

# Galaxies - I

Dynamique ; formation & évolution

Frédéric Bornaud - CEA/SAp, AIM

novembre 2006

# Galaxies - 1

## Introduction générale:

- constitution
- classifications

## Dynamique des galaxies spirales:

- cinématique des disques stellaires
- bras spiraux : théorie cinématique  
ondes de densités  
résonances  
amplification du swing
- réponse du gaz : chocs, formation stellaire induite  
visibilité des bras spiraux  
couples de gravité, redistribution
- barres : nature des ondes barrées  
résonances, réponse du gaz  
barres nucléaires
- **Évolution séculaire** :  
des disques aux bulbes et noyaux  
évolution des barres, formation d'anneaux  
description sur la séquence de Hubble

# Galaxies - 2

## Dynamique des galaxies en interaction:

- collision et fusion : friction dynamique
- relaxation violente : formation des bulbes et Elliptiques
- collisions frontales – anneaux collisionnels
- réponse du gaz :
  - queues de marée
  - formation stellaire induite

## Formation/évolution des galaxies:

- scénario hiérarchique
- comment croissent les disques spiraux
- accrétion de gaz
- bimodalité des galaxies
- matière noire et problèmes du CDM

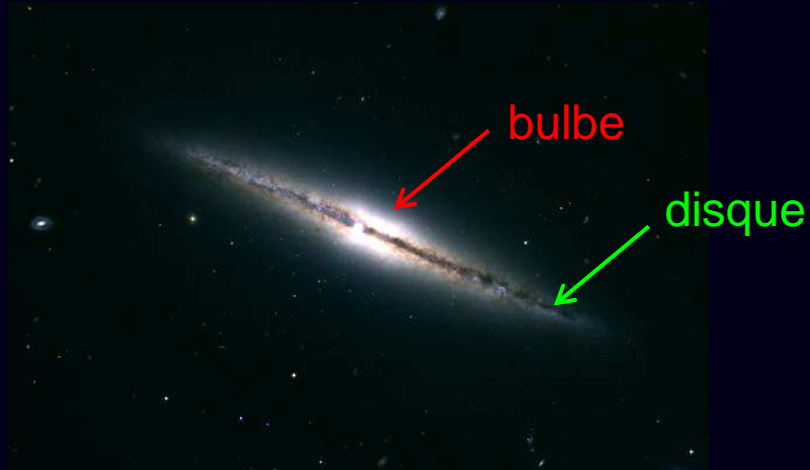
# Introduction Générale

# Constitution



- Etoiles:  
90% de la masse visible  
(actuelle)
- Milieu interstellaire:  
Atomique (HI 21cm + He)  
Moléculaire (H<sub>2</sub>, CO)  
Ionisé (formation stellaire, H $\alpha$ )  
Poussière (extinction)
- Matière noire:  
Rotation trop rapide p/r à la masse  
visible  
Missing baryons + non-baryonique

# Spirales/Elliptiques



Spirals : rotating disks  
stars + gas

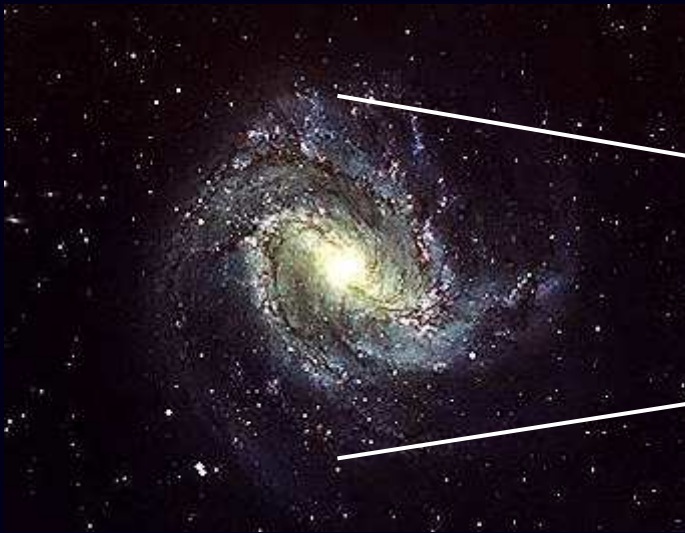


Ellipticals : sphéroïdals  
random motions > rotation  
very little (cold) gas

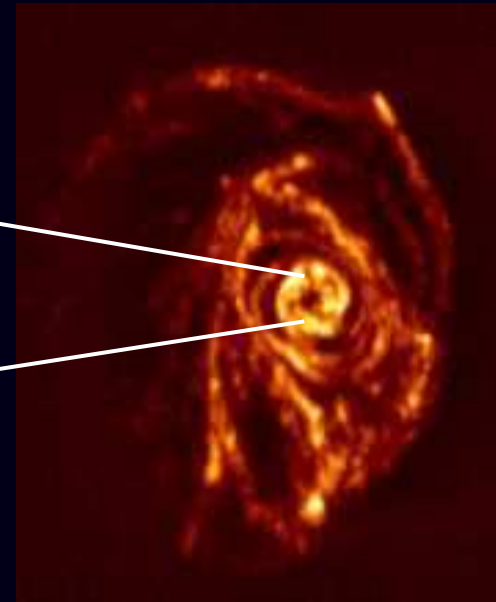
# Ordres de grandeur

Masse :  $10^9$  Mo (naine)  
 $10^{11}$  Mo (spirale, Voie-Lactée)  
 $>10^{12}$  Mo (elliptiques géantes d'amas)

Rayon : *étoiles* 10 kpc (pour une masse moyenne)  
*gaz* 3-4 fois plus (notamment HI)

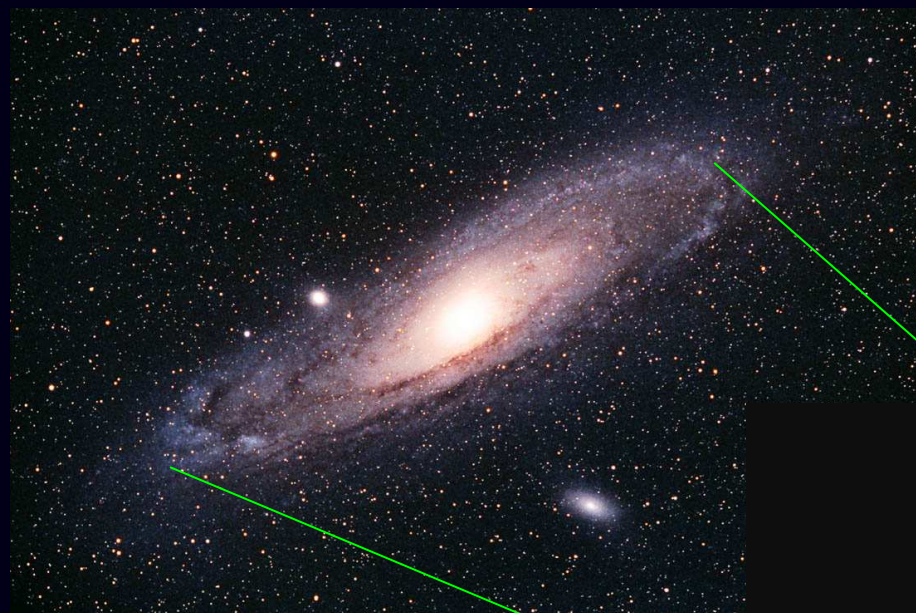


M32 : étoiles

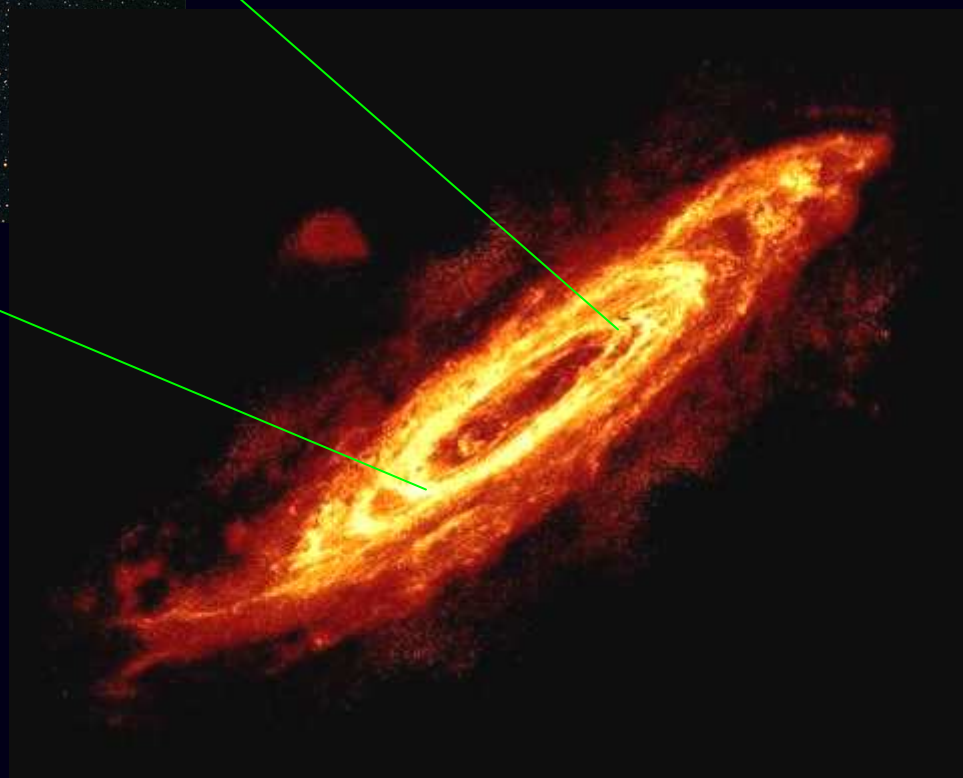


gaz HI





Optical map



HI Neutral Hydrogen



# Ordres de grandeur

Masse :  $10^9$  Mo (naine)  
 $10^{11}$  Mo (spirale, Voie-Lactée)  
 $>10^{12}$  Mo (elliptiques géantes d'amas)

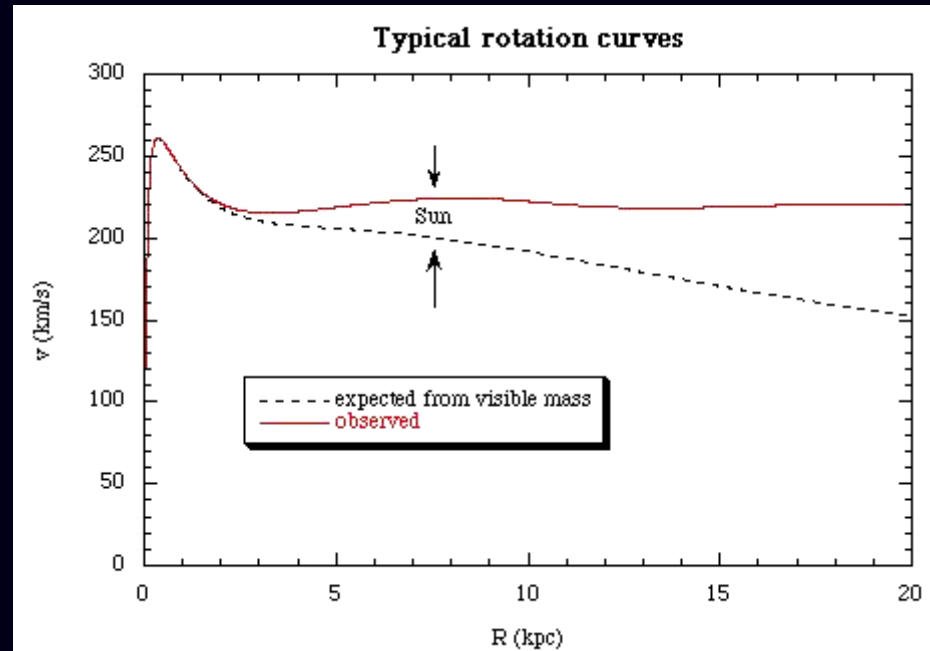
Rayon : *étoiles* 10 kpc (pour une masse moyenne)  
*gaz* 3-4 fois plus (notamment HI)

Temps : rotation en  $10^8$  ans au centre  
 $10^9$  ans aux bords

Vitesse de rotation : 100-200 km/s

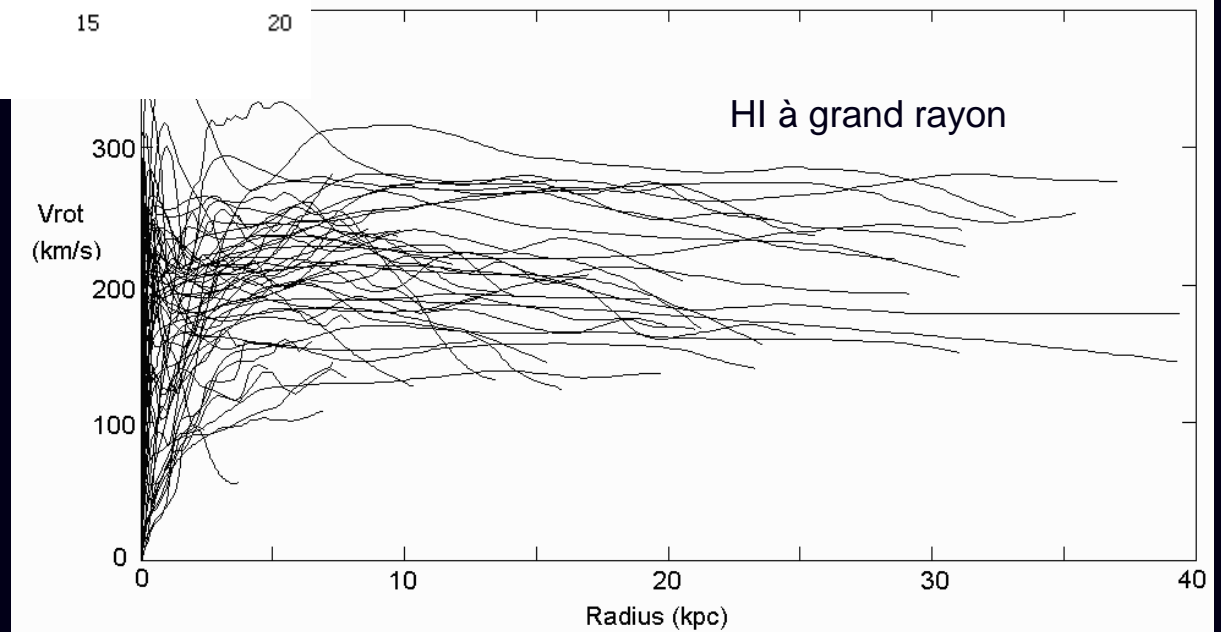
Entre galaxies : centaines de kpc (sauf amas)  
50 à 1000 km/s

# Courbes de rotation

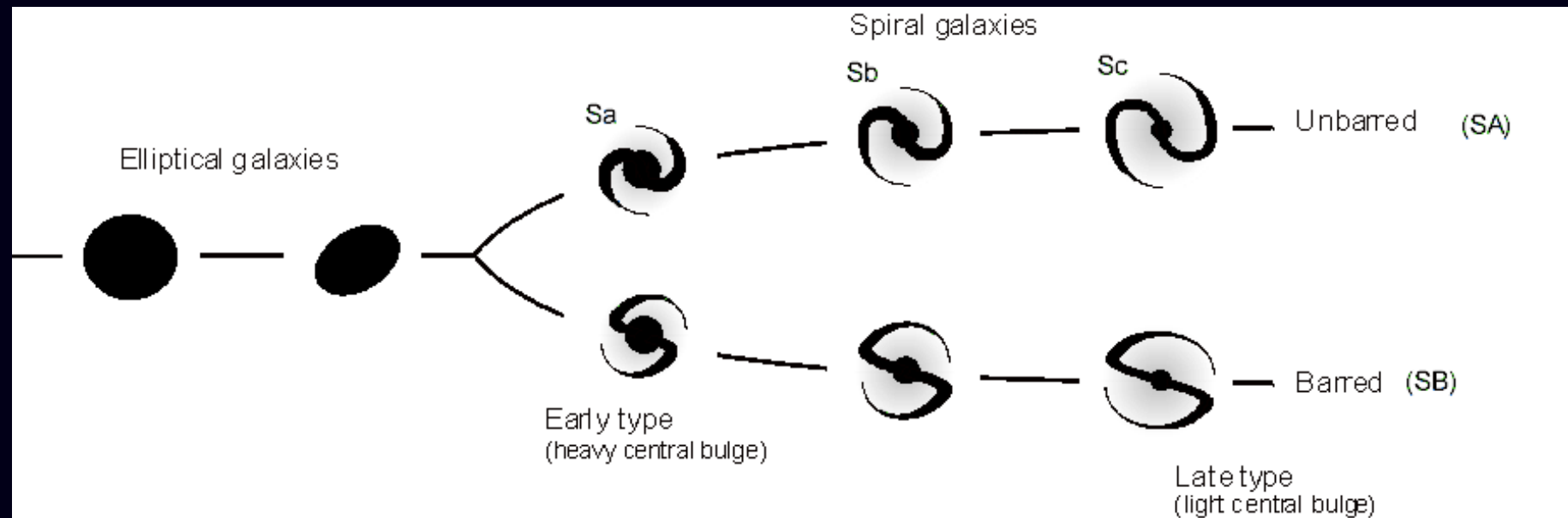


Rotation rapide  
+ courbes plates

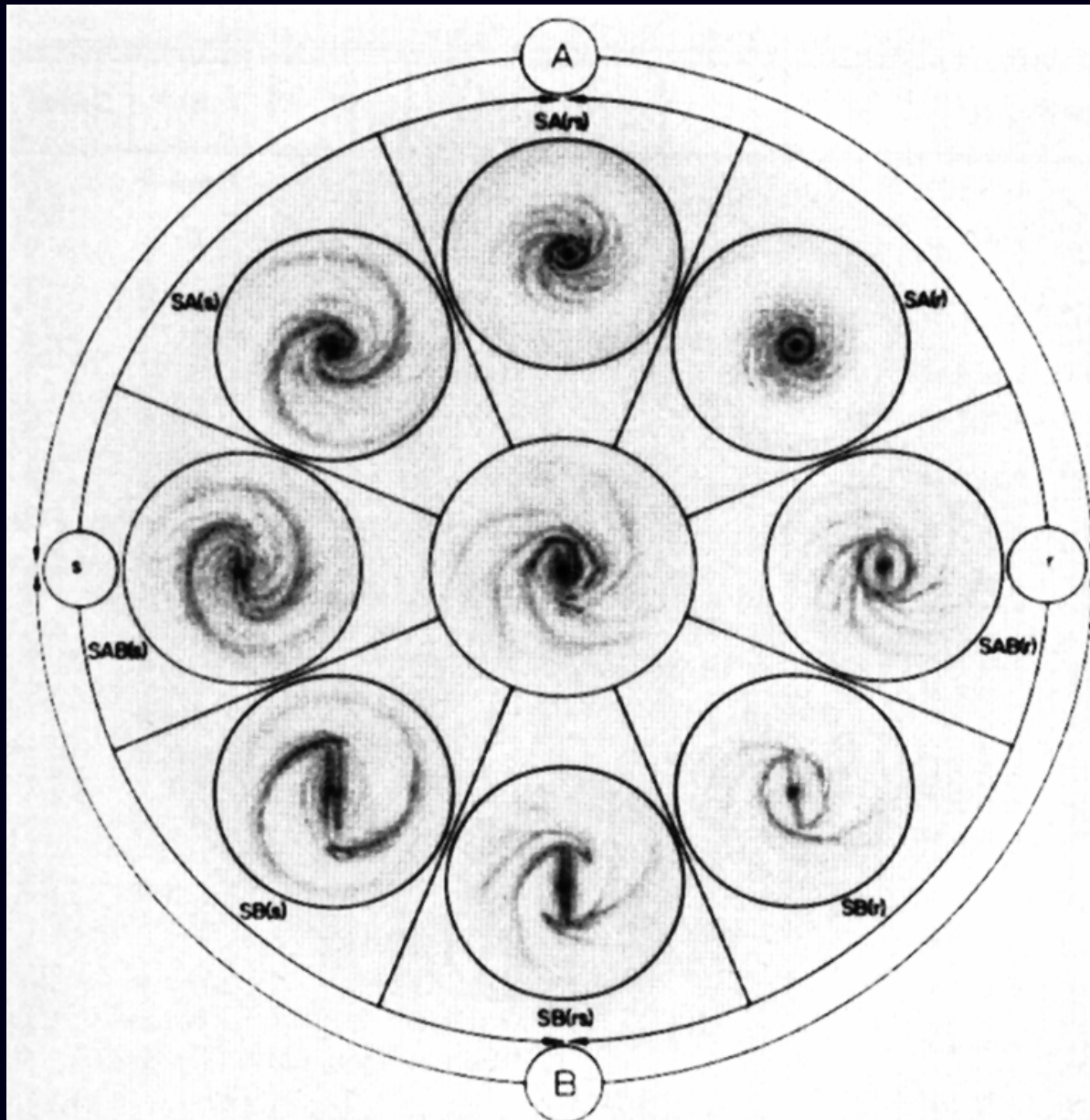
=> Matière noire  
en "*halo*"



# Classification de Hubble



# Classification de de Vaucouleurs



SA

SAB

SB

# Classification des spirales



Grand design



Flocculente

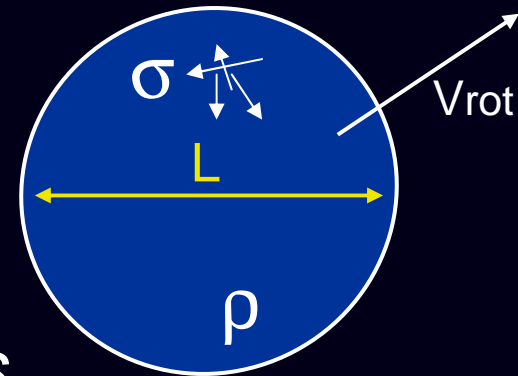
Mais souvent lié à la longueur d'onde:  
en NIR on voit plus grand-design, flocculente en B V...

