

Galaxies - II

Dynamique ; formation & évolution

Frédéric Bournaud - 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

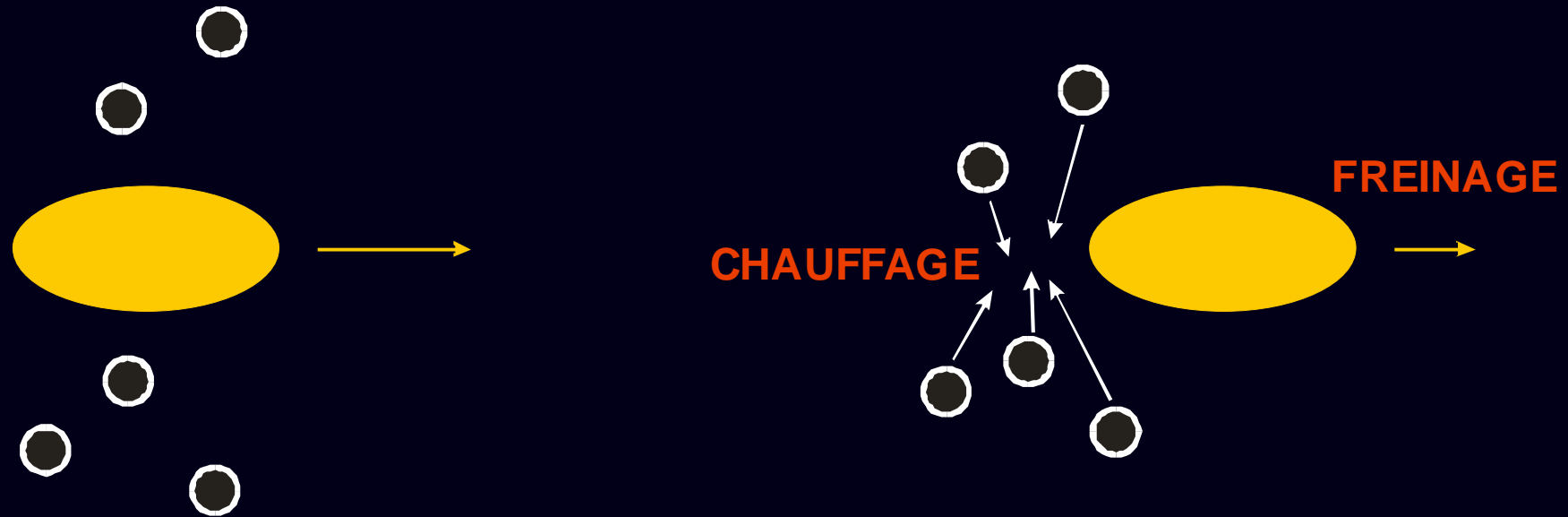
Formation/évolution des galaxies:

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

Collisions de galaxies

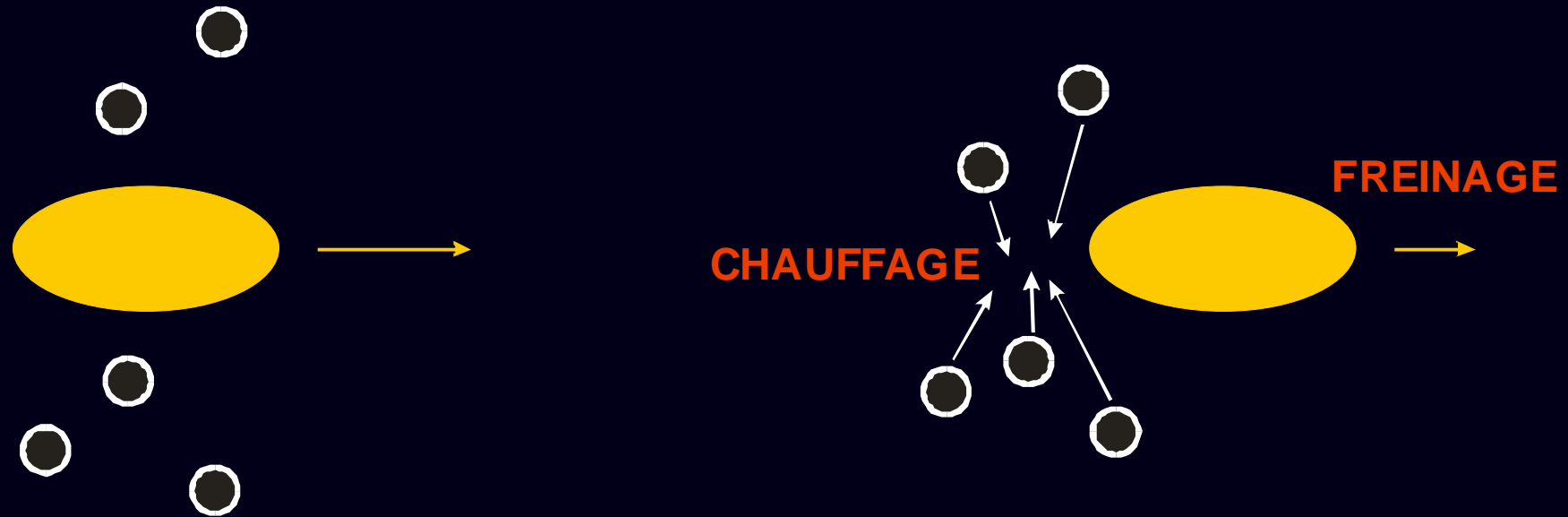


Friction dynamique et fusion



- Friction dynamique :
- concentration de masse dans le sillage
 - freinage
 - possibilité de fusion des deux systèmes
 - simultanément, chauffage cinématique

Friction dynamique et fusion



Formule de Chandrasekhar :

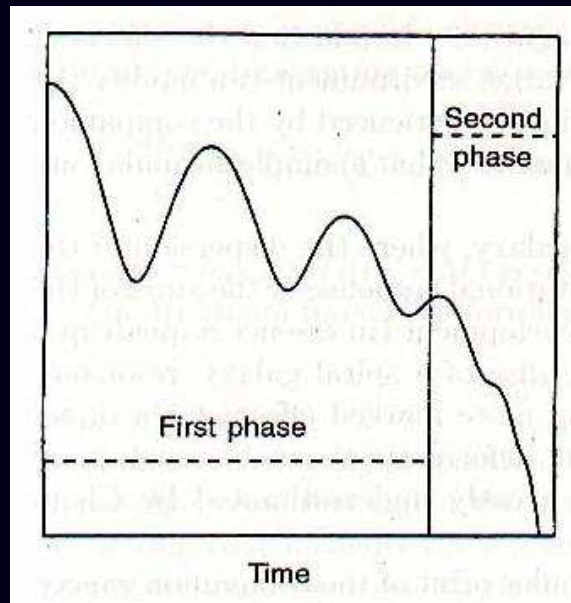
accélération de friction proportionnelle à :

- la vitesse relative des deux galaxies
- la masse de chacune

Force à distance. Croit avec la densité

Collision de deux spirales

- Le freinage débute avant la collision des composantes visibles :
 - Halos de matière noire étendu
 - Force à distance
- Les collisions rapides ($\sim 1000 \text{ km/s}$) ne résultent pas en fusion
- Les collisions lentes ($\sim 50\text{-}500 \text{ km/s}$) résultent en fusion, après éventuellement un certain nombre d'orbites



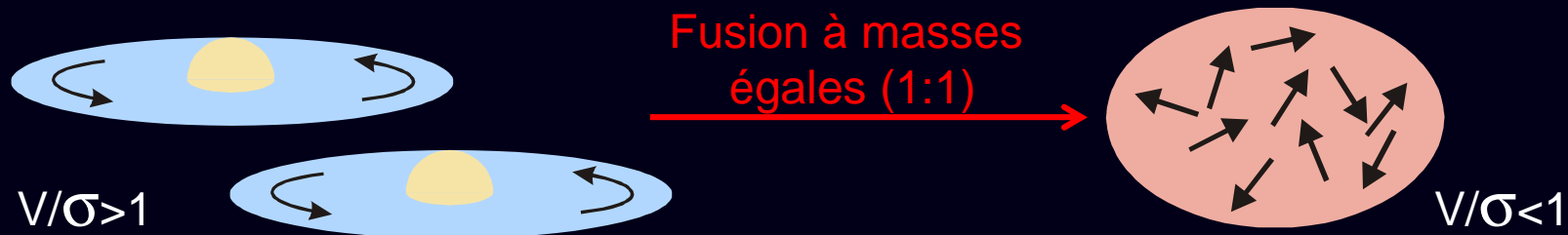
Fusion ; formation des elliptiques

Lors de la fusion de deux spirales (M , V_{coll}):

- leur énergie relative MV_{coll}^2 est dissipée
- chauffage des étoiles $\rightarrow Nm\sigma^2$

\Rightarrow Chauffage typique $\sigma \sim 100\text{-}200 \text{ km/s}$ (après évaporation)
en même temps $V \downarrow$

\Rightarrow Système final maintenu par sa **dispersion** de vitesses.
+ chauffage (relativement) isotrope \Rightarrow système sphéroïdal



Relaxation ; profil radial

2 spirales de même masse

=> fusion par friction dynamique

$$T_{\text{fusion}} = T_{\text{fric dyn}} = 50 - 300 \text{ Myr}$$

$$T_{\text{dynamique}} = T_{\text{orbital}} = 100 - 600 \text{ Myr}$$

=> fusion *rapide* (vs. temps dynamique interne)
donc *relaxation violente*.

Variation de l'énergie d'une étoile :

$$dE/dt = \frac{1}{2} m dv^2/dt + d\Phi/dt$$

- généralement $d\Phi/dt$ négligeable, énergie d'une étoile se conserve en moyenne
- dans la relaxation violente, l'énergie d'une étoile peut varier.

Relaxation ; profil radial

Dans ce processus:

On atteint rapidement un équilibre statistique

Variation de l'énergie individuelle des étoiles

=> contraction du coeur
tendance à l'évaporation des régions externes.

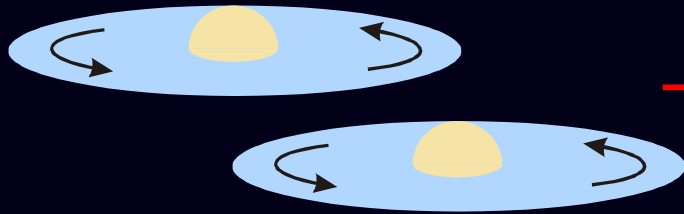
Sersic profile $\mu(r) = \mu_0 \exp [-b (r/r_e)^{1/n}]$ **n increased**

Rq: Cette relaxation violente n'est pas la relaxation à 2 corps (progressive) type évolution des amas stellaires ou globulaires!

Les interactions étoile-étoile ne compte pas dans les galaxies, seulement étoile-potentiel.

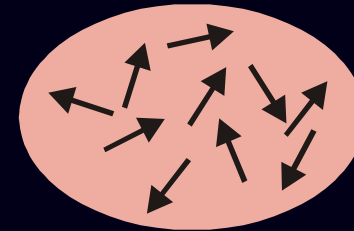
Galaxies spirales et elliptiques

2 Spirales



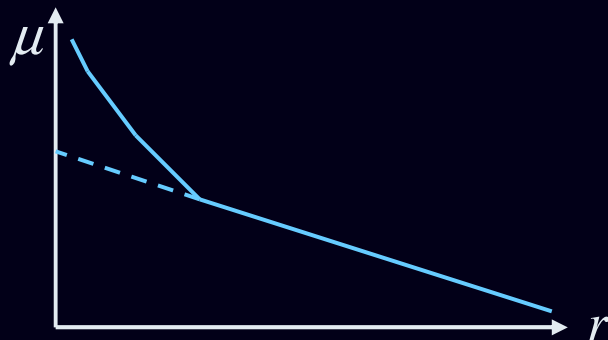
Fusion à masses
égales (1:1)

Elliptiques



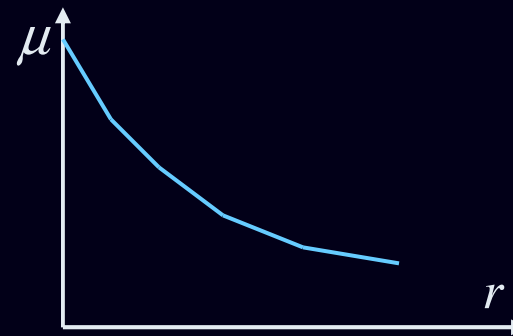
- **Disque** ($r/h \approx 10$)
- **Rotation** ($v/\sigma \approx 4-10$)
- Profil **exponentiel** (Freeman)

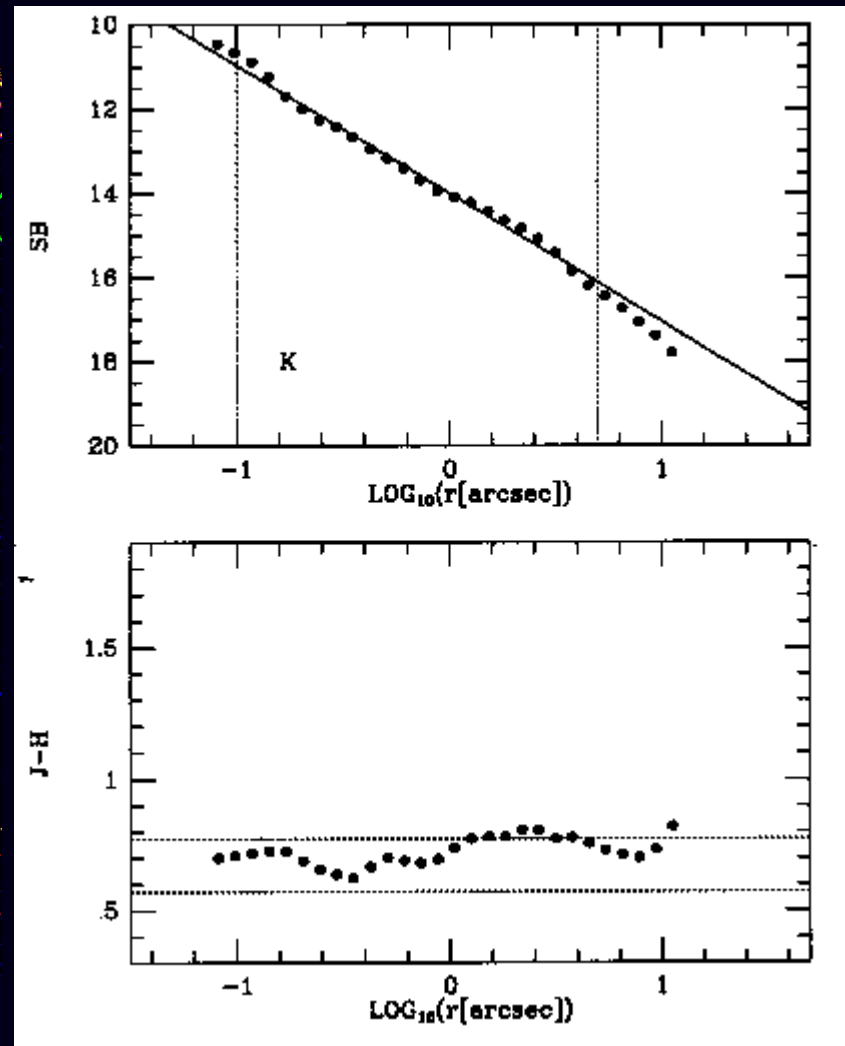
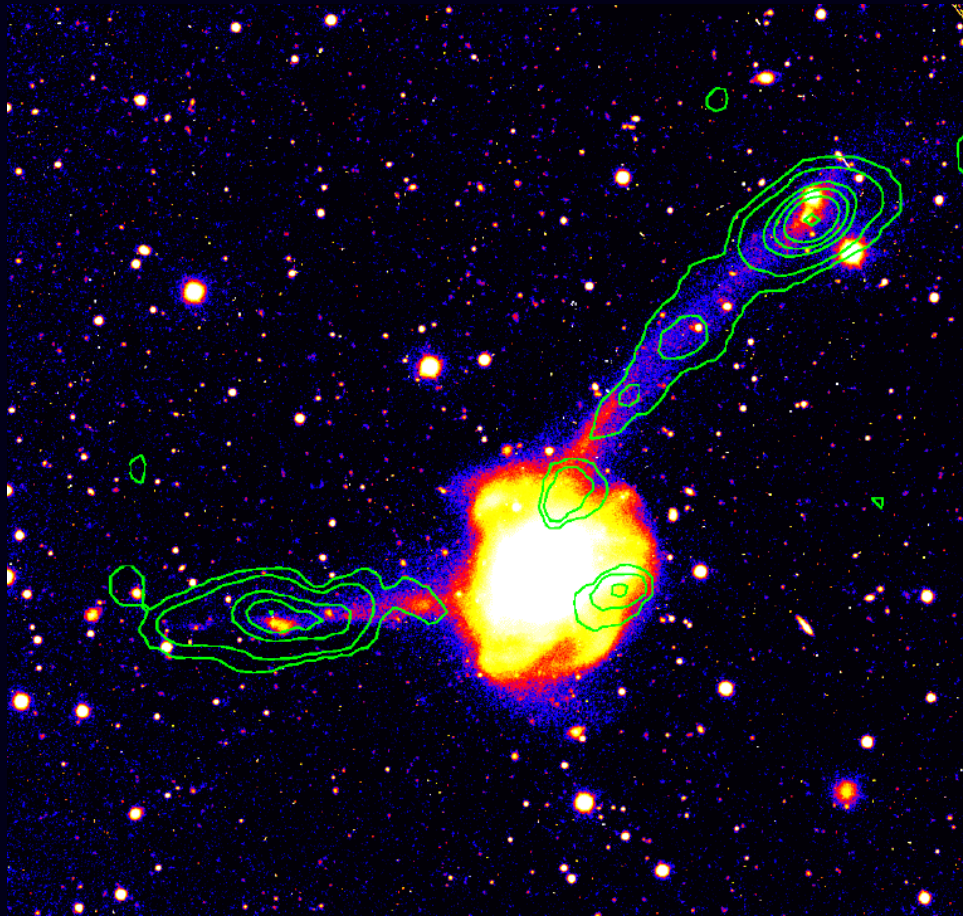
$$L(r) \propto \exp(-r/r_e) \quad (+\text{bulbe})$$

