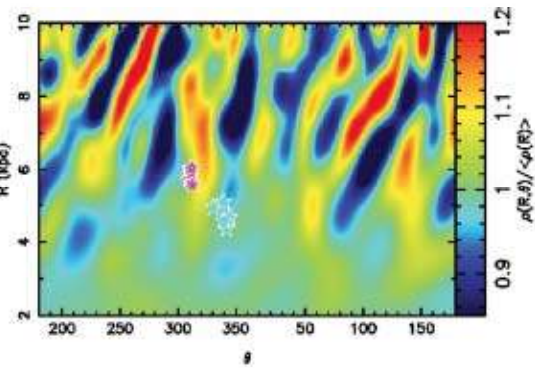
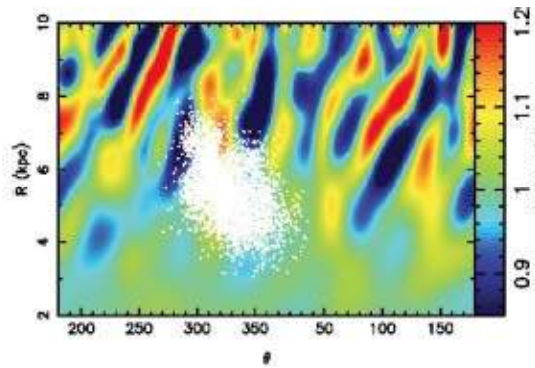


Le calcul de la vitesse des ondes donne  $\Omega_p$  qui suit fidèlement  $\Omega$   
Les étoiles sont en corotation avec l'onde



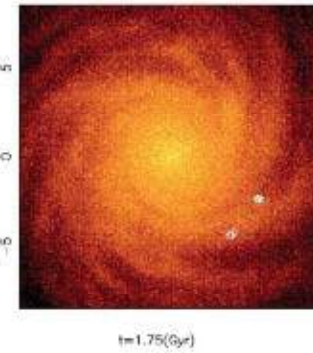
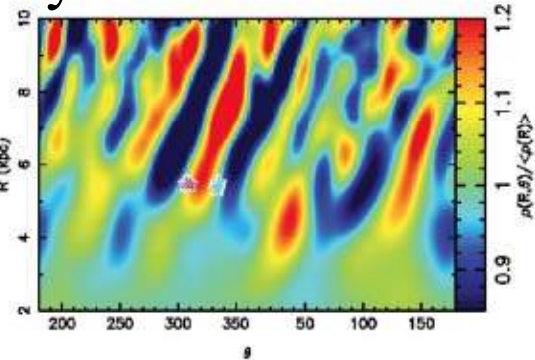
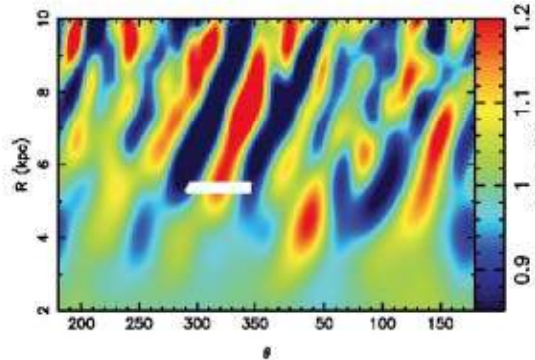
*Grand et al 2012*

# Les spirales attirent les particules



Qui passent de leading à trailing

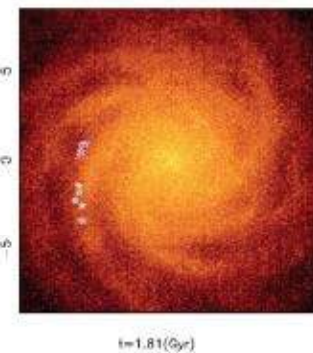
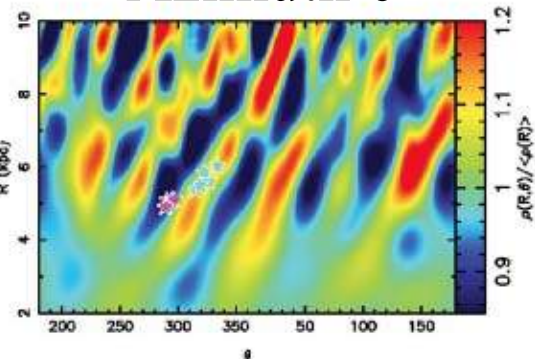
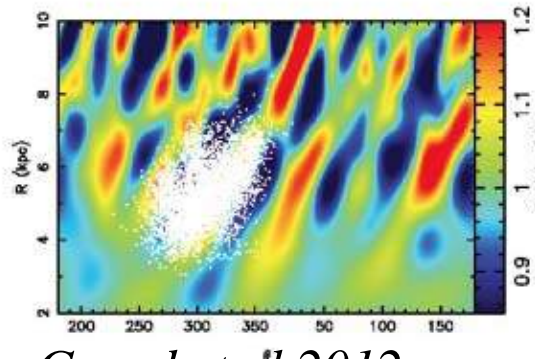
Rayon R



A nouveau le SWING

Rose: R décroît  
Bleu: R croît

Azimuth  $\theta$



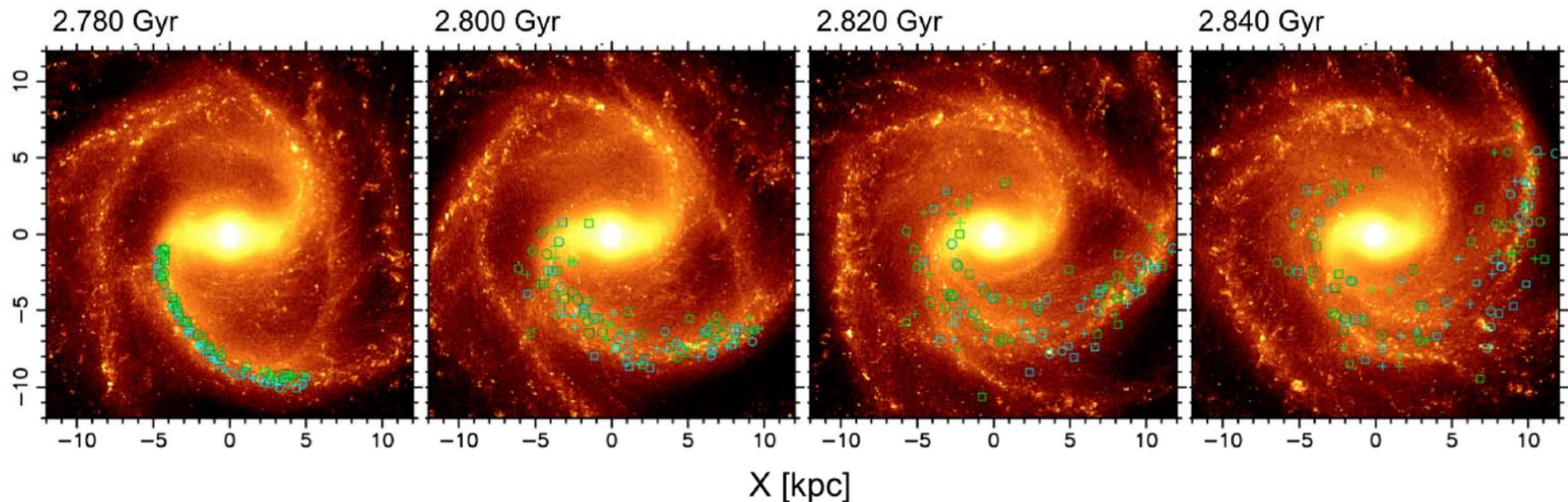
→ Pas d'ondes quasi-stationnaires



# Les galaxies barrées: ondes de densité

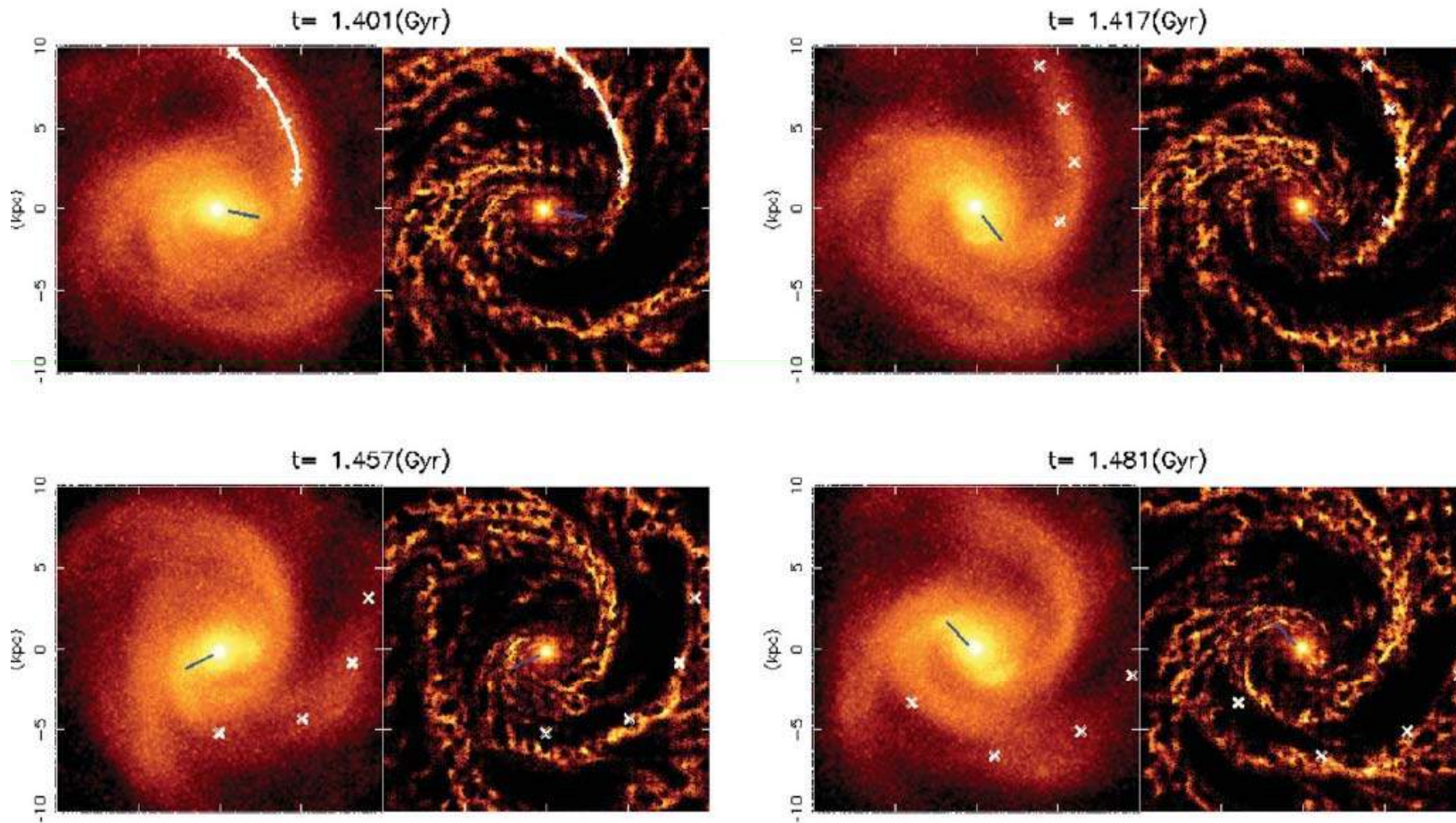
Les ondes spirales sont beaucoup plus cohérentes  
Bien que leur forme évolue sur des échelles de 100Myr

Il ne s'agit pas d'ondes matérielles, comme le montre le mouvement des  
particules relativement aux bras spiraux  
La spirale est à l'extérieur de la corotation



# Des spirales barrées avec gaz

Avec gaz, et formation de barres: les ondes sont plus persistantes, mais,  $\Omega_p$  n'est constant que dans la barre