# Stabilité des disques

## Instabilité de Jeans

Région d'un disque 2D (fin, éventuellement en rotation)

Dimension  $L$ , densité  $\rho$ , dispersion  $\sigma$



*La région s'effondre si les vitesses désordonnées ( $\sigma$ ) des étoiles ne sont pas assez élevées pour les faire sortir de la région avant que l'effondrement ne se produise*

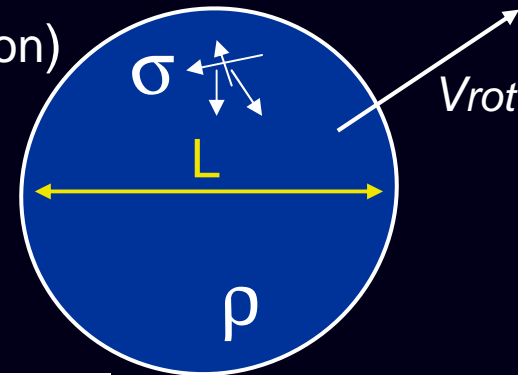


# Stabilité des disques

## Instabilité de Jeans

Région d'un disque 2D (éventuellement en rotation)

Dimension  $L$ , densité  $\rho$ , dispersion  $\sigma$



Une étoile quitte la région en  $T_{echap} = \frac{L}{\sqrt{\sigma}}$

La région tend à s'effondrer en  
(chute libre d'une étoile initial<sup>e</sup> au bord)

$$T_{effond} = \sqrt{\frac{\pi L}{8G\rho}}$$

=> Instable si  $T_{effond} < T_{echap}$  soit  $L > L_J = \frac{\pi}{8G} \frac{\sigma^2}{\rho}$

# Stabilité des disques

## Instabilité de Jeans

=> Instable si  $T_{\text{effond}} < T_{\text{echap}}$  soit  $L > L_J = \frac{\pi}{8G} \frac{\sigma^2}{\rho}$

$$\sigma \sim 40 \text{ km/s}$$

$$\rho \sim 100 \text{ Mo/pc}^2 \Rightarrow L_J \sim 1 \text{ kpc}$$

Seules les petites échelles sont stabilisées par la dispersion de vitesses ( $\approx$  pression)

=> Pourquoi les disques sont-ils stables et ne se fragmentent-ils pas ?

# Stabilisation par la rotation

On a négligé le mouvement d'ensemble dans le disque:

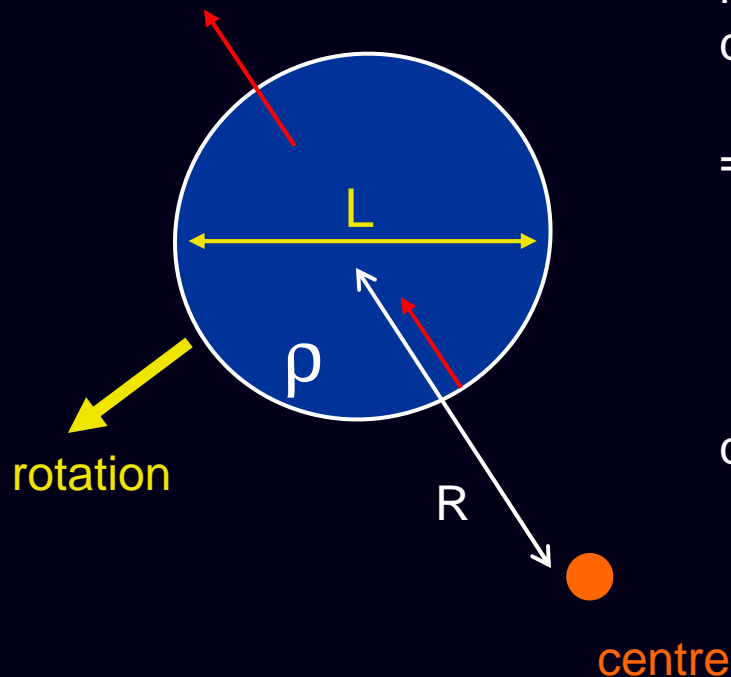
il faut rajouter les accélérations d'entraînement qui dépendent du rayon

=> gradient résultant sur la région étudiée :

$$\Delta F = \frac{d(\Omega^2 R)}{dR} L \approx \kappa^2 L$$

qui doit stabiliser contre la gravité :

$$F_G = \frac{G\rho\pi L^2}{L}$$



La rotation stabilise les grandes échelles :

$$L > L_{Rot} = \frac{G\rho}{\kappa^2}$$

# Le critère de Toomre

Toutes les échelles sont stables si  $L_{\text{rot}} < L_{\text{Jeans}}$

Soit la dispersion de vitesses  $\sigma > \sigma_{\text{crit}} = \pi G \rho / \kappa$

$$Q = \sigma / \sigma_{\text{crit}} > 1$$

Typiquement  $\sigma_{\text{crit}} \sim 30 \text{ km/s}$

=> les disques sont stables, en tout cas pour les disques dominés par les étoiles  $\sigma \sim 50 \text{ km/s}$

- Le gaz interstellaire peut par contre devenir instable.  
(dynamique couplée au refroidissement)
- Un disque riche en gaz peut être globalement instable.

# Composantes stabilisatrices

Stabilité:  $\sigma > \pi G \rho / \kappa$

- Masse du disque : accroît  $\rho$  , déstabilise
- Fraction de gaz : abaisse  $\langle \sigma \rangle$  , déstabilise
- Bulbe central : augmente  $\Omega, \kappa$  sans modifier  $\rho$   
=> stabilise
- Matière noire : idem bulbe : stabilise... sauf si dans le disque

La stabilité des spirales permet certainement d'exclure que toute la matière noire soit dans le disque des spirales (argument historique)

# Quelle est l'orbite d'une étoile?

Le potentiel n'est PAS Keplérien! (disque+bulbe+halo)

On décrit le potentiel par sa courbe de rotation:

- $V(r)$  = vitesse d'une étoile si orbite parfaitement circulaire
- $\Omega(r)$  = angulaire

UNE solution est l'orbite circulaire à  $\Omega(r)$  ...

... quelle est la solution générale?

On peut montrer que toute étoile va décrire **autour de la solution circulaire à  $\Omega(r)$  des *épicycles* à la fréquence épicyclique  $\kappa(r)$**



# Quelle est l'orbite d'une étoile?

En coordonnées polaires :

- $r(t) = R$
- $\theta(t) = \Omega(R).t$  à l'ordre 0 , avec  $\Omega = d\Phi / r dr$

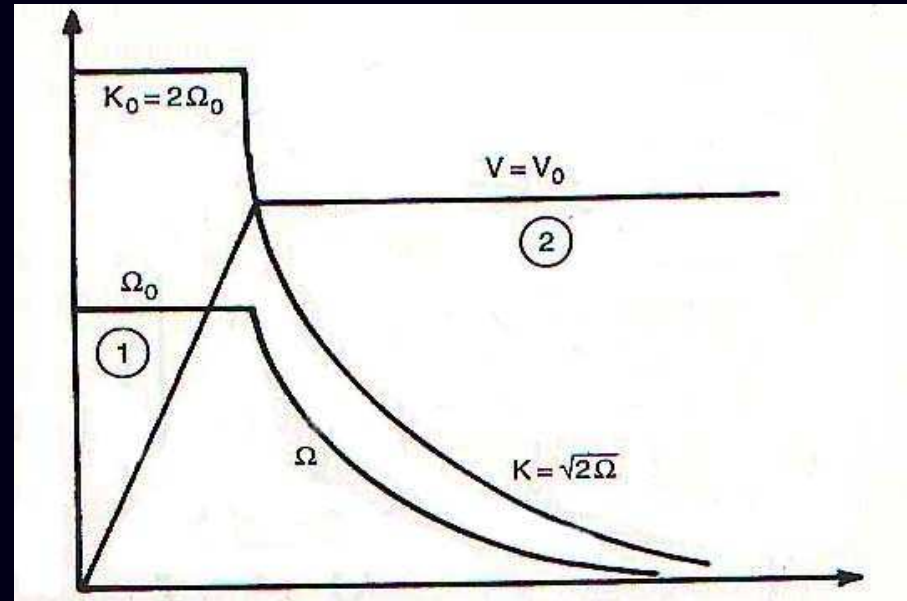
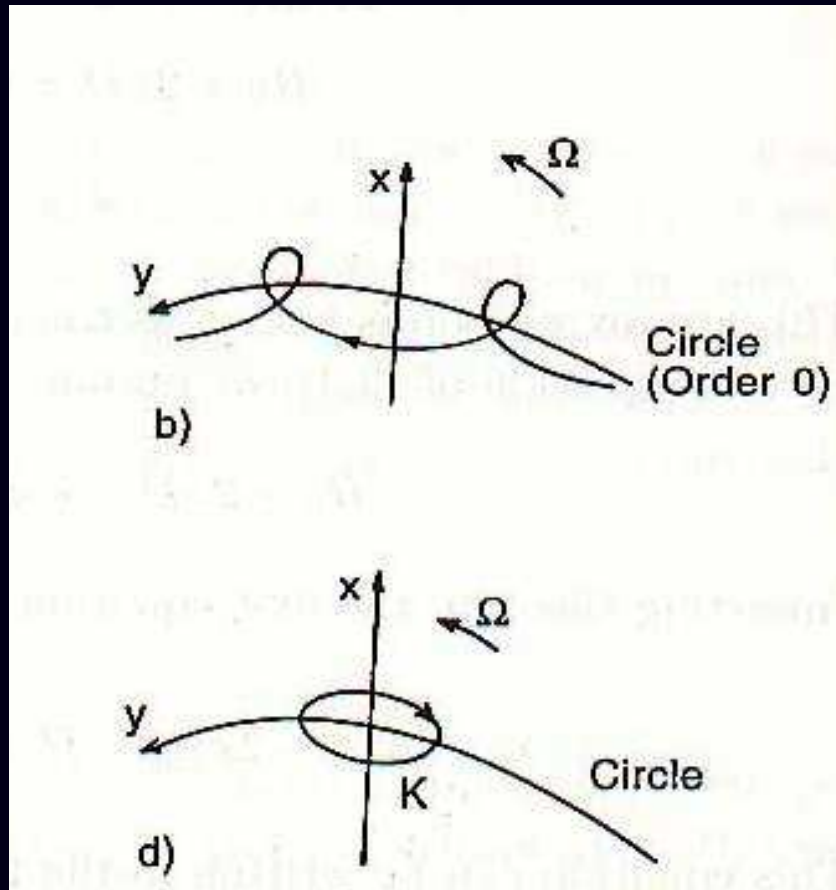
Ordre 1 :  
-  $r(t) = R + x(t)$   
-  $\theta(t) = \Omega(R).t + y(t)$

Linéarisation du PFD =>  $d^2x / dt^2 + \kappa^2 x = \text{cte}$  + idem en  $y/R$

$$\kappa^2 = R d\Omega^2 / dR + 4\Omega^2$$

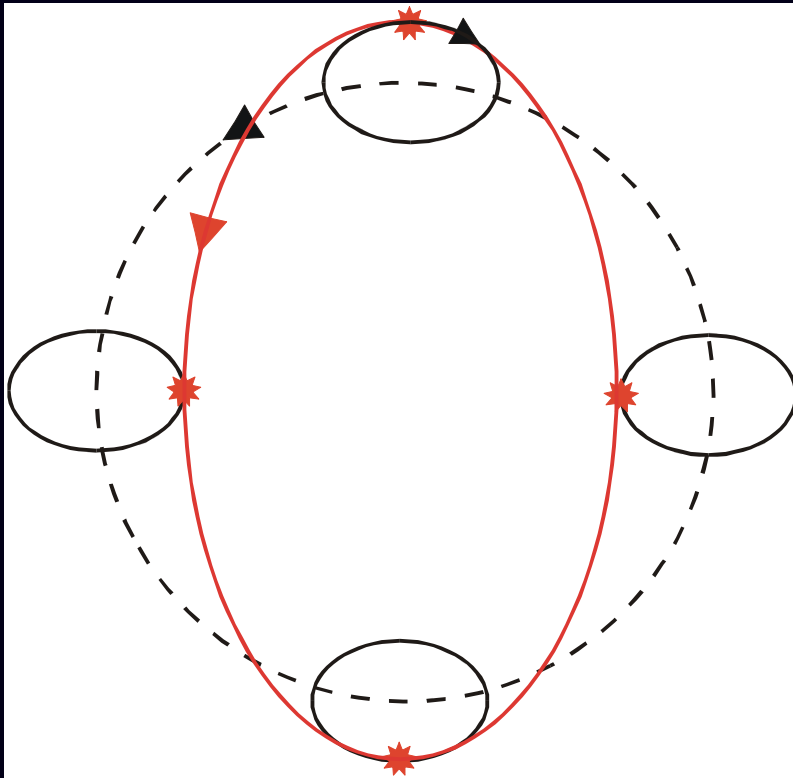
⇒ Autour de la position circulaire “moyenne”,  
l'étoile décrit une ellipse (rétrograde) à la fréquence épicyclique  $\kappa$

# Précession des ellipses

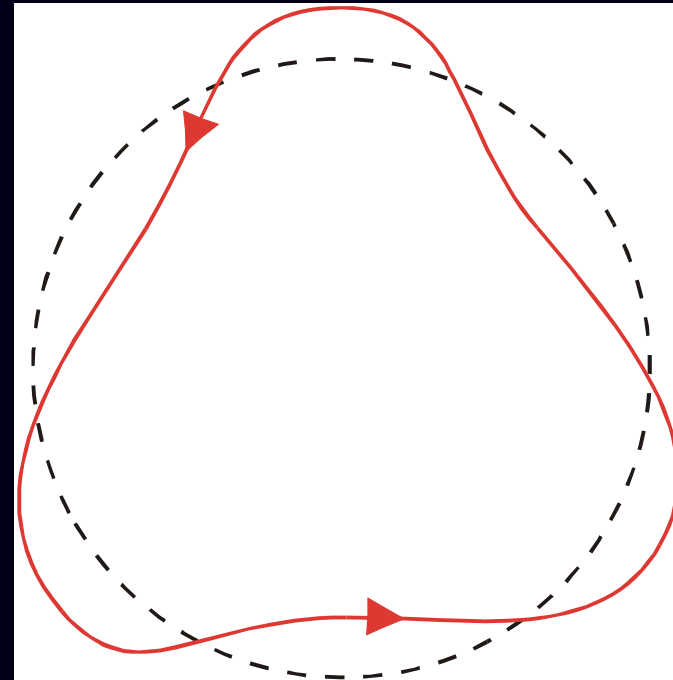


$$K^2 = R \frac{d\Omega^2}{dR} + 4\Omega^2$$

# Précession des ellipses

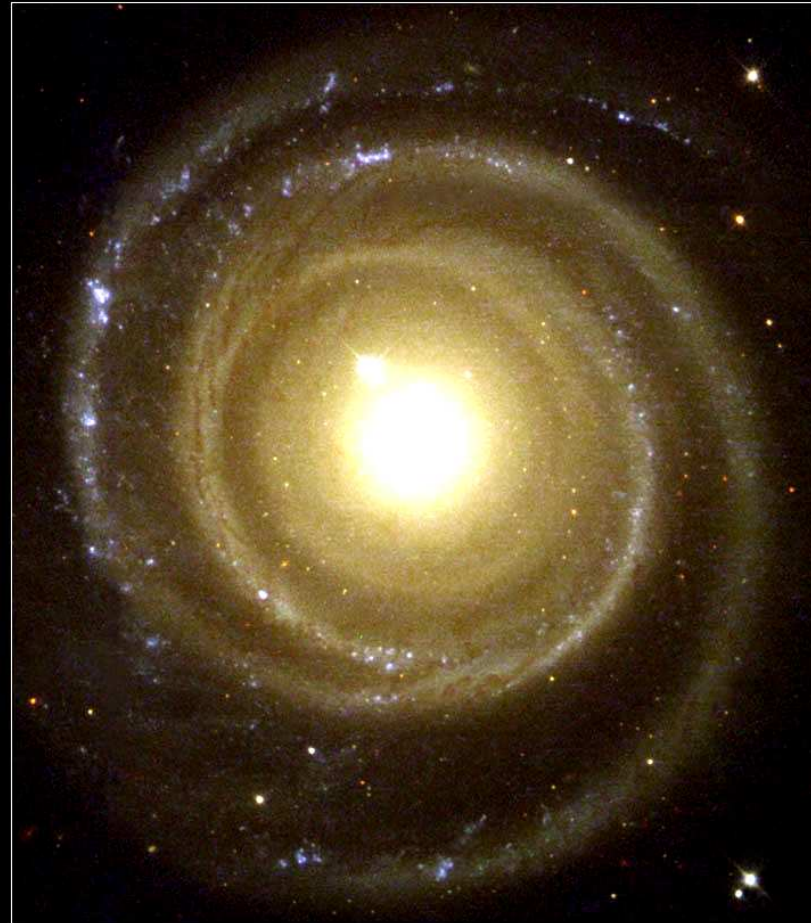


Ref. tournant à  $\Omega - \mathcal{K}/2$



# Les bras spiraux

Spiral Galaxy NGC 4622



Hubble  
Heritage

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC02-03

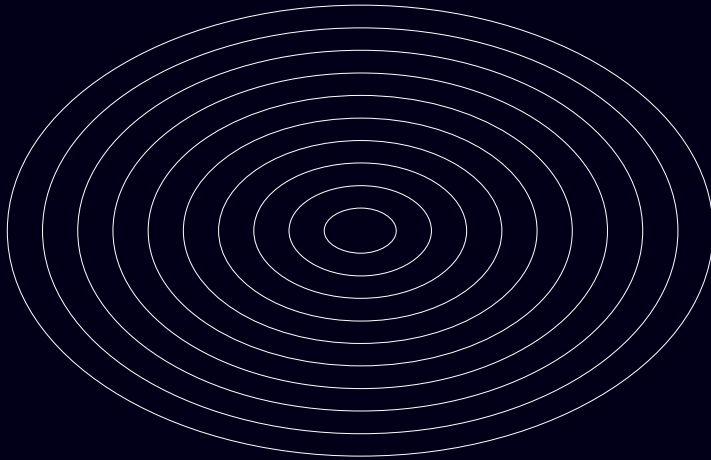
# Les bras spiraux



a

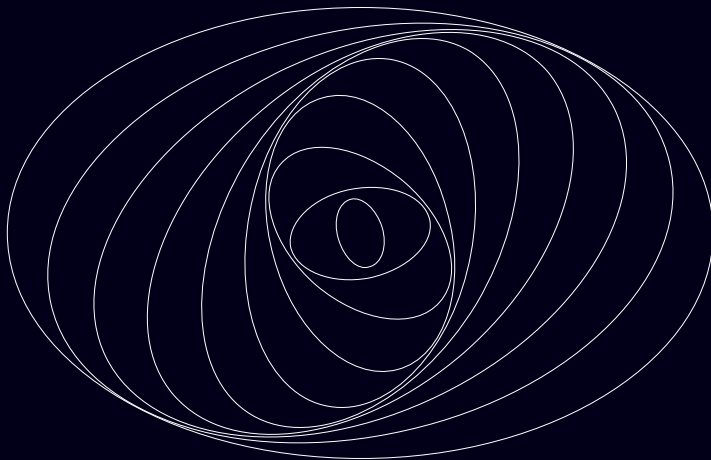


# Théorie cinématique



Naissance de bras :  
orbites elliptiques +  
précession différentielle  
( $\Omega - \kappa/2$  non constant)

MAIS : comment arrêter l'enroulement  
différentiel?...