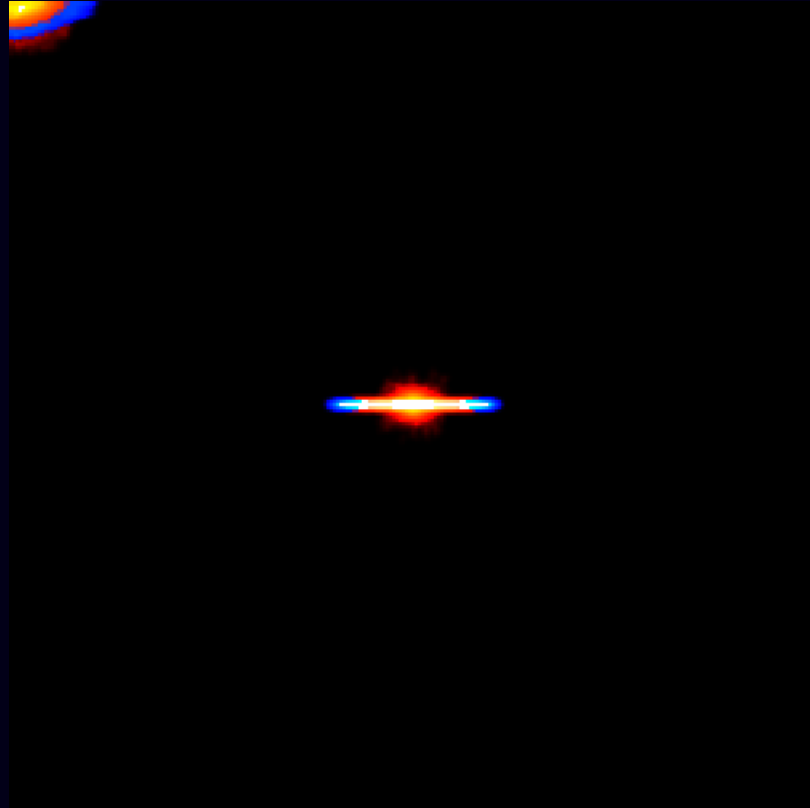


- **Sphéroïde** ($b/a \approx 1-2.5$)
- **Dispersion** ($v/\sigma \approx 0-1$)
- Profil « **$R^{1/4}$** » (de Vaucouleurs)

$$L(r) \propto \exp(-3.33 [(r/r_e)^{1/4} - 1])$$







Fusion « majeure »
de deux galaxies spirales de même masse

Galaxy mergers

Mass ratio

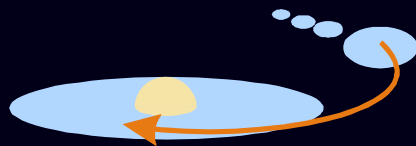
1:100

1:10

1:3

1:1

Minor Mergers



Spiral + Dwarf

=> Disturbed spiral :

Thickening, heating,
bulge fueling...

MODERATE EFFECTS

=> Remnant = **SPIRAL**

Walker et al. 1996



S0-like systems
with major
kinematical heating

Major Mergers



Spiral + Spiral

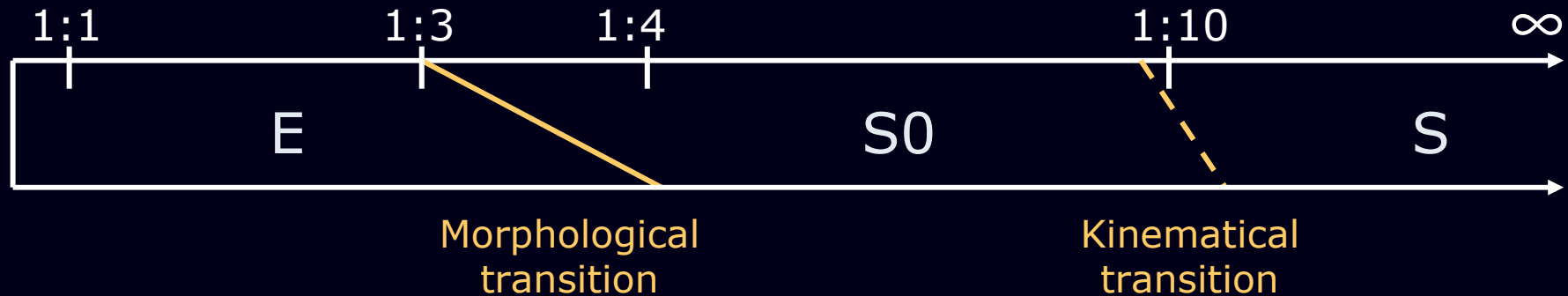
=> Dispersion/Relaxation

=> Remnant = **ELLIPTICAL**

Barnes 1992, Naab & Burkert 2003

Formation of E/S0/S

Critical mass ratios

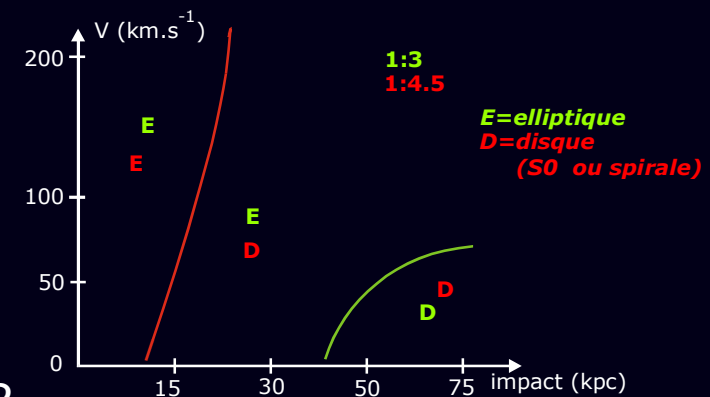


Remnant = E/S0/S : controlled **mainly by the mass ratio**
(except for very gas-rich mergers at high z)

Elliptical/Disk transition around 3:1 - 4:1

Large range forming S0s from 4:1 to 10:1

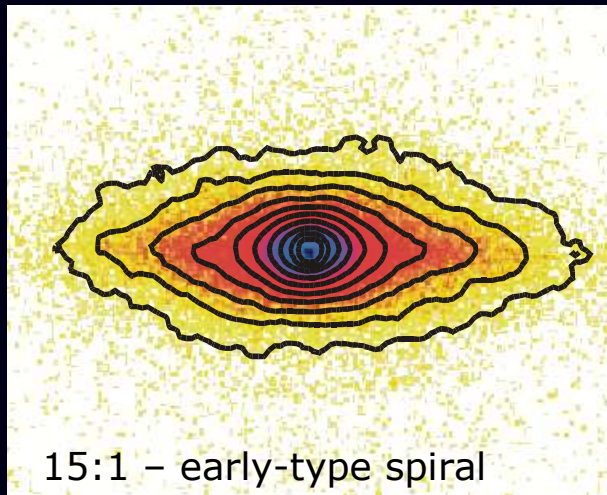
=> What if several mergers of this kind ?



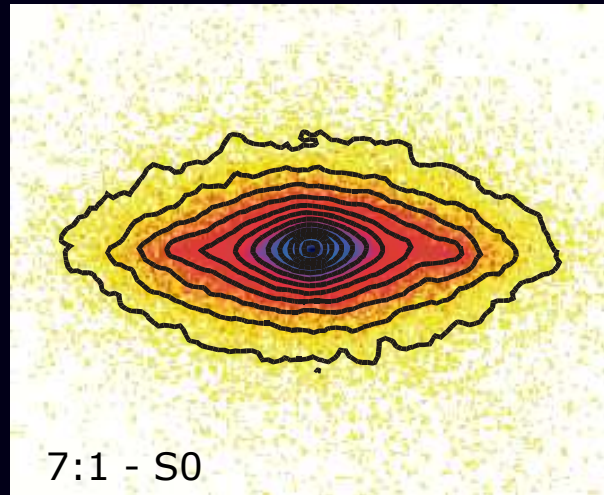
Intermediate mass ratio \rightarrow S0

*Exponential profile + $V/S \sim 1$ + *Isophotes 'disky'**

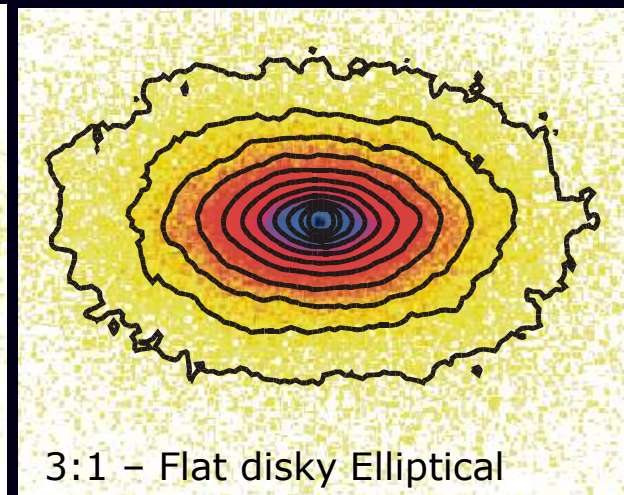
\Rightarrow Typical of lenticular S0



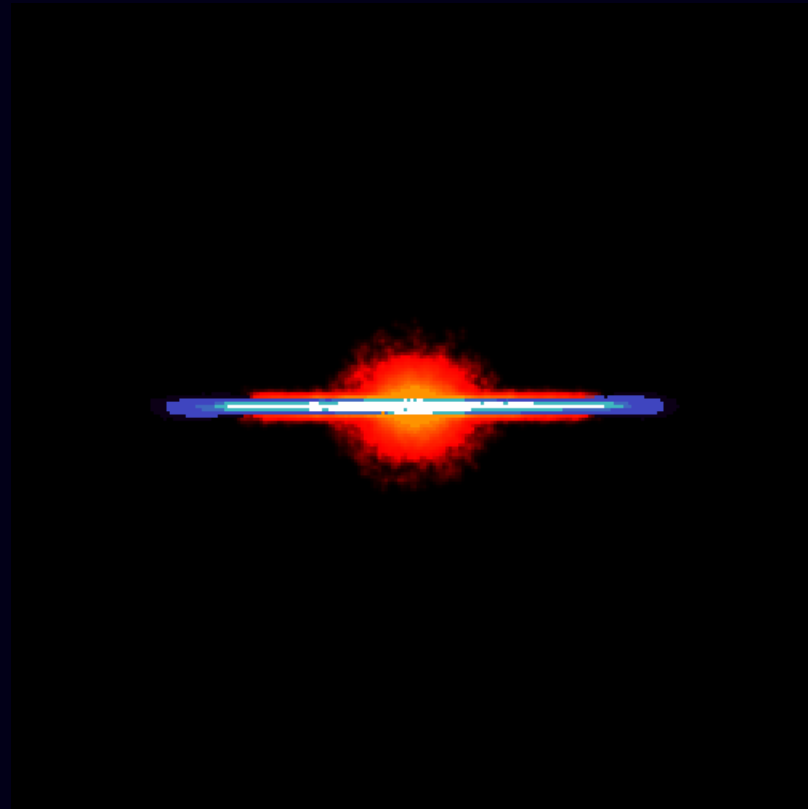
$V/\sigma \sim 2.2$



$V/\sigma \sim 0.9$



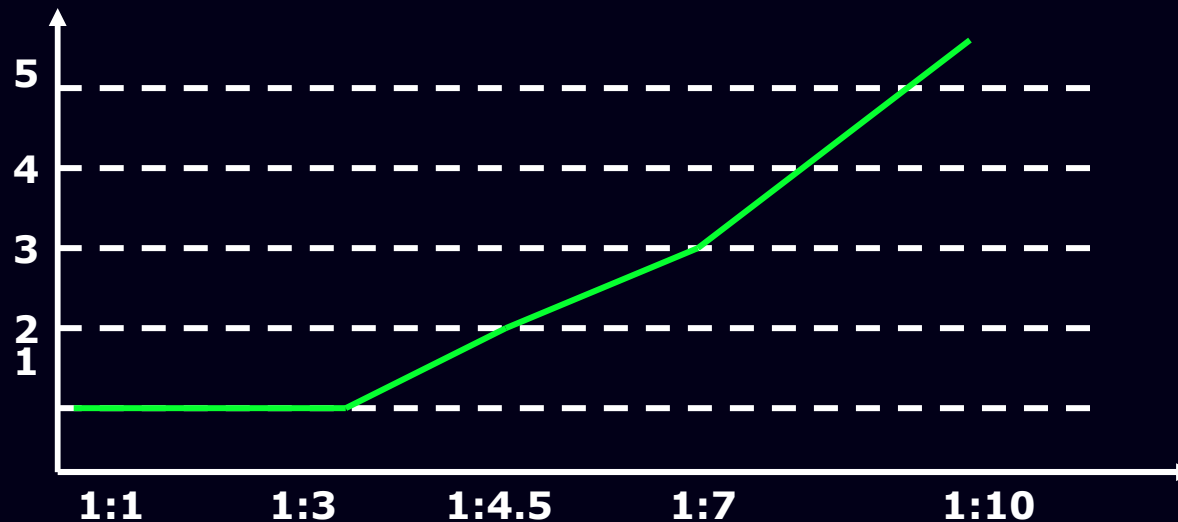
$V/\sigma \sim 0.6$



Sequence of 7 mergers with 7:1 companions (15% gas)

Successive Mergers

Number of mergers to form an elliptical (at $f_{\text{gas}} = 10\%$)



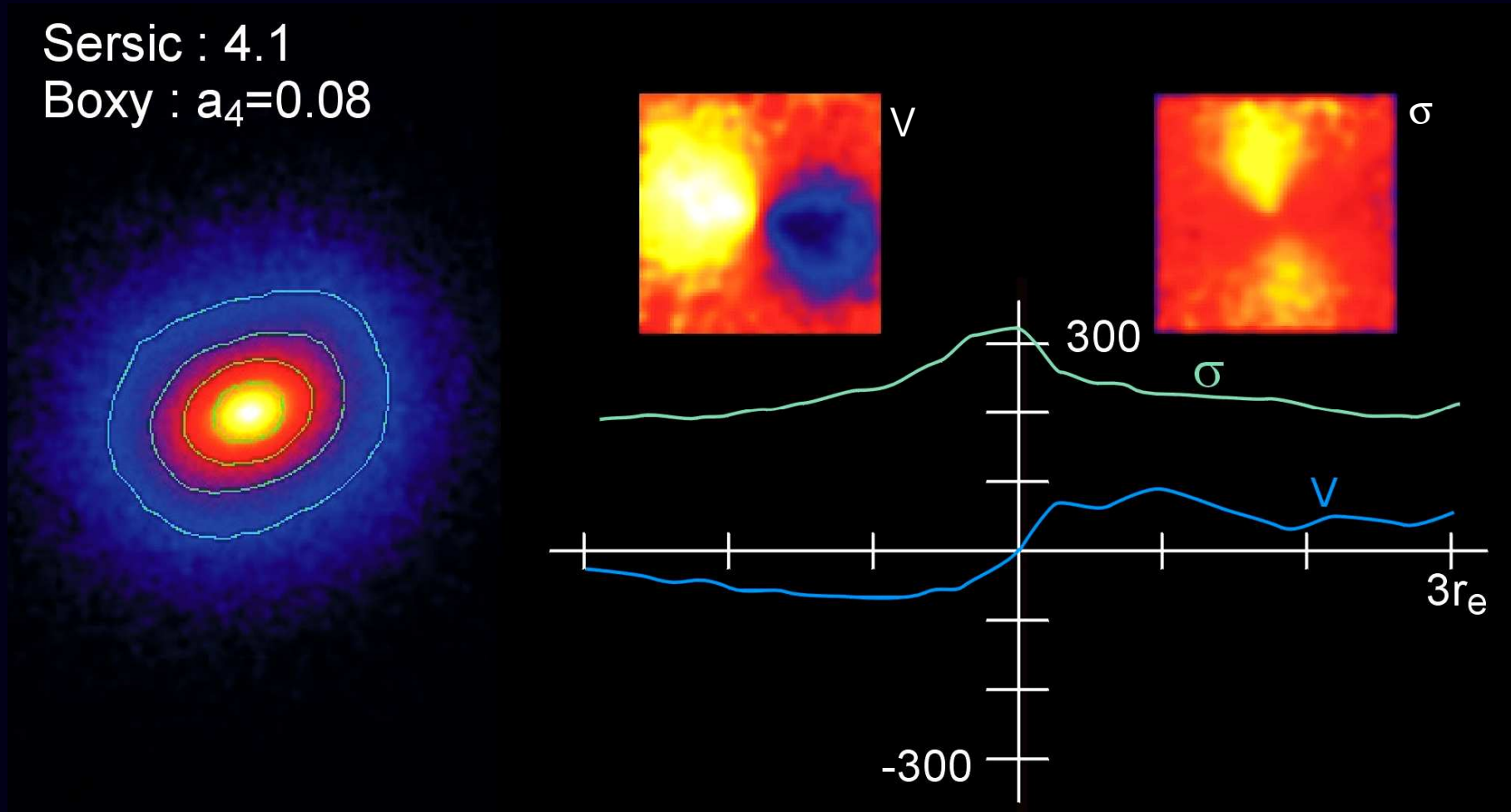
Galaxy mass function (Press-Schechter)

\Rightarrow 3x[1:7] more likely than 1x[1:2] (*Steinmetz & Navarro 2002*)

Formation of ellipticals more likely by multiple minor mergers than one major merger (if no accretion between mergers...)