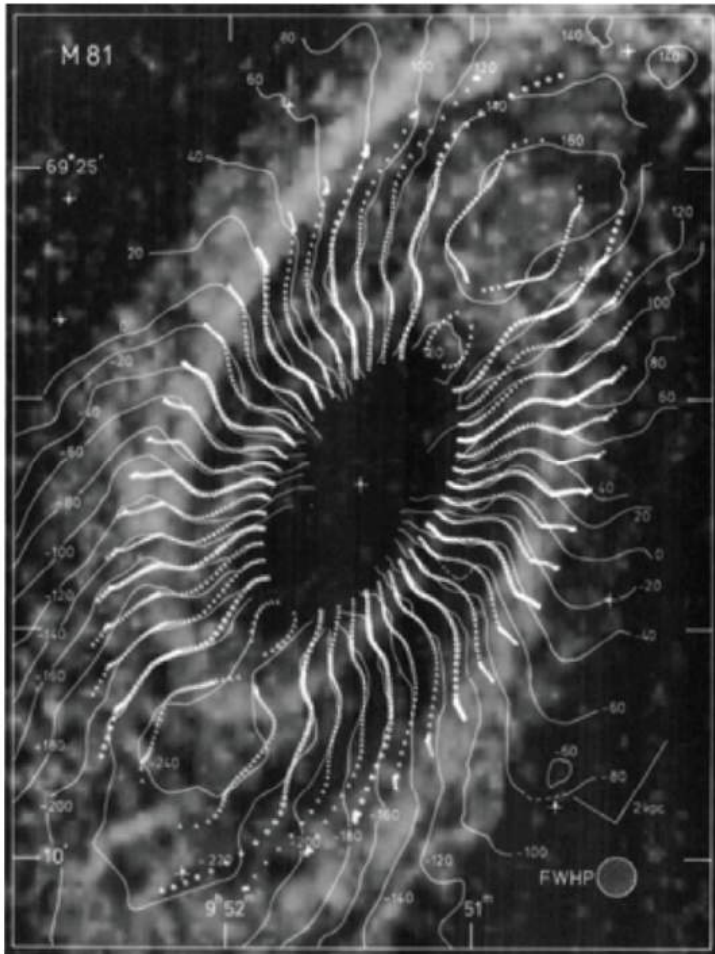
*Grand et al 2012*

Les bras spiraux se remplacent dans le disque, et sont souvent en quasi corotation avec les étoiles

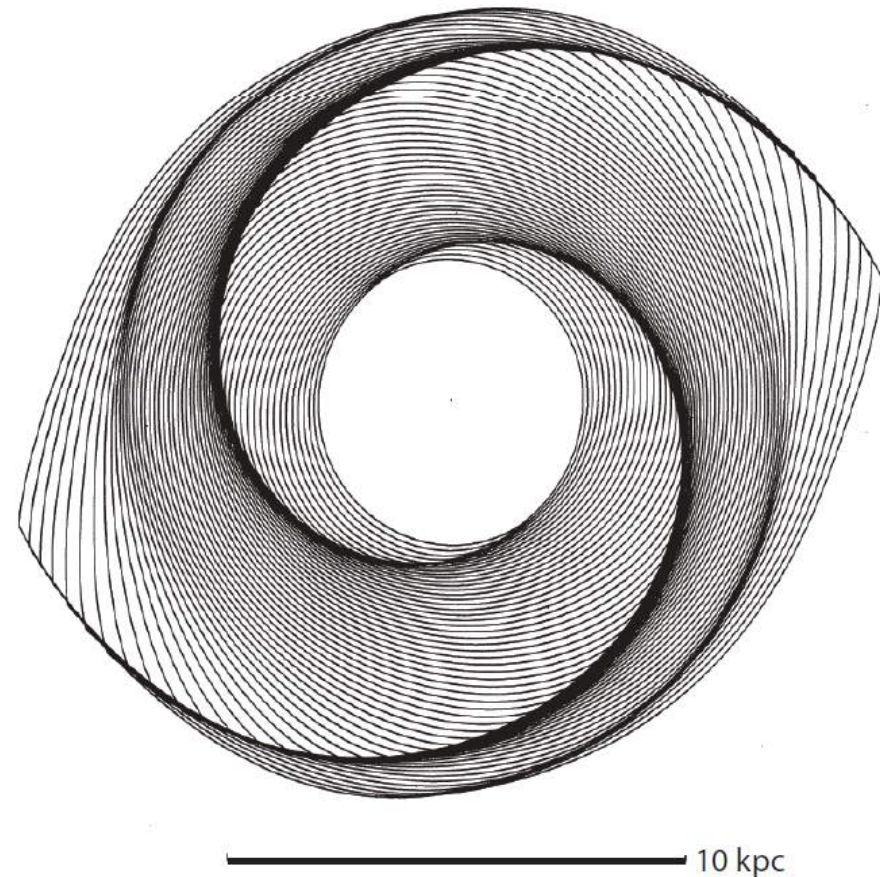
# Perturbations de vitesses

La théorie des ondes de densité prévoit des perturbations caractéristiques de vitesse à la traversée des bras spiraux  
Grand succès pour Messier 81 (*Visser 1980*)

**a**

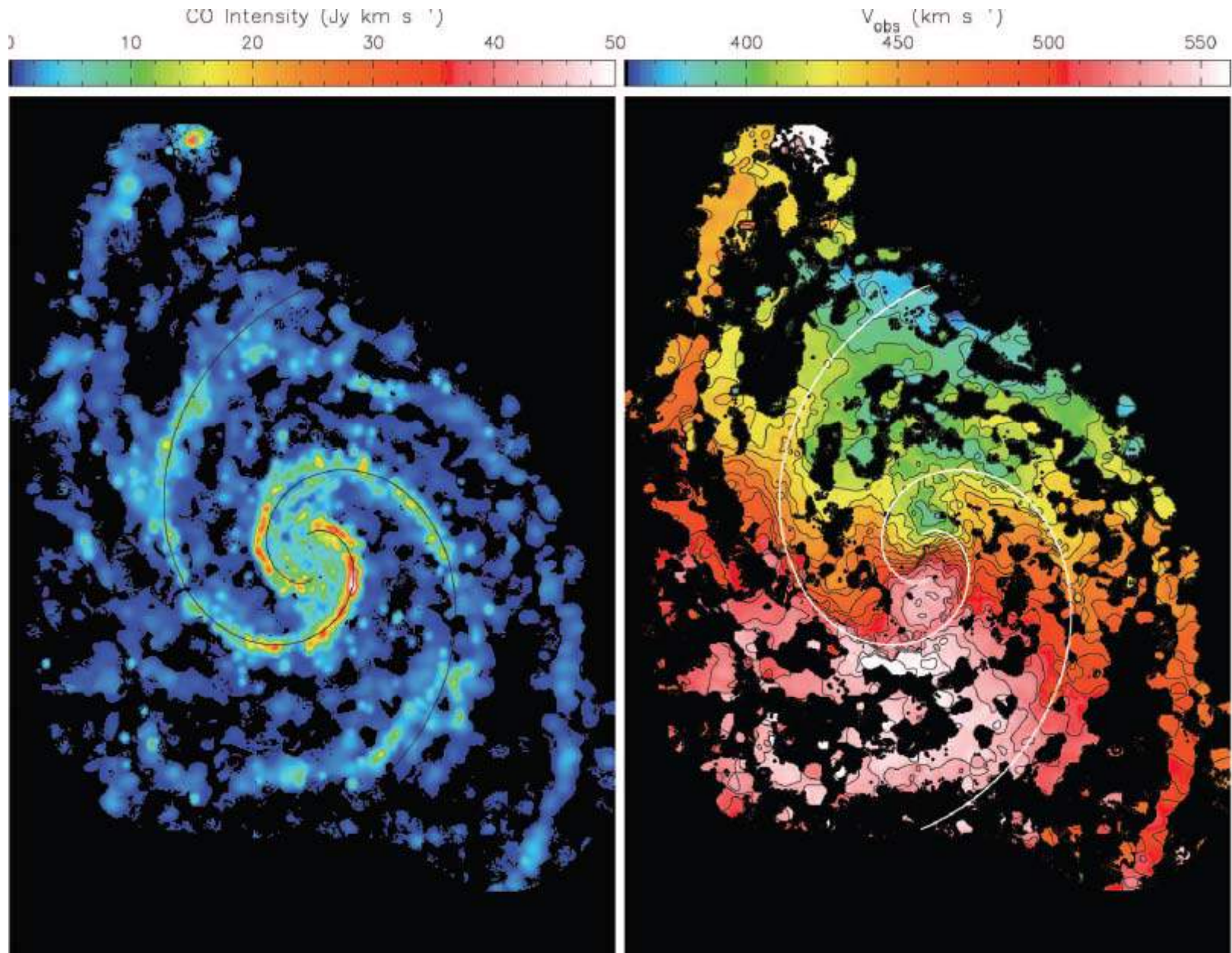
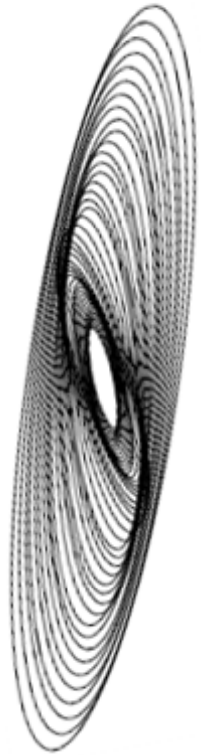


**b**



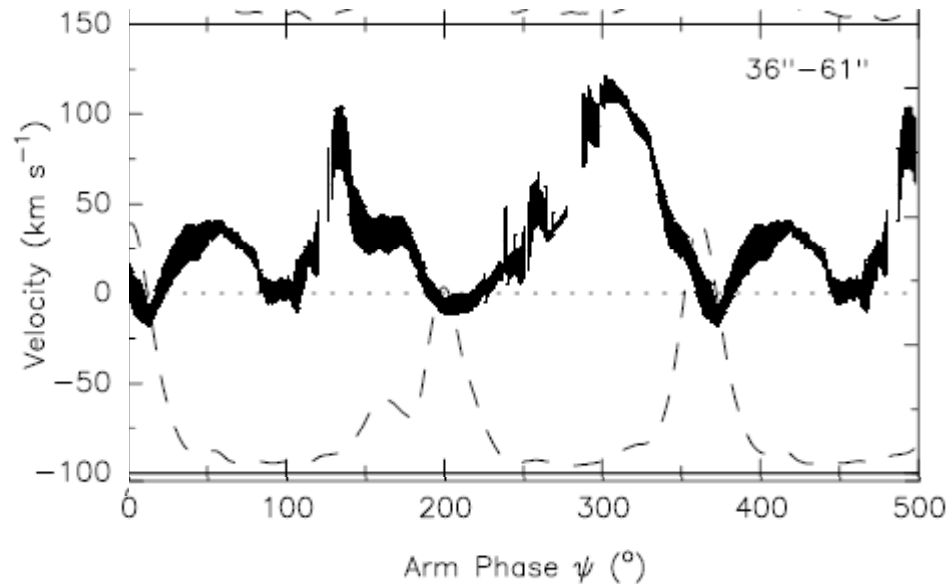
# Vitesse dans M51

CO(1-0)  
BIMA



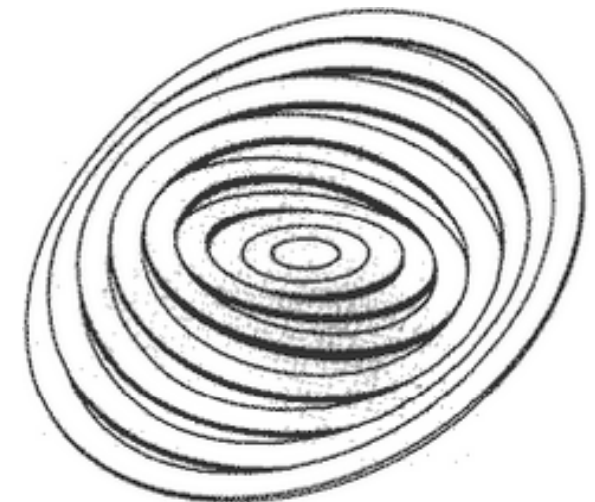
# Perturbations à la traversée des bras

L'intensité des perturbations de vitesses  $\sim 60\text{km/s}$  correspond à une forte onde de densité



Il existe en plus des distortions du plan, ou warp

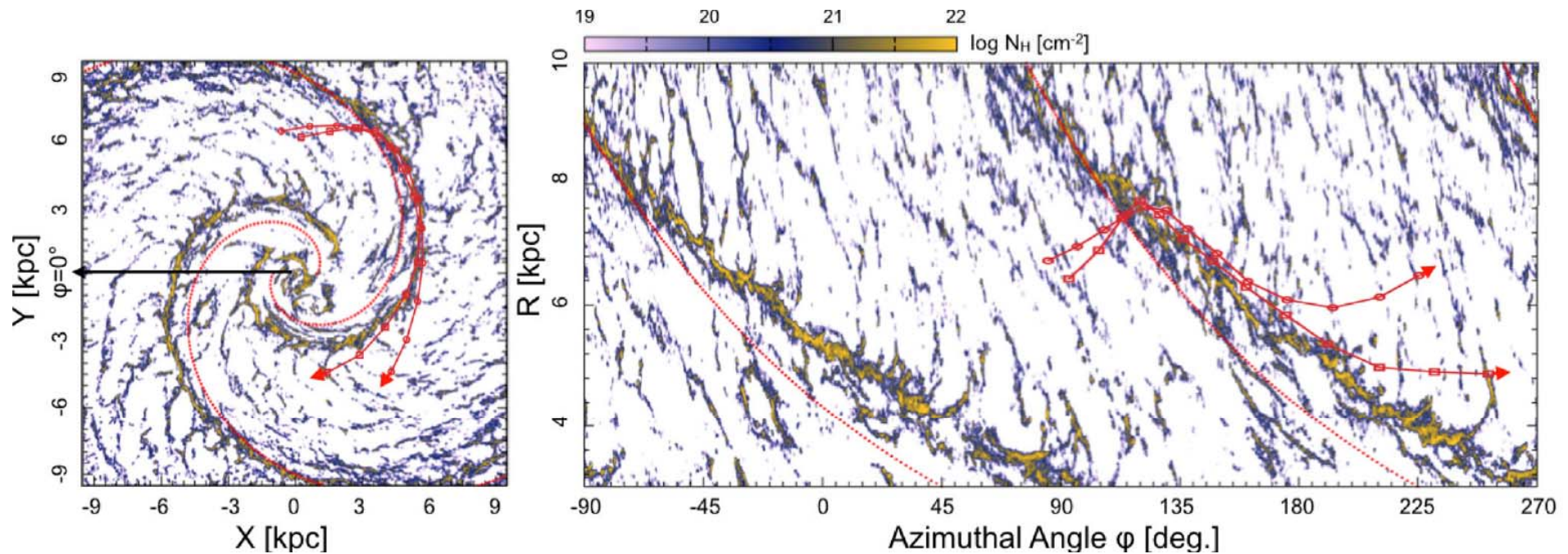
→ l'ensemble ne correspond pas à un état stationnaire