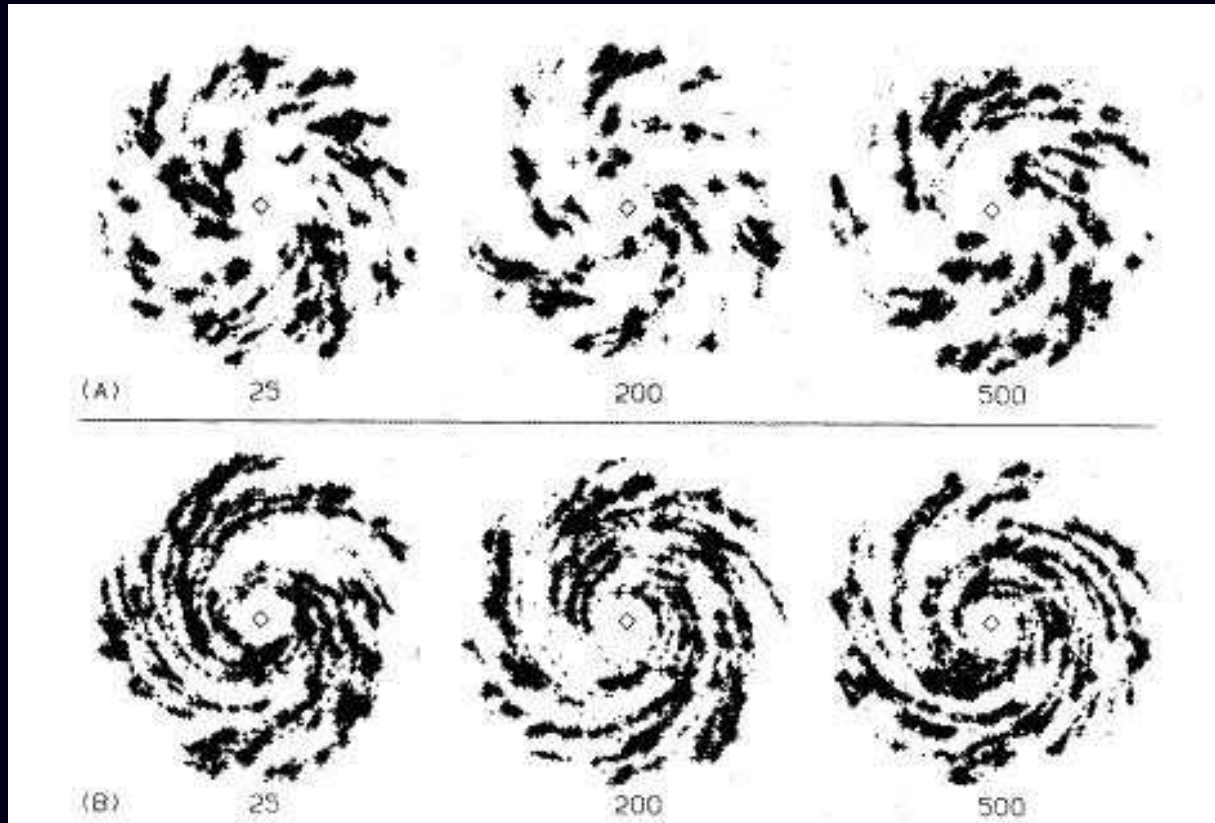
⇒ Les bras ne peuvent pas être  
purement cinématiques

⇒ Les bras ne peuvent pas être  
matériels (matière d'un bras y reste  
indéfiniment)

Rq : Pas magnétique. Le champ  
magnétique suit les bras mais ne s'y  
intensifie pas (ou pas assez).



# Formation stellaire contagieuse



Peut-être les spirales “floculentes” (mais pas forcément)

Pas les spirales “grand design”, ni spirales vieilles

# Ondes de densité

On peut *initier* une structure spirale par:

- l'enroulement cinématique
- la formation stellaire contagieuse
- une perturbation extérieure
- des "fluctuations" initiales (simulations, disques primordiaux)

Tout le problème est de la *maintenir* sur plusieurs rotations!  
(pas toutes des spirales jeunes)

Seule théorie valable proposée entre 1966 et 2006 :

Théorie des **ondes de densités**, Lin & Shu 1964-66 .

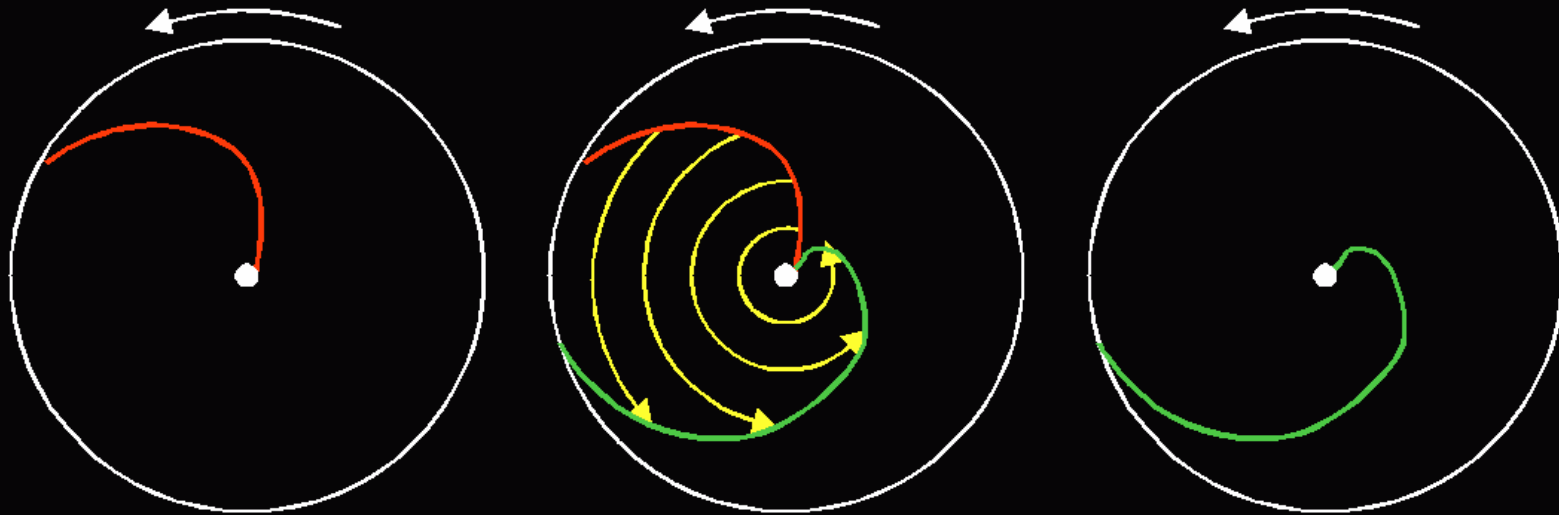
# Ondes de densité

- Les bras spiraux sont des ondes qui se propagent dans le disque
- Pas de déplacement global de matière
- Onde auto-gravitante
- Relation de dispersion calculable (complexe) à la limite WKB uniquement  
→  $\omega(k)$  , avec  $\omega^2 > 0$  (propagation mais stable)  
(alors que pour l'effondrement gravitationnel  $\omega^2 < 0$ )

Explique la *nature* des spirales ... mais pas leur formation:

*Comment passer de petites fluctuations initiales (locales) à des spirales (presque) toutes orientées dans le même sens, avec le même enroulement ( $\sim 1/2$  à 2 tours sur le rayon des disques) ?*

# Sens d'enroulement des bras



Enroulement différentiel (shear)

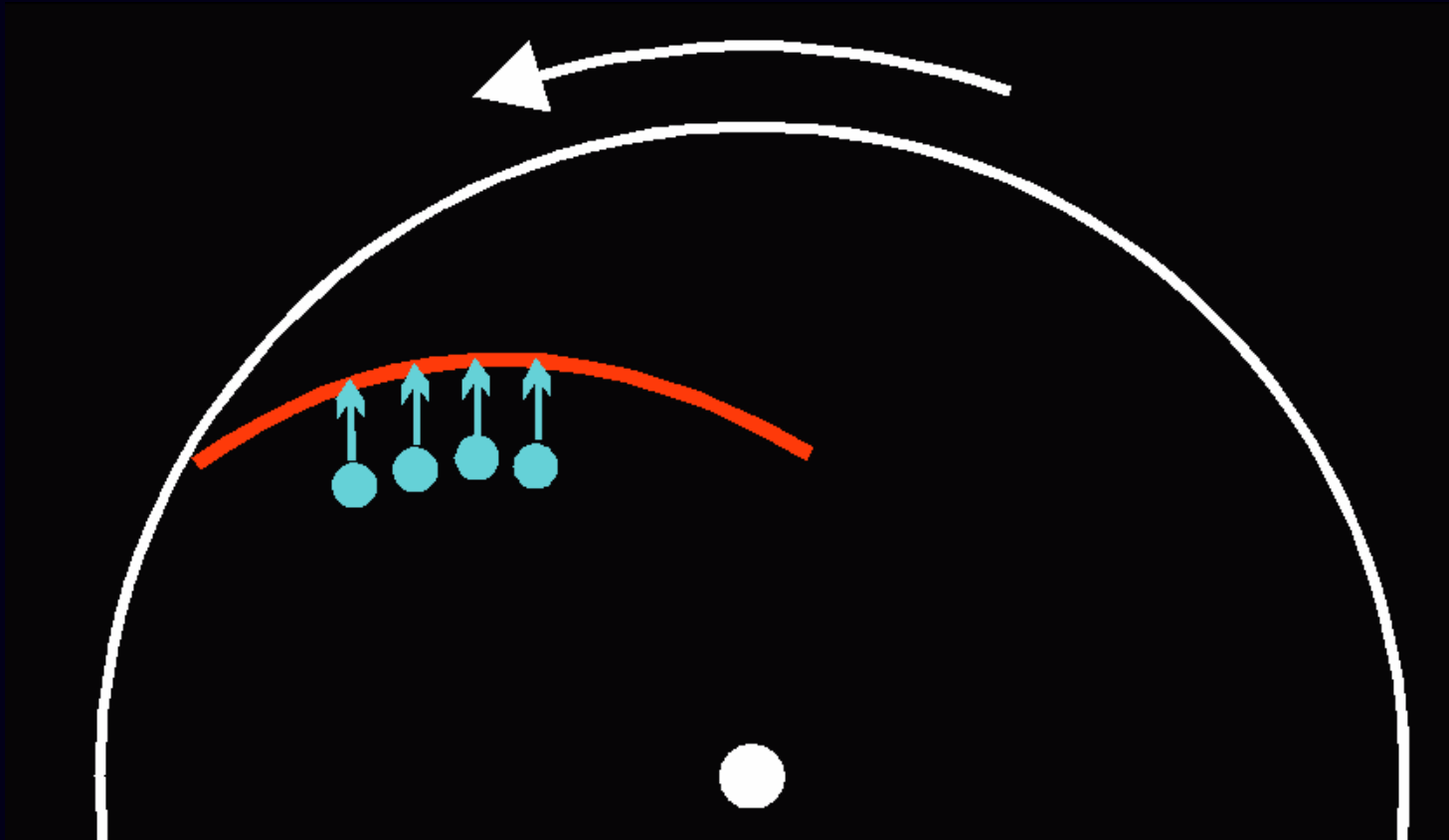
=> passage spontané et rapide de *leading* à *trailing*...

... *Mais l'enroulement va continuer et détruire l'onde trailing (ou du moins la rendre irréaliste, très enroulée)*

*Pourquoi plus de trailing que de leading , et jamais très enroulées ??*  
(existence d'un degré d'enroulement typique ==long. d'onde favorite)

# L'amplification de swing

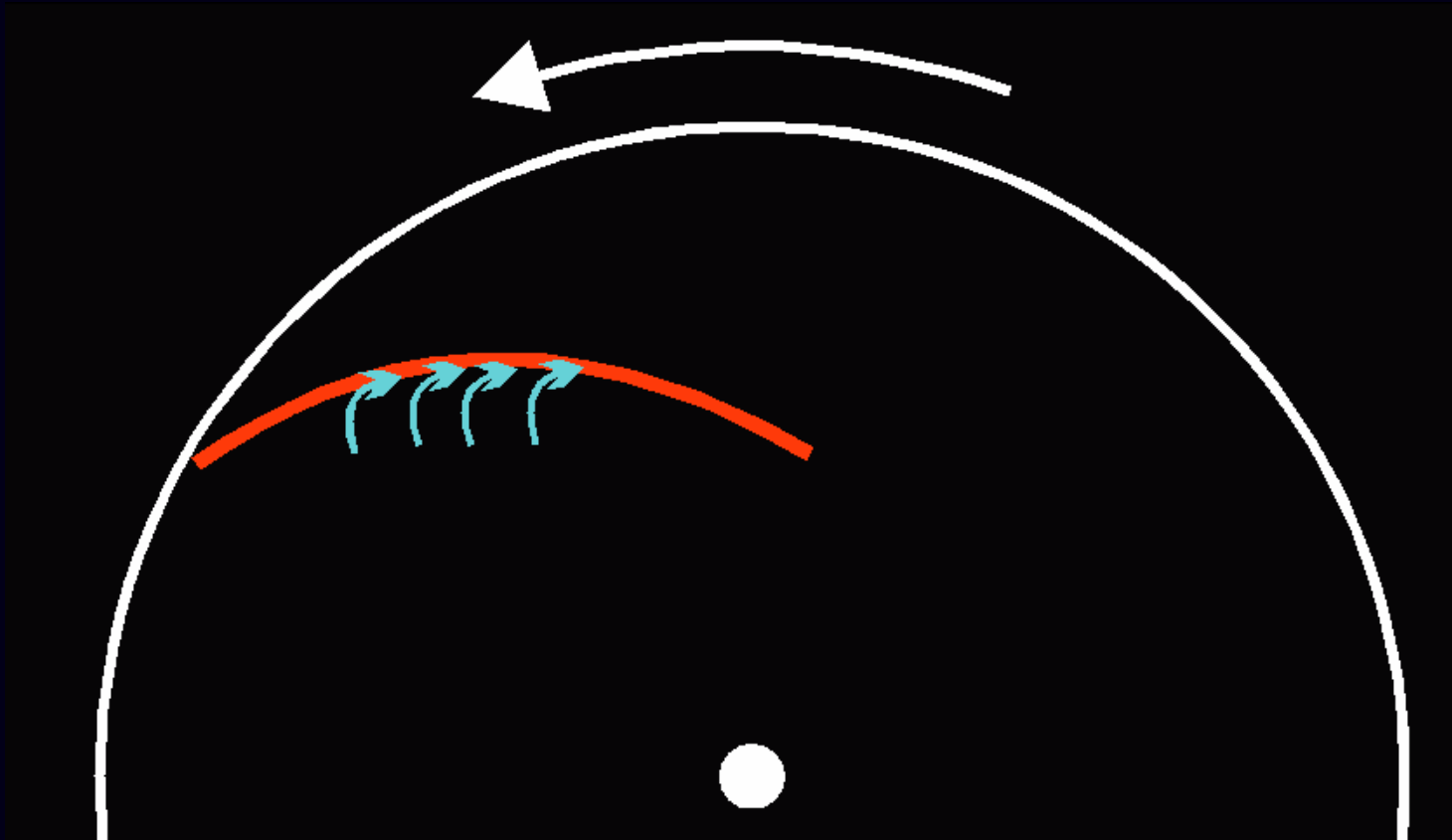
Lorsqu'une onde passe de leading à trailing (shear) :



- L'arrivée de l'onde attire collectivement les étoiles dans la même direction
  - Direction non azimuthale car onde enroulée
- => Lancement simultané sur des épicycles ( « swing » )

# L'amplification de swing

Lorsqu'une onde passe de leading à trailing (shear) :

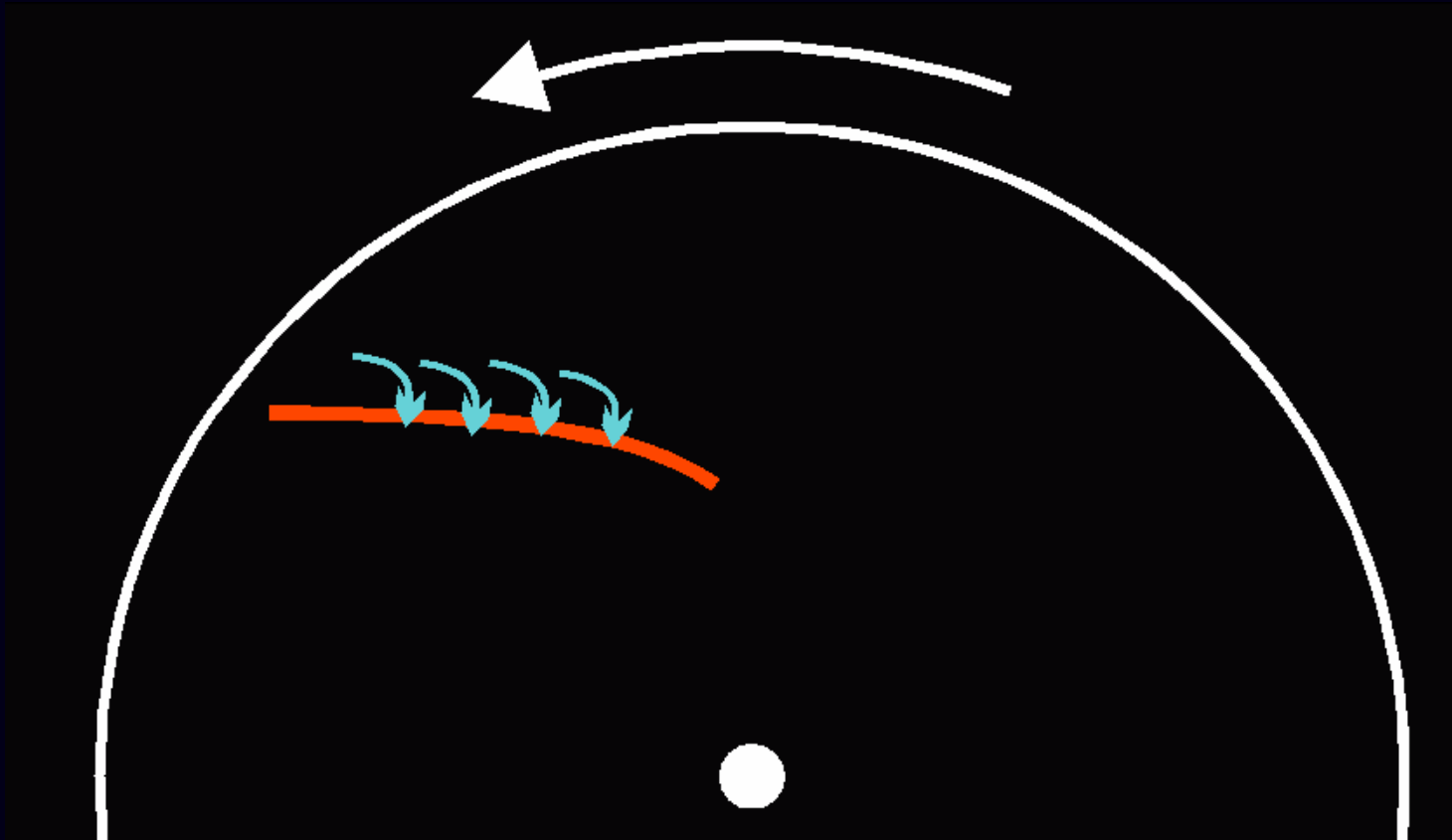


- L'arrivée de l'onde attire collectivement les étoiles dans la même direction
  - Direction non azimuthale car onde enroulée
- => Lancement simultané sur des épicycles ( « swing » )



# L'amplification de swing

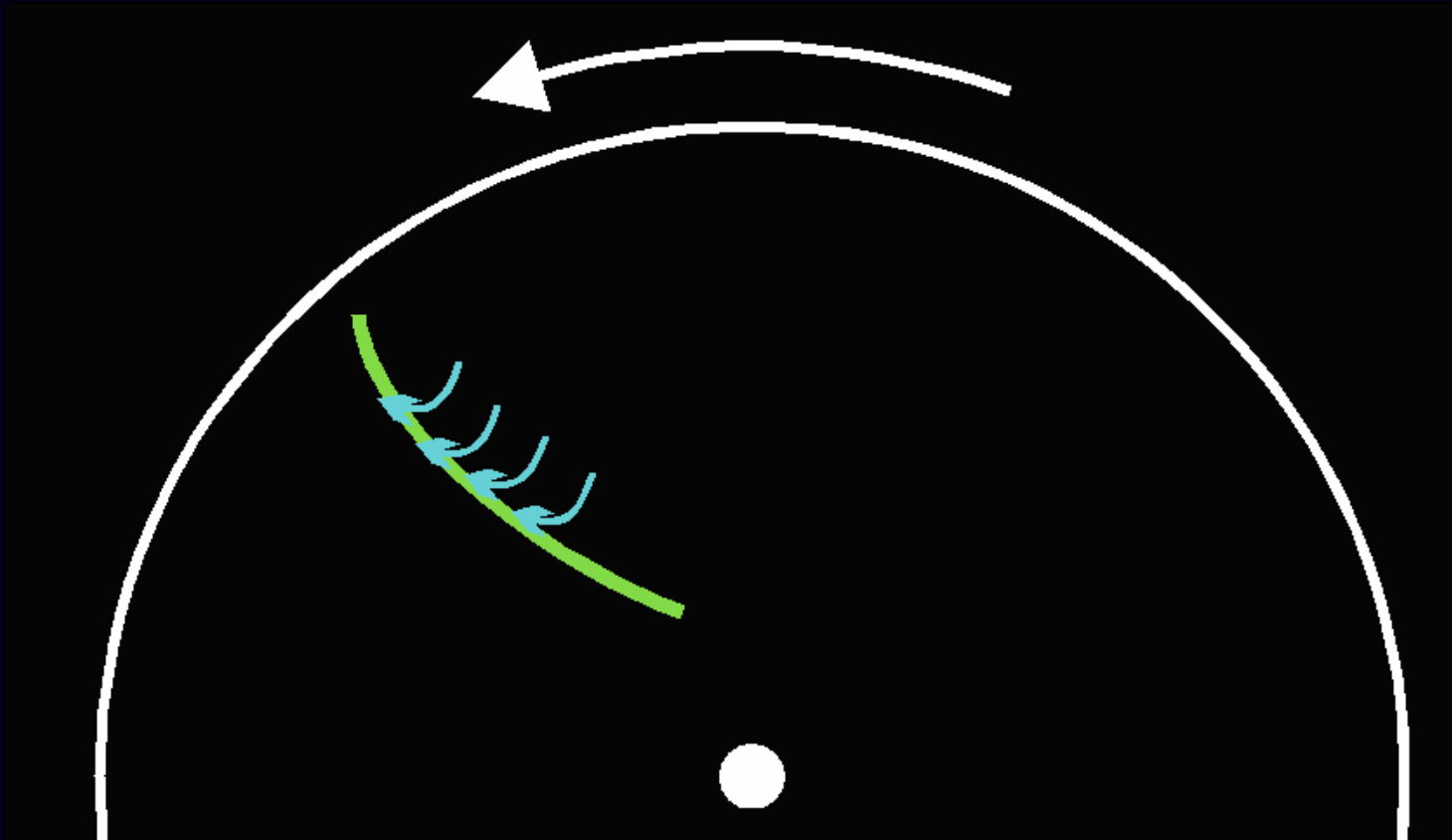
Lorsqu'une onde passe de leading à trailing (shear) :