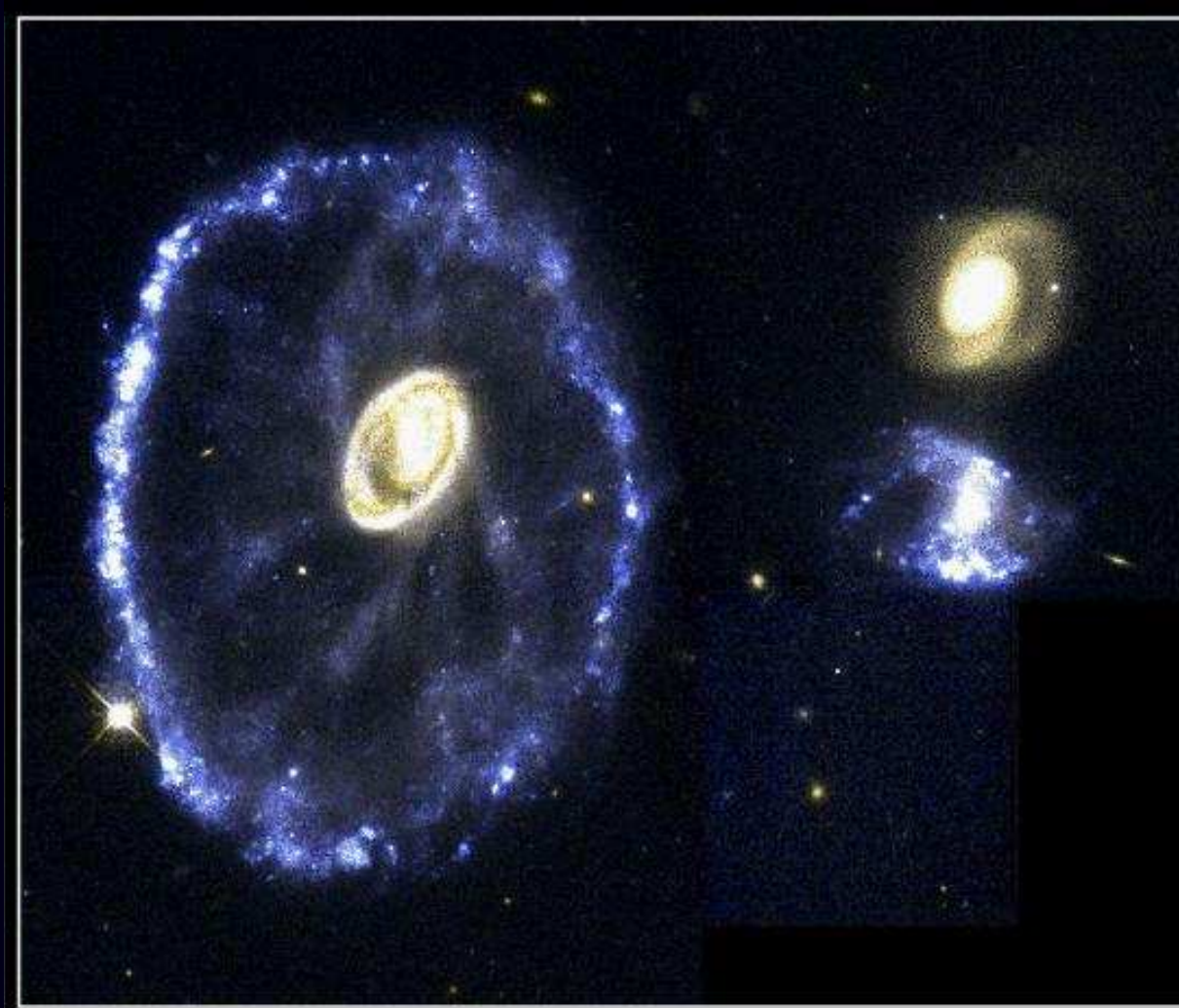
Exemple : 50 companions 50:1

Sersic : 4.1
Boxy : $a_4=0.08$





Collisions frontales



Anneaux collisionnels

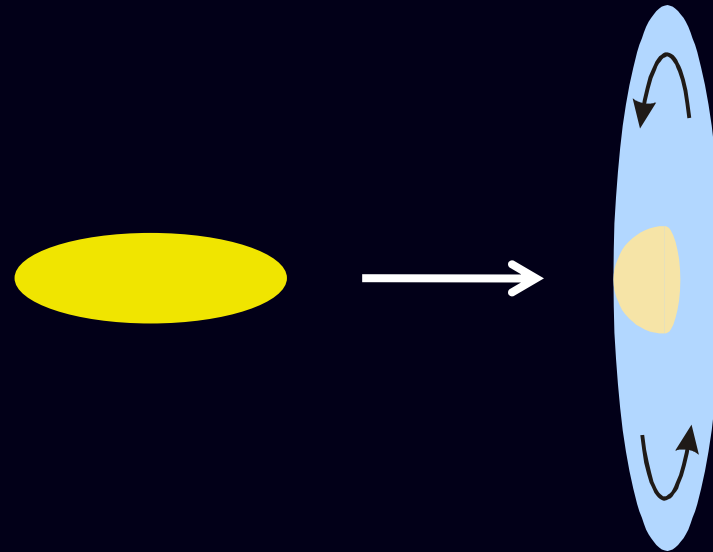
Orbite proche de l'axe polaire

Petit paramètre d'impact

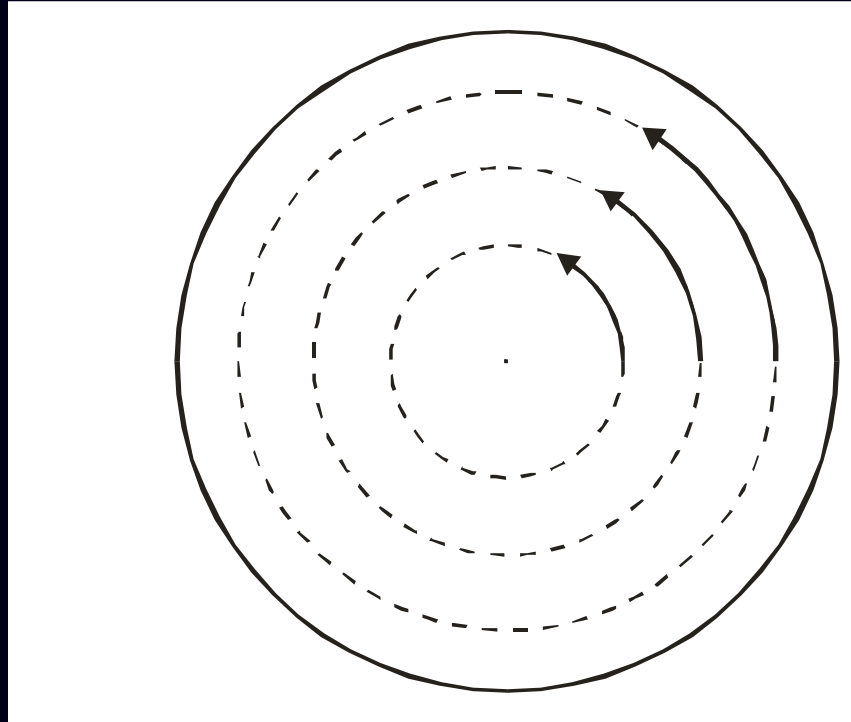
Vitesse quelconque :

- faible avec fusion
- élevée sans fusion

Elliptique ou spirale sur spirale



Impulsion centrale, réponse du disque

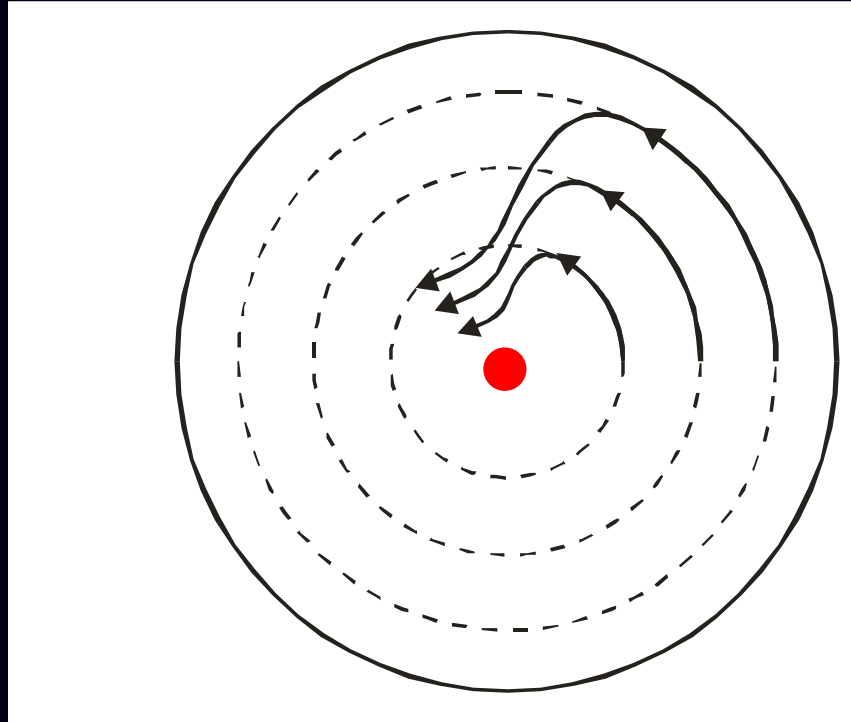


Départ d'un disque initial « froid » ($V \gg \sigma$)

Excitation de mouvement radiaux (\Rightarrow épicycles) d'abord vers le centre ET en phase

Puis départ vers l'extérieur (suite des épicycles)

Impulsion centrale, réponse du disque

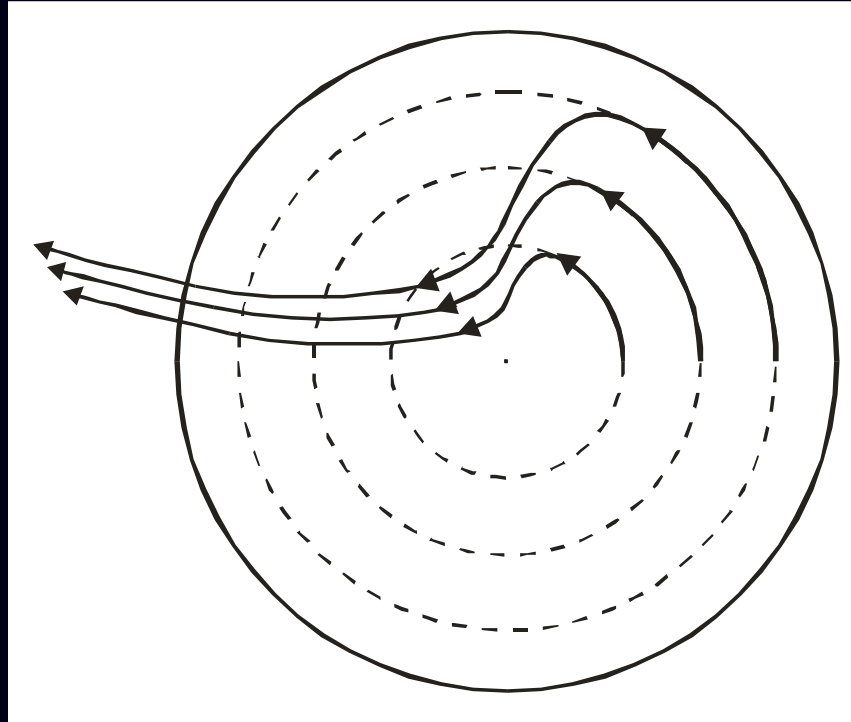


Départ d'un disque initial « froid » ($V \gg \sigma$)

Excitation de mouvement radiaux (\Rightarrow épicycles) d'abord vers le centre ET en phase

Puis départ vers l'extérieur (suite des épicycles)

Impulsion centrale, réponse du disque

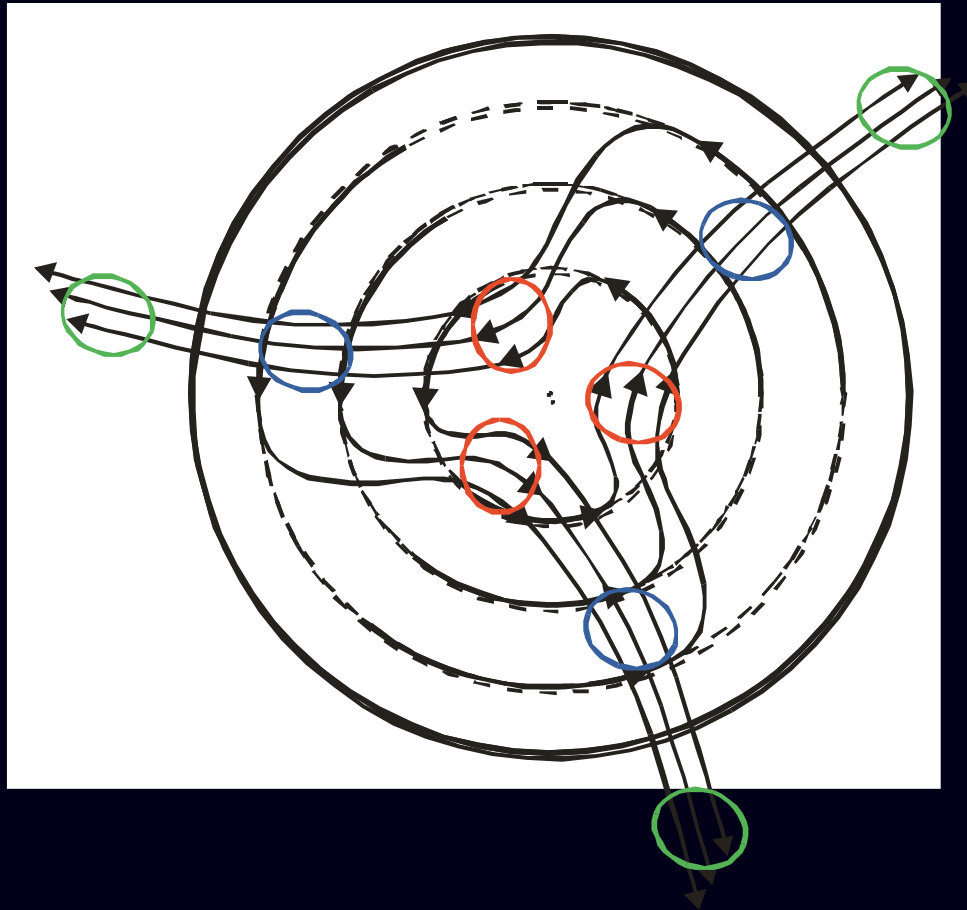


Départ d'un disque initial « froid » ($V \gg \sigma$)

Excitation de mouvement radiaux (\Rightarrow épicycles) d'abord vers le centre ET en phase

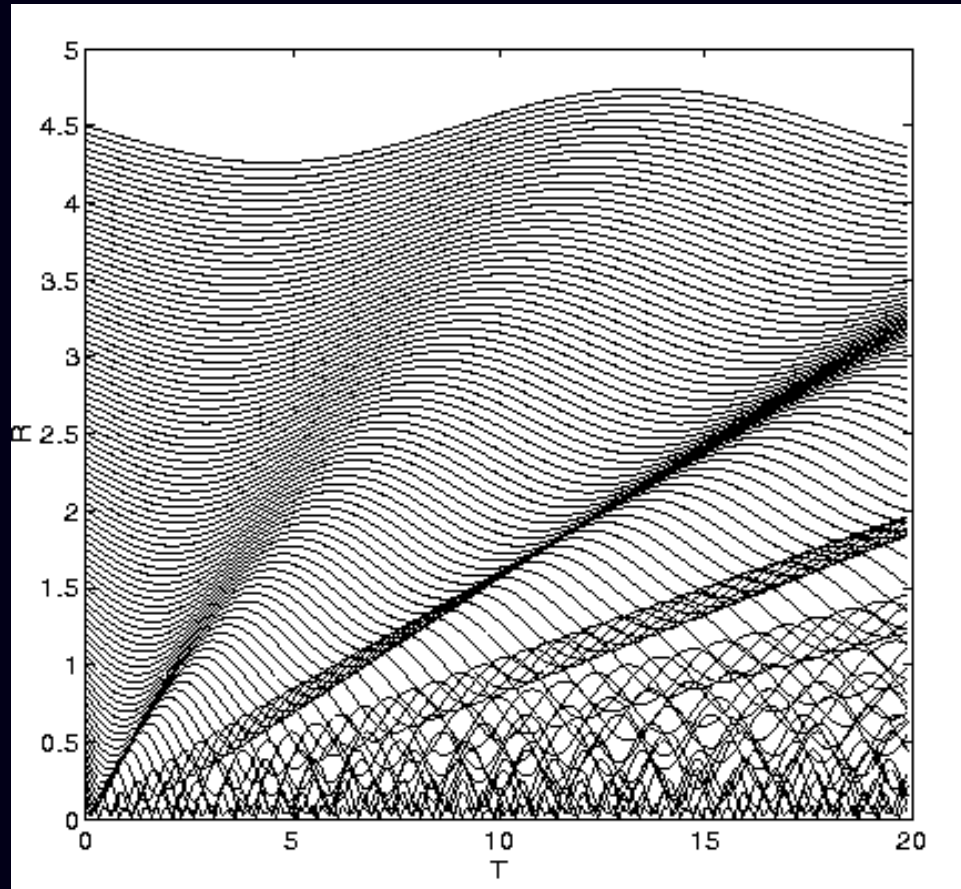
Puis départ vers l'extérieur (suite des épicycles) ; **cohérente \Rightarrow surdensité**

Impulsion centrale, réponse du disque



Invariance azimuthale → **anneaux** en expansion

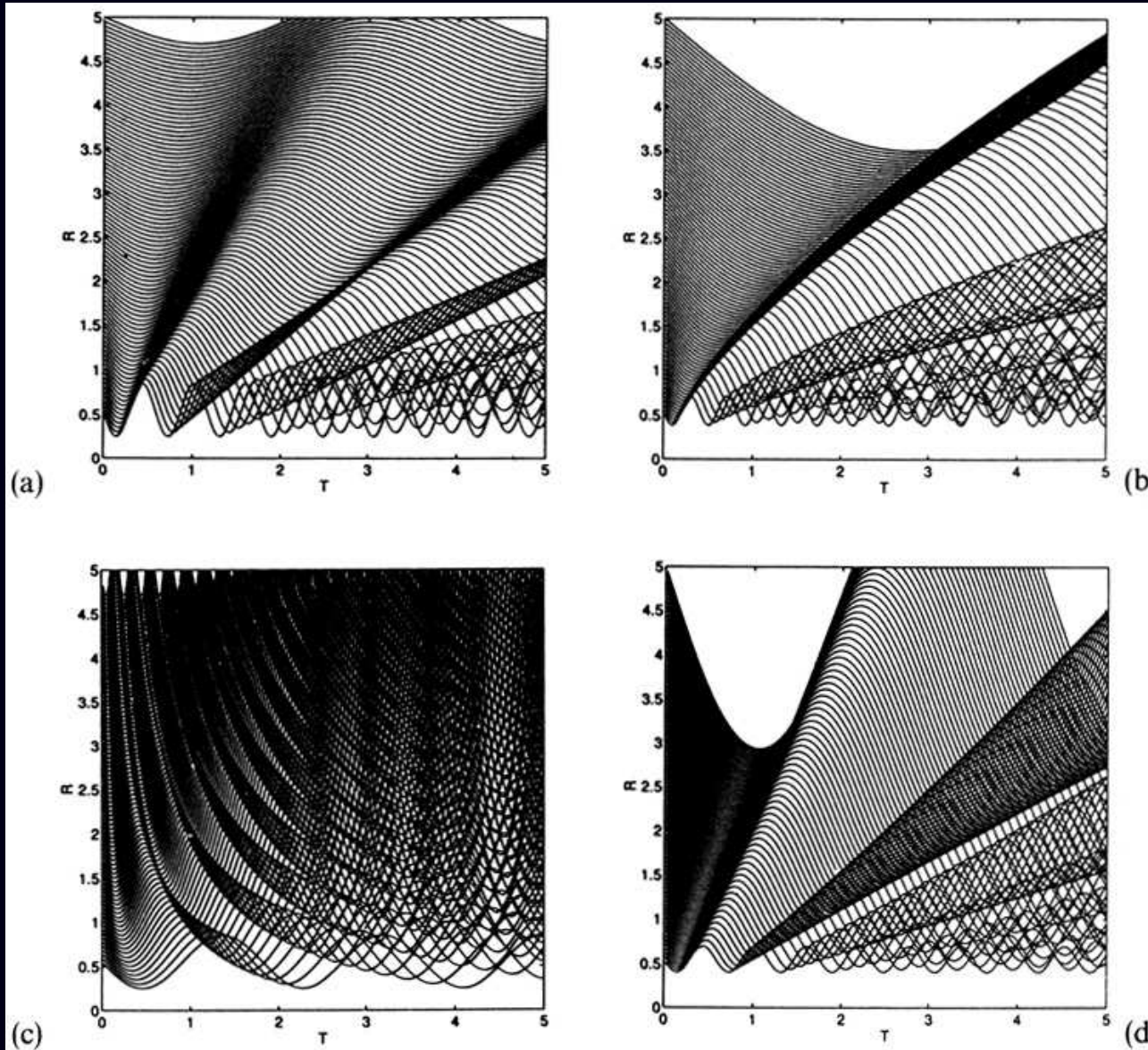
Impulsion centrale, réponse du disque



- Suivi de quelques étoiles d'un disque initialement uniforme
- Excitation des épicycles cohérente lors du passage (impulsion centrale) de la galaxie compagnon
- Réponse => série d'anneaux en expansion
(de + en + lente et décohérente)
- Sans gravité, viscosité, etc...