*Shetty et al 2007*

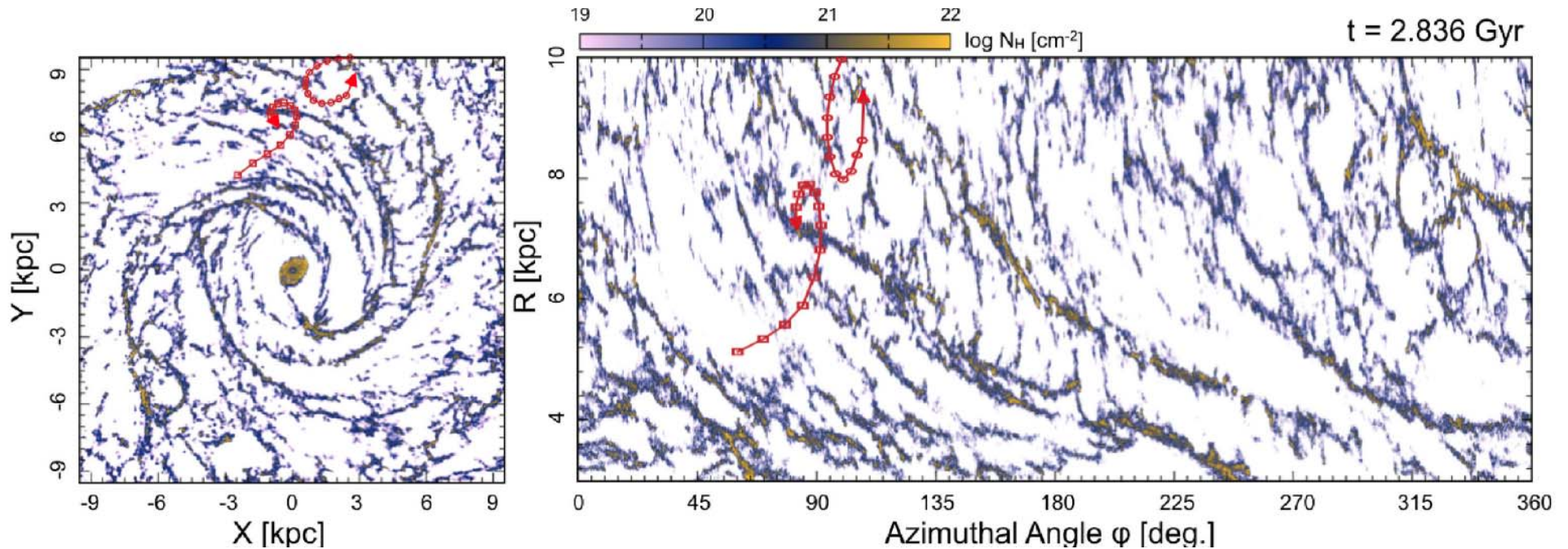
# Des perturbations non-discriminantes

En fait, on s'attend à ce genre de perturbations quel que soit le modèle de spirales: ondes transitoires, modes, ou quasi-stationnaires



Un potentiel spiral analytique est imposé  $\rightarrow$  ondes stationnaires

# Cas complètement auto-gravitant



Ondes dynamiques, qui se reforment, récurrentes

L'intensité des écarts de vitesse est la même

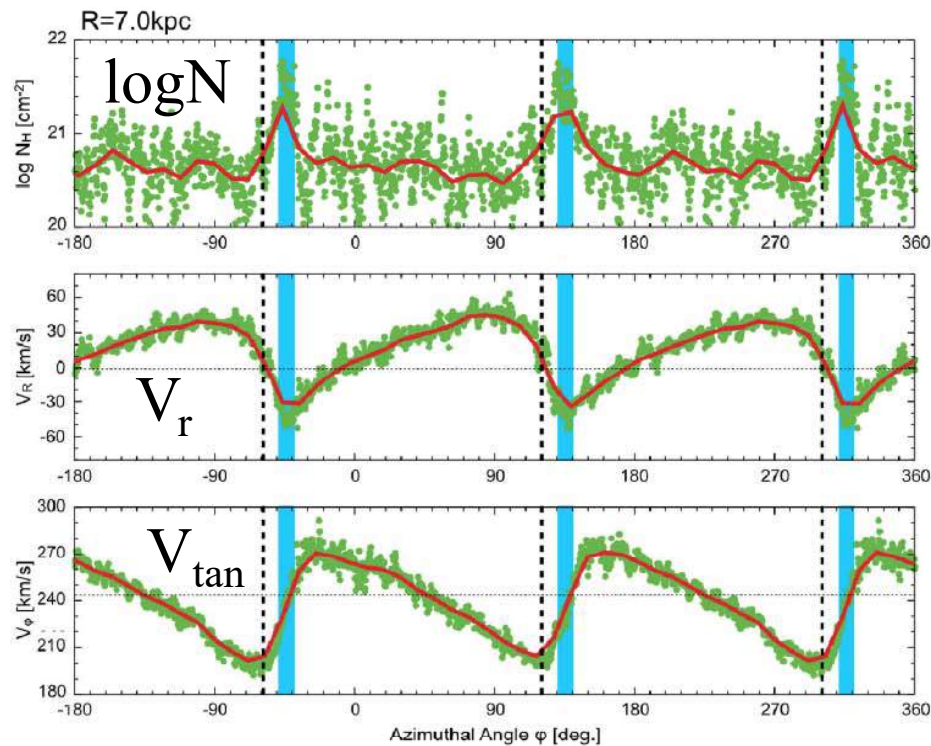
Par contre, pour  $R < C_R$ , la spirale fixe  $\rightarrow V_{\text{radial}}$

la spirale dynamique  $\rightarrow V_{\text{tangential}}$

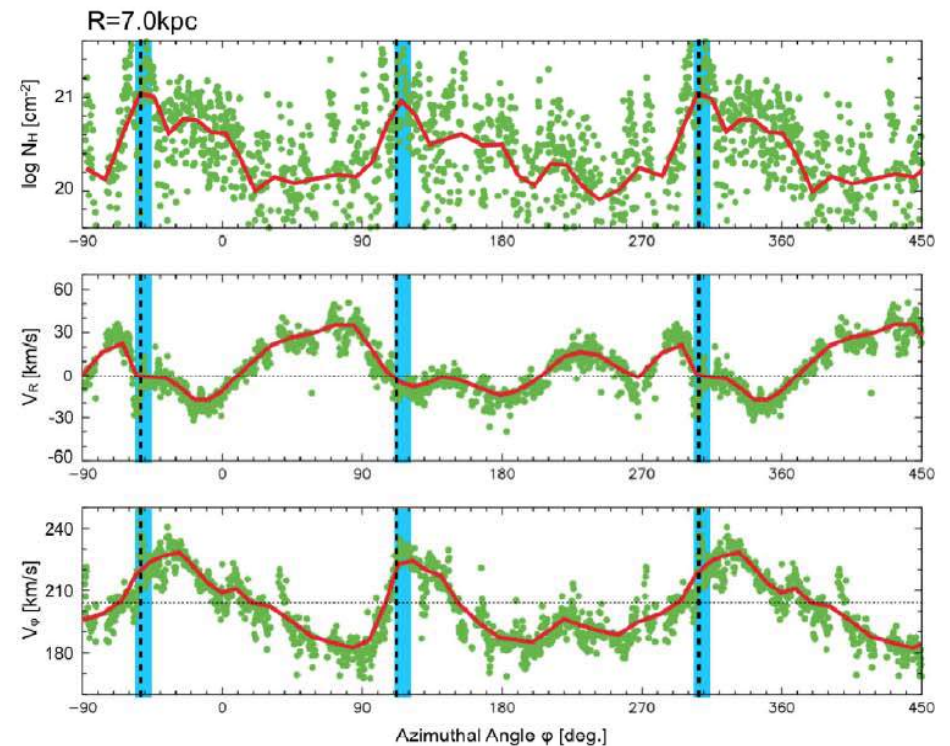
# Comparaison entre les perturbations de vitesses

Bien que les bras spiraux ne soient pas stationnaires, les perturbations de vitesses sont très semblables, dans le cas « dynamique »

Différences toutefois:  $V_r=0$  et  $V_{\tan}=V_{\text{cir}}$  dans le bras



Stationnaire



Dynamique

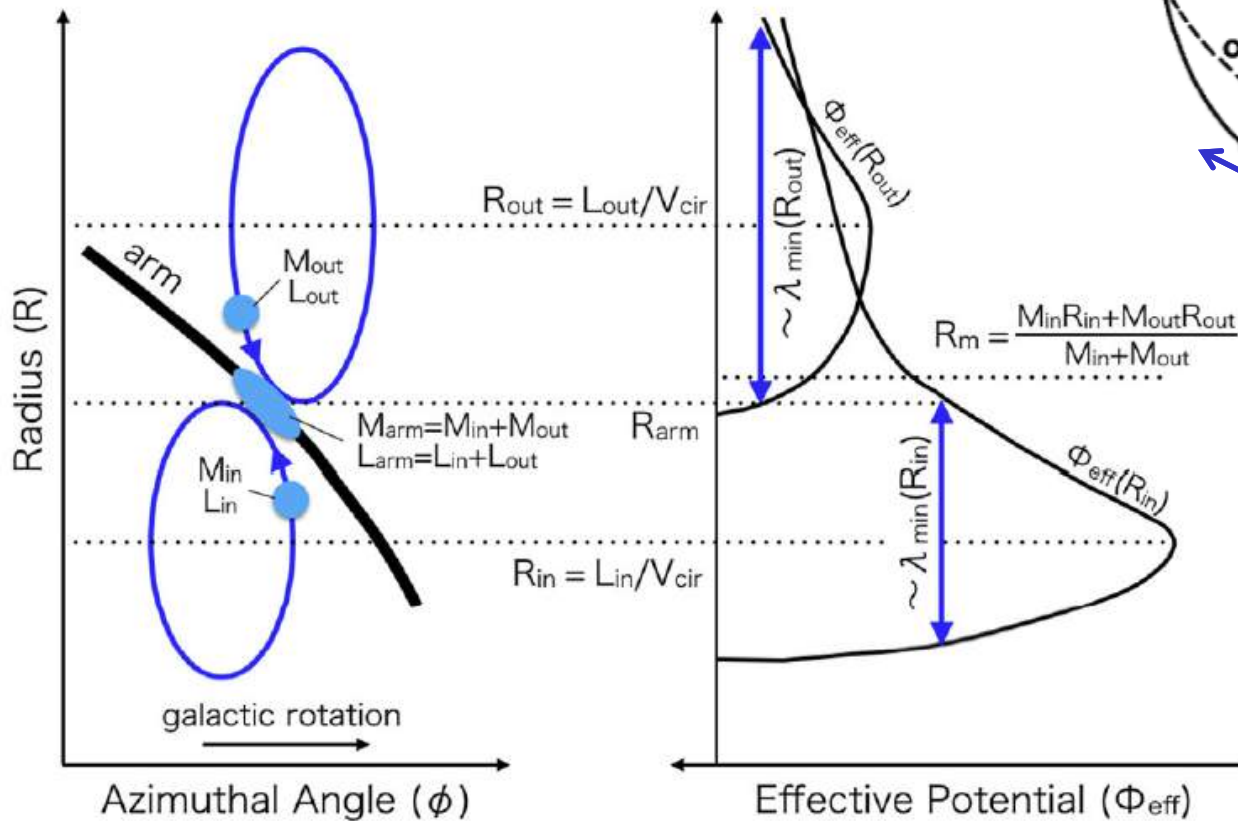
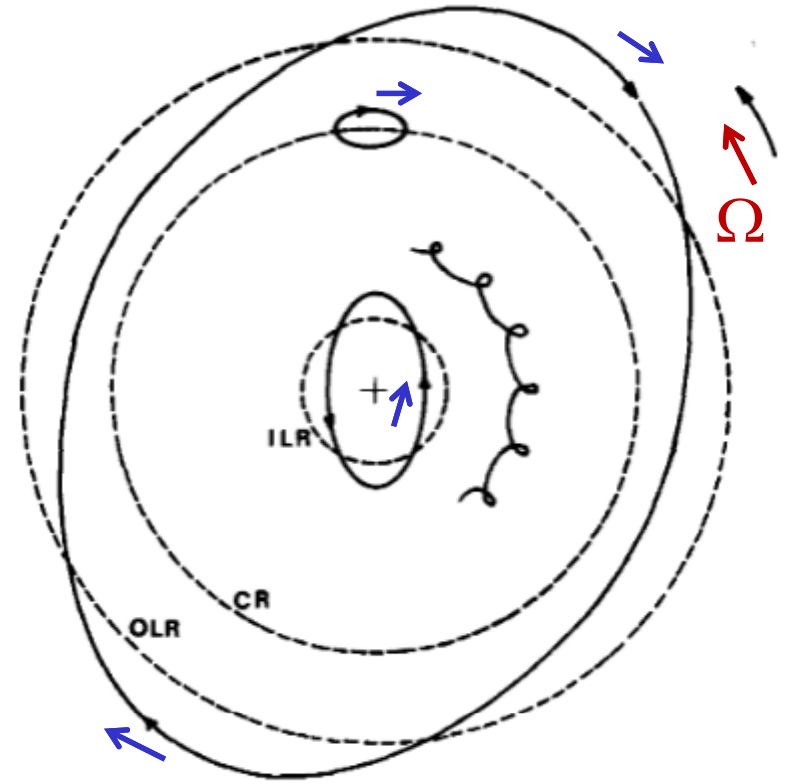