- En suivant leurs épicycles les étoiles « accompagnent » la déformation de leading à trailing de l'onde

# L'amplification de swing

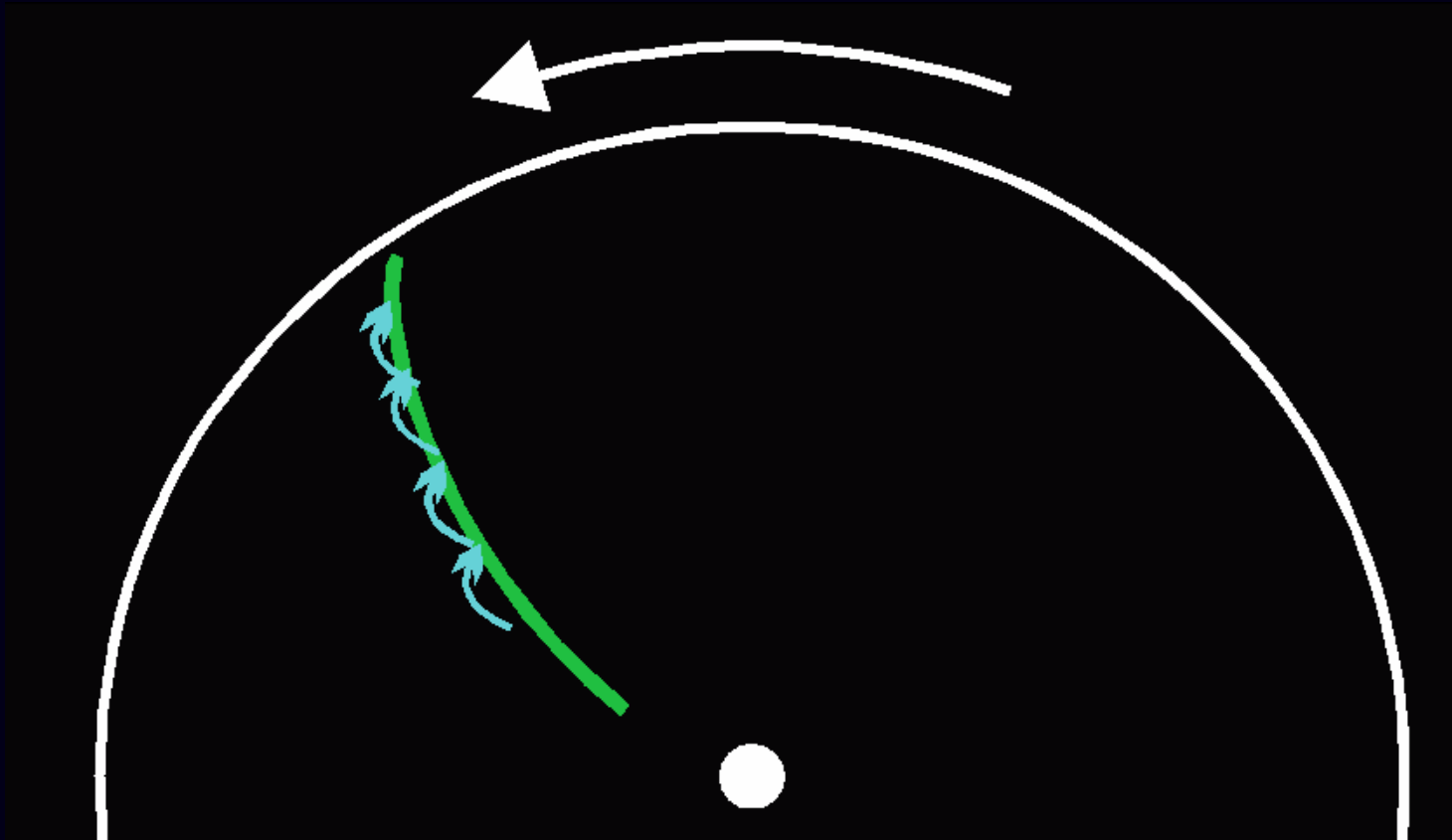
Lorsqu'une onde passe de leading à trailing (shear) :



- En suivant leurs épicycles les étoiles « accompagnent » la déformation de leading à trailing de l'onde

# L'amplification de swing

Lorsqu'une onde passe de leading à trailing (shear) :



Résultat : Quand l'onde passe de leading à trailing, la durée de séjour des étoiles dans le bras est augmentée

# L'amplification de swing

Lorsqu'une onde passe de leading à trailing (shear) :

L'excitation cohérente des épicycles (le swing) permet aux étoiles d'accompagner le bras changeant d'orientation

⇒ Durée moyenne de séjour d'une étoile dans un bras augmentée

⇒ Le bras voit sa masse s'accroître durant cette phase

⇒ Amplification durable de l'onde de densité (par auto-gravité)

# Bilan

Préférence des ondes trailing : **Oui**

Shear + Amplification de swing

Enroulement modéré : **Non**

Le shear devrait encore enrouler l'onde après son amplification.

=> Reste à stabiliser de la forme des bras spiraux...

# La Corotation

Rayon de corotation d'une onde :

*Rayon auquel la vitesse de rotation des étoiles (en orbite circulaire pure)  $\Omega(r)$  coïncide avec la vitesse de l'onde spirale*

L'étoile est fixe p/r à l'onde (juste un petit épicycle local)

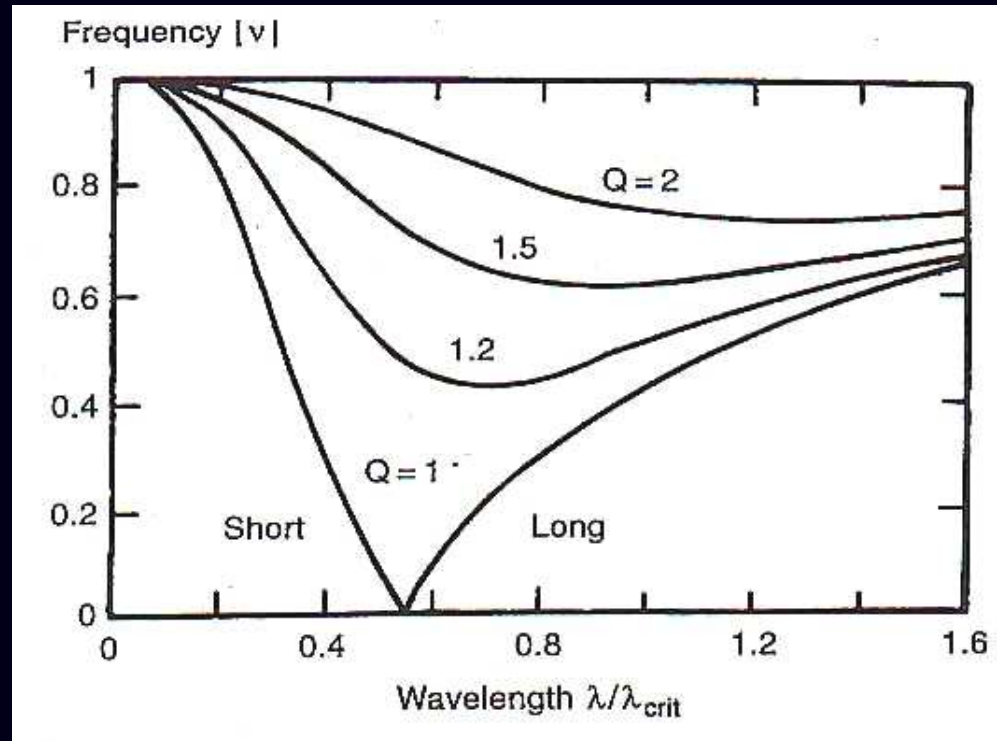
Conséquence : dans le référentiel des étoiles, l'onde n'avance pas => barrière avec *transmission/réflexion*



*Une onde trailing peut se réfléchir en onde leading et échapper au shear (+ réfraction vers l'intérieur)*

# La Corotation

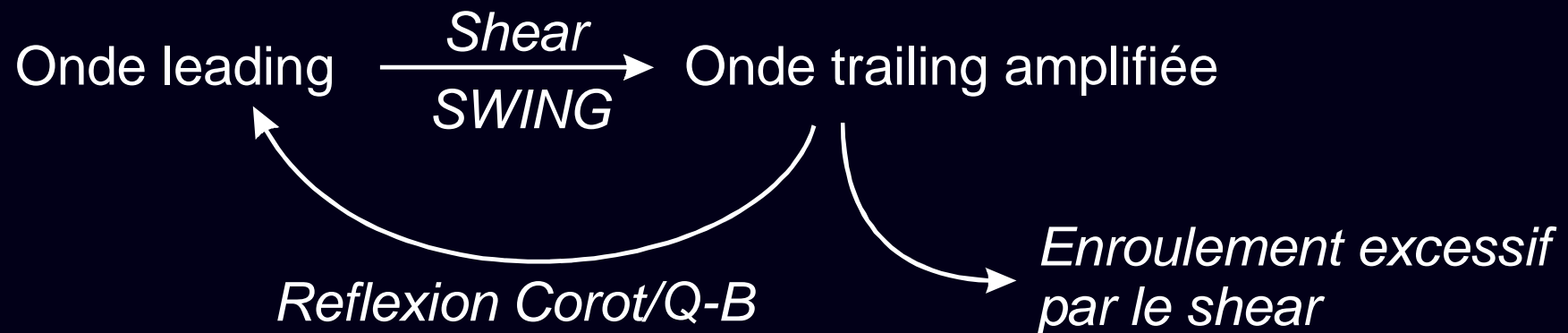
Relation de dispersion :



Dans un disque  $Q > 1$  : existence d'une "Q-barrier" étendue autour du rayon de corotation. Pas d'onde progressive, mais possibilité de transmission (analogie tunnel)



# Spiral feedback loop

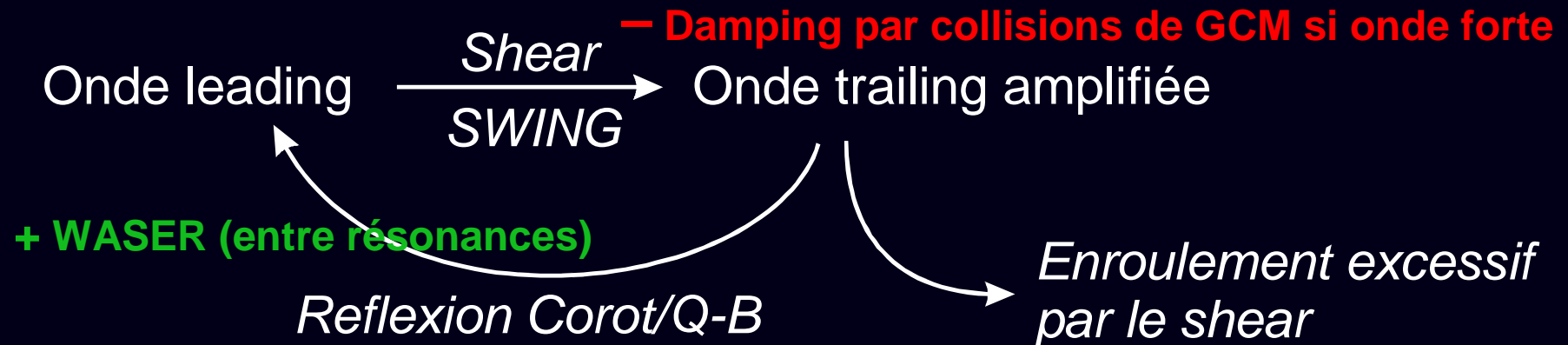


Si la longueur d'onde assez grande, alors la réflexion à la CR se produit avant enroulement par le shear.

Mais les longueurs d'ondes trop grandes ont une faible efficacité de swing et de réflexion.

- ⇒ Longueur d'onde optimale de la boucle de feedback typiquement  $\sim$  rayon du disque (comme observé)
- ⇒ **Explication des sens/degré d'enroulement préférentiels**

# Spiral feedback loop



Si la longueur d'onde assez grande, alors la réflexion à la CR se produit avant enroulement par le shear.

Mais les longueurs d'ondes trop grandes ont une faible efficacité de swing et de réflexion.

- ⇒ Longueur d'onde optimale de la boucle de feedback typiquement  $\sim$  rayon du disque (comme observé)
- ⇒ **Explication des sens/degré d'enroulement préférentiels**

# Bilan

Préférence des ondes trailing : **Oui**

Shear + Amplification de swing

Enroulement modéré : **Oui**

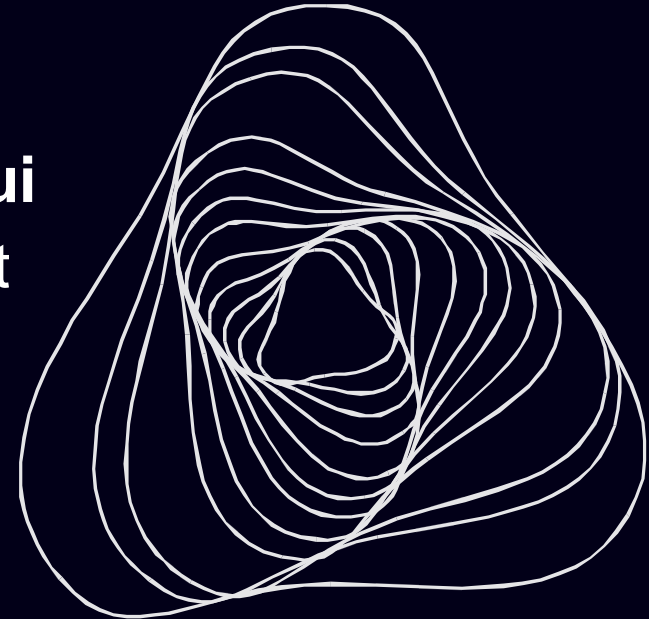
Le shear devrait encore enrouler l'onde après son amplification... Mais réflexion (CR) et amplification en boucle

Prédominance des ondes à 2 bras : **Oui**

$\Omega - \kappa/m$  varie plus fortement si  $m$  croît

=> shear plus fort dès que  $m > 2$

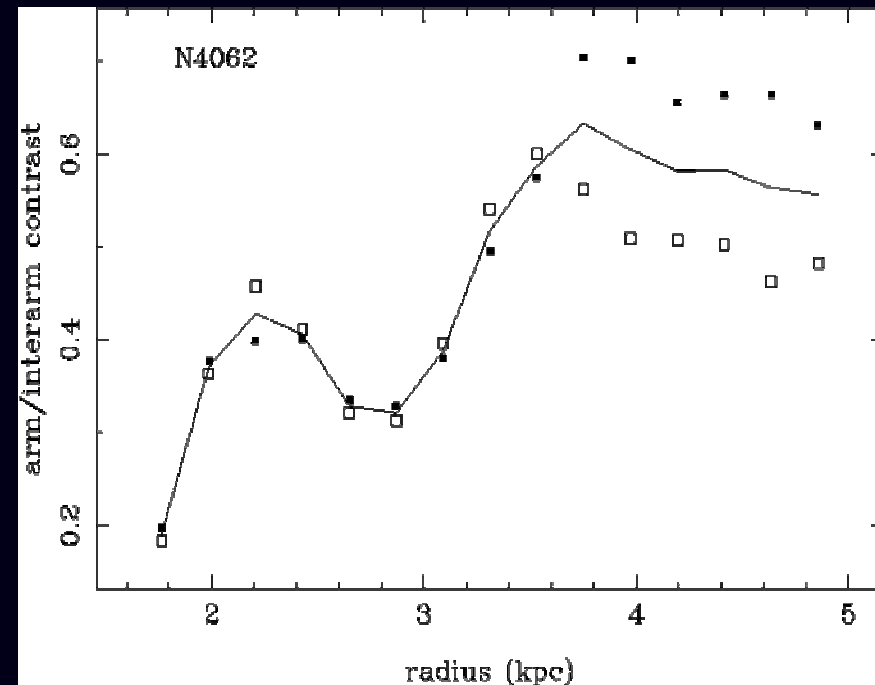
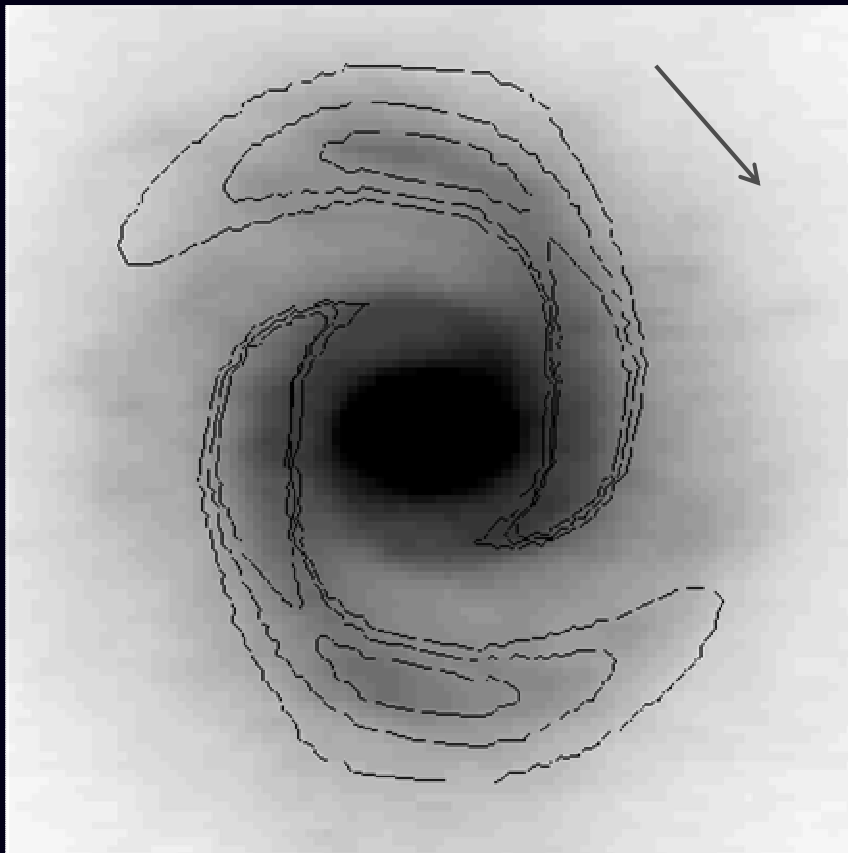
=> atténuation des modes