⇒ **ANNEAUX EN EXPANSION**
qui sont des **ONDES DE DENSITE**
cinématiques

Impulsion centrale, réponse du disque

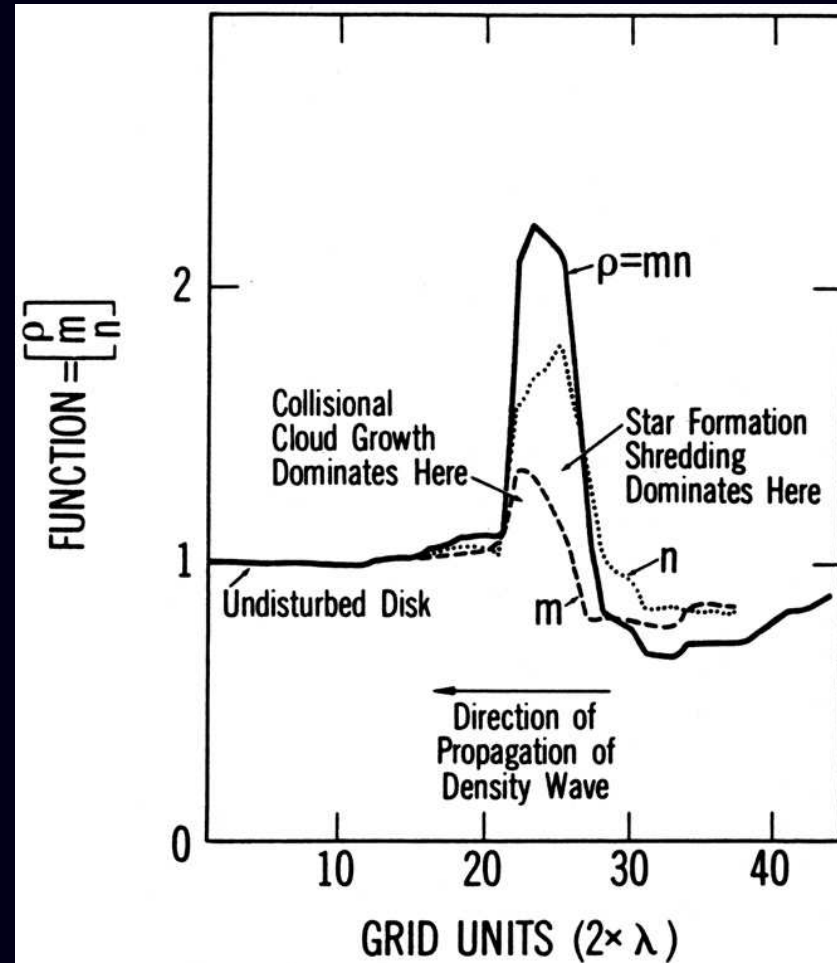
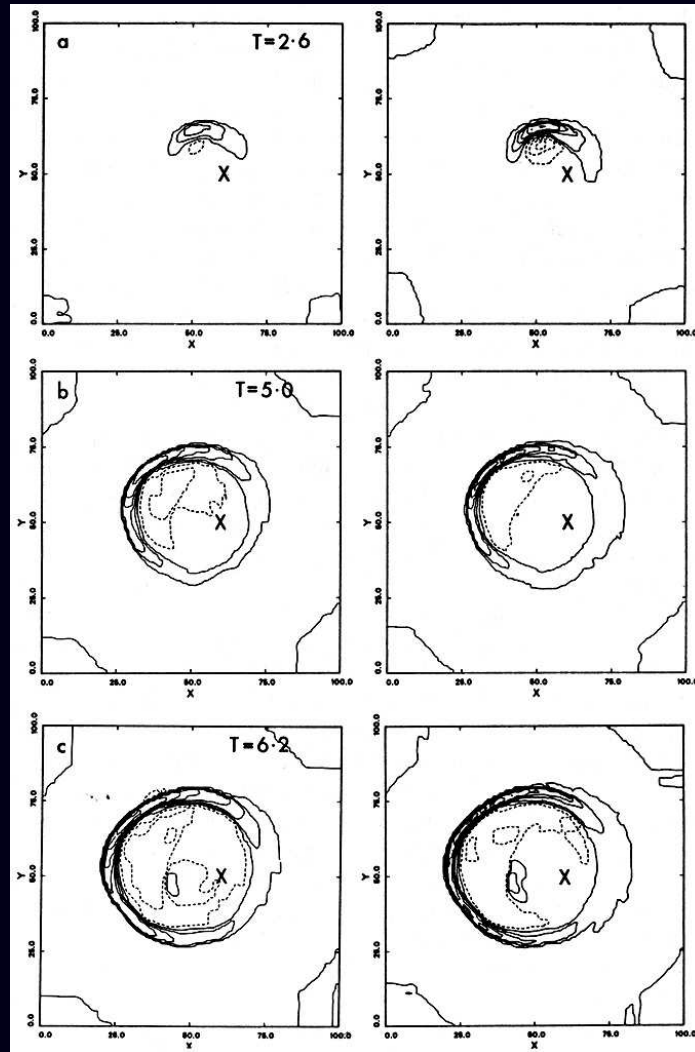


Fonction de la forme des deux potentiels :

- Amplitude $A(R)$
potentiel perturbant

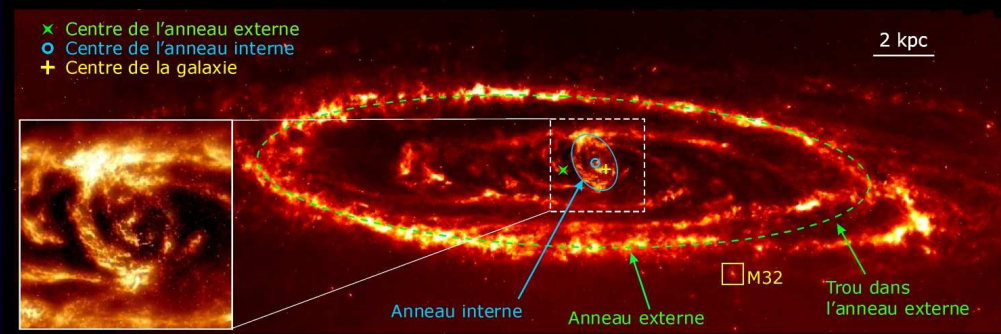
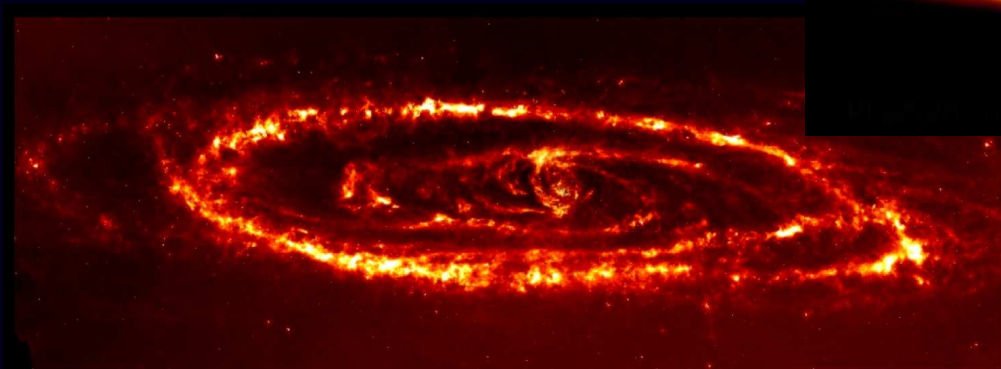
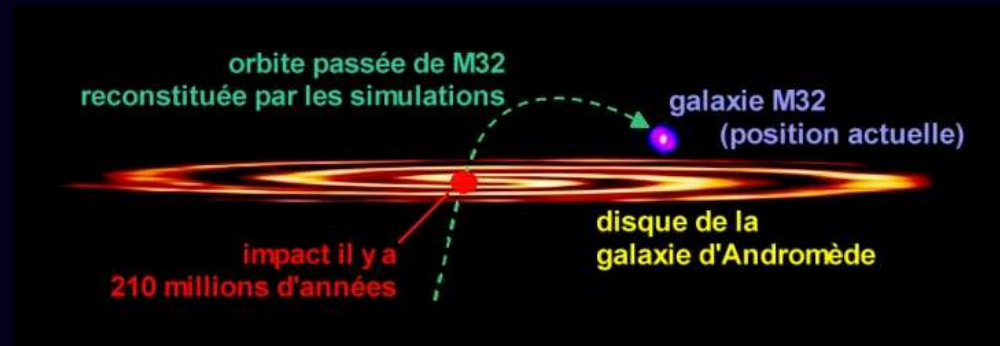
- Fréquence $K(R)$
potentiel disque cible

Impulsion centrale, réponse du disque



Formation stellaire induite

M31 - IRAC

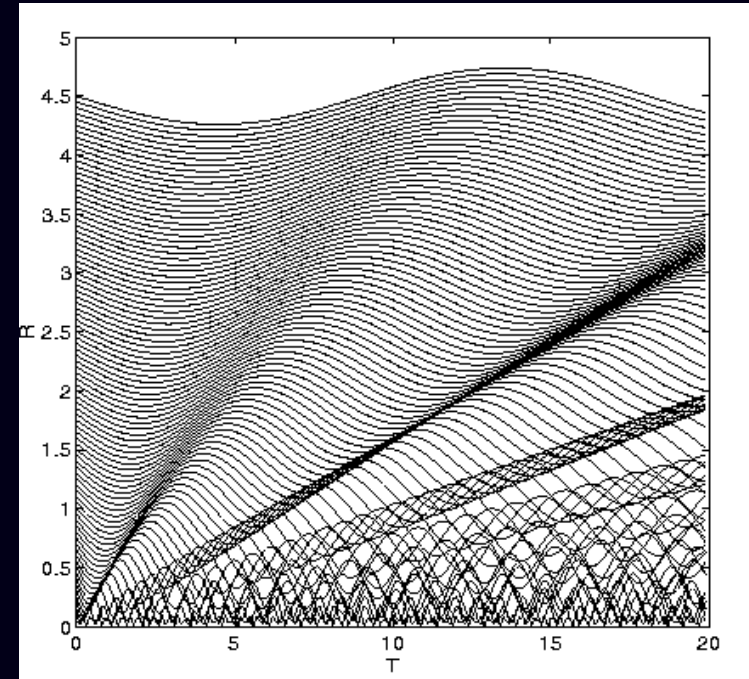
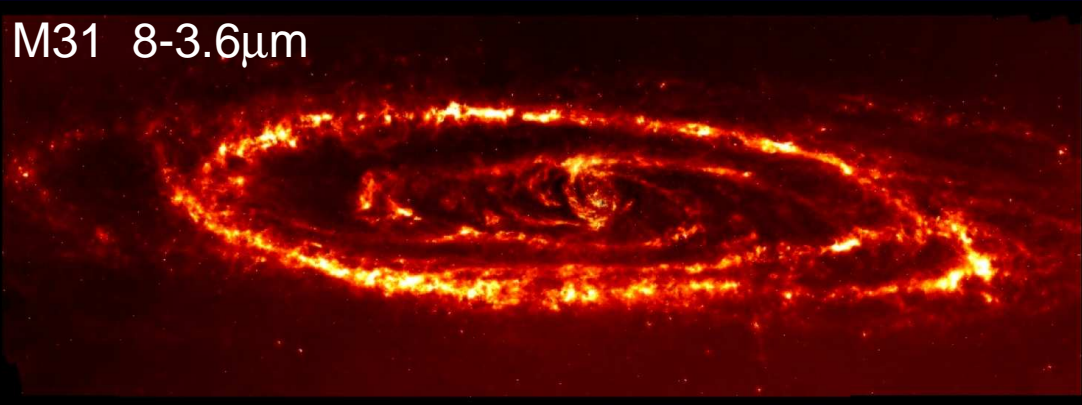


Réponse du gaz et des étoiles

M31 3.6 μ m

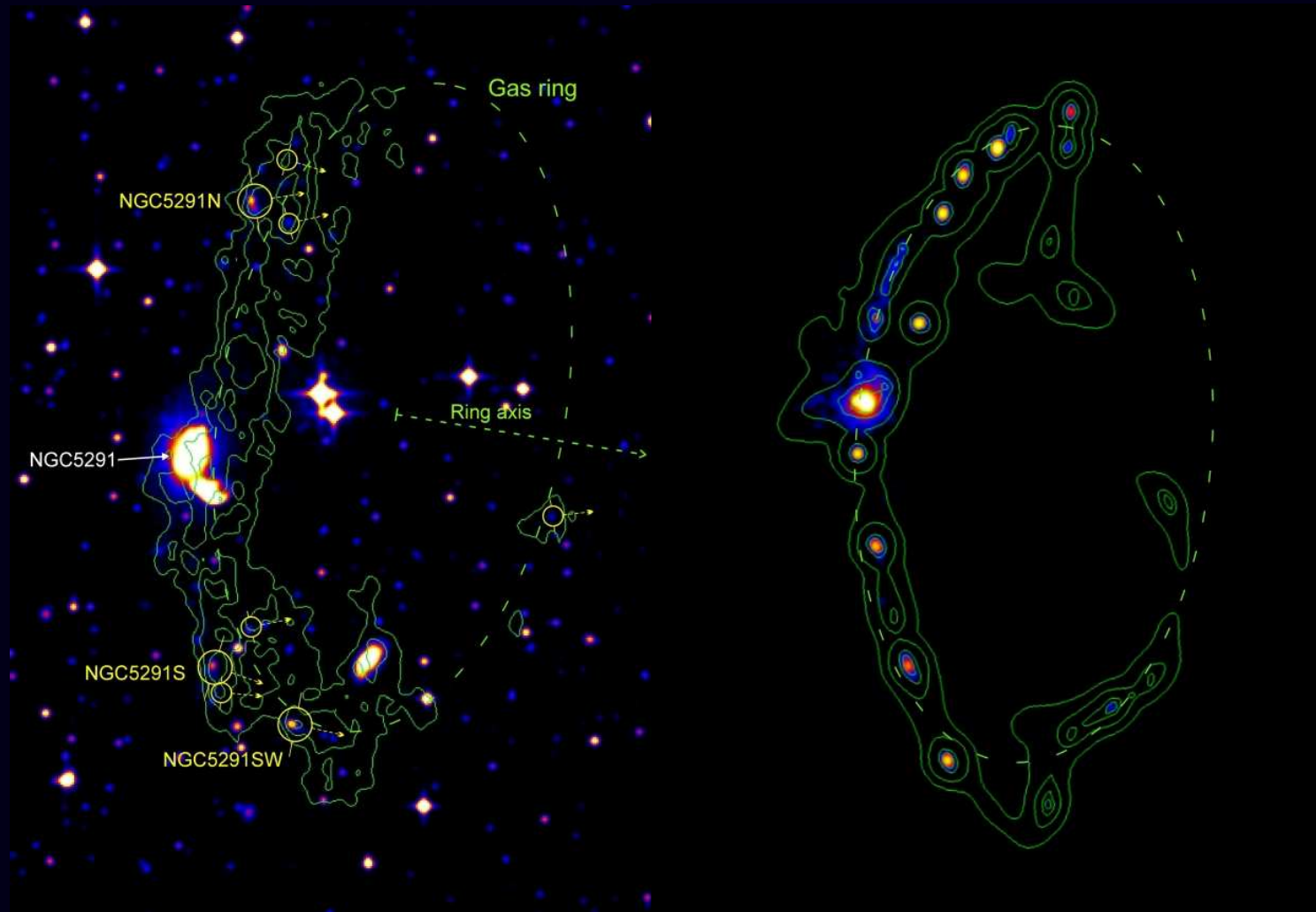


M31 8-3.6 μ m



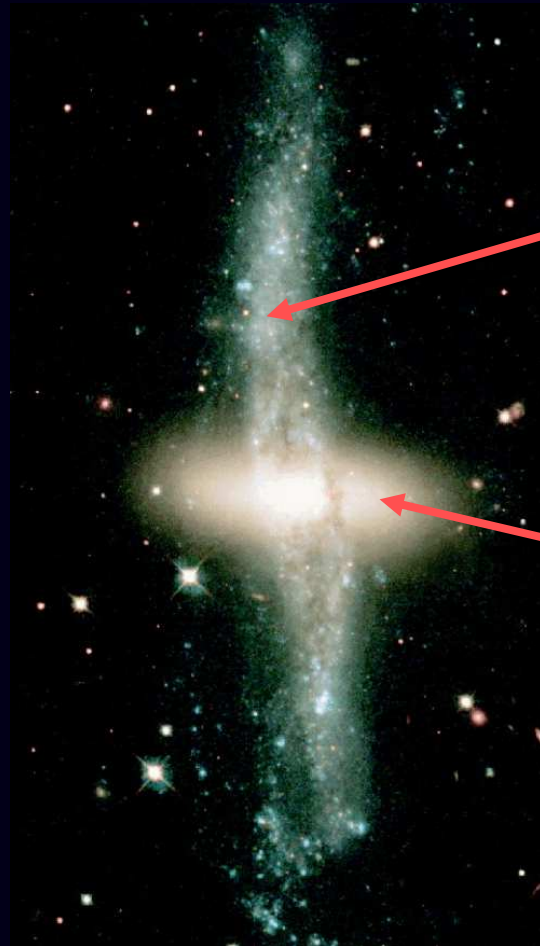
- Les étoiles ont déjà une dispersion de vitesse ~ 50 km/s
(donc des mouvements épicycliques)
 \Rightarrow l'excitation des épicycles n'est pas aussi cohérente que le gaz
 \Rightarrow anneaux moins contrastés
mais formation stellaire induite (UV, B..)