# Détail du processus

Les particules sont amenées dans le bras le long des épicycles,

$$L_{\text{arm}} = M_{\text{in}} R_{\text{in}} V_{\text{cir}} + M_{\text{out}} R_{\text{out}} V_{\text{cir}}$$

$$V_{\text{arm}} = R_m V_{\text{cir}} / R_{\text{arm}} \sim V_{\text{cir}}$$



Modèle simple

$$V = \text{cst} = V_{\text{cir}}$$

$$\lambda_{\text{min}} = \lambda_{\text{crit}} Q$$

$$\lambda_{\text{crit}} \sim 2R \text{ (Swing)}$$

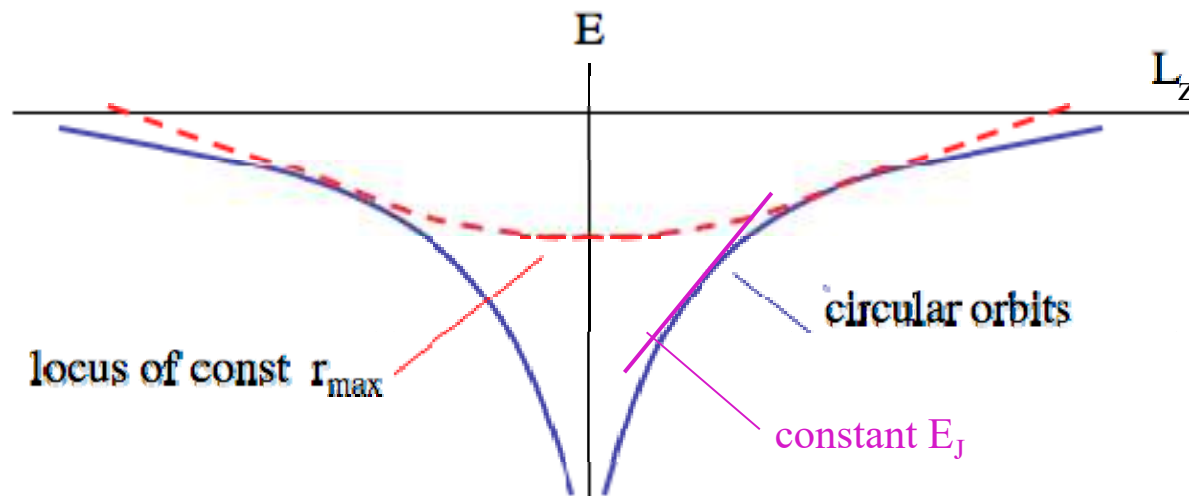
# Migration radiale, induite par les spirales

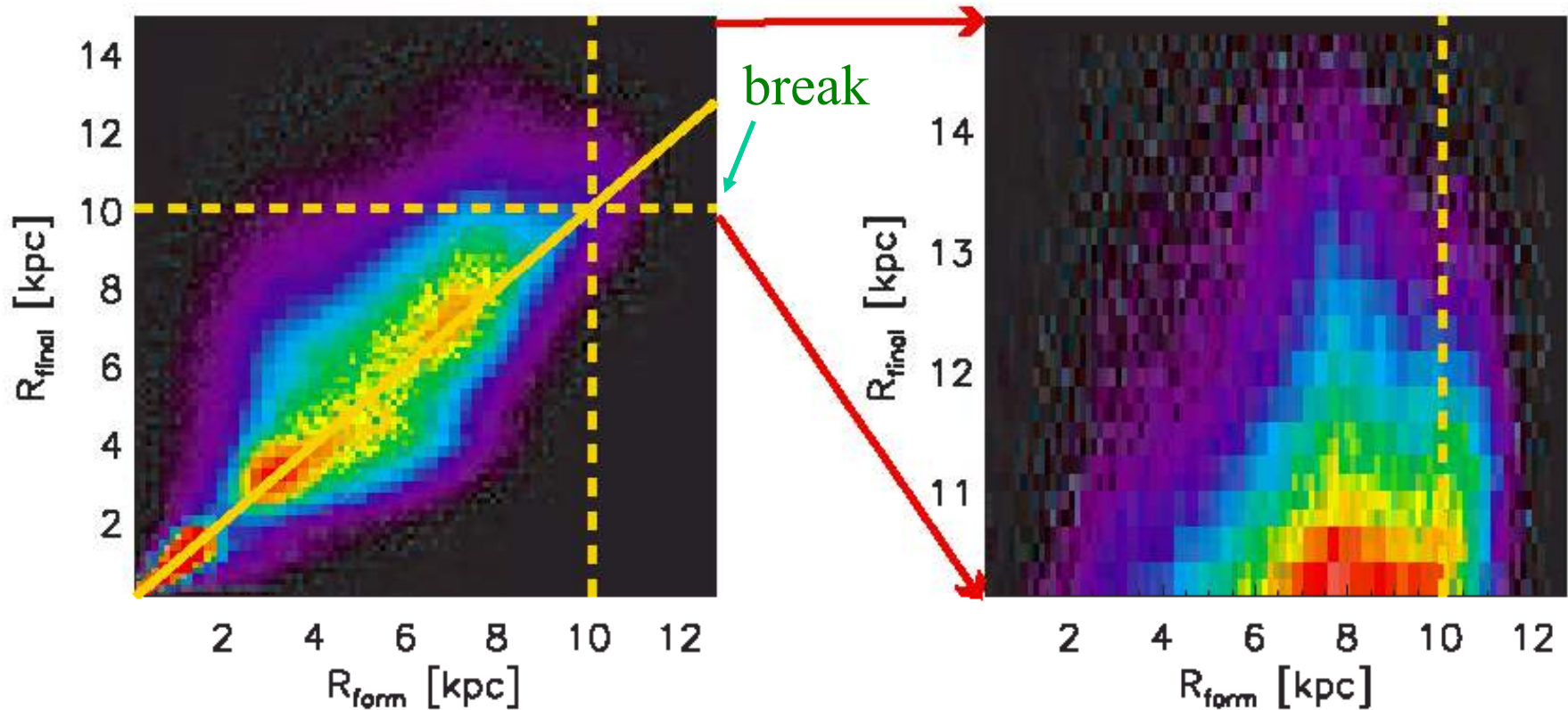
Les étoiles subissent les couples de torsion d'un bras spiral qui passe à proximité: elles échangent leur moment angulaire

Ceci à énergie constante, près de la Corotation

$$\Delta J_R = \frac{\Omega_p - \Omega}{\omega_R} \Delta L$$

L'onde spirale doit être éphémère, car sinon les étoiles conservent l'intégrale de Jacobi, et restent sur une ligne ou courbe de Lindblad ( $E - L_z$ ) Le Jacobi est  $E_J = E - \Omega L_z$





Simulation de la formation d'étoiles dans un disque galactique:

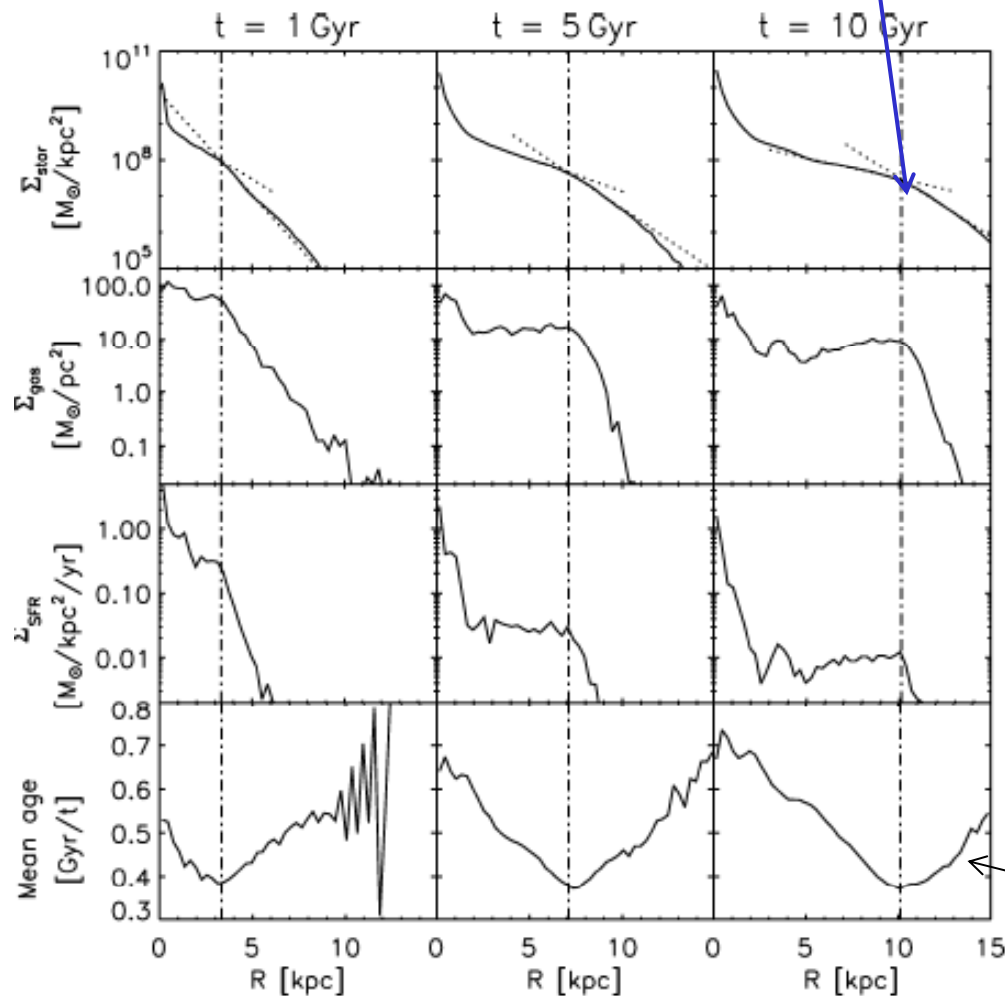
Les bras spiraux redistribuent les étoiles dans le disque

Les étoiles qui se forment à  $R < 10$  kpc peuvent se retrouver à  $R = 10-14$  kpc. Surtout les étoiles avec  $\Omega \sim \Omega_p$

→ corotation

# Mouvement radial vers l'extérieur

Simulation N-corps: la troncature dans le disque d'étoiles migre vers l'extérieur, au fur et à mesure de l'accrétion de gaz



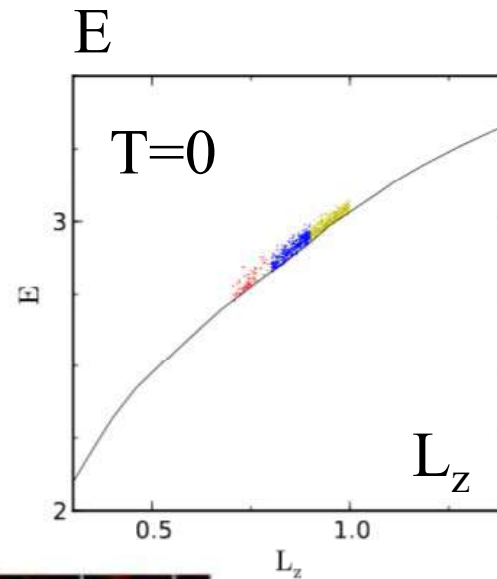
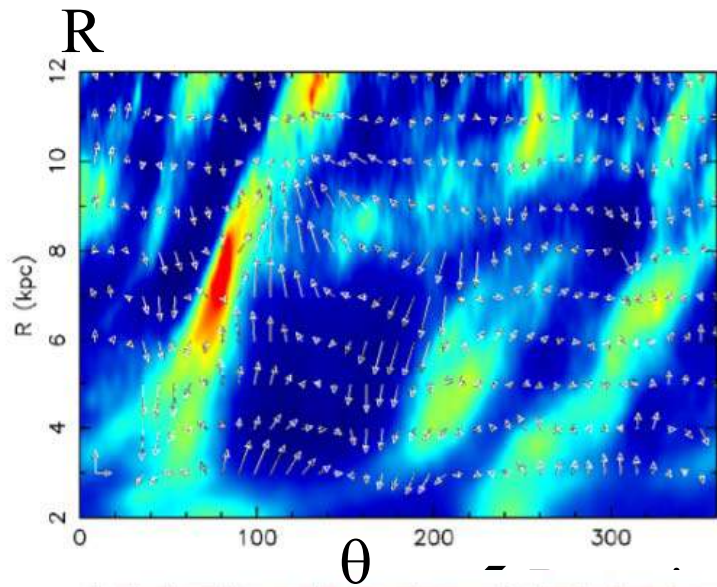
→ les ondes spirales transfèrent les étoiles vers l'extérieur