# Décomposition des ondes

La théorie des ondes de densité prévoit des ondes leading < trailing

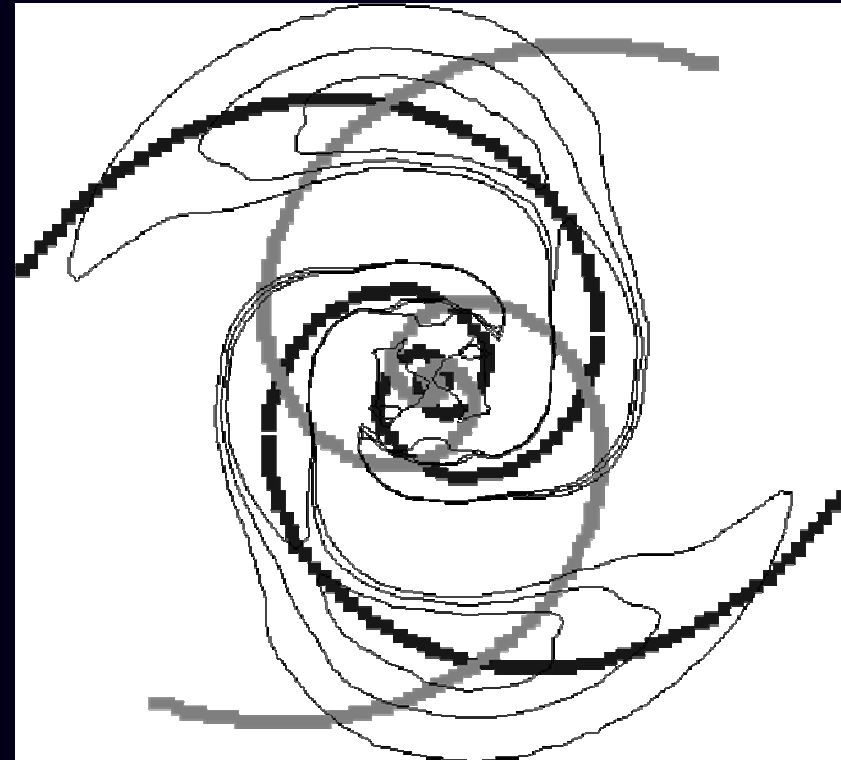
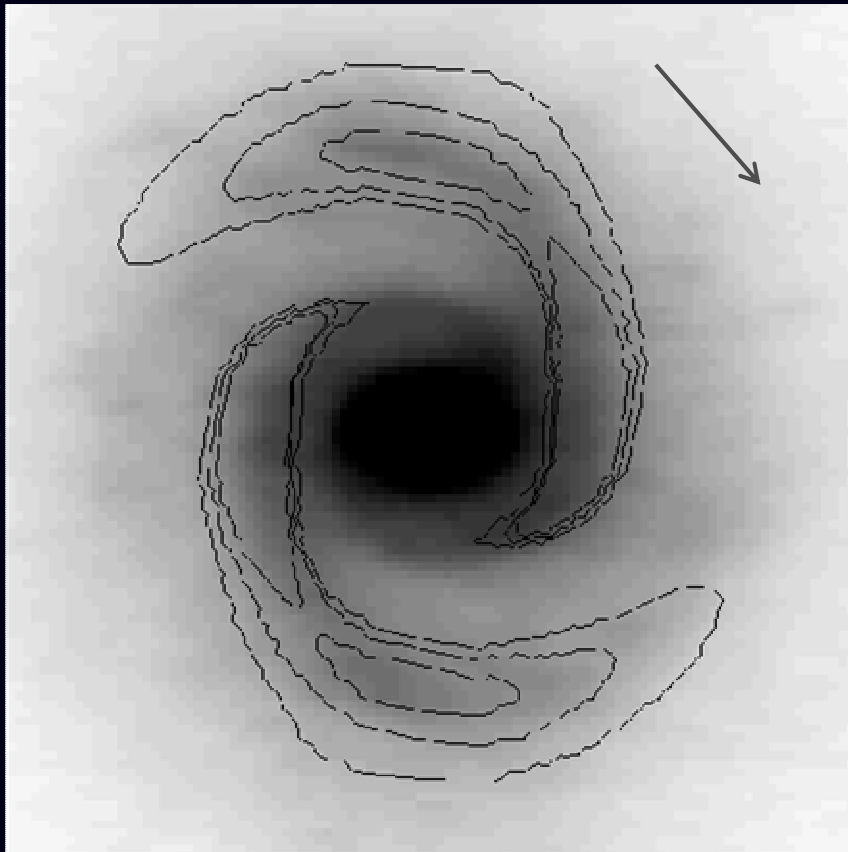
Mises en évidence par la modulation des bras spiraux



# Décomposition des ondes

La théorie des ondes de densité prévoit des ondes leading < trailing

Mises en évidence par la modulation des bras spiraux

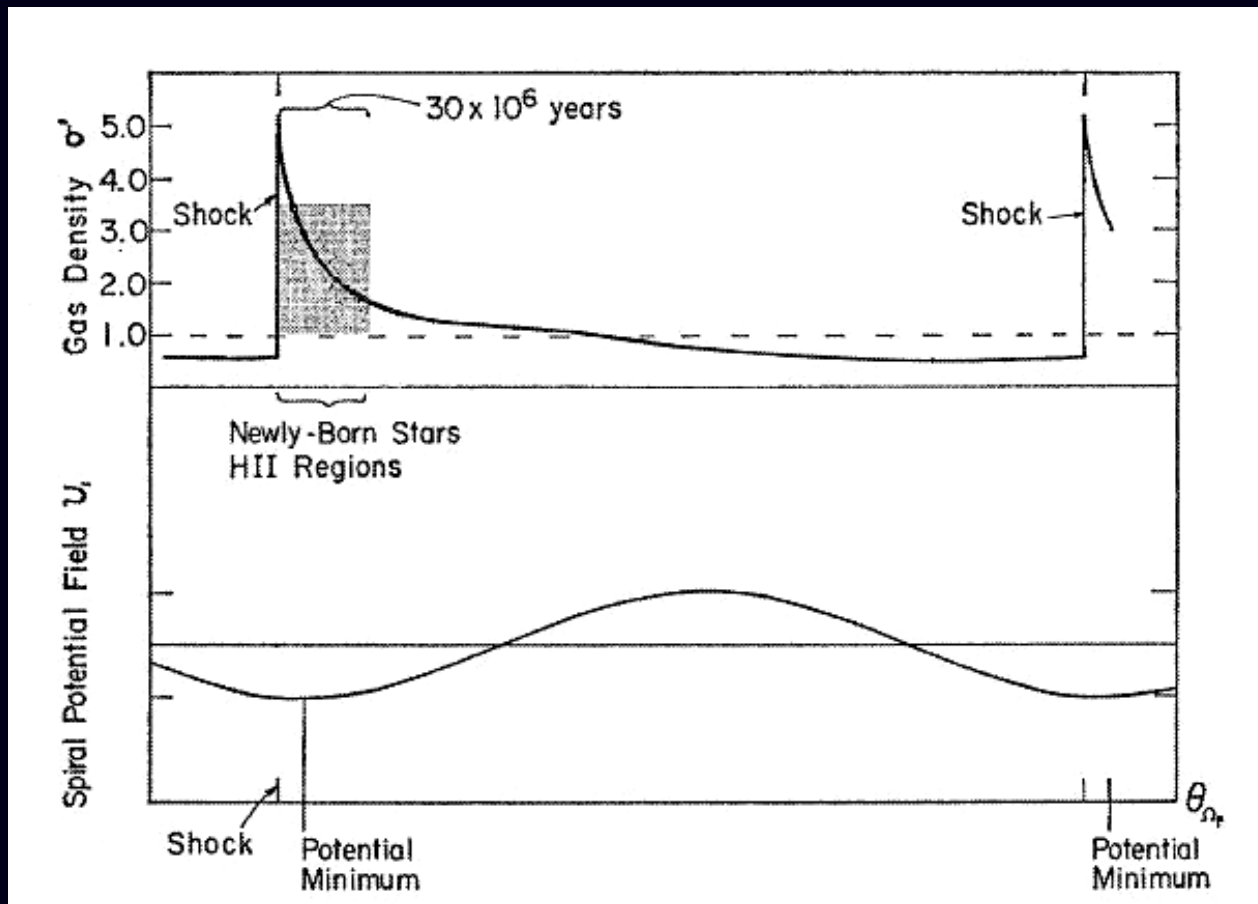


- Succès de la théorie des ondes de densité (+*streaming motions*)
- Aussi observé dans des spirales flocculentes!

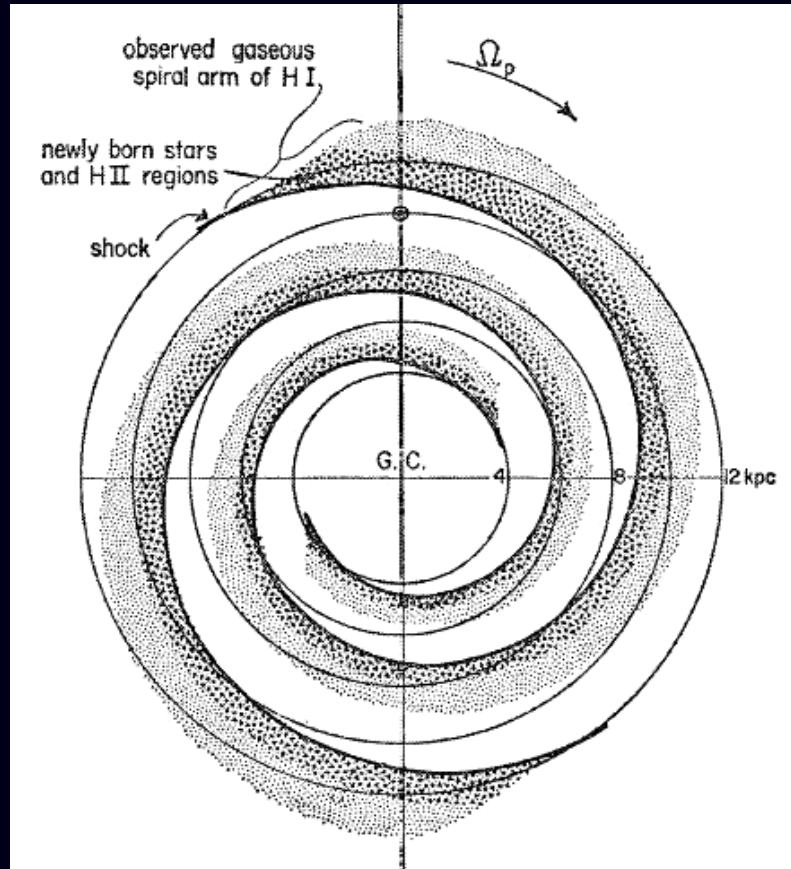
# Réponse du gaz

Gaz interstellaire :  $\sigma \sim 6-10$  km/s

Très sensible au potentiel des bras : forte compression ET choc



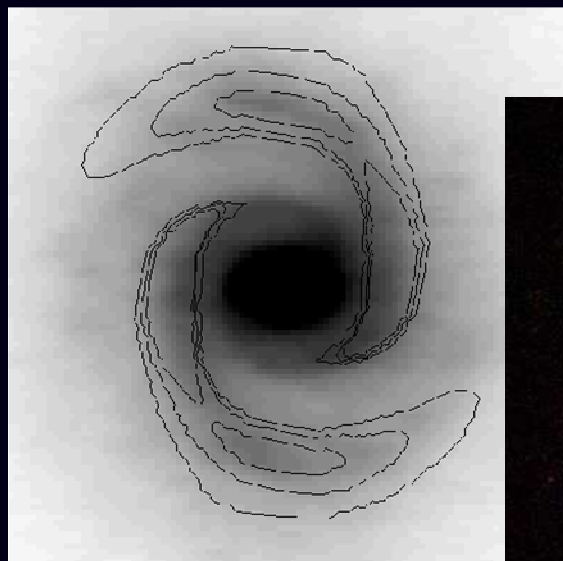
# Formation stellaire induite



## Visibilité des bras :

- Très visible pour le gaz (choc)  
(contraste  $\sim 10$ )
- Très contrastés en B (étoiles jeunes formées in-situ), mais parfois « fragmentés » par la poussière
- Moins contrastés en R et NIR  
(contraste  $\sim 0.5$ )  
mais trace la distribution de masse sans absorption ou variations du M/L





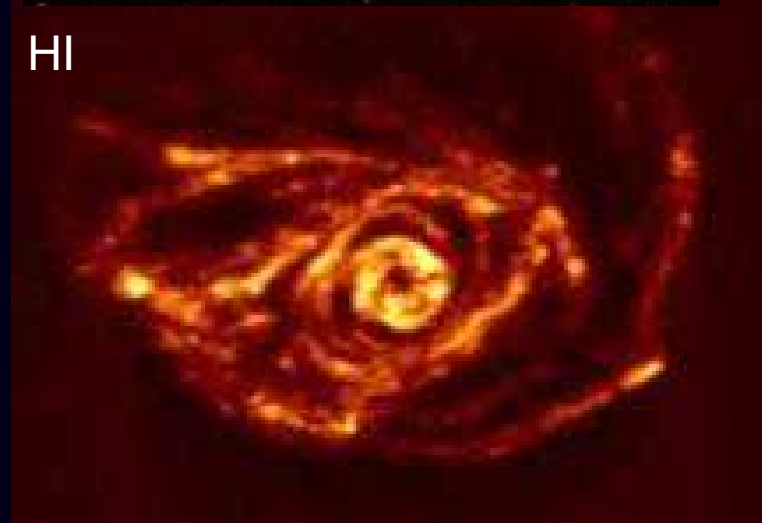
NIR



Visible



UV



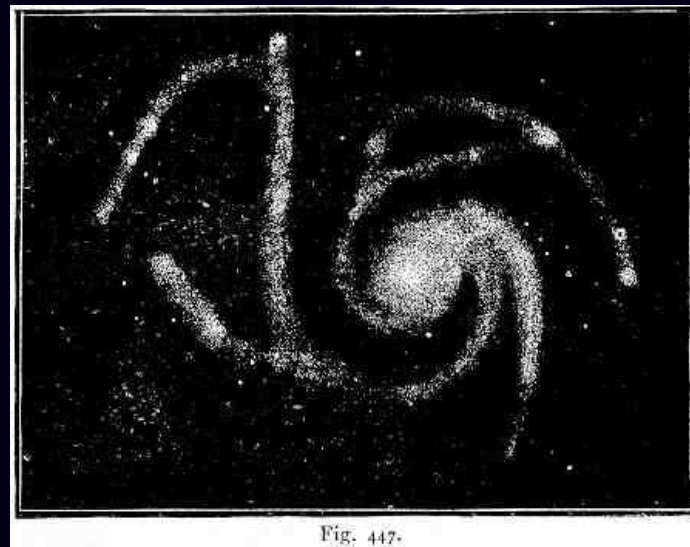
HI

# Historique

Découverte des bras spiraux : Lord Rosse ~1850

(M33, M101, M51...)

*“Much as the discovery of the forms may be calculated to excite our curiosity ... We have no fair ground even for a plausible conjecture.”*



# Historique

Découverte des bras spiraux : *Lord Rosse* ~1850  
(M33, M101, M51...)

1940-1950 : Théories cinématiques, théorie de circulation  
... et “winding problem” (*Lindblad, Oort*)

60s : Cause = champ magnétique ou gaz/poussière (*Baade*)

1964-66 : Autogravité des disques, théorie des ondes de  
densité (*Toomre, Lin & Shu*)

70s : Réflexion/réfraction des ondes, feedback et damping  
(*Lin, Kalnajs, Linden-Bell*)

Réponse du gaz (*Roberts*)

80s : Rôle de l'amplification du swing (*Toomre*)

90s : Modulation des bras spiraux, ondes leading sous-jacentes  
(*Elmegreen*) confirmant les ondes de densité

+ décomposition des modes et vitesse des ondes (masse du disque) (e.g.  
*Puerari et al. 2000*)

# Les barres



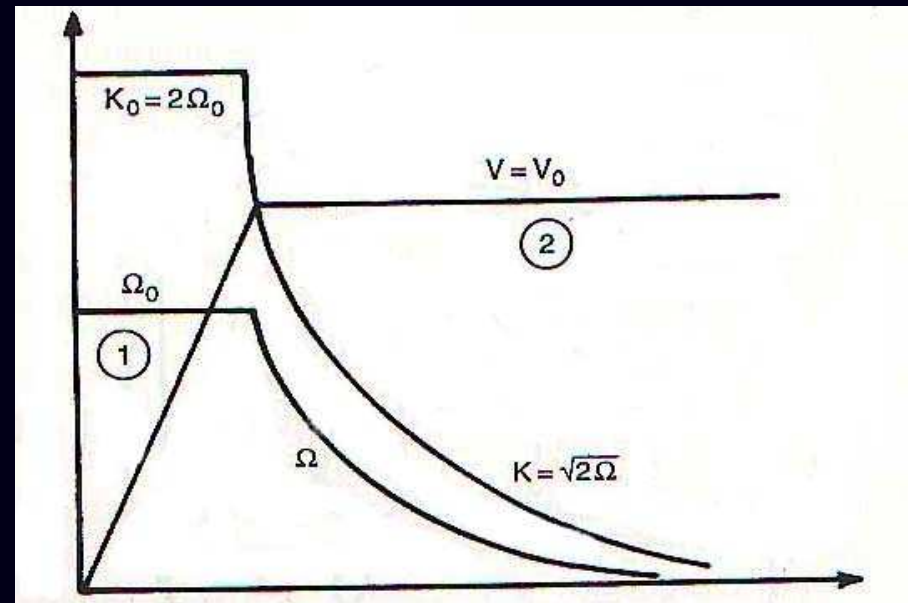


# Nature des barres

Dans les régions centrales  
+ et dans la corotation :

- Plus de réflexions sur CR interne
- Plus de shear

⇒ On peut avoir des  
ondes leading et trailing  
d'intensité comparables



⇒ Ondes “stationnaires” barrées



# Nature des barres

Observationnellement:

Des ondes à *phase* constante  
(pas d'enroulement)

- Excellent moyen de les distinguer des bras spiraux  $m=2$
- Omniprésentes (NIR) même si difficile à voir à (BVR) car poussière et ISM ne suivent pas la barre (cf suite)

optique 1/3 SB 1/3 SAB 1/3 SA  
NIR (2000+) > 80% de barres!

# Formation

Dans la théorie des ondes de densité, la barre est une onde “à moment angulaire négatif”.

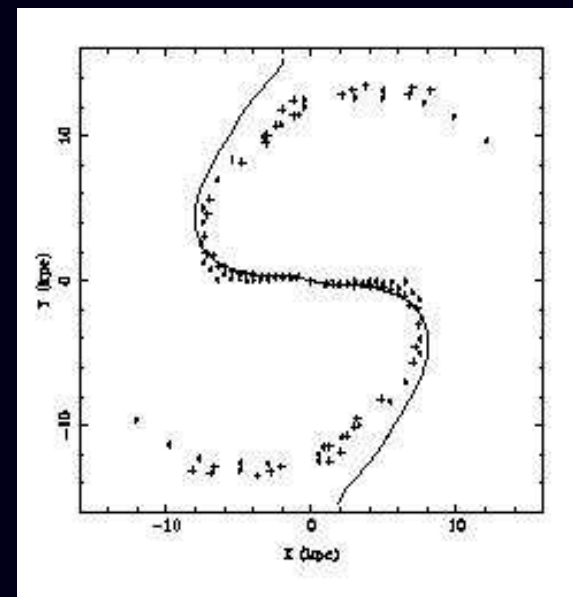
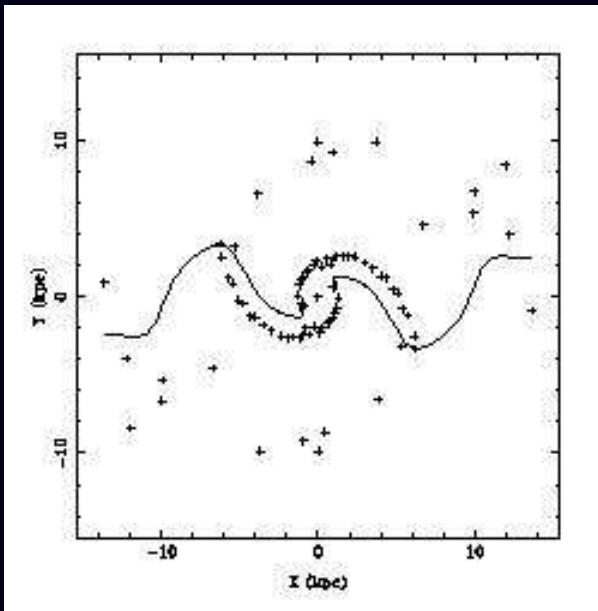
Pour passer d'un disque symétrique, ou spiral, à un disque barré, il faut lui enlever du moment angulaire.



# Redistribution du moment angulaire

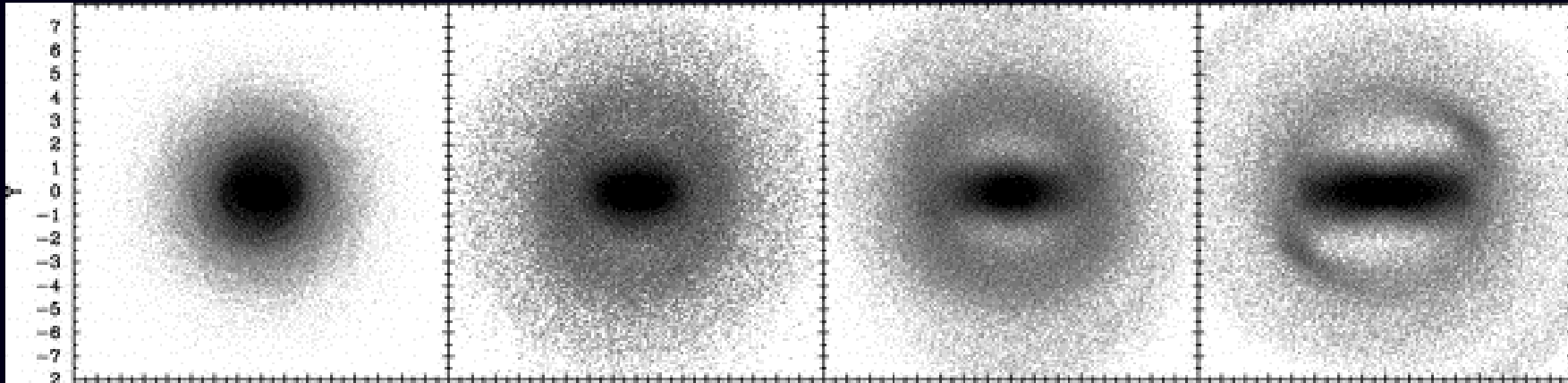
Formation d'une barre / rôle des bras spiraux

- La formation d'une structure spirale suffit à transférer le moment angulaire intérieur  $\rightarrow$  extérieur
- Déphasage potentiel/matière  $\Rightarrow$  couples de gravité.