Enrichissement de l'IGM



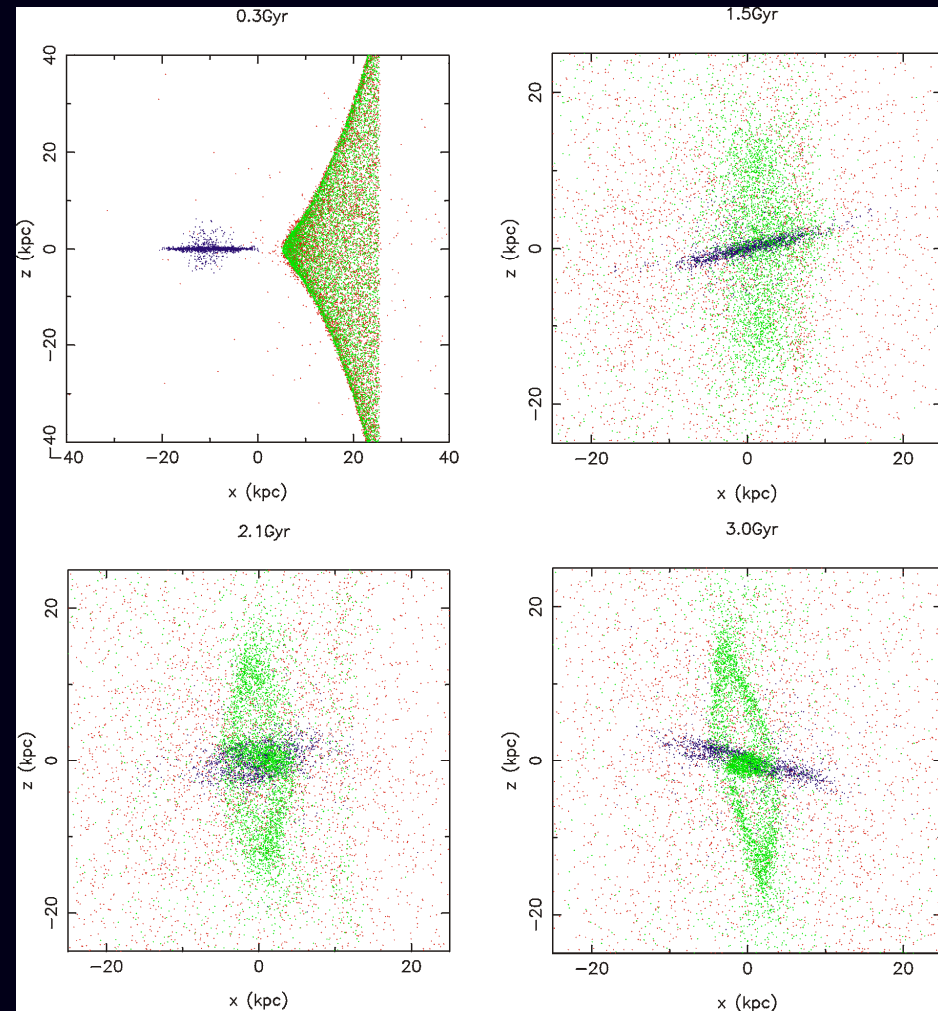
Anneaux polaires

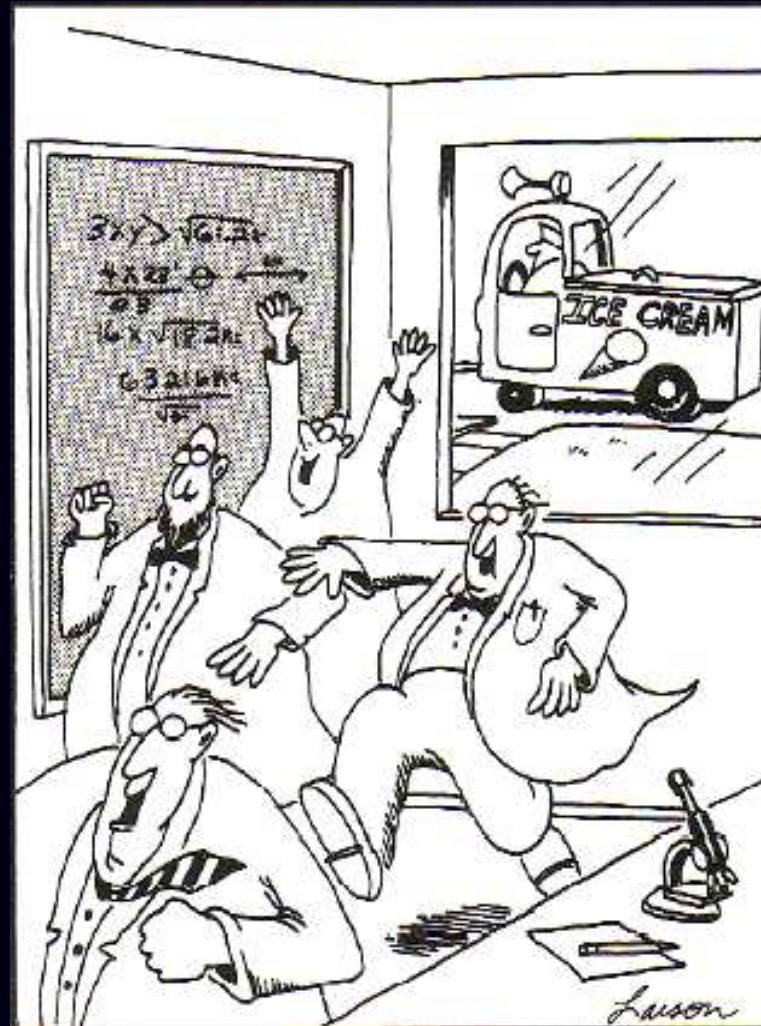
Collision plus lente : anneau + fusion



Anneau polaire

Galaxie hôte

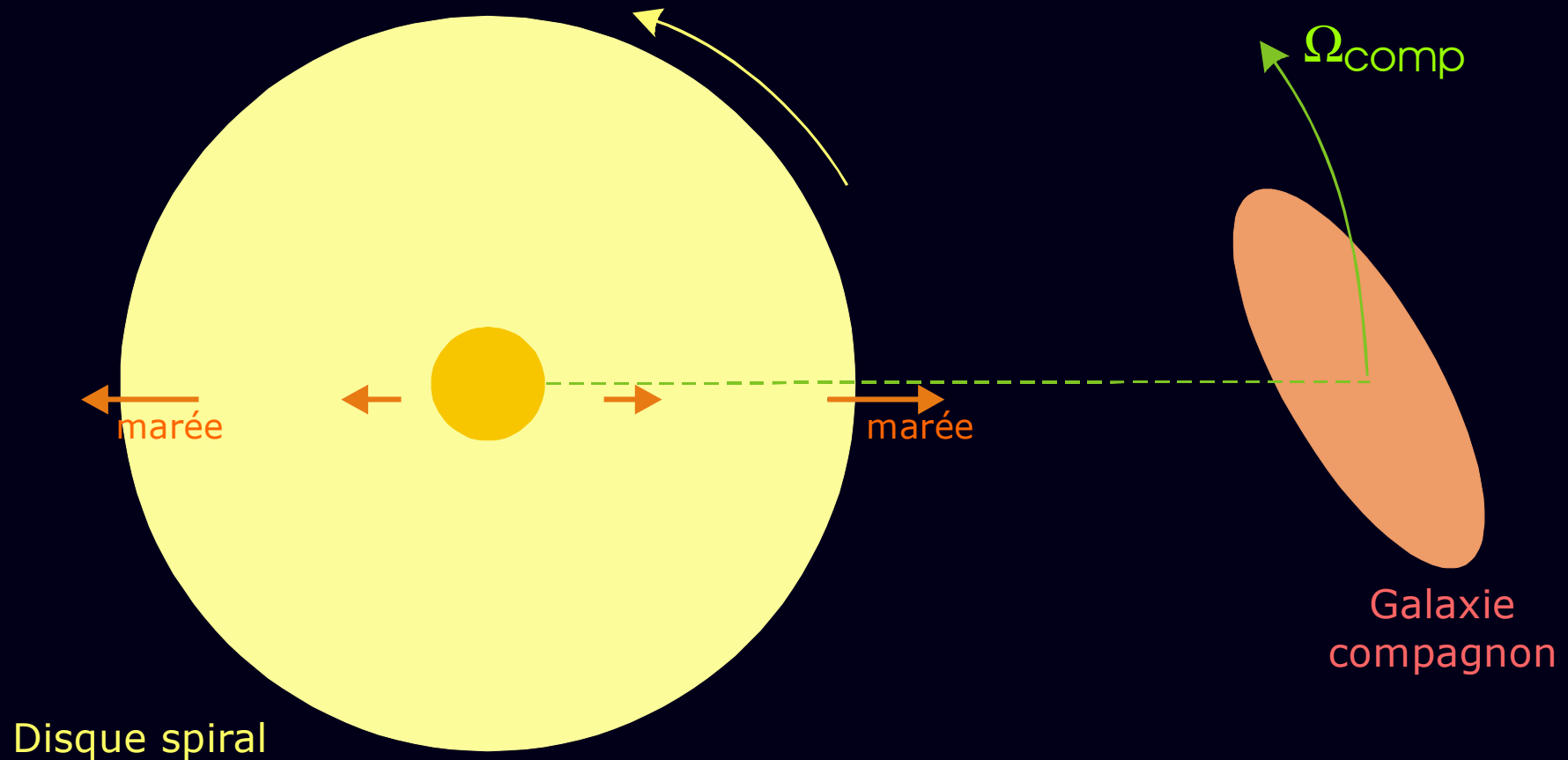




Collisions de galaxies : queues de marée et formation stellaire



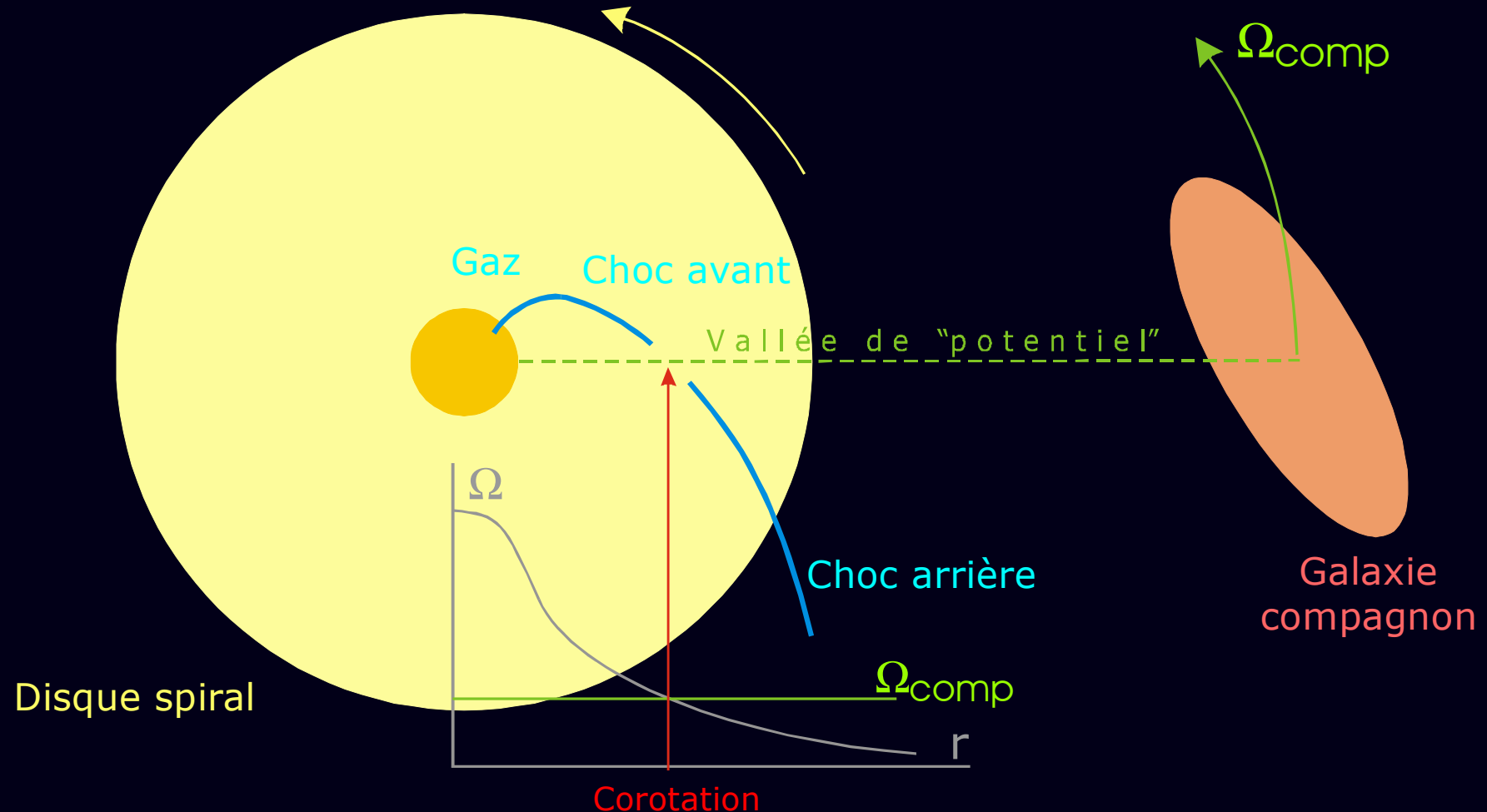
Effets de marée et réponse du gaz



Champ de marée centrifuge.

Plus efficace si compagnon en corotation avec le disque

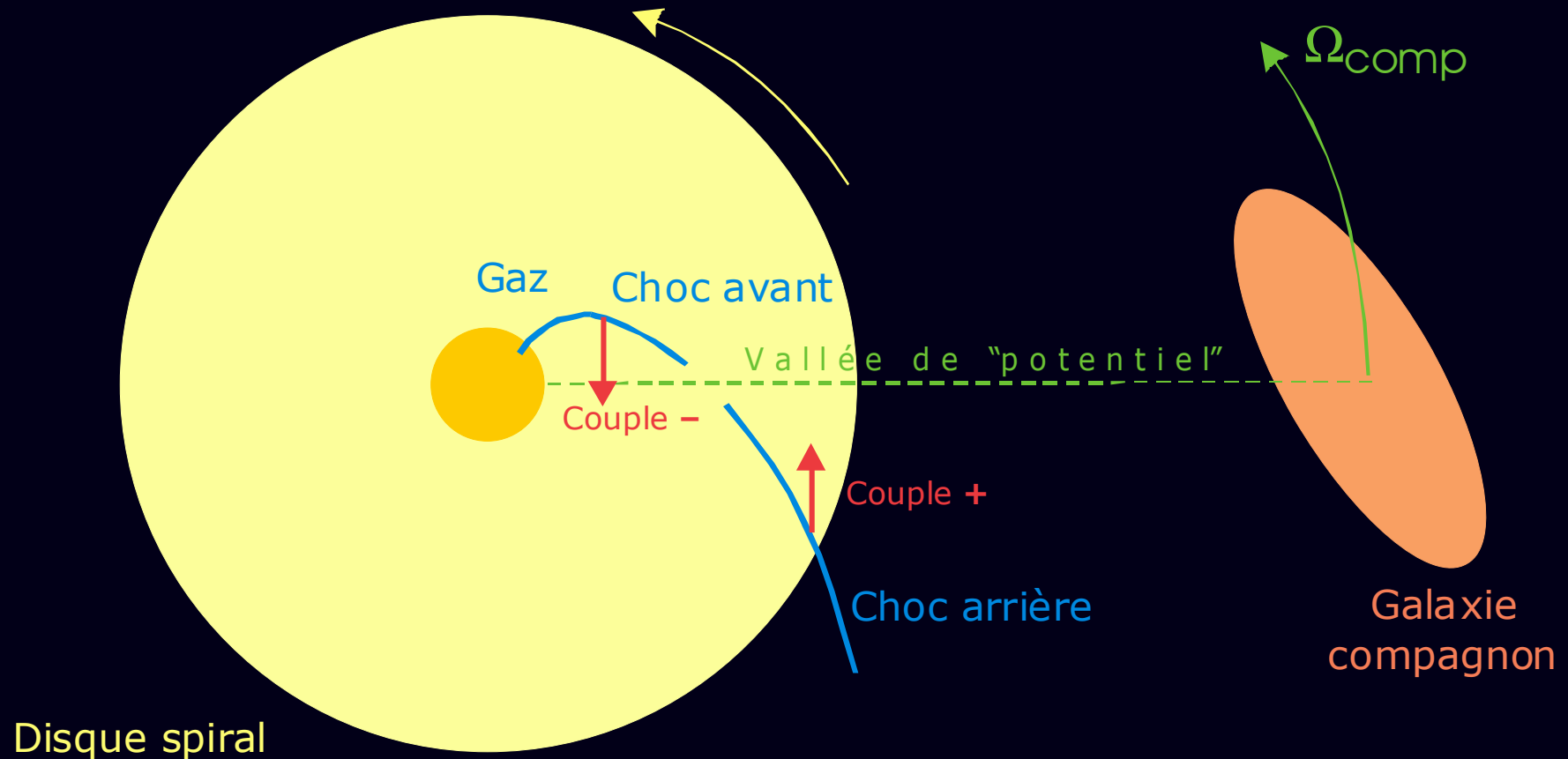
Effets de marée et réponse du gaz



Réponse du gaz au champ de marée

- contrôlé par la position du compagnon
- dépend de la localisation des résonances (en particulier corotation)