Modifient les gradients de métallicité

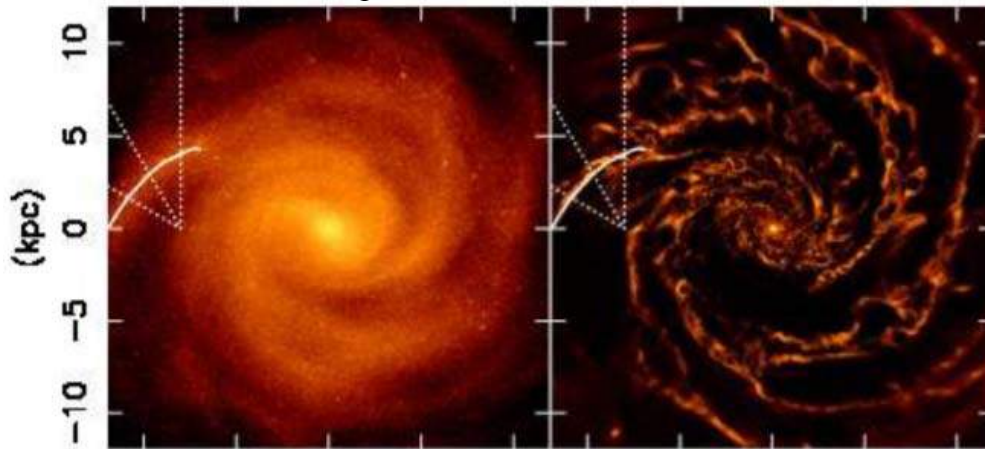
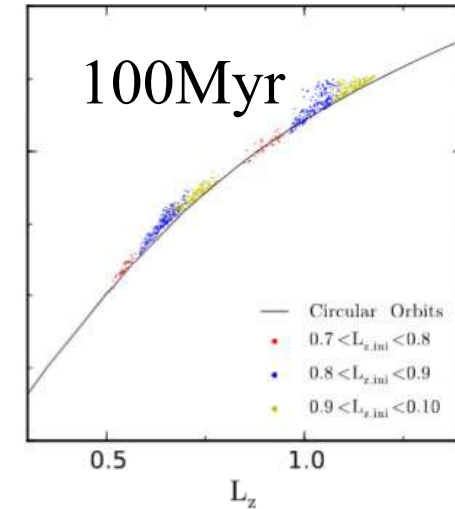
Age migration

*Roskar et al 2008*

# Migration radiale: orbites circulaires



*Grand & Kawata 2015*



**Structure spirale transitoire** →  
perturbations de vitesse  
Echange de moment angulaire →  
migration radiale

Simulations:  $2.5 \cdot 10^{12} M_{\odot}$  matière noire  
 $4 \cdot 10^{10} M_{\odot}$  étoiles &  $10^{10} M_{\odot}$  gaz  
*Kawata et al 2014*

**Perturbations de vitesse  
compatibles avec les  
observations**

# Migration radiale et azimuth

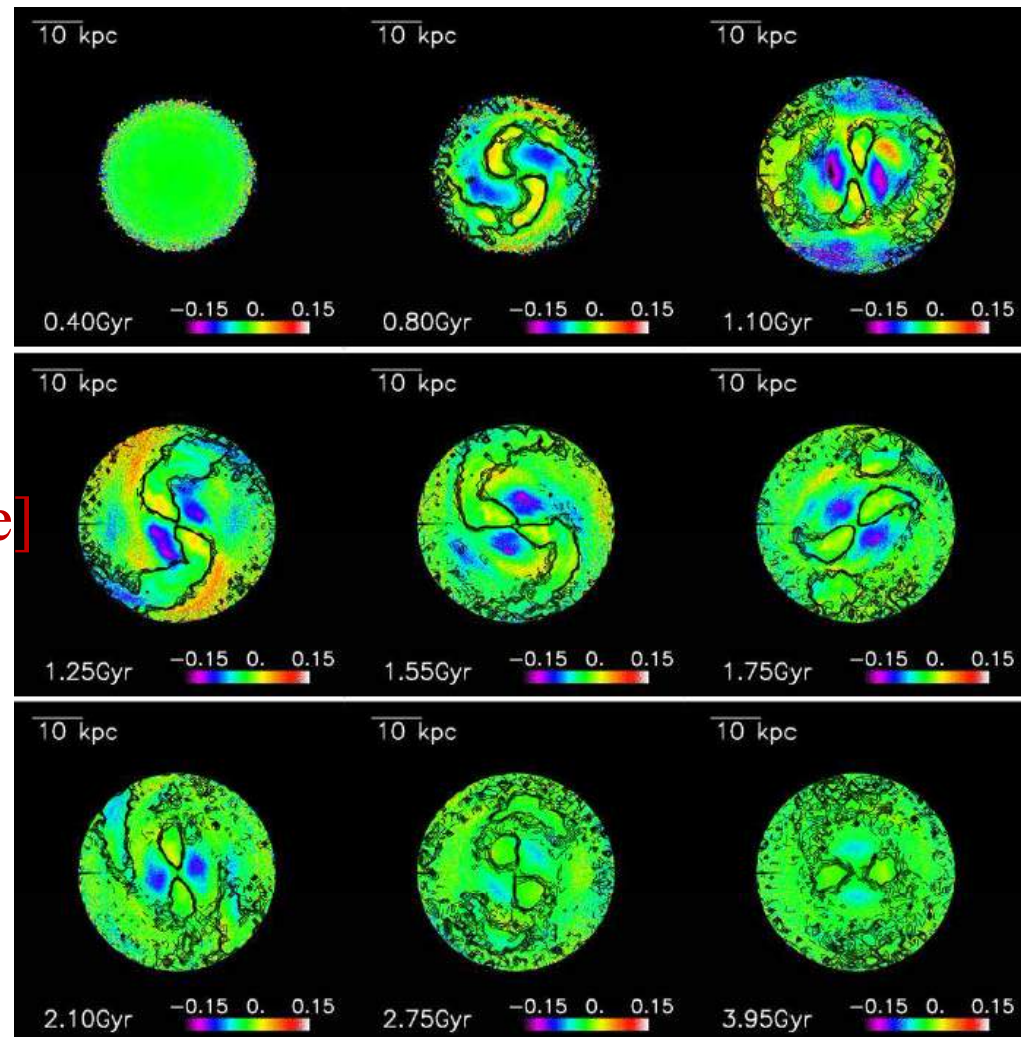
La migration peut se voir dans les abondances chimiques  $[\text{Fe}/\text{H}]$

Signatures azimuthales prédites pendant la migration

Gradient radial & vertical en  $[\alpha/\text{Fe}]$  pour disque mince, mais pas épais  
→ Evidence de migration radiale

*Di Matteo et al 2013*

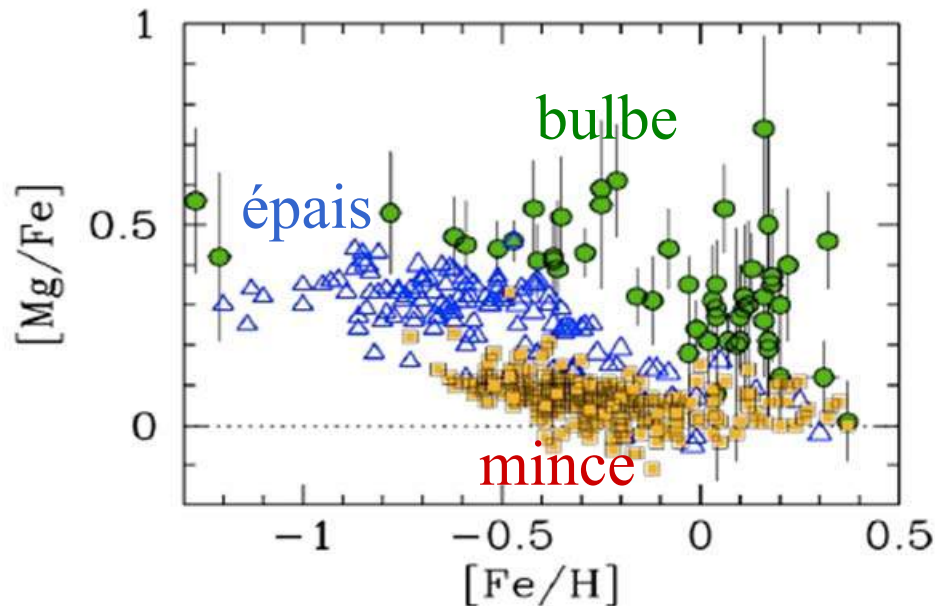
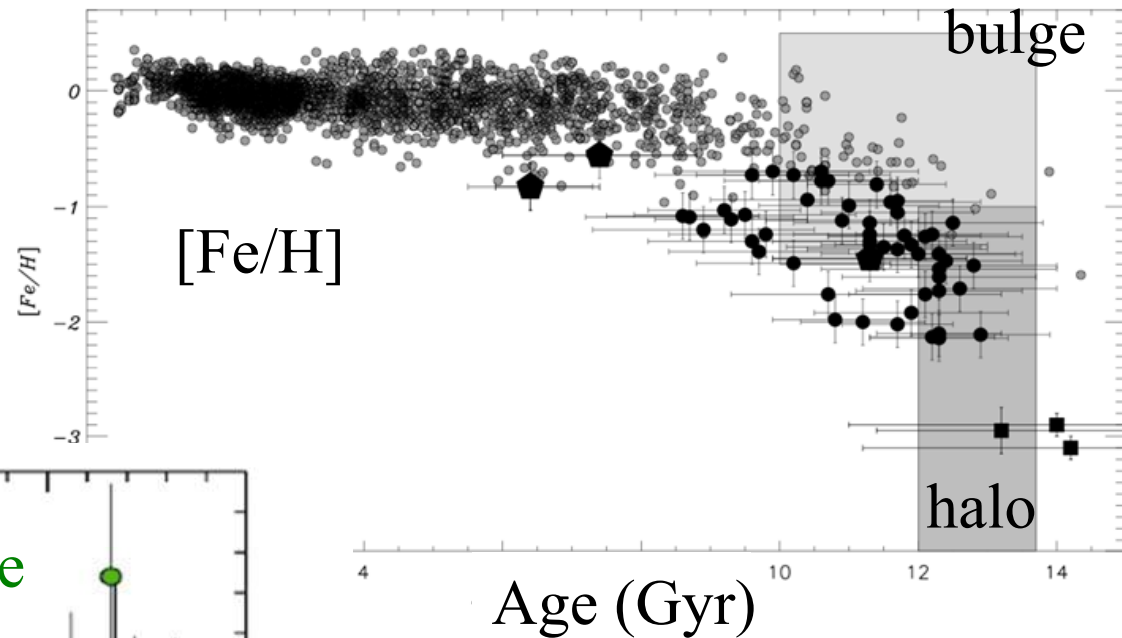
**Cartes de  $\delta[\text{Fe}/\text{H}]$**



# Traçage par les abondances chimiques

Les éléments comme O, Mg, Al, Si sont formés rapidement, et éjectés par les SN de type II, mort des étoiles massives → éléments  $\alpha$  (durée de vie  $10^6$ - $10^7$ ans)

Pour le Fer, fin de vie des étoiles de faible masse, (durée de vie  $10^9$ - $10^{10}$ ans)