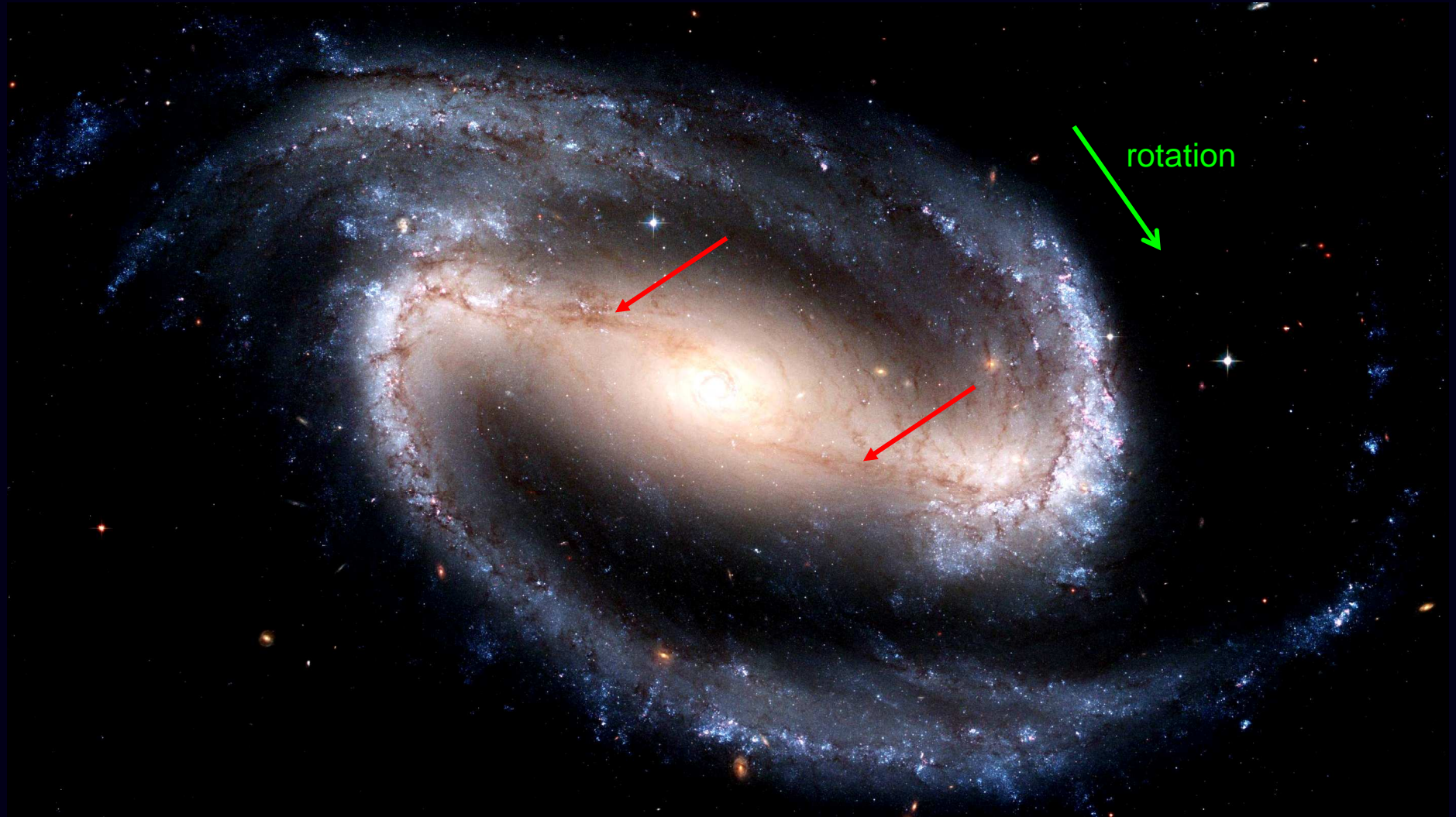
# Redistribution du moment angulaire

Formation d'une barre / rôle du halo

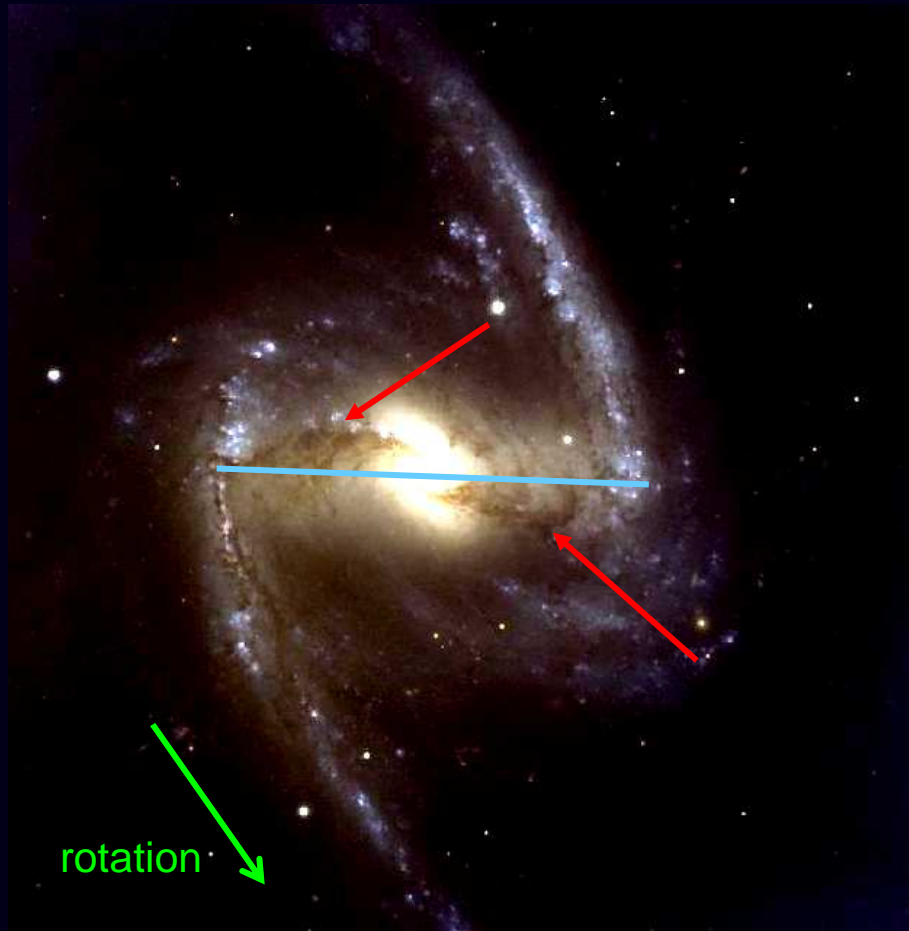


- La friction sur un halo (noir) massif peut réduire le moment angulaire du disque central
- Peut former une barre sans bras spiraux (Athanasoula 02)
- Essentiellement pour les S0. Le transfert de moment par les bras spiraux domine dans les spirales

# Réponse du gaz



# Réponse du gaz



## Formation stellaire:

- A priori excitée dans les chocs et la turbulence

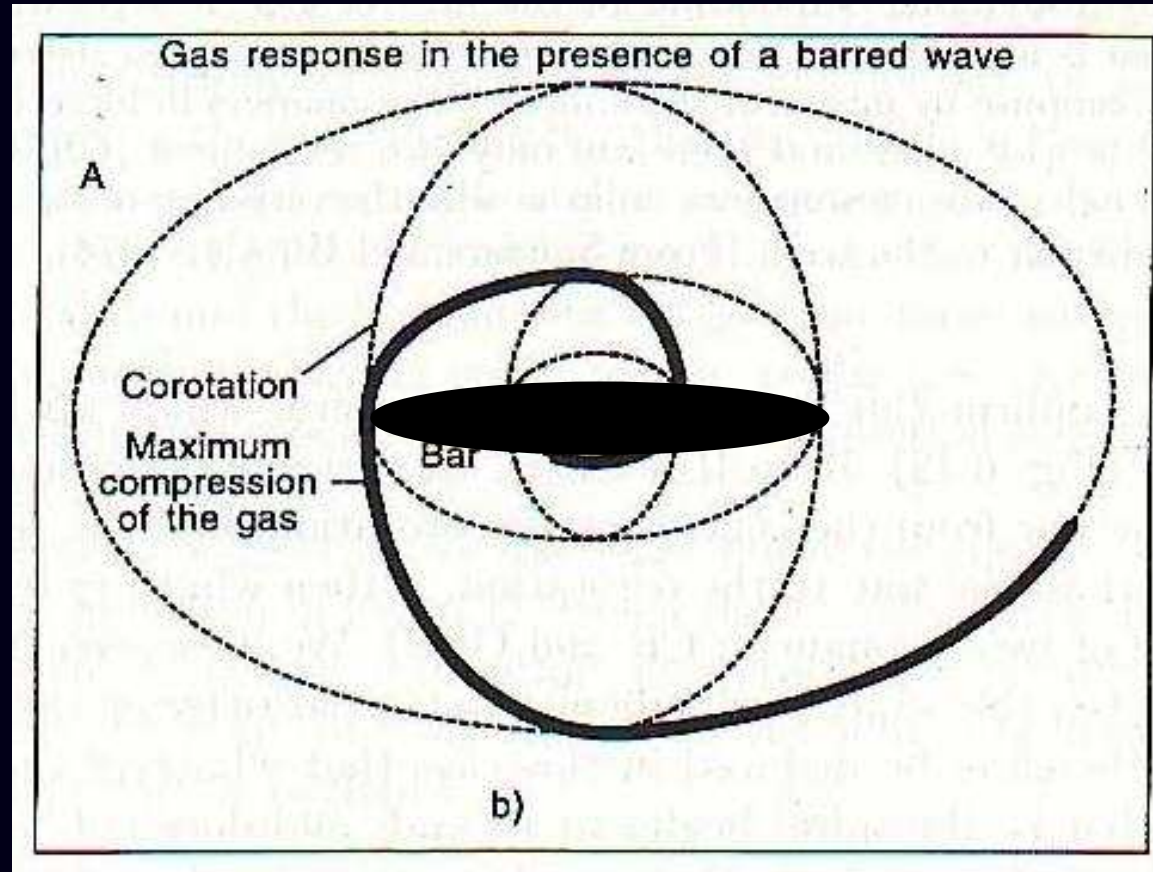
- Peut-être parfois inhibée? si la barre « vide » le gaz...

En tout cas pas de fort starburst le long de la barre.

Possibilité d'un starburst central induit.

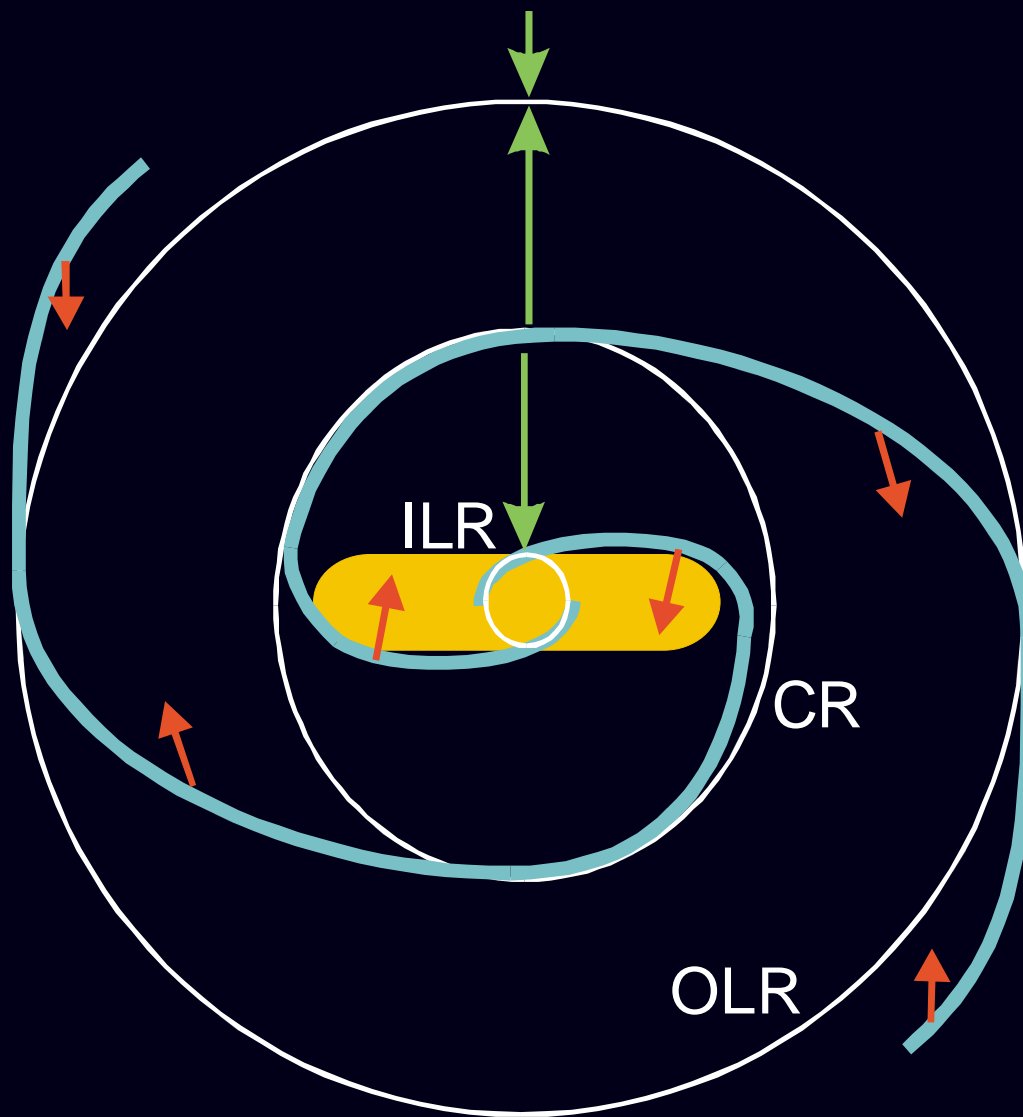


# Anneaux résonants

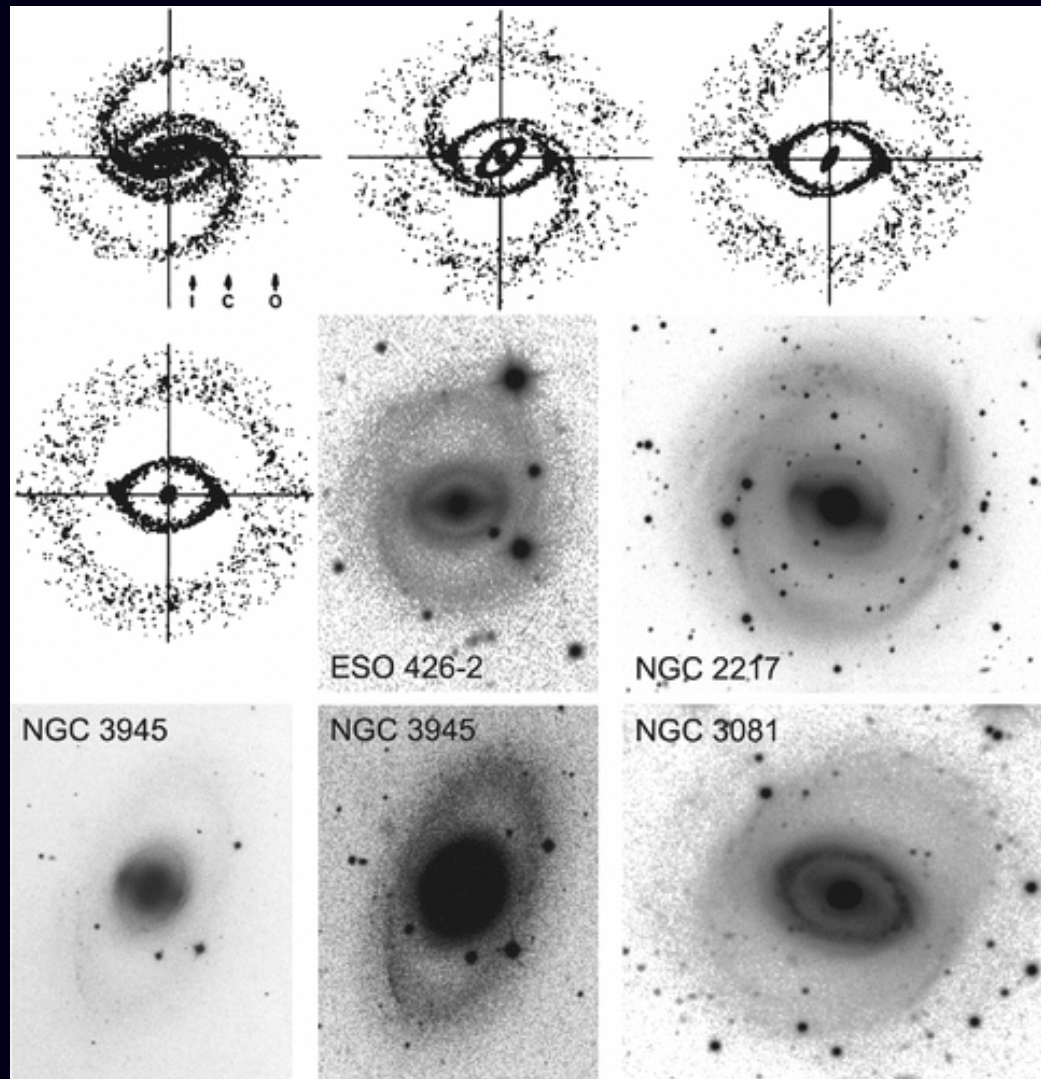


Le gaz tend à s'aligner sur les orbites périodiques p/r à la barre (=positions des résonances), mais chocs (imposs. croisements de lignes de courants)  
=> Compression du gaz sur deux bras, changement de résonance chaque  $\frac{1}{4}$ -de-tour

# Anneaux résonants



# Anneaux résonants

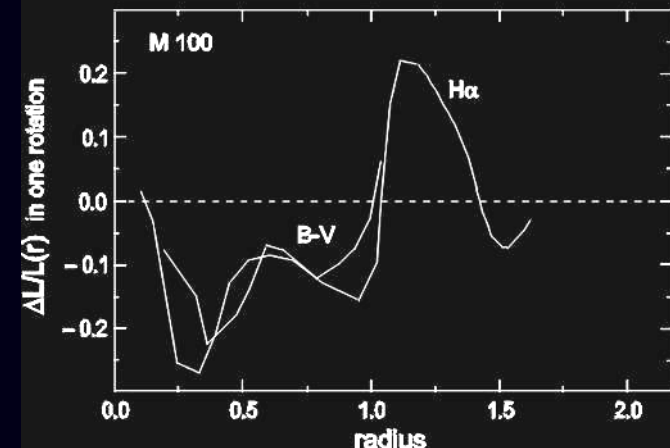
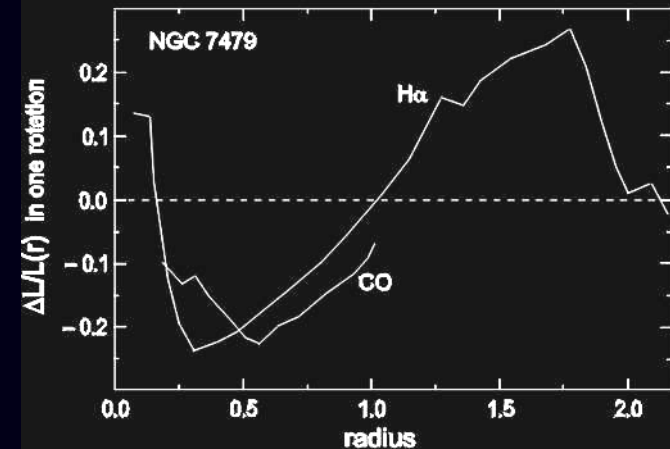
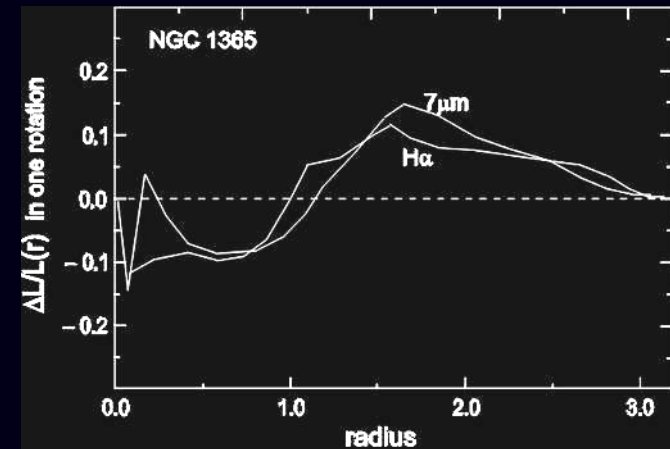
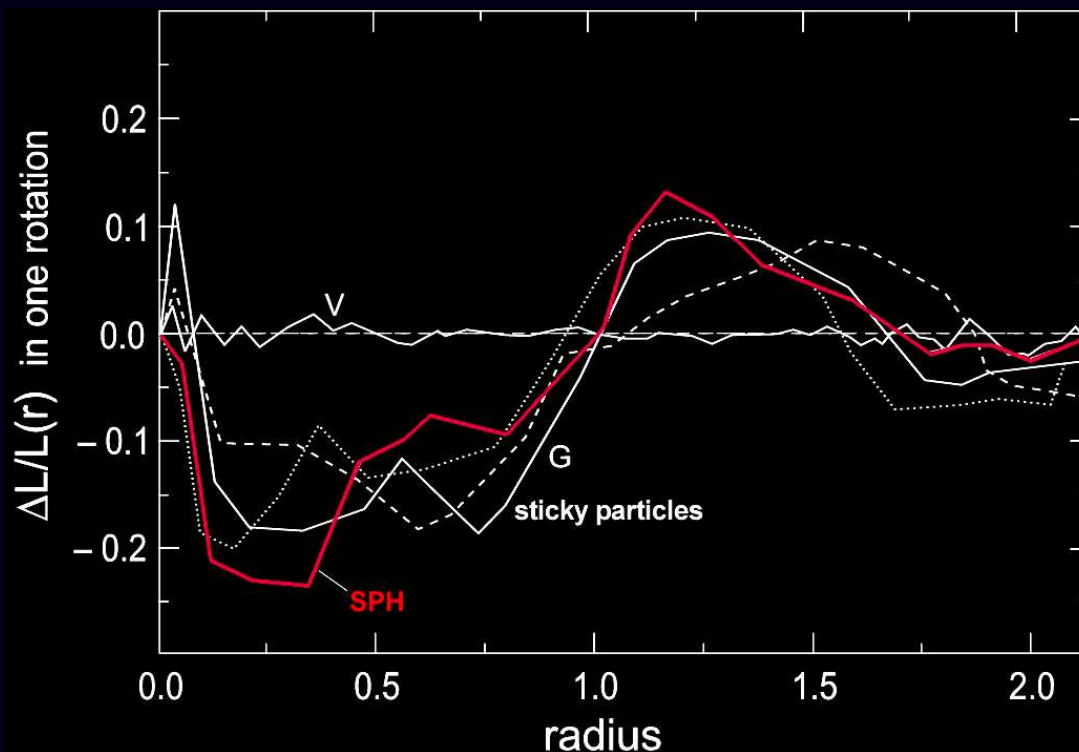


# Gravity torques

## Observations and simulations

Observations vs. sticky-particles + SPH:

- Gas loses 10-15% of its angular momentum per rotation (inside CR)
- Viscosity is negligible (in sticky-particles.)