Effets de marée et réponse du gaz

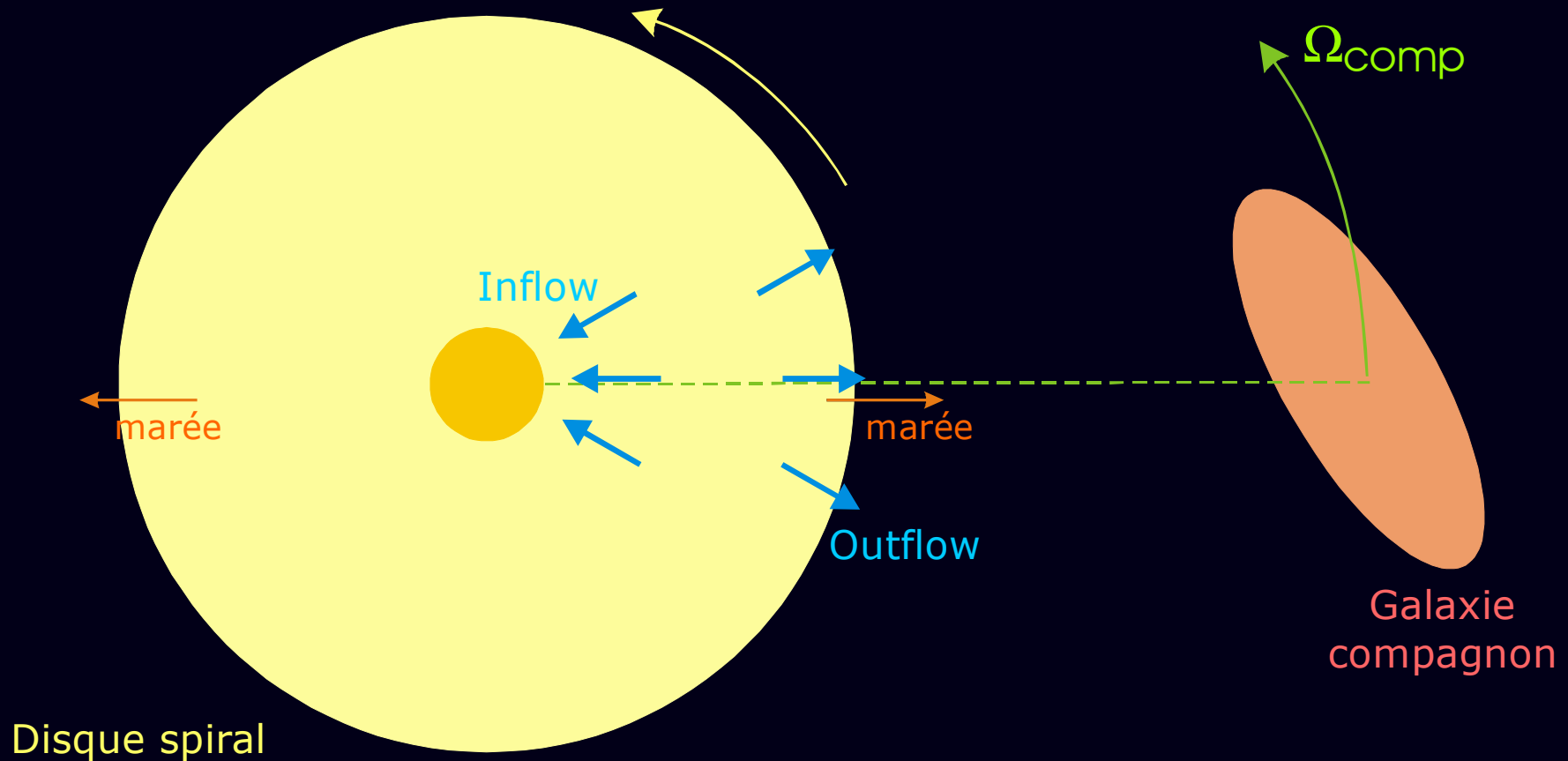


Couples positifs/négatifs en fonction du rayon

=> Outflow au-delà de la corotation (couples + champ de marée initial)

=> Inflow dans les régions internes (couples < 0 dépassent champ de marée > 0)

Effets de marée et réponse du gaz

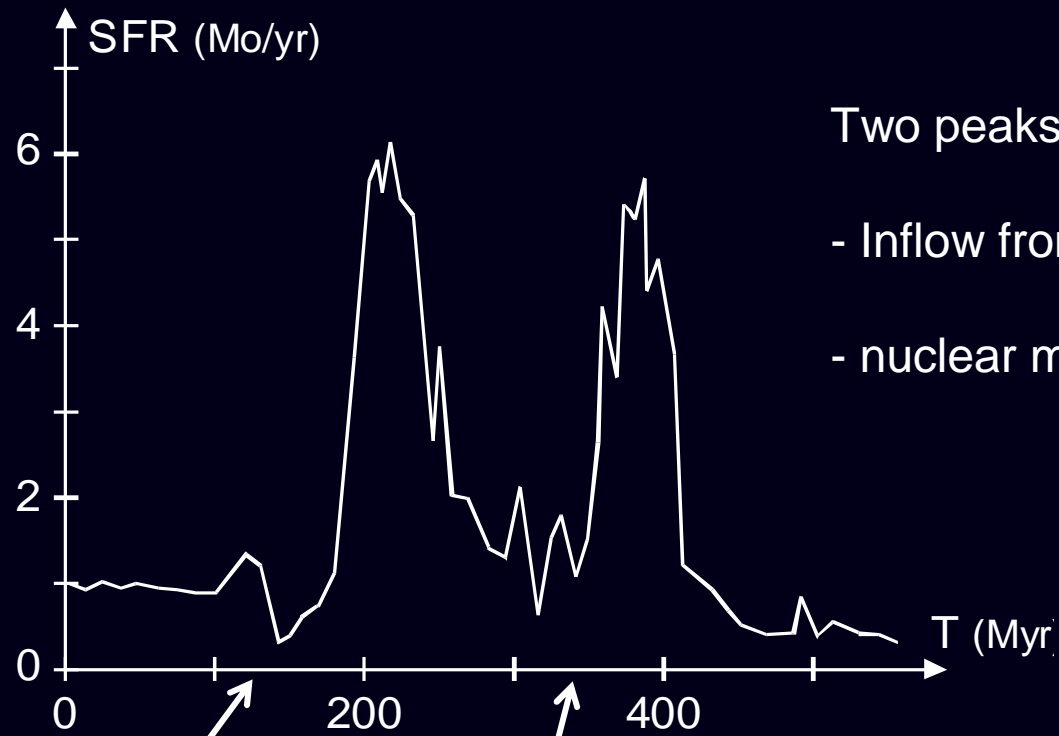


Outflow au-delà de la corotation : **queues de marée**

Inflow dans les régions internes : **flambée de formation stellaire**

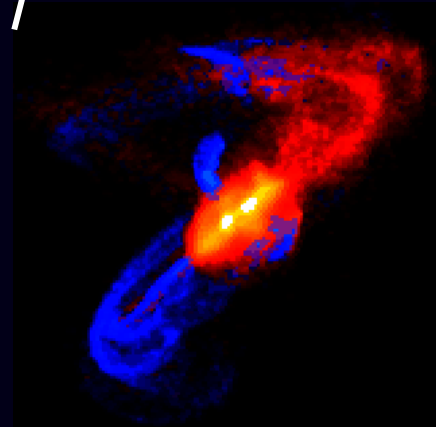
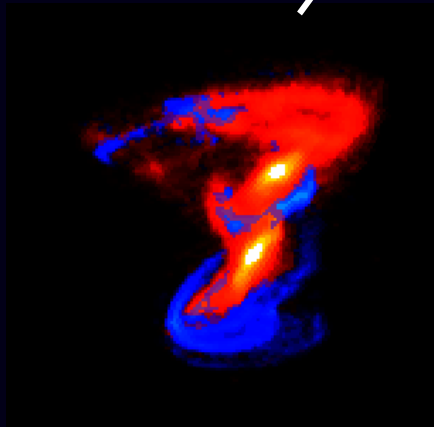
Régions internes

Merger-induced starburst

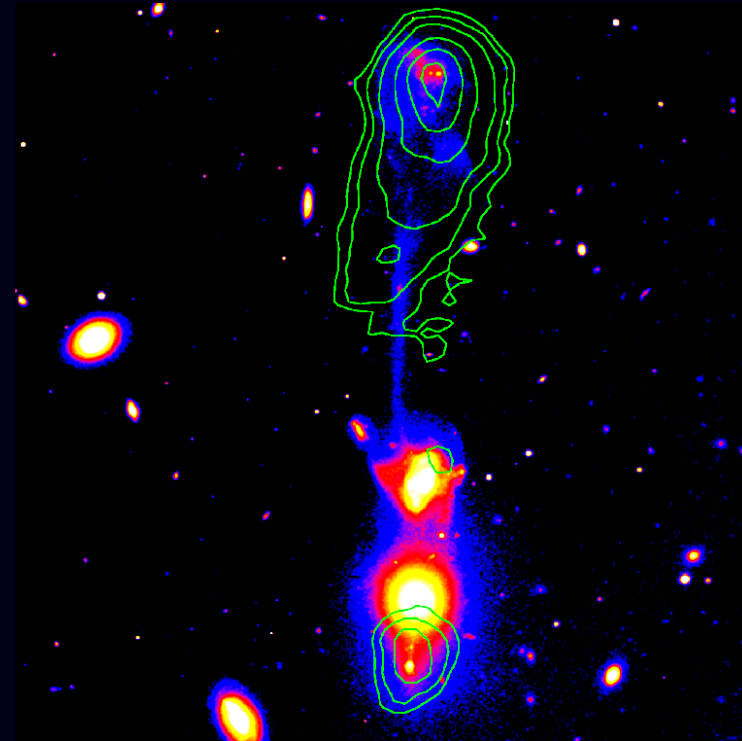
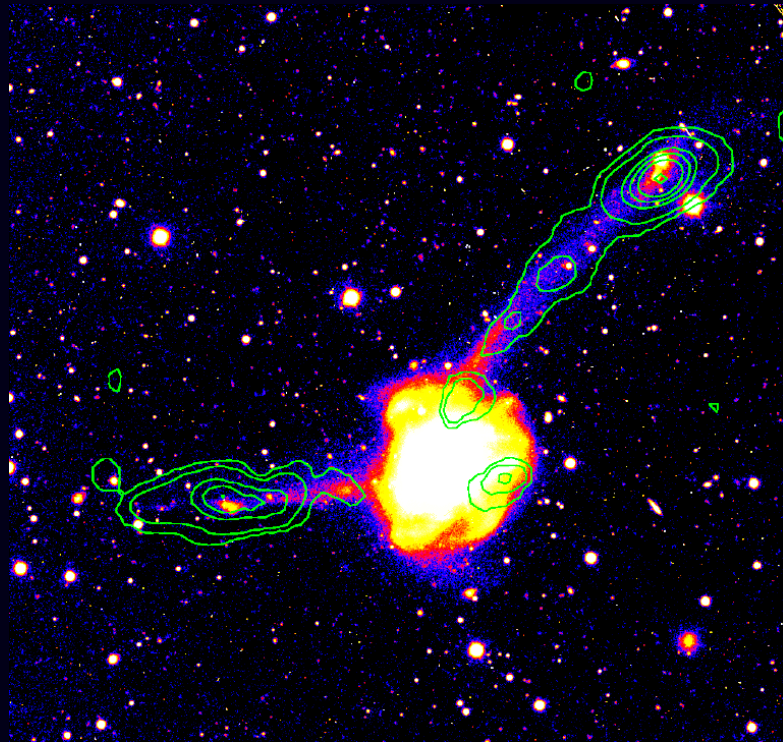


Two peaks (not always seen):

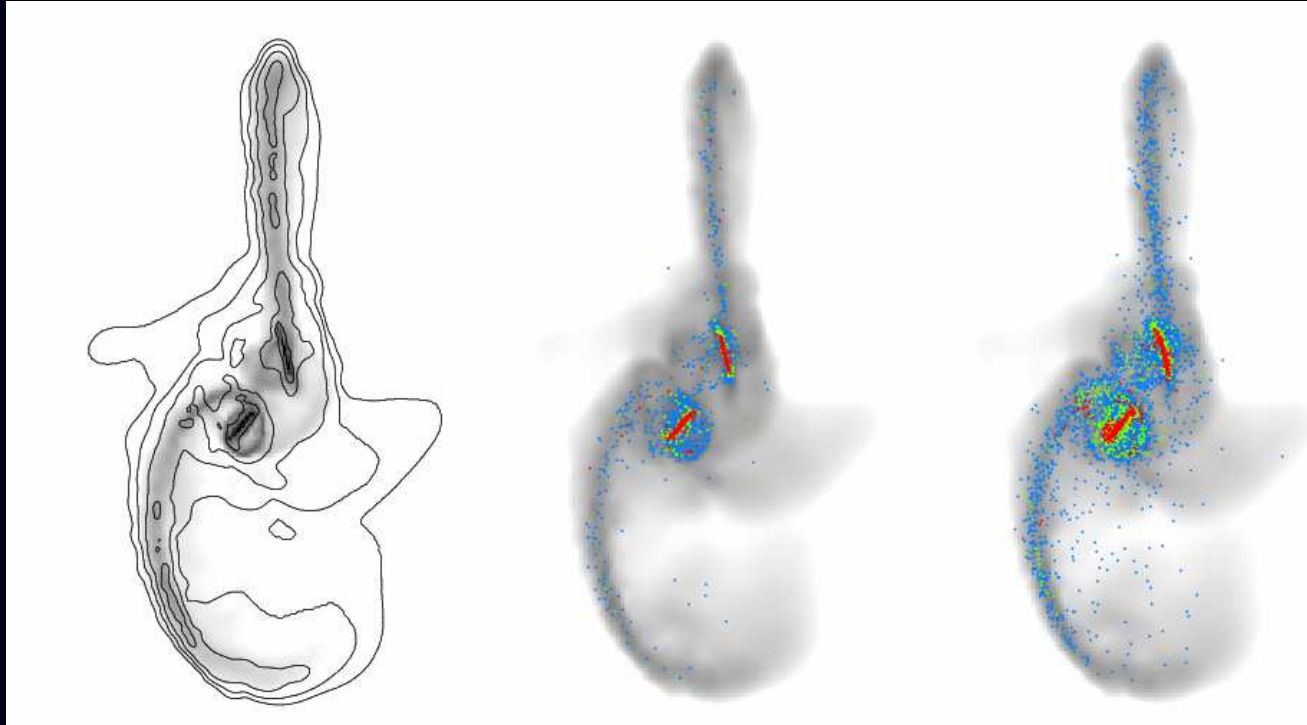
- Inflow from corotation
- nuclear merger