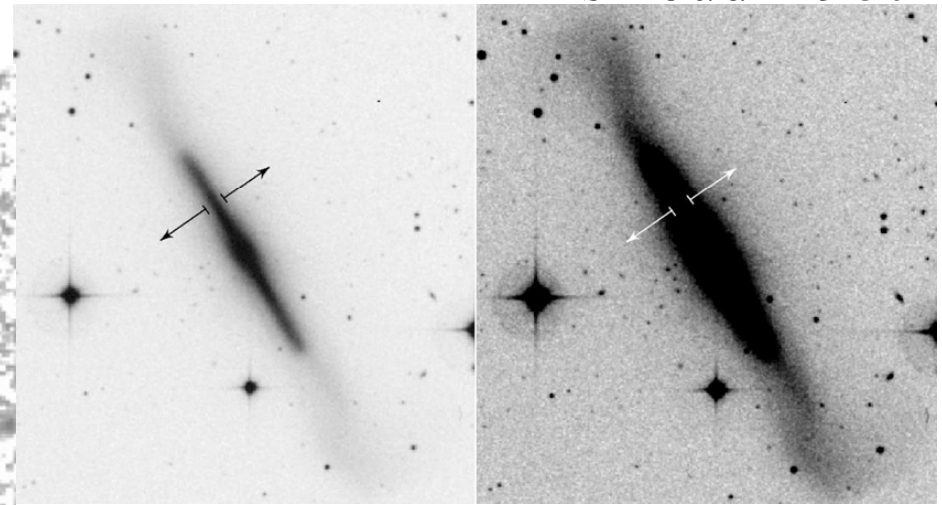
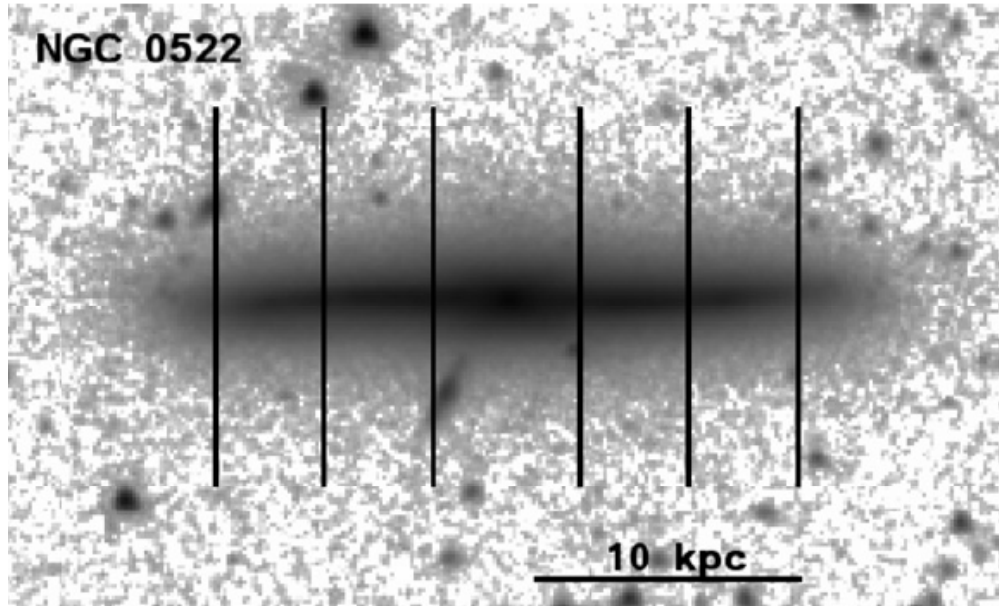


et explosions de SN de type Ia, binaires naine blanche + étoile de séquence principale

Même type et taille que MW  
*Comeron et al 2011 (S4G)*

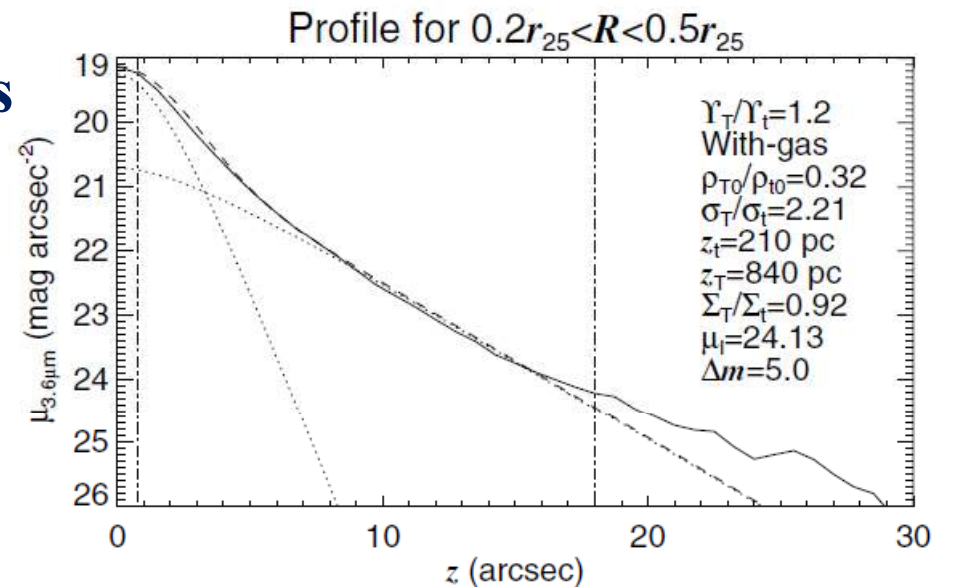
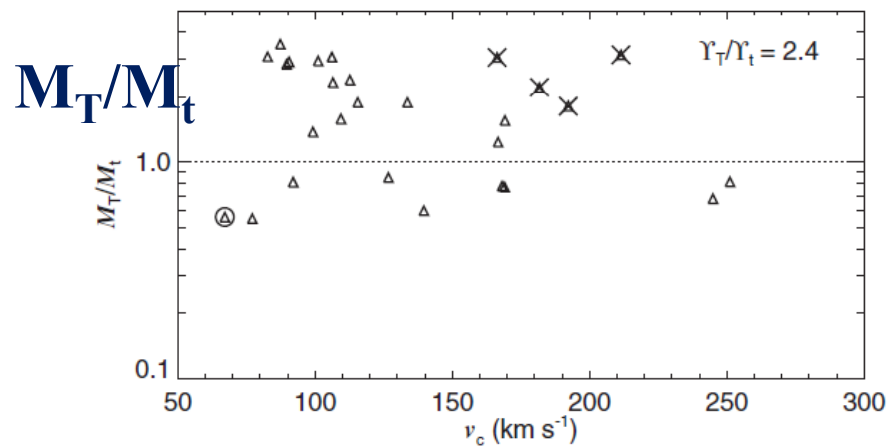
# Disque épais

Tsikoudi 1980

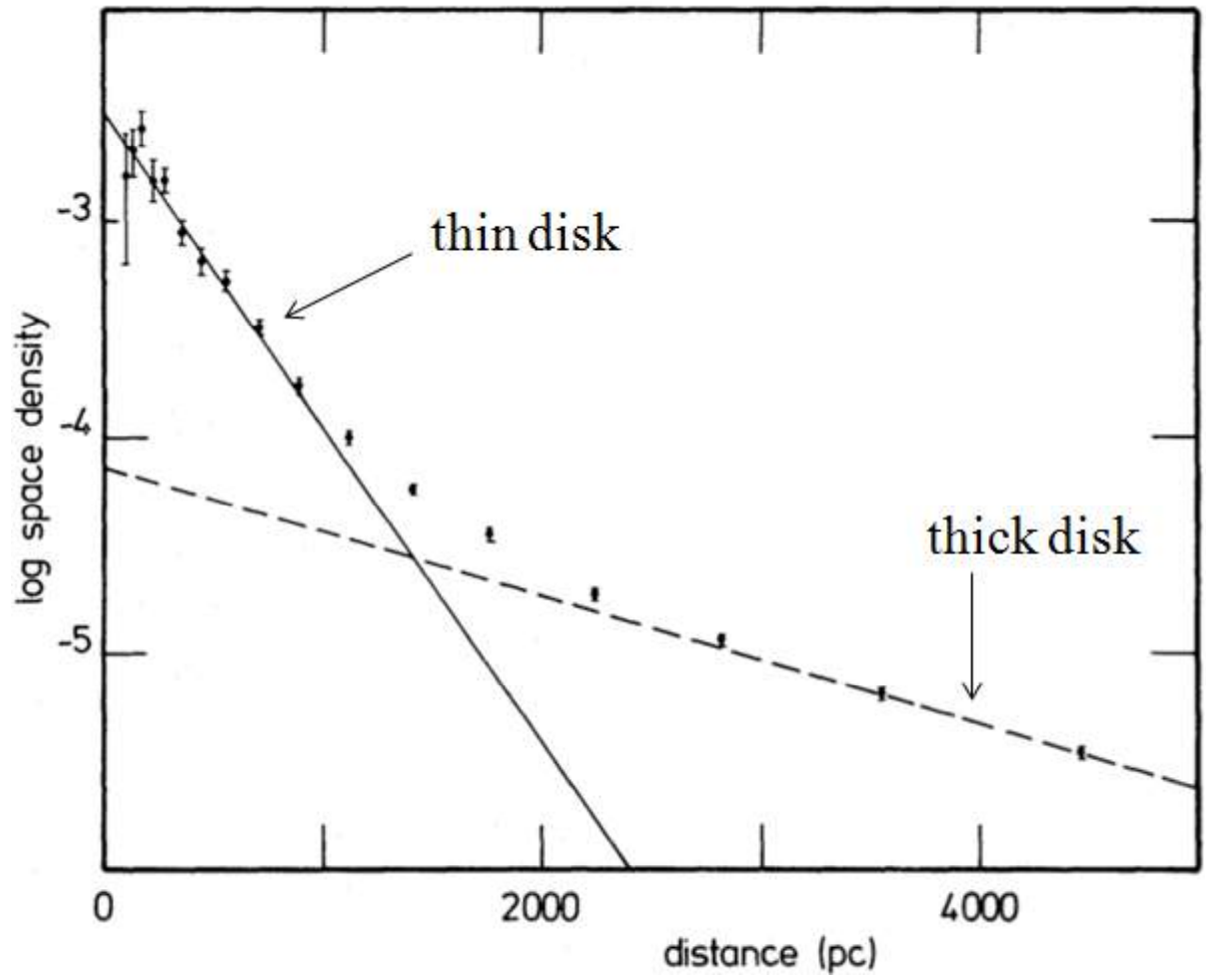


$z_t = 250 \text{ pc}$ ,  $z_T = 900 \text{ pc}$

Les 2 disques: masses comparables

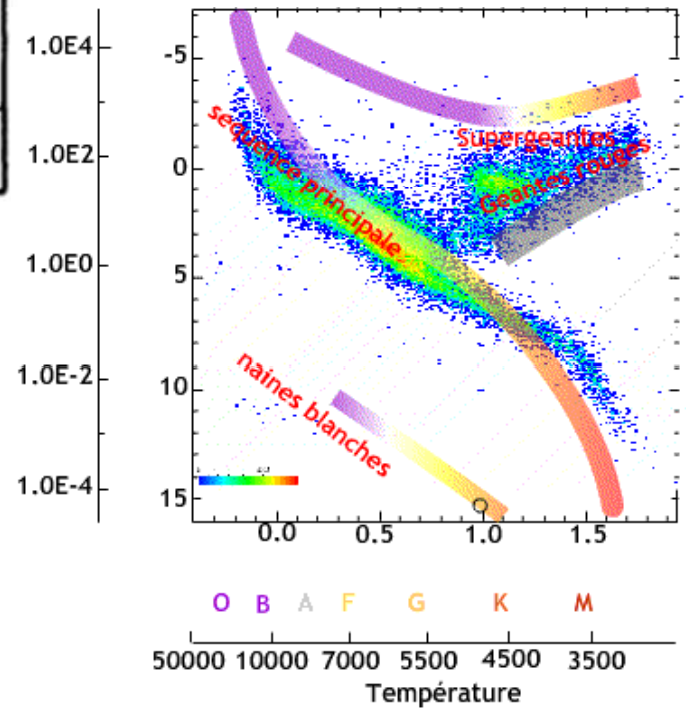
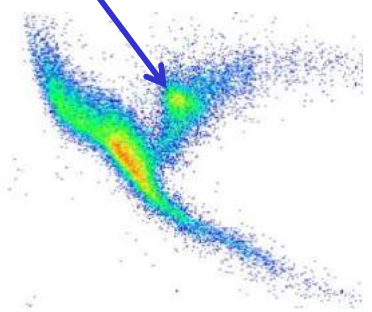






Le disque épais a été découvert pour la première fois avec **12500 étoiles** vers le pôle Sud Galactique et leur diagramme Couleur-magnitude

Aujourd'hui la méthode du "red clump" est plus précise (L indep. de Z, âge)