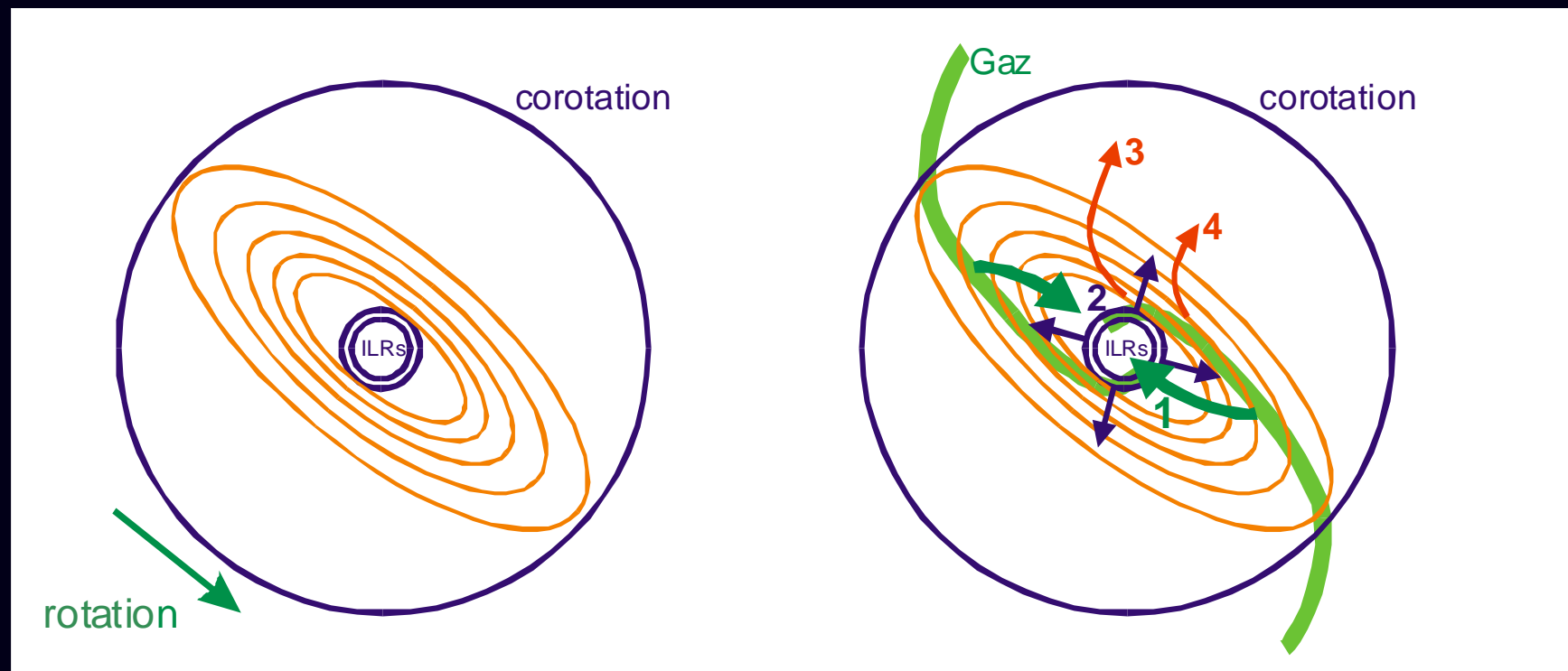
# Evolution of bars

*Auto-destruction ?* (Hasan, Norman, Pfenniger, Friedli... 1990-93)

Gas infall induced by the bar (leading shock)

→ growth of a **central mass concentration** (CMC)

→ bar weakening



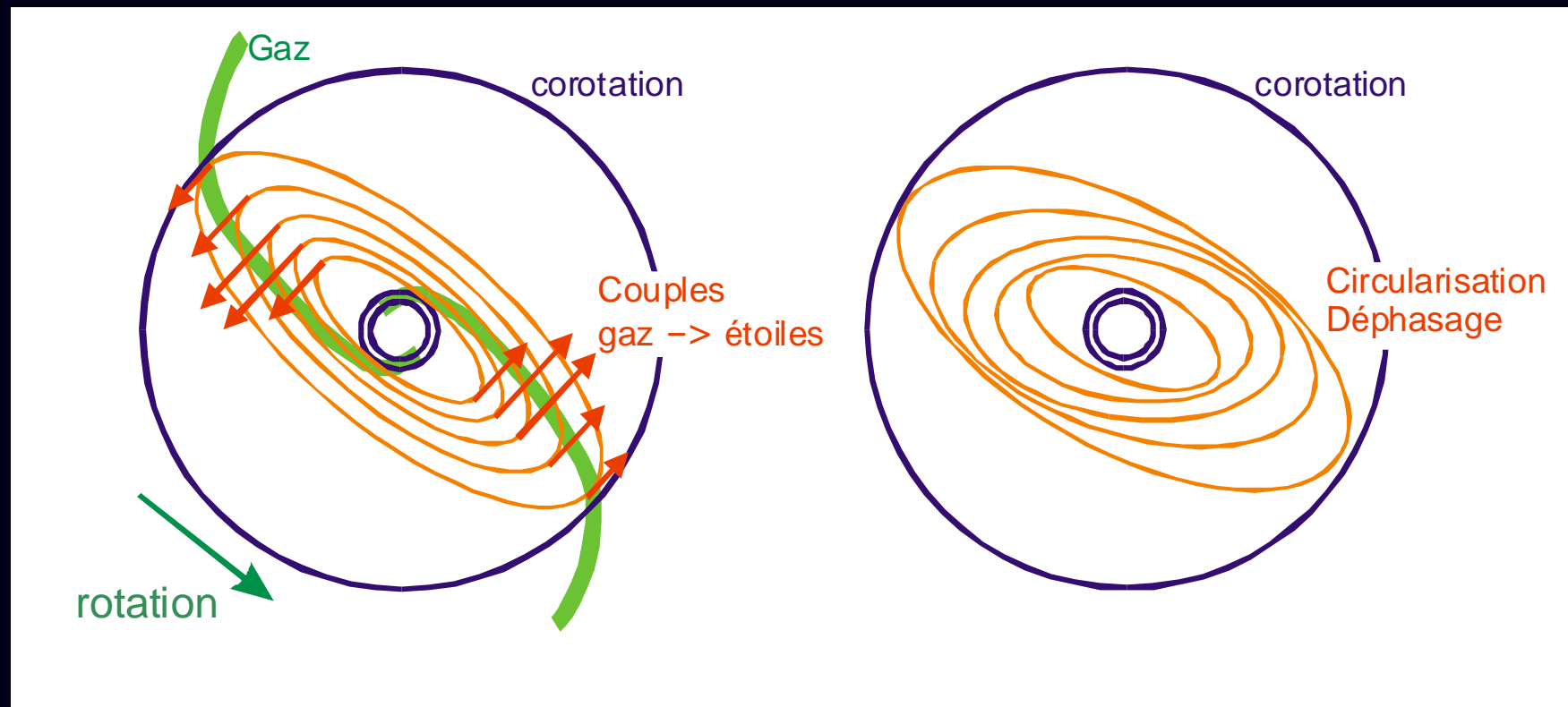
# Evolution of bars

*Auto-destruction ?* (Hasan, Norman, Pfenniger, Friedli... 1990-93)

Gas infall induced by the bar (leading shock)

→ goes with **positive torques from gas to stars**

→ bar weakening



# Destruction of bars

1- Central mass concentration

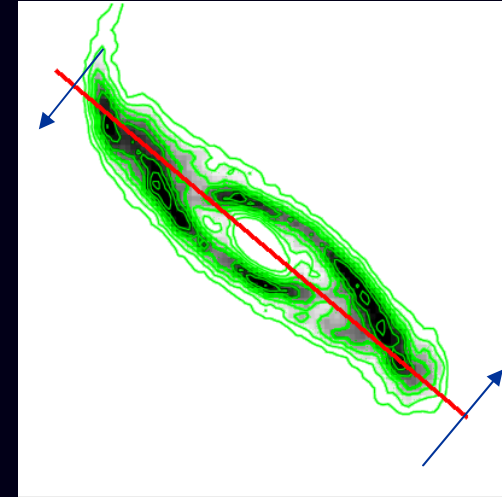
2- Transfer of angular momentum to stars

1+2 => **bar dissolved in a few billion years**

**Gravity torques realistic (vs. observations)**

**=> 1 and 2 realistic in simulations**

**=> Bar destruction realistic in simulations**



*How much gas required to dissolve a bar?*

5-10% of the baryonic mass

=> many present bars may be long-lived

BUT bars at  $z=1$  must have been destroyed before  $z=0$

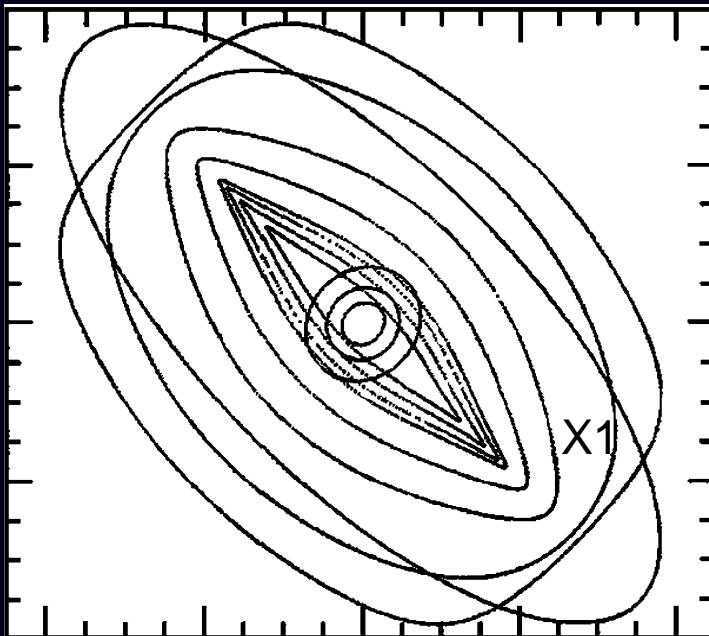
=> REFORMATION ?

# Disques/barres nucléaires

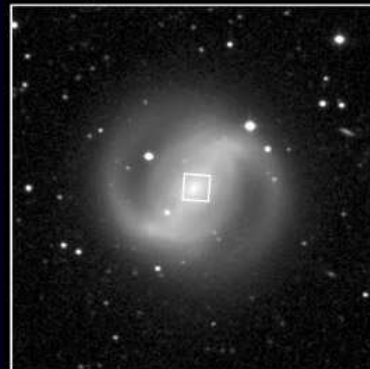
Les barres se développent :

- dans la corotation
- à l'extérieur de l'ILR (réson. Interne de Lindblad)

Dans l'ILR, plus d'orbite de famille X1, disque découplé



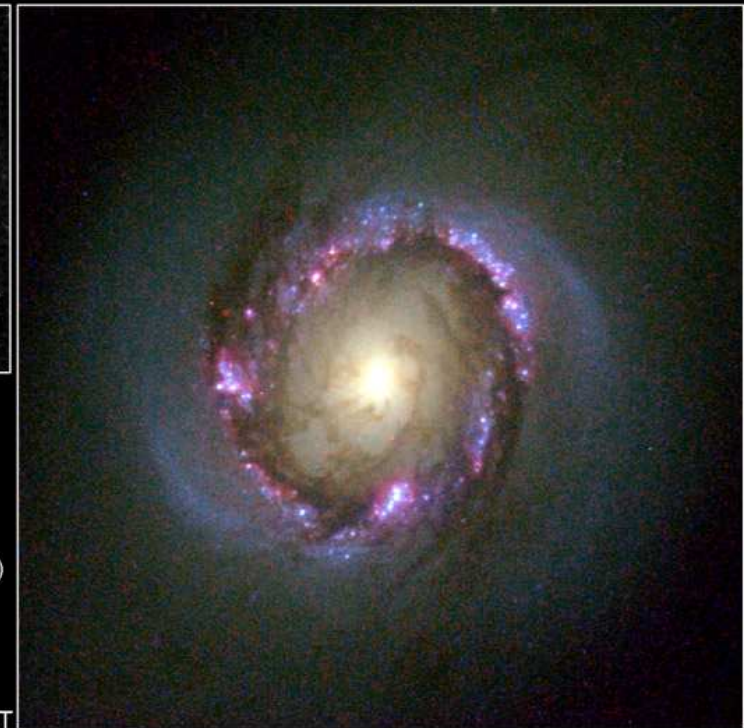
Galaxy NGC 4314



McDonald Observatory

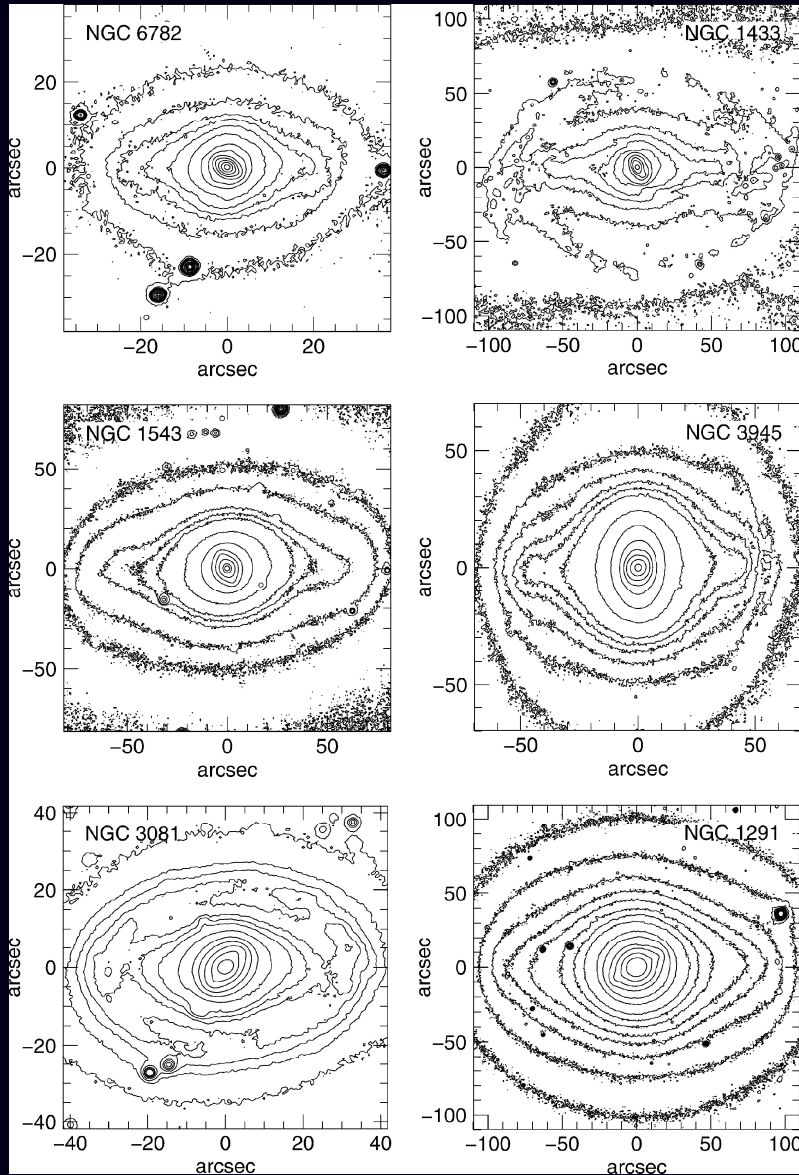
PRC98-21 • June 11, 1998  
ST ScI • OPO  
G. F. Benedict (University of Texas)  
and NASA

Hubble Space Telescope • WFPC2



HST

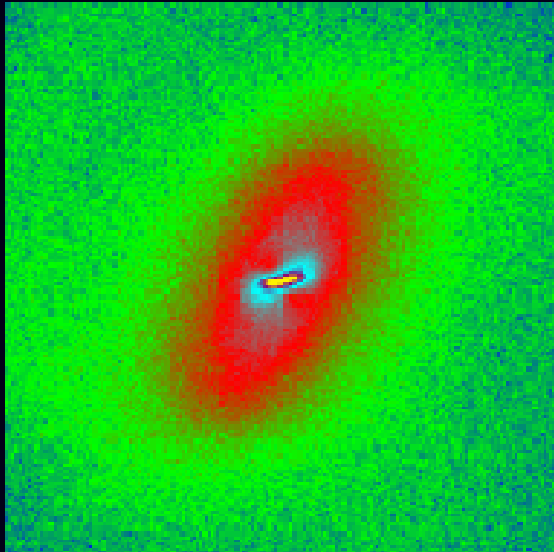
# Disques/barres nucléaires



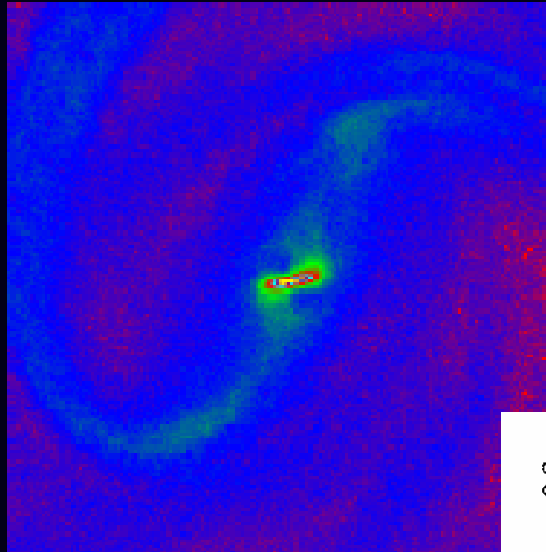
Souvent associés à un «  $\sigma$ -drop » central. Disque jeune, probablement formé par l'accrétion de la première barre

# Disques/barres nucléaires

étoiles

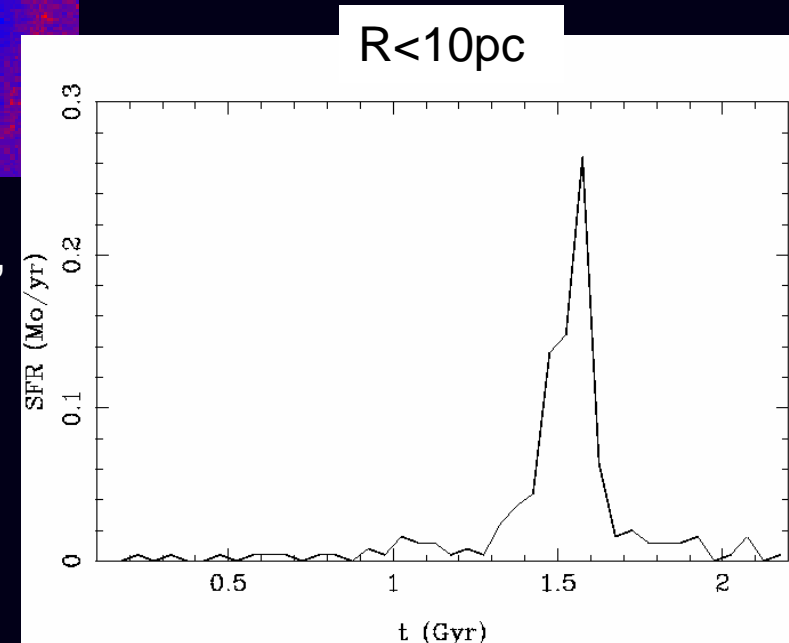


gaz

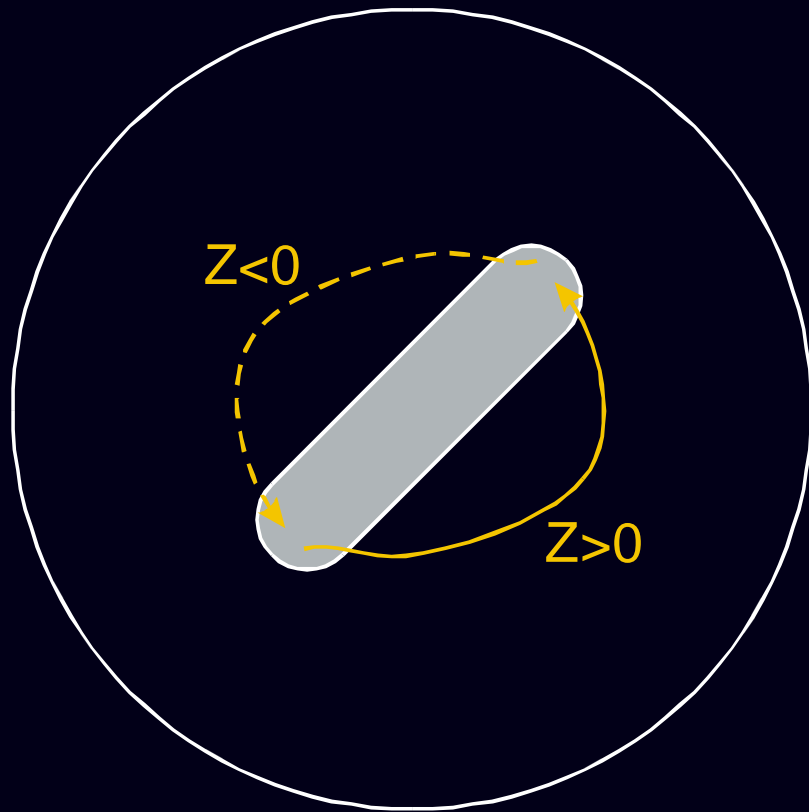


Même réponse du gaz que pour la barre principale, mais à l'échelle de  $\sim 10$ - $100$  pc, et en général sans résonance interne (ou troisième barre?)