Queues de marée



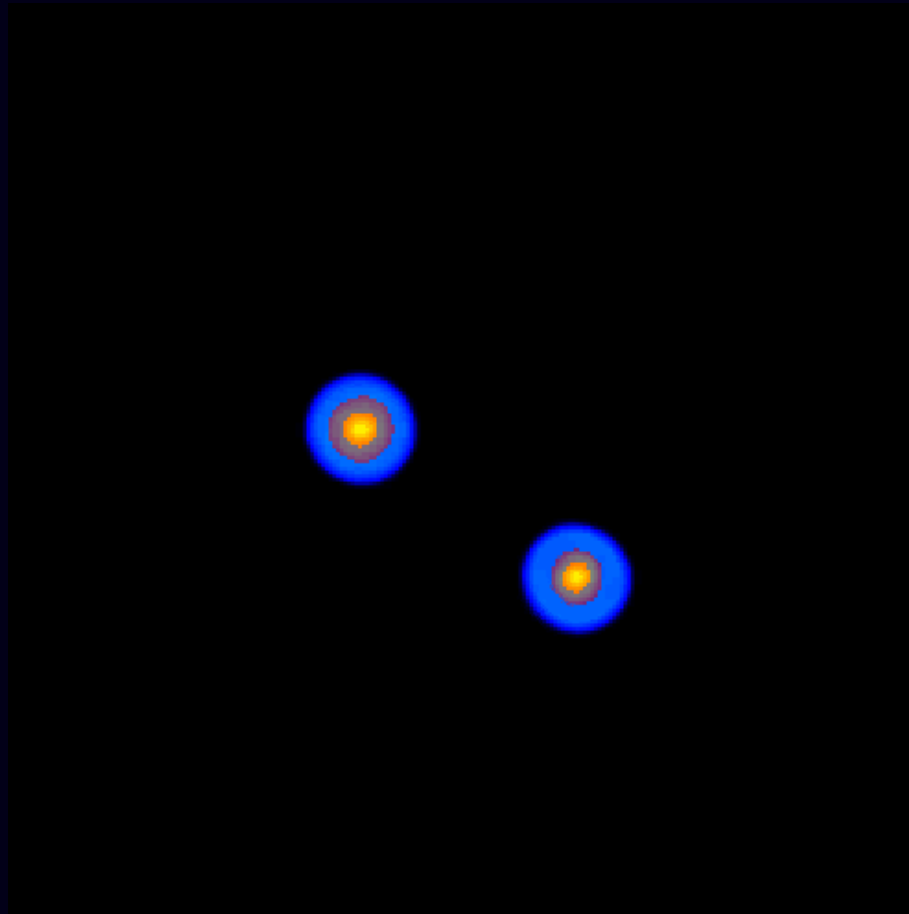
Shock-induced star formation



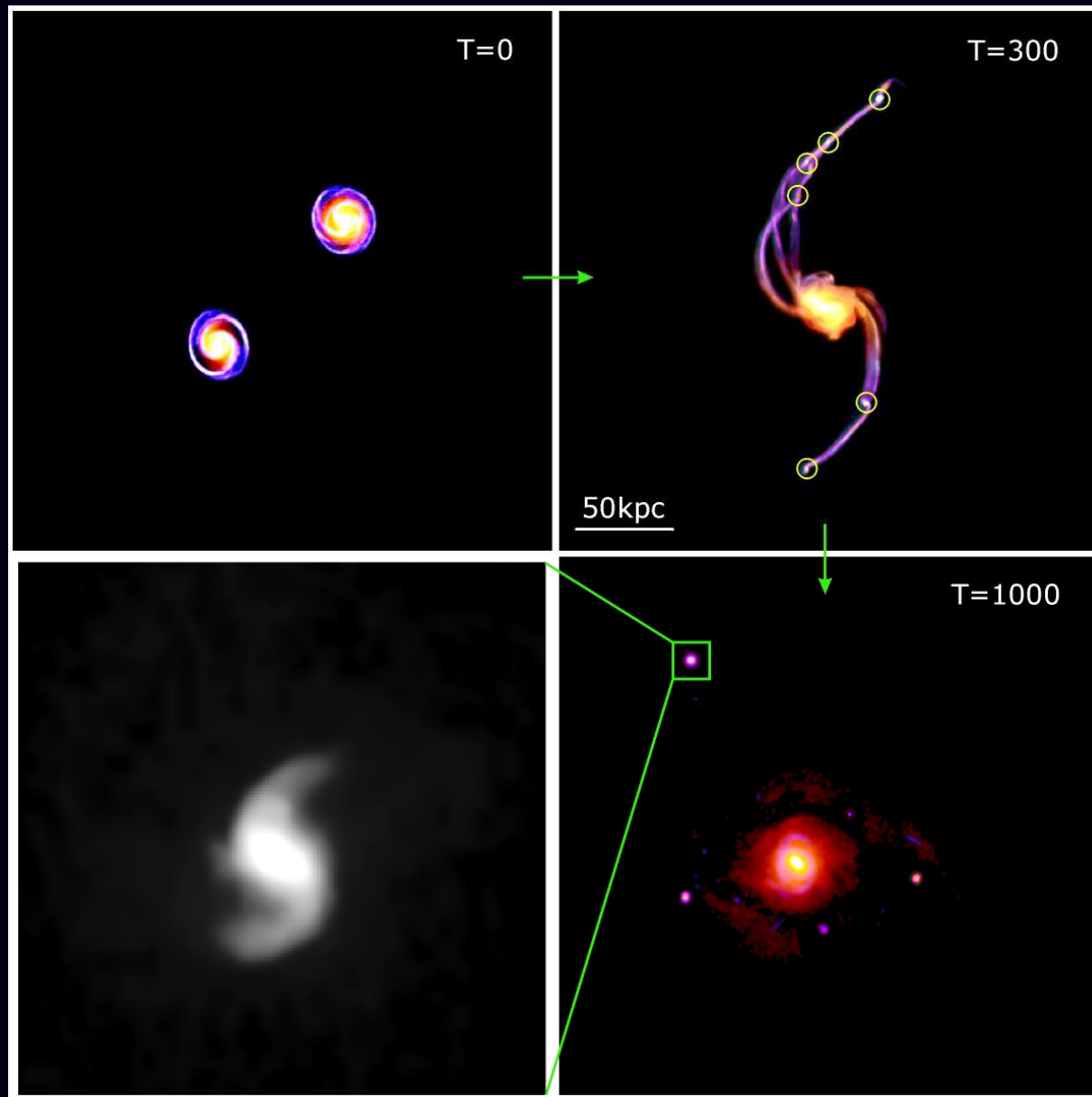
Barnes (2004)

La formation stellaire observée dans les queues de marée (entre autres) semble corrélée à l'énergie dissipée par les chocs dans le MIS, plus que par la densité locale de gaz

Simulations of tidal dwarfs



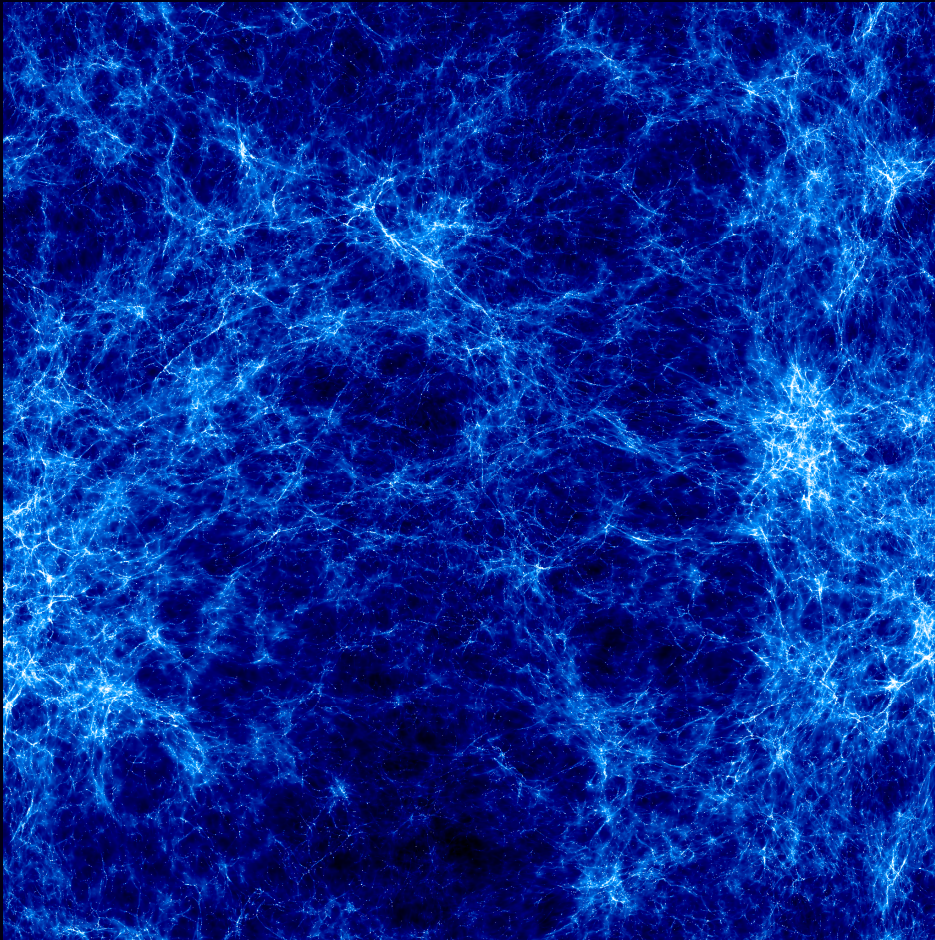
Galaxies naines de marée



Contribution non négligeable
au total des galaxies naines



Formation/évolution des galaxies

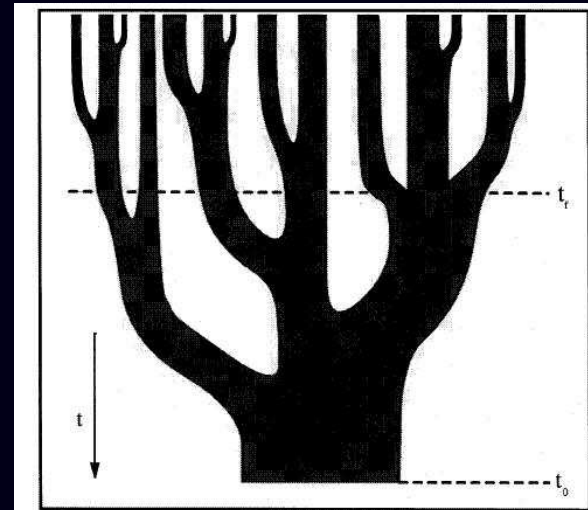


Horizon/marenostrum

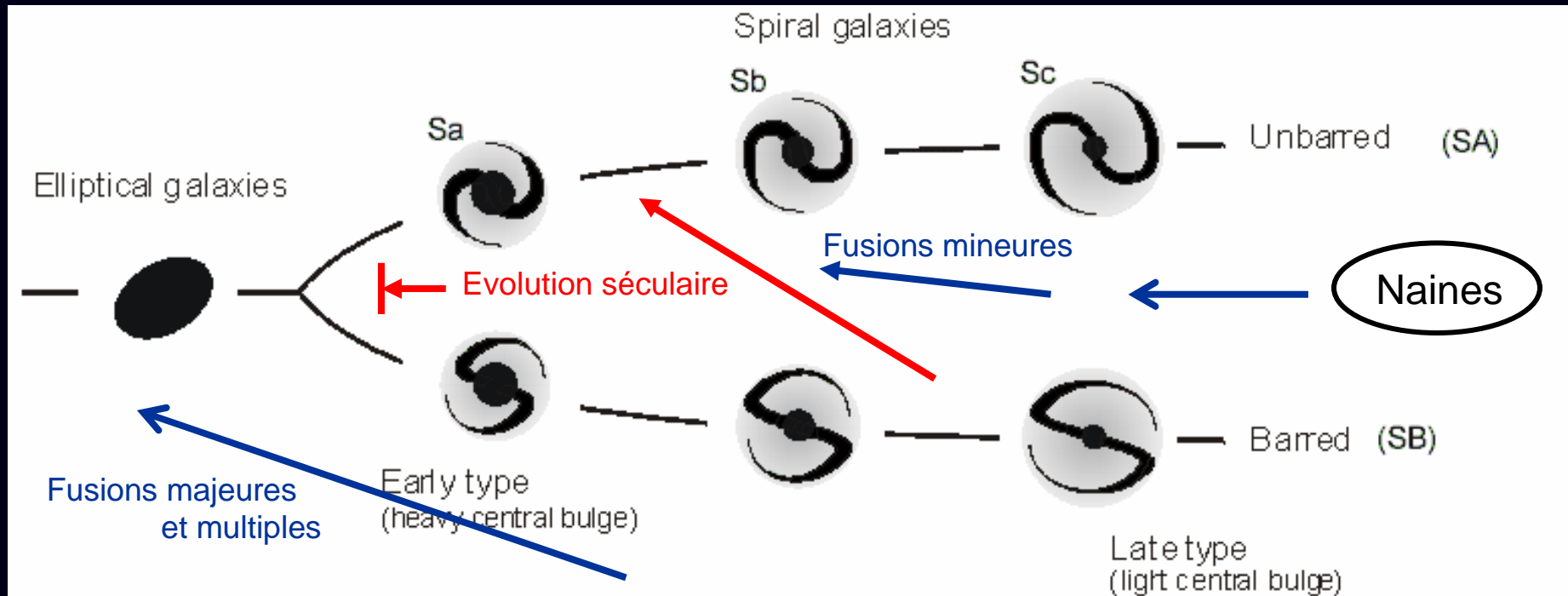
Scénario hiérarchique

- Fluctuations primordiales
- Temps de collapse fonction de la taille
- Galaxies naines en premier
- Fusionnent en galaxies plus massives
- Qui s'assemblent ensuite en amas ...

=> Scénario « hiérarchique » de la formation des Galaxies et des grandes structures

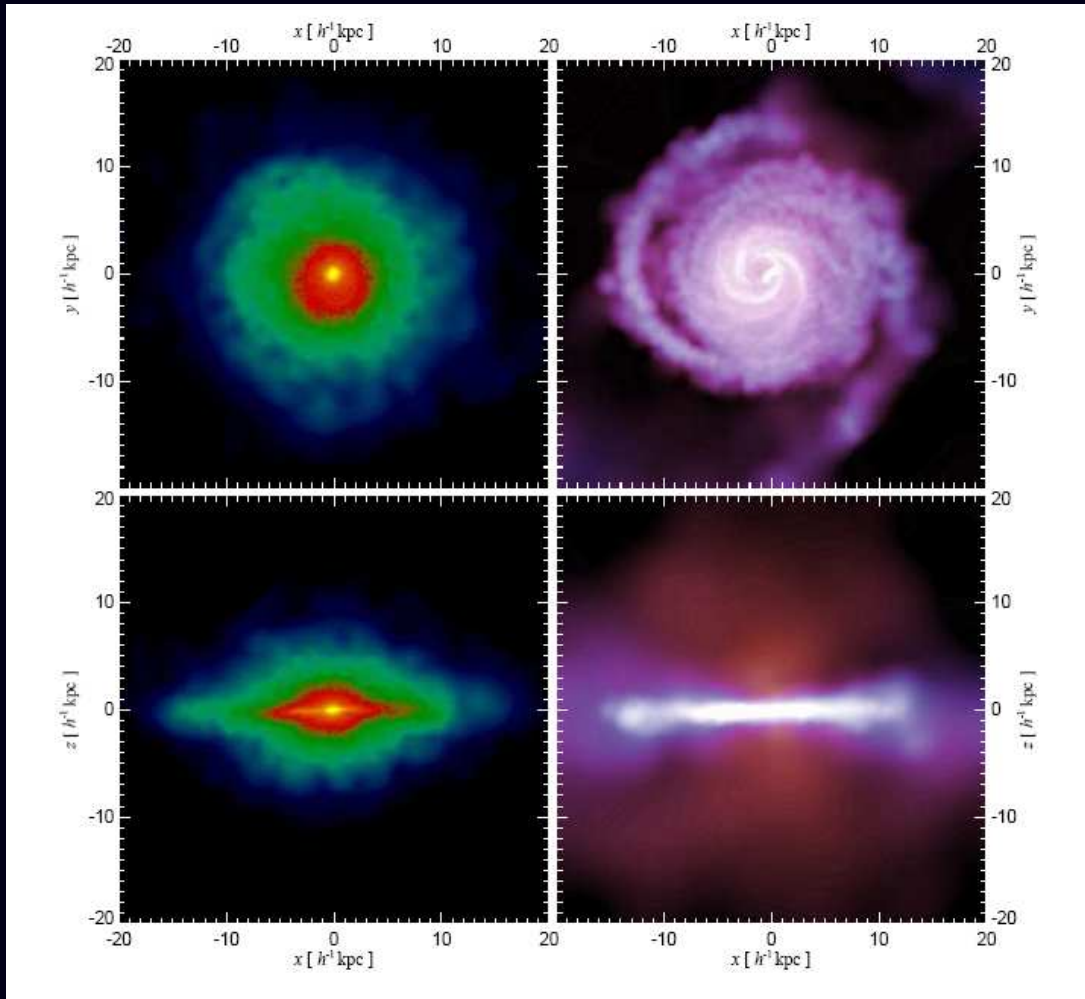


Evolution : séculaire + hiérarchique



- Evolution à sens unique vers les types précoces puis elliptiques (et non barrés)
 - Peu de retour en arrière possible (naines de marée... quelques % de masse)
- => Comment les spirales ont pu doubler leur masse de $z=1$ à $z=0$ (prédit+observé)?