Gilmore & Reid 1983

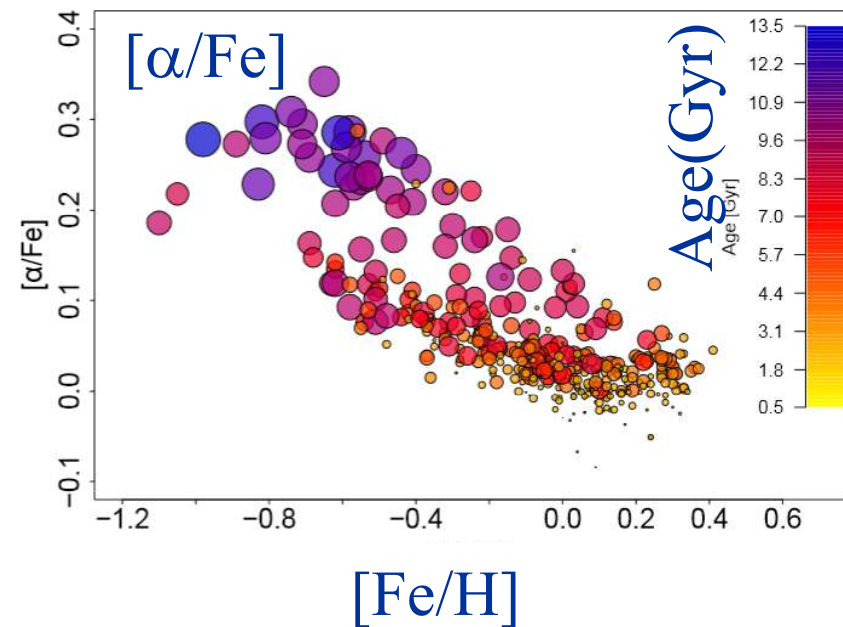
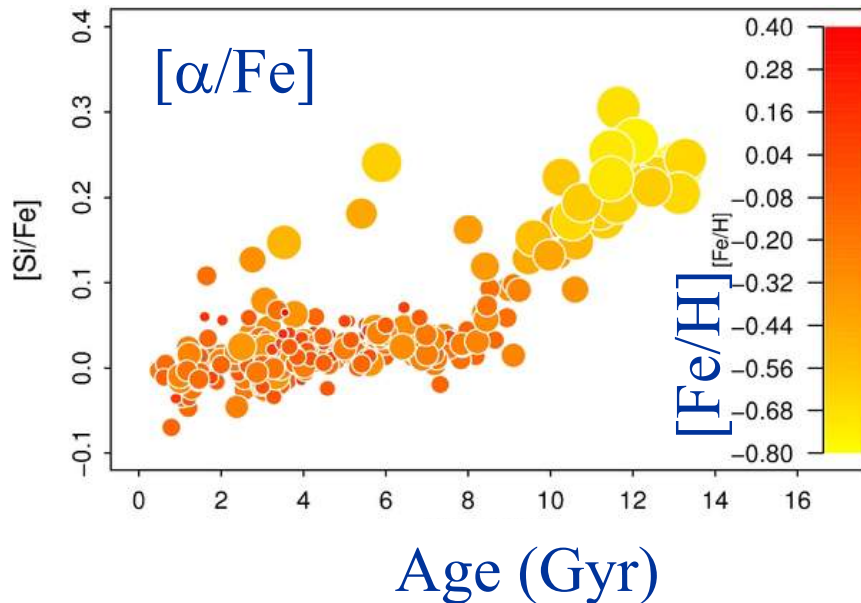
# Masses, tailles radiales et verticales

Disque mince: **R**: 3 kpc **H**: 300±50pc

Disque épais: **R**: 2.5kpc **H**: 900±180pc

$M_T/M_t \sim 0.5-1$  Tailles comparables (Comeron et al 2012)

Dans la Voie lactée, le disque épais a un rayon plus petit, mais est comparable en masse (15% en brillance de surface au Soleil)



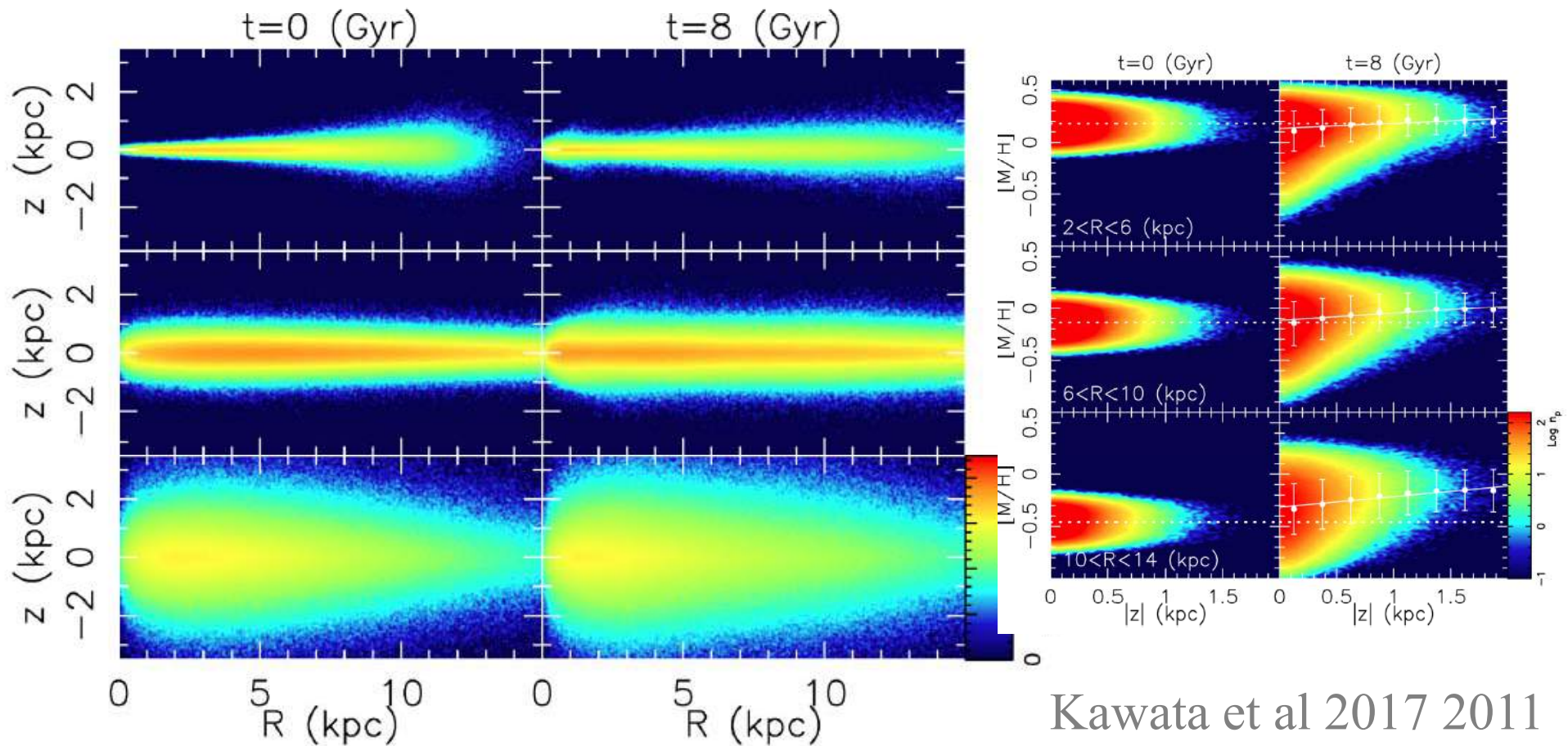
Abondances: « chemical tagging »

Haywood et al 2013

# Formation du disque épais

## Plusieurs scenarios:

- 1) Accrétion et destruction de satellites (comme pour le halo sellaire)
- 2) Chauffage du disque par des fusions mineures
- 3) **Migration radiale, ou diffusion résonante**
- 4) **Formation in-situ à partir du disque de gaz épais (gal riches en gaz)**



Kawata et al 2017 2011

# Conservation de l'action verticale

Energie en z

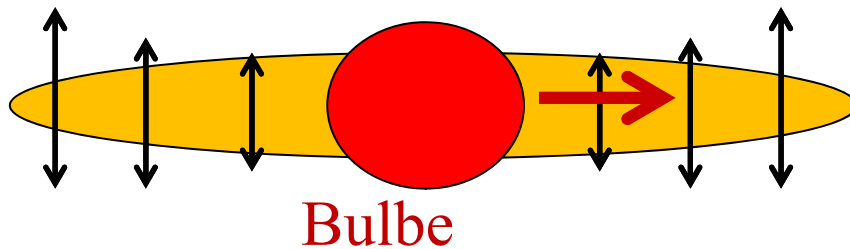
$$E_z = \frac{1}{2}v_z^2 + \Phi(R, z) - \Phi(R, 0)$$

Action en z

$$J_z = \frac{1}{2}\pi \int v_z dz$$

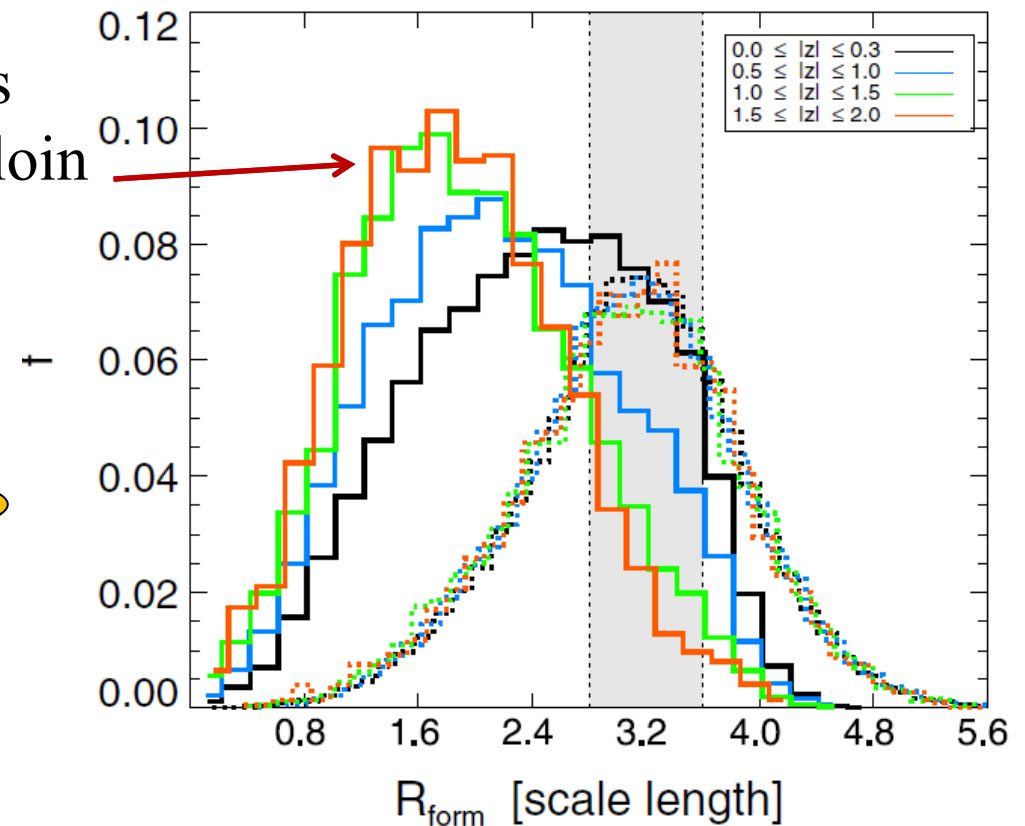
Si l'énergie n'est pas tout à fait conservée,  
l'action en z l'est en moyenne

Dans la simulation, les particules  
les plus hautes viennent de plus loin  
à l'intérieur du rayon solaire



*Loebman et al 2011*

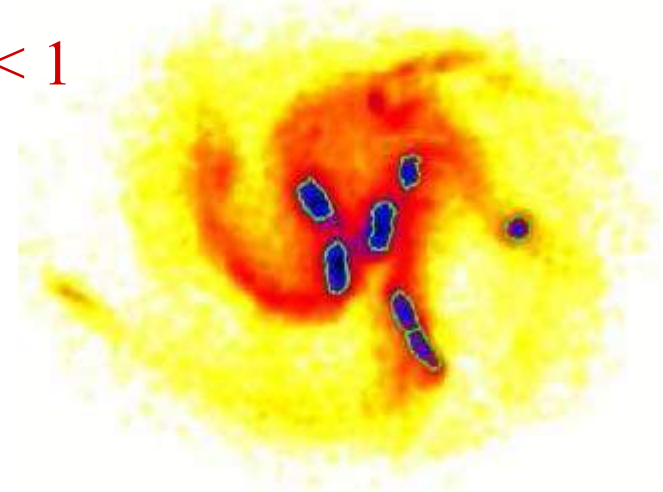
$7 < R_\odot < 9$  kpc



# Formation dans les galaxies jeunes, riches en gaz



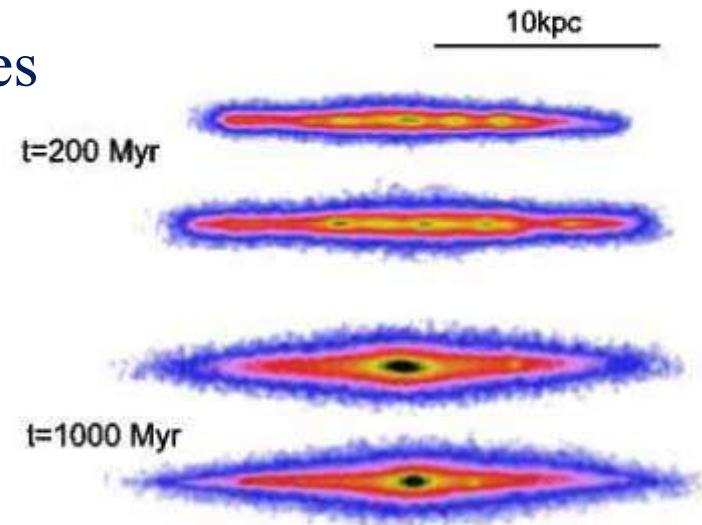
Instable  $Q < 1$



Formation rapide d'un disque exponentiel  
+ bulbe, par friction dynamique

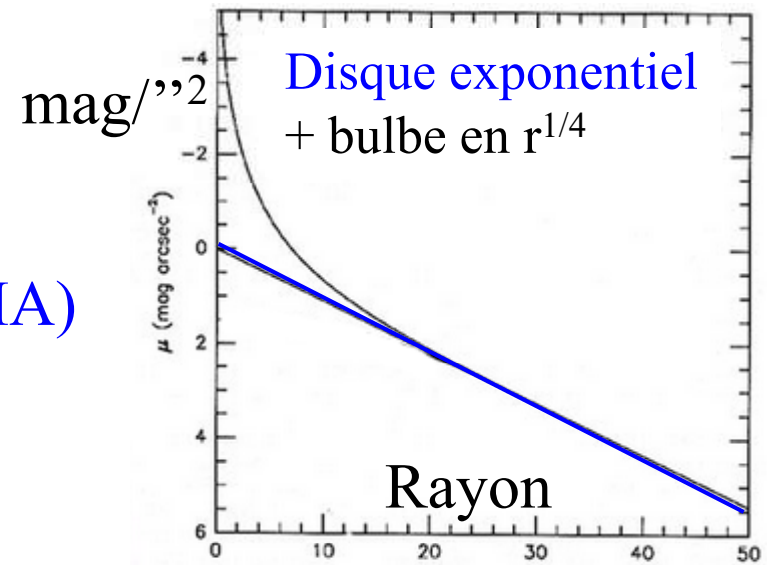
*Noguchi 1999, Bournaud, Elmegreen et al 2007*