⇒ Mécanisme possible pour alimenter un starburst central, et peut-être un AGN.



# Résonances verticales



Rapport entier entre:

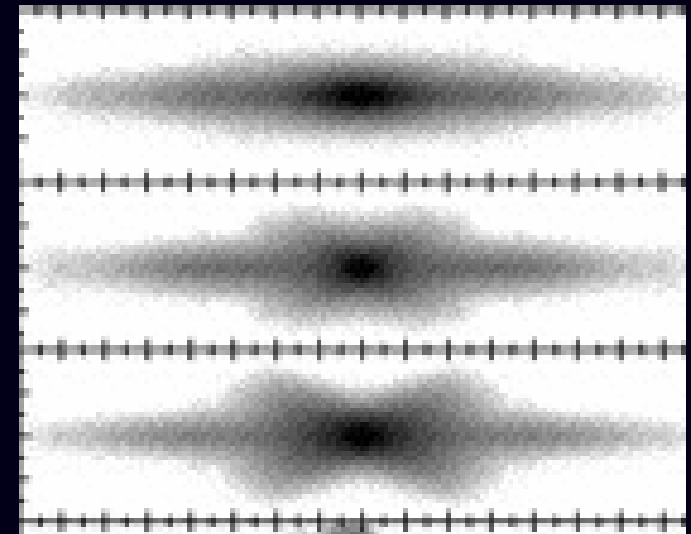
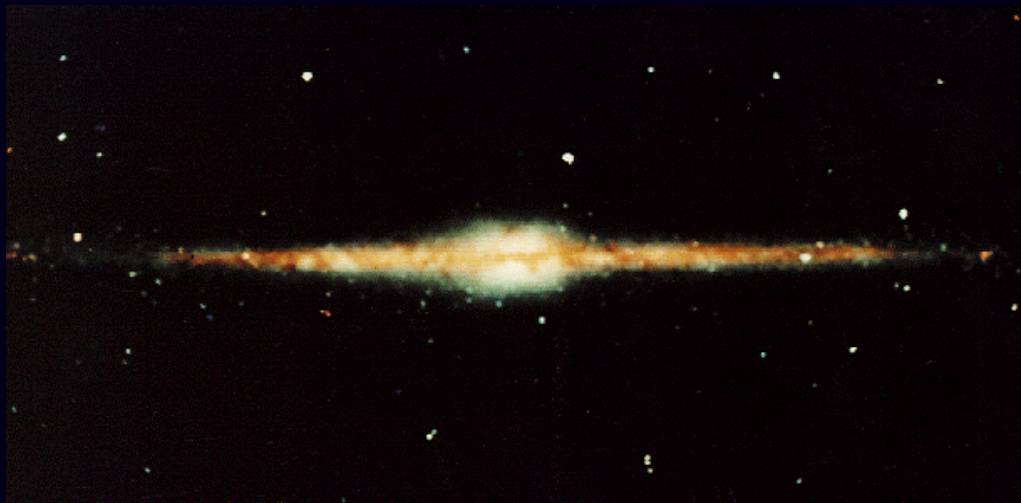
- vitesse de rotation de la barre
- fréquence d'oscillation verticale des étoiles

=> Amplification des mouvements verticaux (perp. au disque) ; épaississement du disque.

Les résonances verticales les plus fortes sont dans les régions externes de la barre



# Alimentation du Bulbe



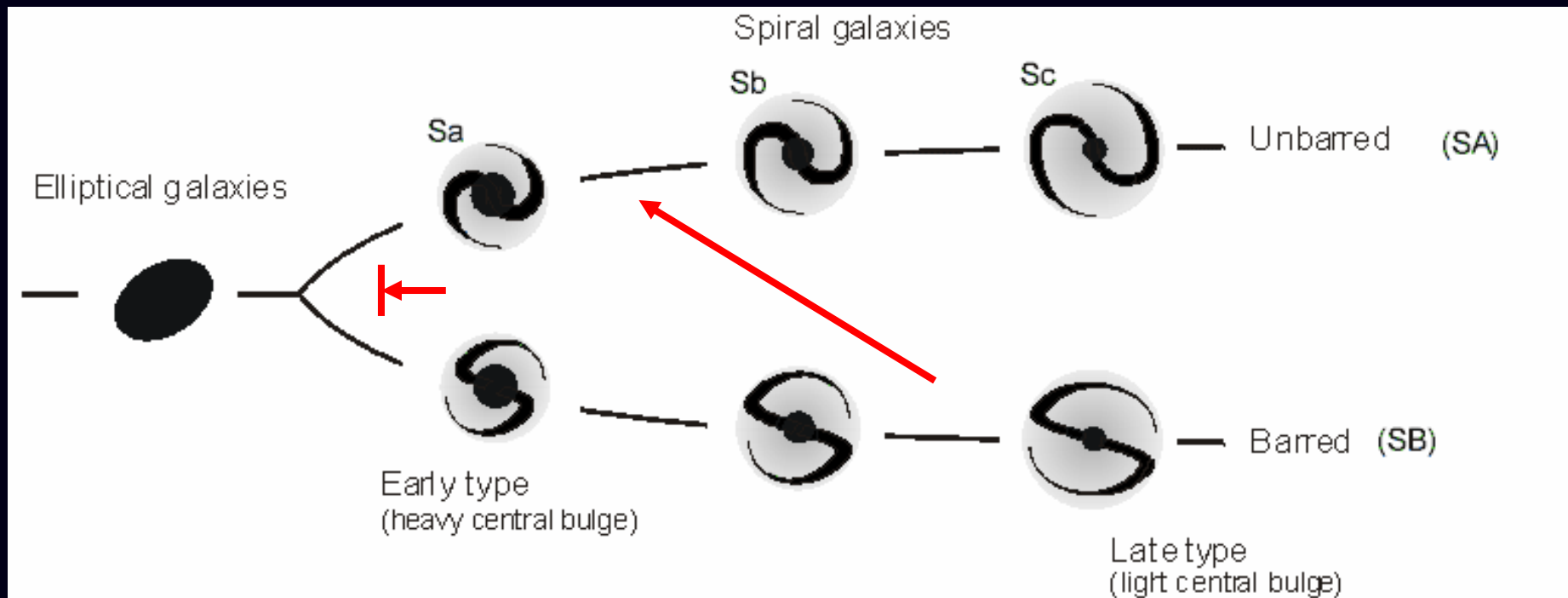
Bureau & Athanassoula 03

MW Cobe/Dirbe



# L'évolution séculaire

# Séquence de Hubble

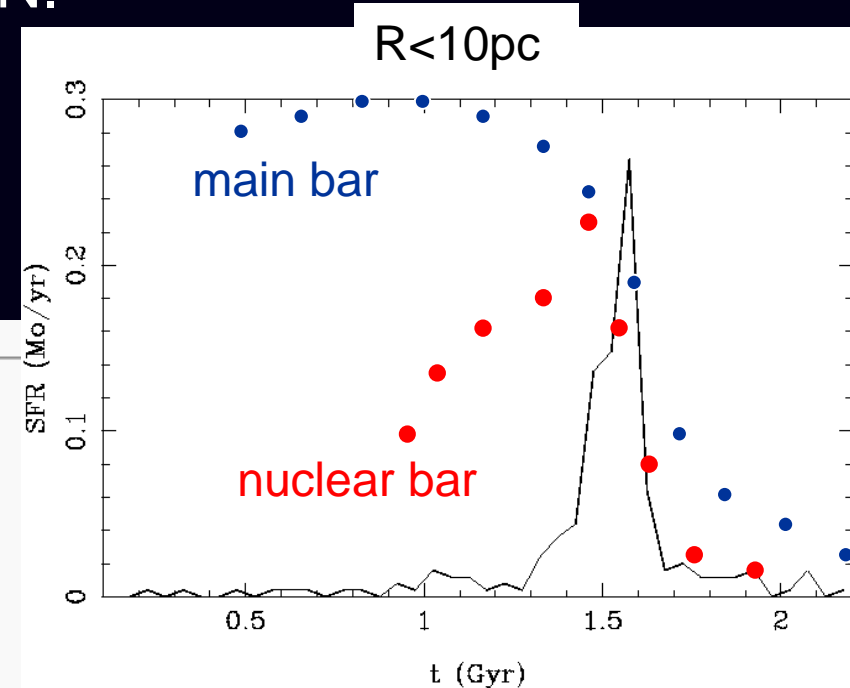
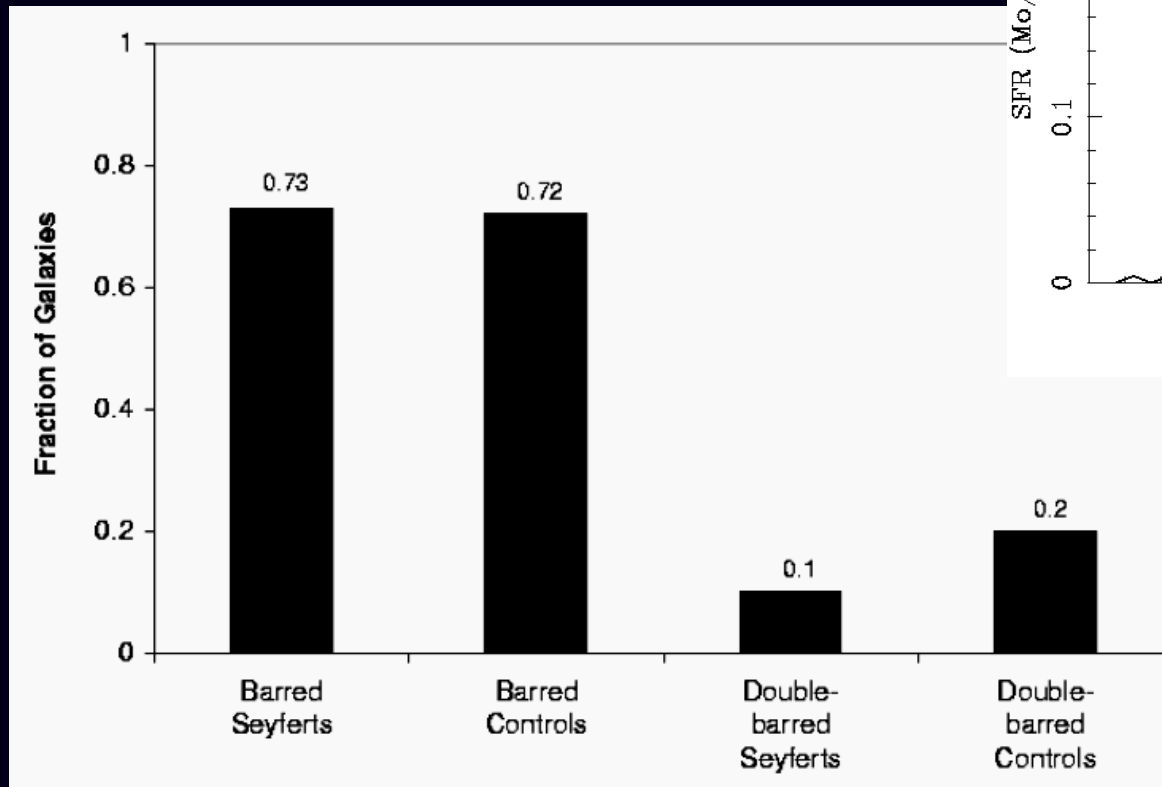


- Évolution naturelle vers les types non barrés + précoces
- Croissance du bulbe (et TN central simultané ?)
- Évolution vers les lenticulaires S0 difficile ; Elliptiques impossible

# Barres et AGNs ?

Anti-corrélation double-barre/AGN.

Destruction du système de double barre avec l'alimentation du burst central puis de l'AGN

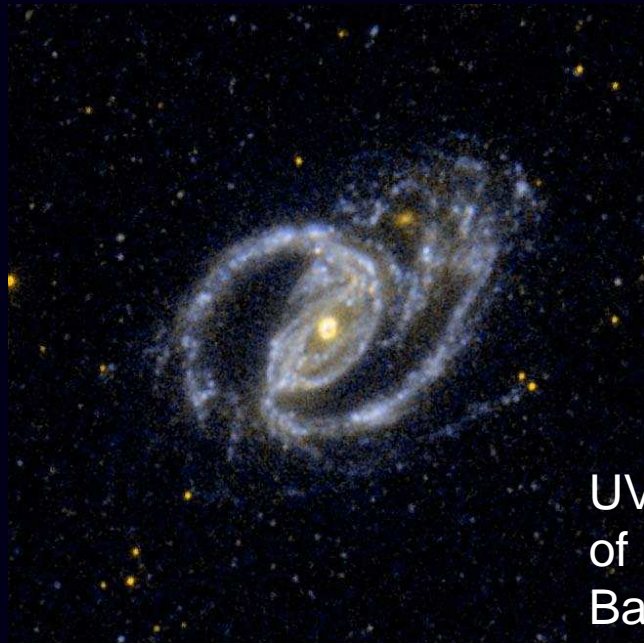


(e.g. Mulchaey & Regan 97, Laine et al. 02)

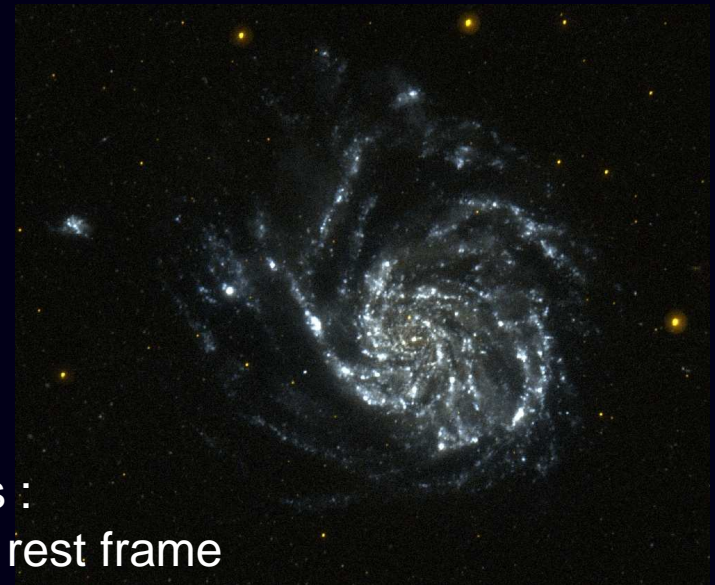
# Quand y a-t-il eu des barres?

A  $z=1$ , invisibles en optique ( $\sim$  B ou UV rest-frame)

Mais deviennent visibles si NIR ou MIR (bandshifting)



UV/Galex images  
of local barred galaxies :  
Bars unseen in the UV rest frame



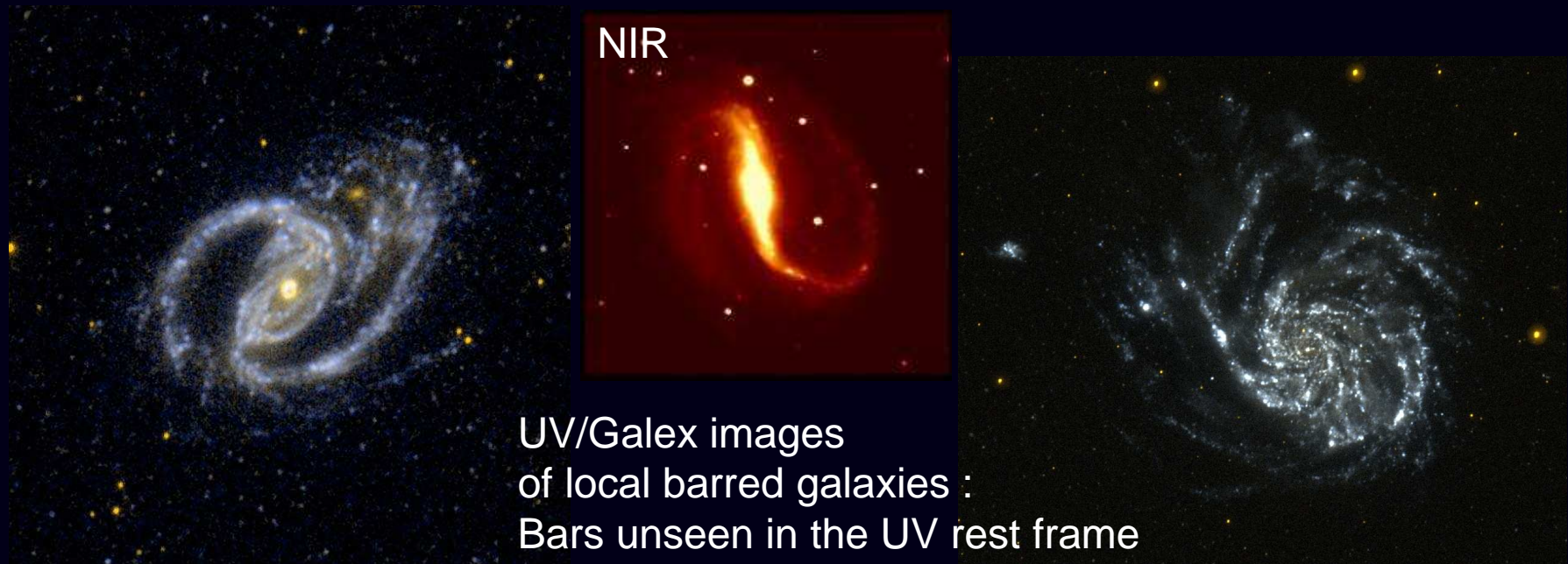
Déjà présentes a  $z=1$  (et fortes).

=> rôle moteur dans l'évolution séculaire, avec possibilité d'évolution cyclique (phases AGNs par exemple?)

# Quand y a-t-il eu des barres?

A  $z=1$ , invisibles en optique ( $\sim$  B ou UV rest-frame)

Mais deviennent visibles si NIR ou MIR (bandshifting)



Déjà présentes a  $z=1$  (et fortes).

=> rôle moteur dans l'évolution séculaire, avec possibilité d'évolution cyclique (phases AGNs par exemple?)

# Formation de disques “réguliers”

Les disques (galaxie moins bulbe) ont un profil exponentiel très régulier (sous-jacent aux ondes spirales).

Origine ? Minimisation de l'énergie d'un disque de *gaz*...  
Mais une grande partie des étoiles se forme avant!

Comment redistribuer les étoiles dans un disque régulier, exponentiel, et stable?

- Redistribution de moment par les barres
- Disques “ouverts” en accrétion?
- Instabilités globales puis dispersion des fragments?
- Fusions mineures?

Des hypothèses mais problème non résolu...