Gas-rich mergers



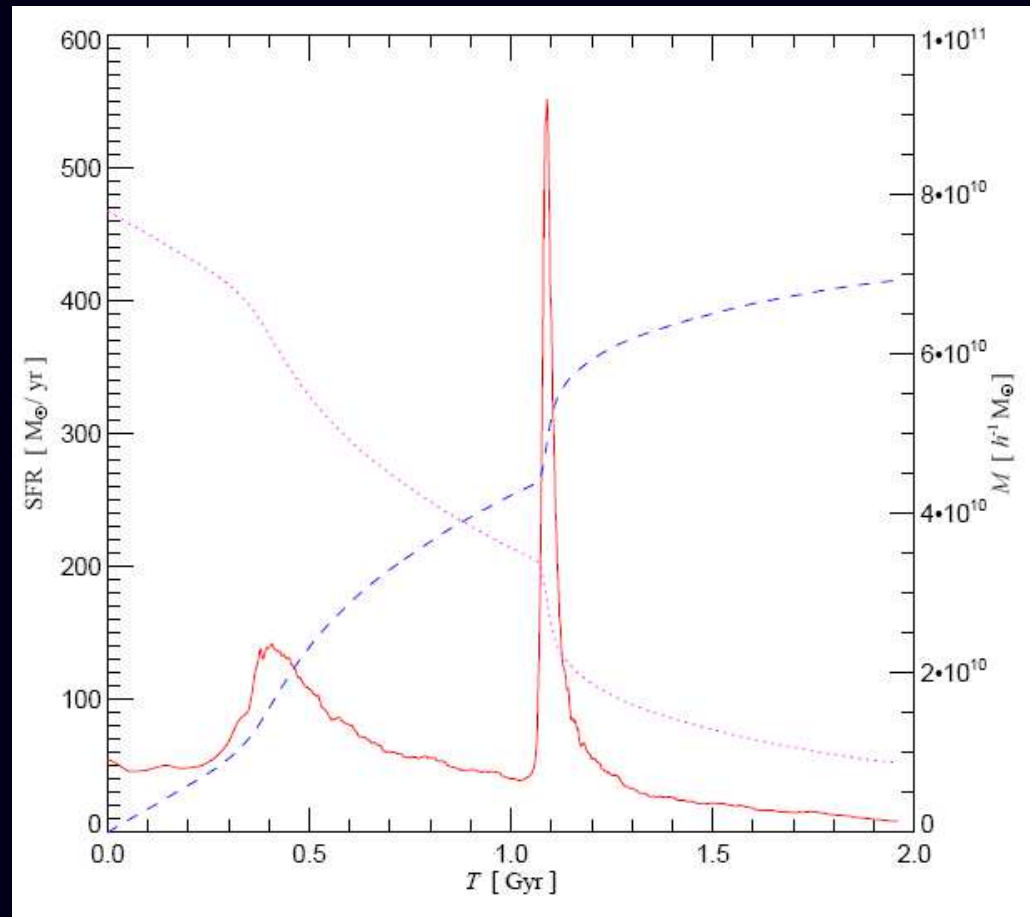
Springel & Hernquist 2005

Fusion 1:1, 100% de gaz à $t=0$

Résultat : galaxie de type lenticulaire

50% disque 50% sphéroïde, même dans ce cas extrême

Gas-rich mergers



Springel & Hernquist 2005

Fusion 1:1, 100% de gaz à $t=0$

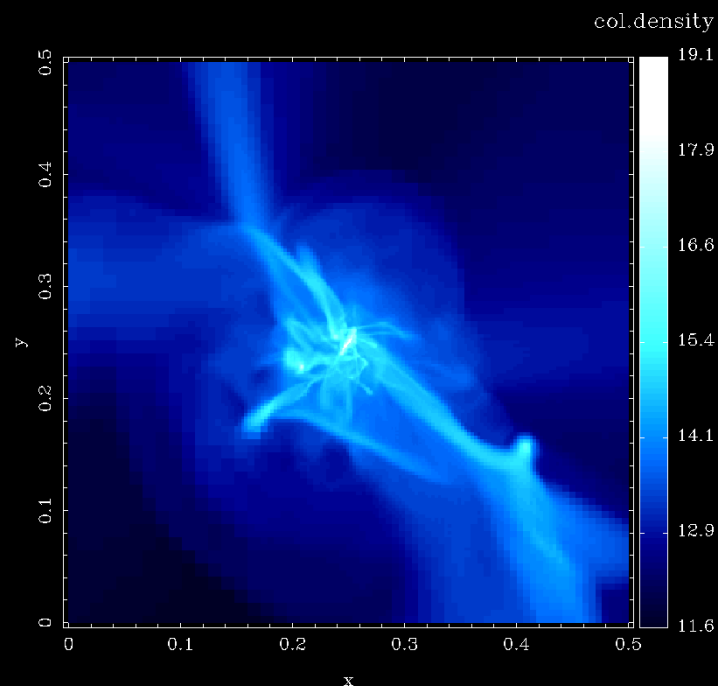
Résultat : galaxie de type lenticulaire

50% disque 50% sphéroïde, même dans ce cas extrême

Accretion de gaz diffus

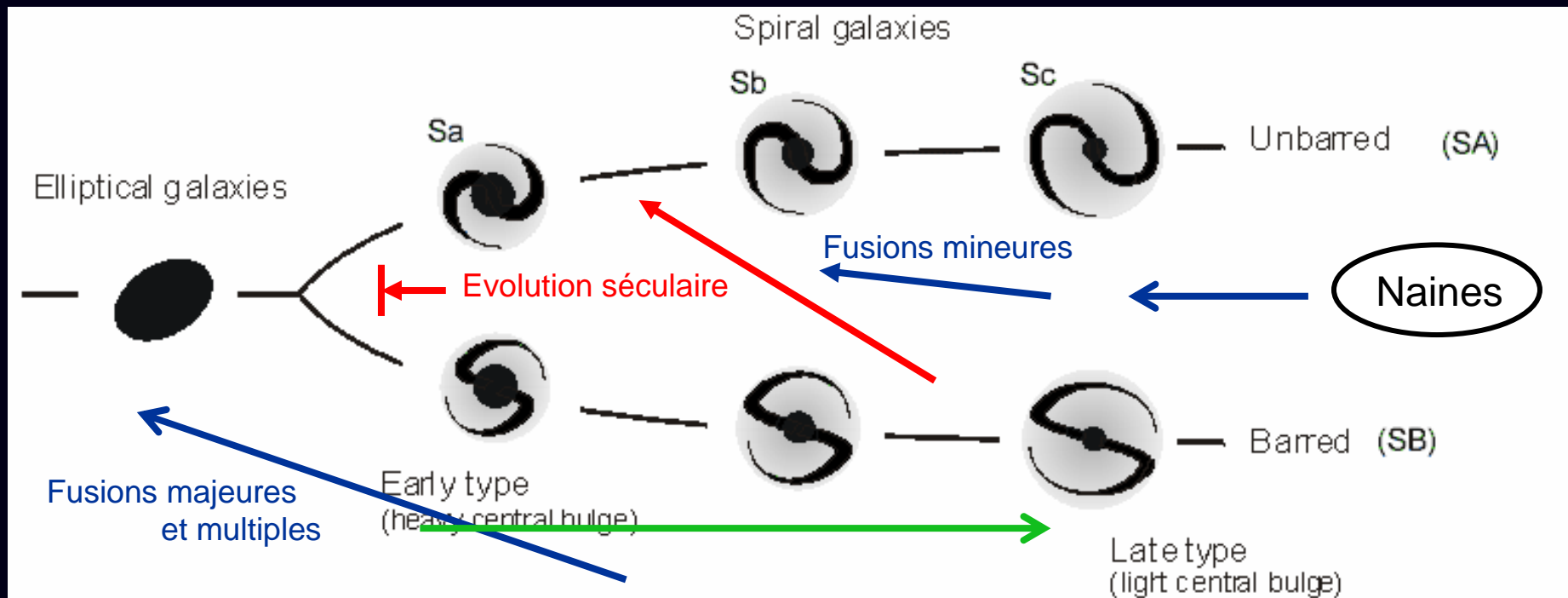
La croissance par le *seul* processus de fusion hiérarchique est exclue, il y a besoin d'accrétion de gaz diffus:

- Nécessaire pour conserver les disques stellaires fins, les barres, les spirales grand-design...
- Prédit (?) par les modèles cosmologiques « standards » (Λ -CDM)



Formation of a spiral galaxy,
Kravtsov et al.

Evolution : séculaire + hiérarchique



- Evolution à sens unique vers les types précoces puis elliptiques (et non barrés)
 - Peu de retour en arrière possible (naines de marée... quelques % de masse)
- => Comment les spirales ont pu doubler leur masse de $z=1$ à $z=0$ (prédit+observé)?

Bimodalité des galaxies

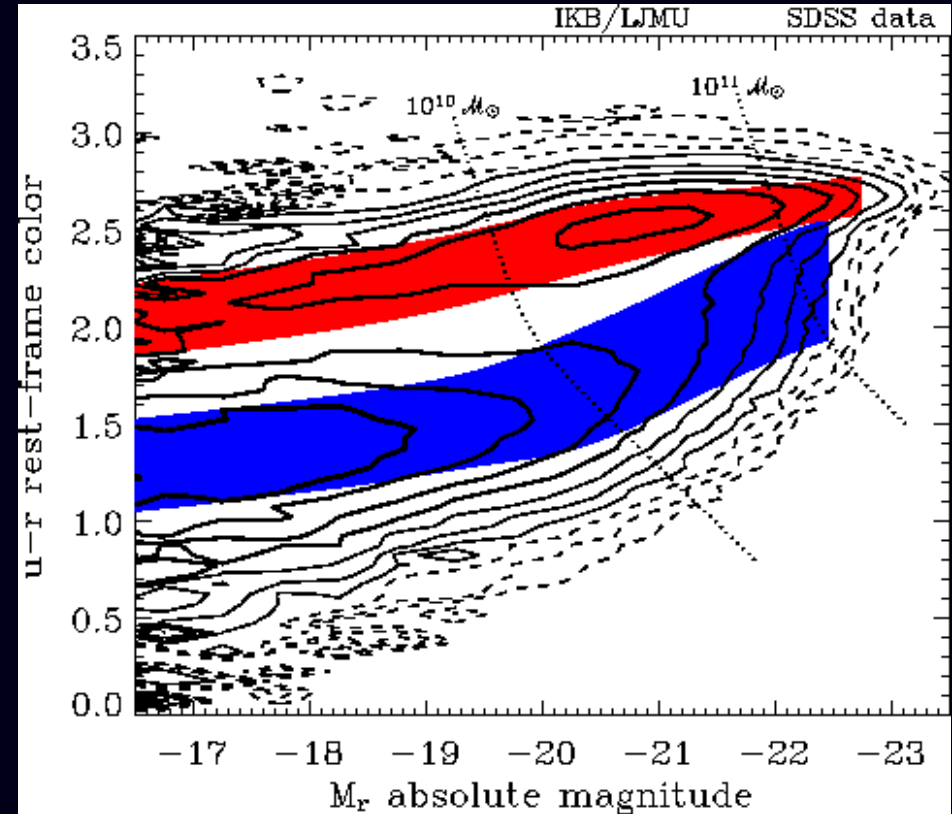
- Galaxies rouges / galaxies bleues

- Explication possible:

au-dessus d'une certaine masse de halo
le gaz accrété n'est plus choqué et
n'alimente plus le disque en matériel
⇒ Croissance par mergers (rouge)

En-deçà de la masse critique, le disque
accrète de la masse, formation stellaire
(bleu)

(Dekel & Birnboim 2006)



Bimodalité des galaxies

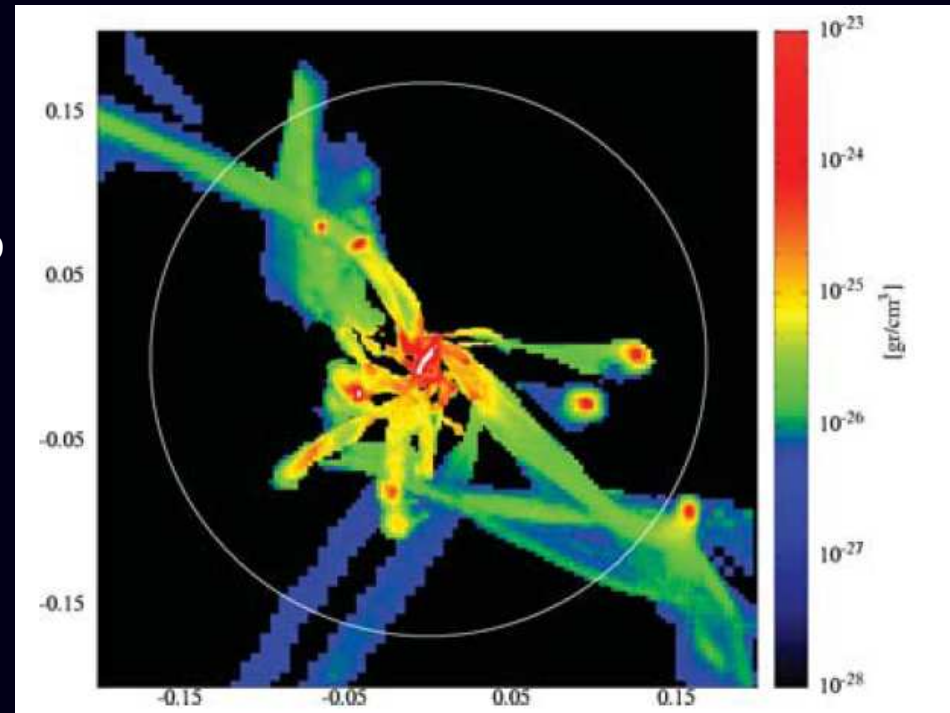
- Galaxies rouges / galaxies bleues

- Explication possible:

au-dessus d'une certaine masse de halo
le gaz accrété n'est plus choqué et
n'alimente plus le disque en matériel
⇒ Croissance par mergers (rouge)

En-deçà de la masse critique, le disque
accrète de la masse, formation stellaire
(bleu)

(Dekel & Birnboim 2006)



Bimodalité des galaxies

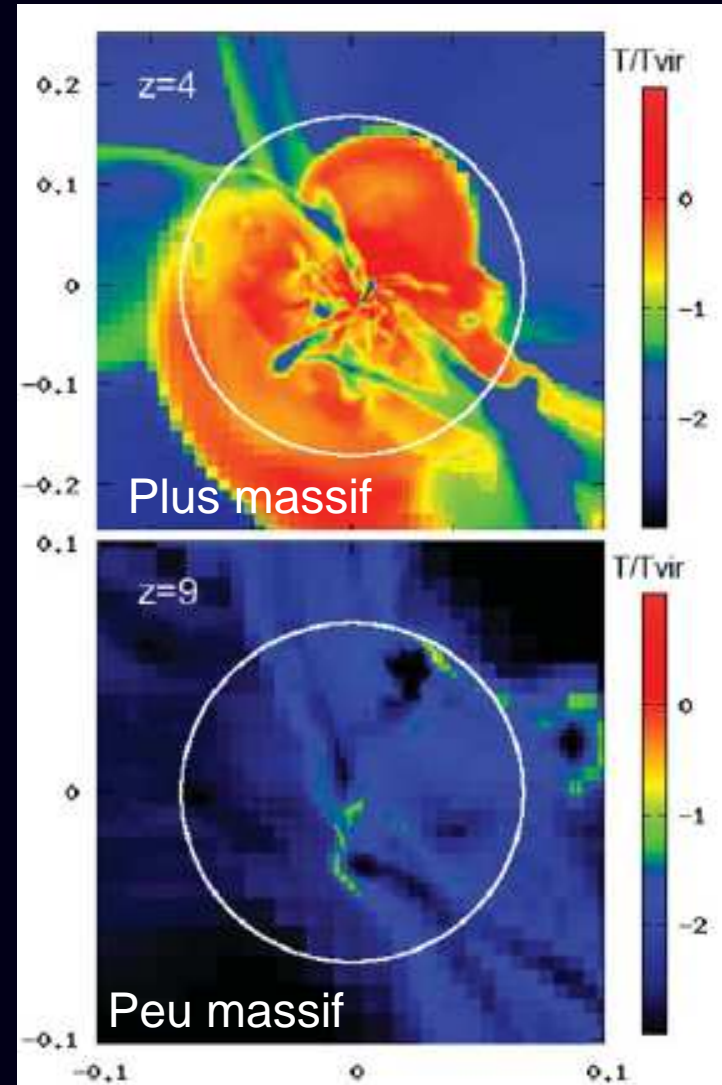
- Galaxies rouges / galaxies bleues

- Explication possible:

au-dessus d'une certaine masse de halo
le gaz accrété n'est plus choqué et
n'alimente plus le disque en matériel
⇒ Croissance par mergers (rouge)

En-deçà de la masse critique, le disque
accrète de la masse, formation stellaire
(bleu)

(Dekel & Birnboim 2006)



Cartes de température

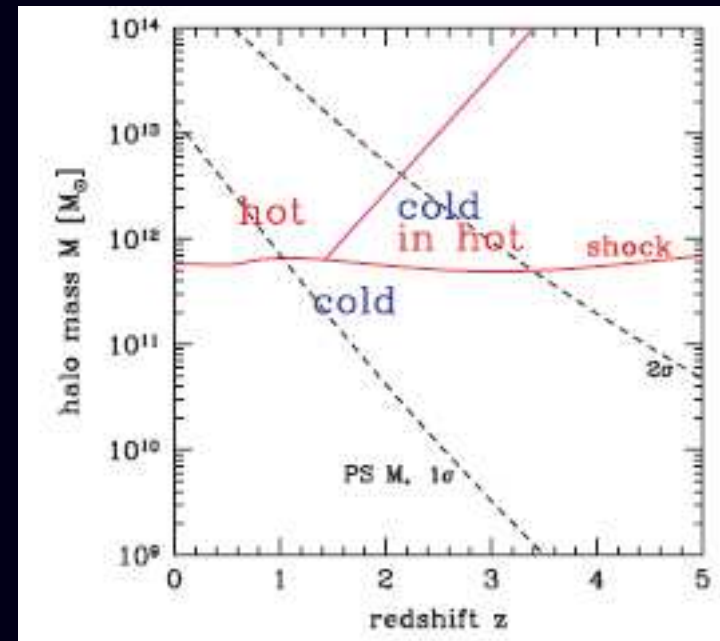
Bimodalité des galaxies

- Galaxies rouges / galaxies bleues
- Explication possible:

au-dessus d'une certaine masse de halo
le gaz accrété n'est plus choqué et
n'alimente plus le disque en matériel
⇒ Croissance par mergers (rouge)

En-deçà de la masse critique, le disque
accrète de la masse, formation stellaire
(bleu)

(Dekel & Birnboim 2006)



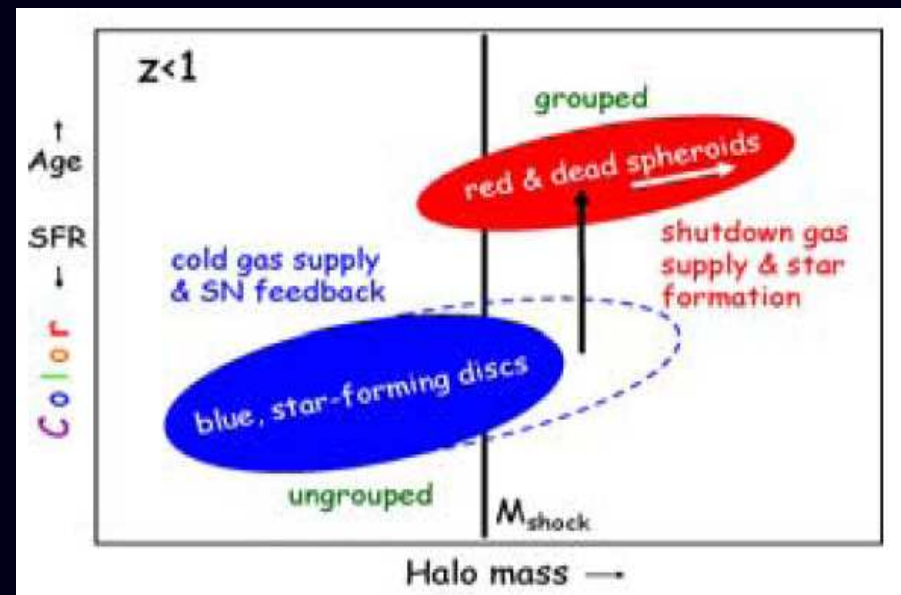
Bimodalité des galaxies

- Galaxies rouges / galaxies bleues
- Explication possible:

au-dessus d'une certaine masse de halo
le gaz accrété n'est plus choqué et
n'alimente plus le disque en matériel
⇒ Croissance par mergers (rouge)

En-deçà de la masse critique, le disque
accrète de la masse, formation stellaire
(bleu)

(Dekel & Birnboim 2006)



Les problèmes du CDM

- Accrétion de gaz, conservation des disques...
=> pas purement hiérarchique mais accord avec le CDM
(en tout cas qualitatif)

- Trois problèmes:

Missing dwarfs

Cusps

Moment angulaire



Vraie galaxie...



...simulation Λ -CDM
même masse

Le troisième est le plus complexe à « résoudre »

Matière noire

- Matière non baryonique :

 - « CDM » : reste la meilleure hypothèse mais des problèmes à résoudre

- Missing baryons :

 - Gaz chaud (ex. intra-amas)

Besoin aussi de gaz froid:

 - alimentation de l'accrétion à bas z
 - réservoir pour la formation stellaire

 - => combien et où ?

 - => stabilité des disques?

 - => déclenchement des flambées de formation stellaires ?