Les galaxies très riches en gaz sont instables  
turbulentes, et forment des disques épais,  
avec une épaisseur constante, plutôt qu'un  
profil s'évasant avec le rayon  
qui sont la conséquence de fusions  
mineures



# Pourquoi les disques sont exponentiels

Non conservation du moment angulaire (MA)  
Les galaxies ne sont pas isolées, les barres et spirales transfèrent MA vers l'extérieur



Dissipation du gaz, et minimisation de l'énergie du système  
→ platitude des disques

Equation du mouvement: extrêmise le Lagrangien  $\mathcal{L} = T - U \rightarrow \delta \mathcal{L} \sim 0$

Dissipation: minimise l'énergie  $E = T + U$

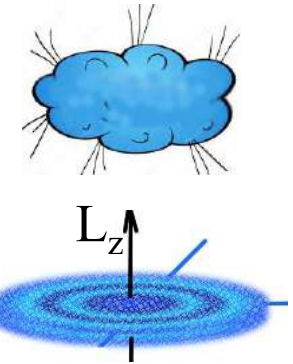
Echelles de temps:  $t_{\text{dyn}} < t_{\text{diss}} < t_{\text{gal}}$

A chaque instant, l'équilibre du Viriel est satisfait  $E = -T$  ( $2T + U = 0$ )

L'énergie rayonnée  $\sim T$

Le disque tend vers  $\Sigma \sim 1/R$  et une courbe  $V_{\text{rot}}$  plate

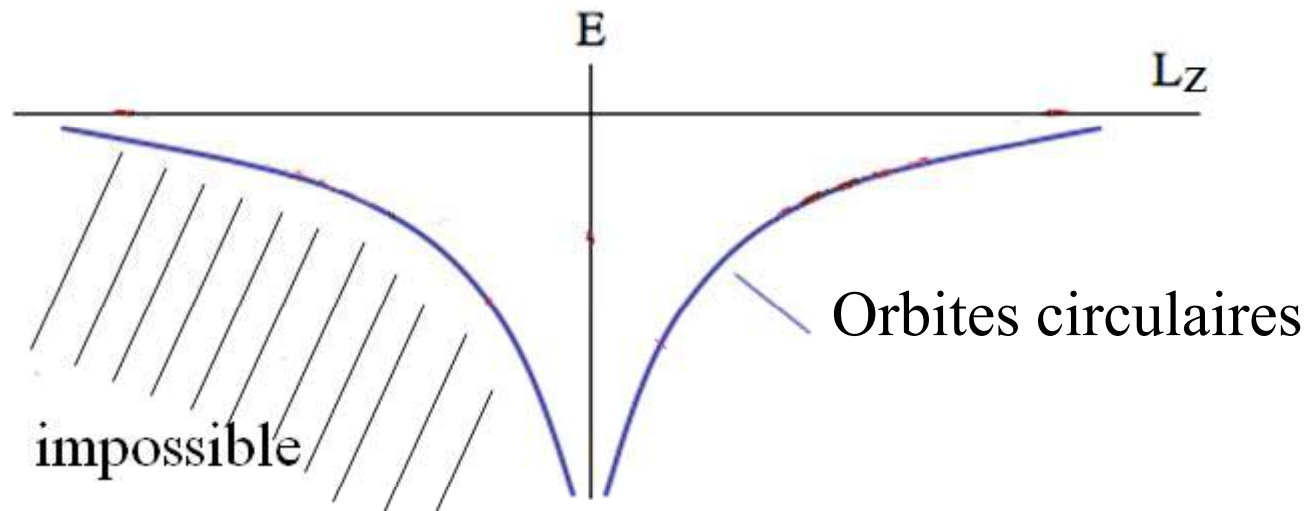
# La forme des disques



Durant une première phase, où la galaxie est essentiellement du gaz, il y a effondrement et aplatissement dans la direction perpendiculaire à  $L_z$

Pour concentrer la masse, il faut échanger du moment angulaire

→ spirales



L'orbite circulaire est l'état d'énergie minimum pour un  $L_z$  donné

Pour un disque mince, les mouvements verticaux et radiaux sont indépendants → équilibre à des échelles de temps différentes

# Obtention d'un disque exponentiel

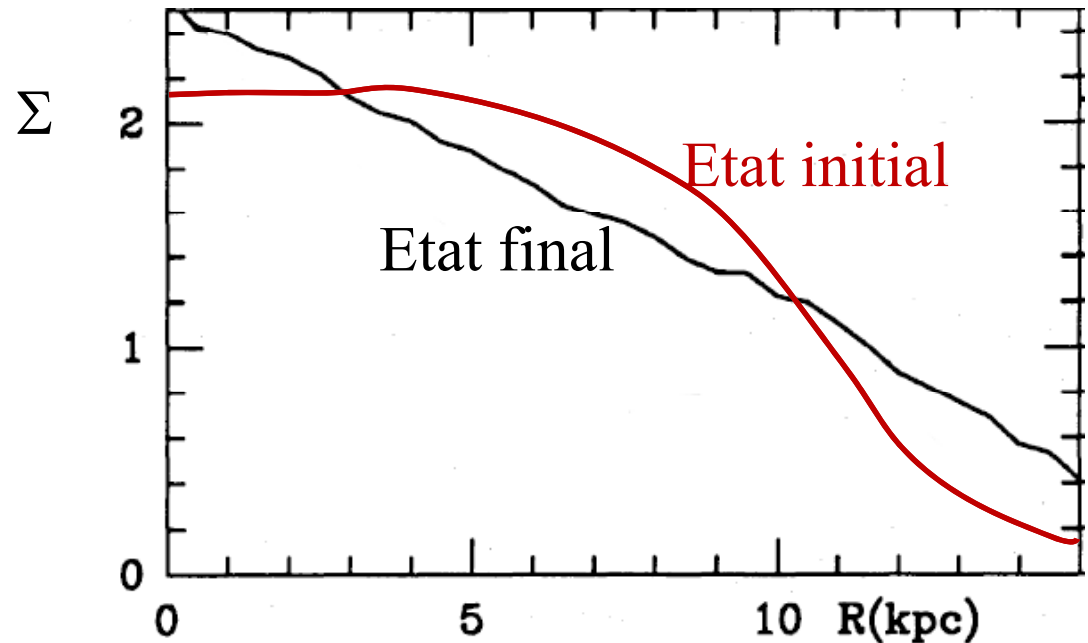
Simulations numériques, avec spirales et barres:

**Le disque devient exponentiel**

$$\Sigma = \Sigma_0 \exp(-r/r_d) \exp(-z/h)$$



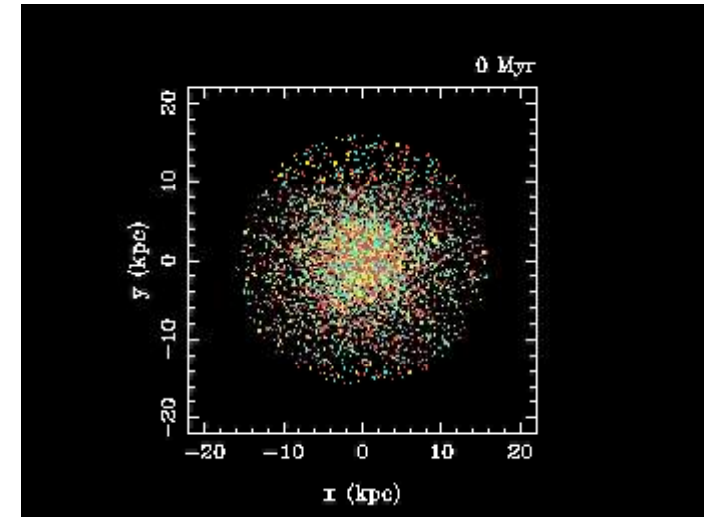
Densité de surface du disque stellaire



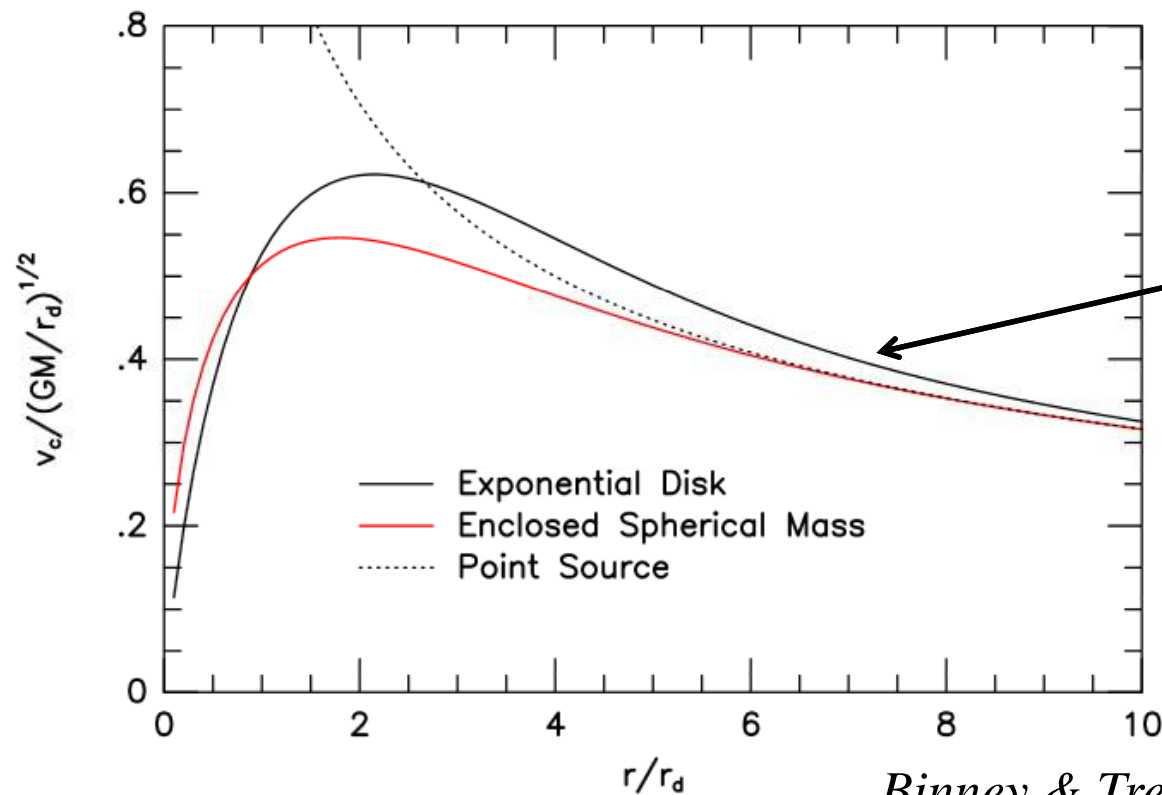
*Combes & Elmegreen 1993*



L'accrétion continue de gaz par les filaments maintient la structure spirale dans le disque



Simulations d'un disque avec accrétion



Courbe de rotation d'un disque exponentiel

*Binney & Tremaine 1987*

# Résumé

- La réalité est plus complexe que de simples ondes de densité, amplifiées par le swing: plusieurs ondes interfèrent à différentes vitesses
- Deux possibilités: battements, ou ondes stationnaires, modes
- Possibilité d'ondes dynamiques, parcellaires
- Instabilités du gaz: Kelvin-Helmholtz, plumes
- +Spirales flocculentes, avec formation d'étoiles chaotique
- → Evolution séculaire, transfert moment angulaire vers l'extérieur par les spirales; migration
- La galaxie tend vers un état minimum d'énergie, avec une distribution exponentielle

