



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Galaxies elliptiques: dynamique et plan fondamental



Françoise Combes



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

Les grandes lignes

- Profils de densité, cœur ou non
- Modélisation de King, Sersic..
- La stabilité des galaxies elliptiques
- Aplatissement et rotation
- Scénarios de formation:
- Effondrement rapide, fusions de galaxies
- Relations d'échelle, Faber-Jackson,
- Le plan fondamental



Galaxies Elliptiques: géantes et naines

(avec les S0: les « early-type » ou ETG)

Différents types

- gE (giant Elliptical)
- E (Elliptical)
- cE (compact Elliptical)
- dE (dwarf Elliptical)

(*brillance de surface cE
supérieure à dE*)

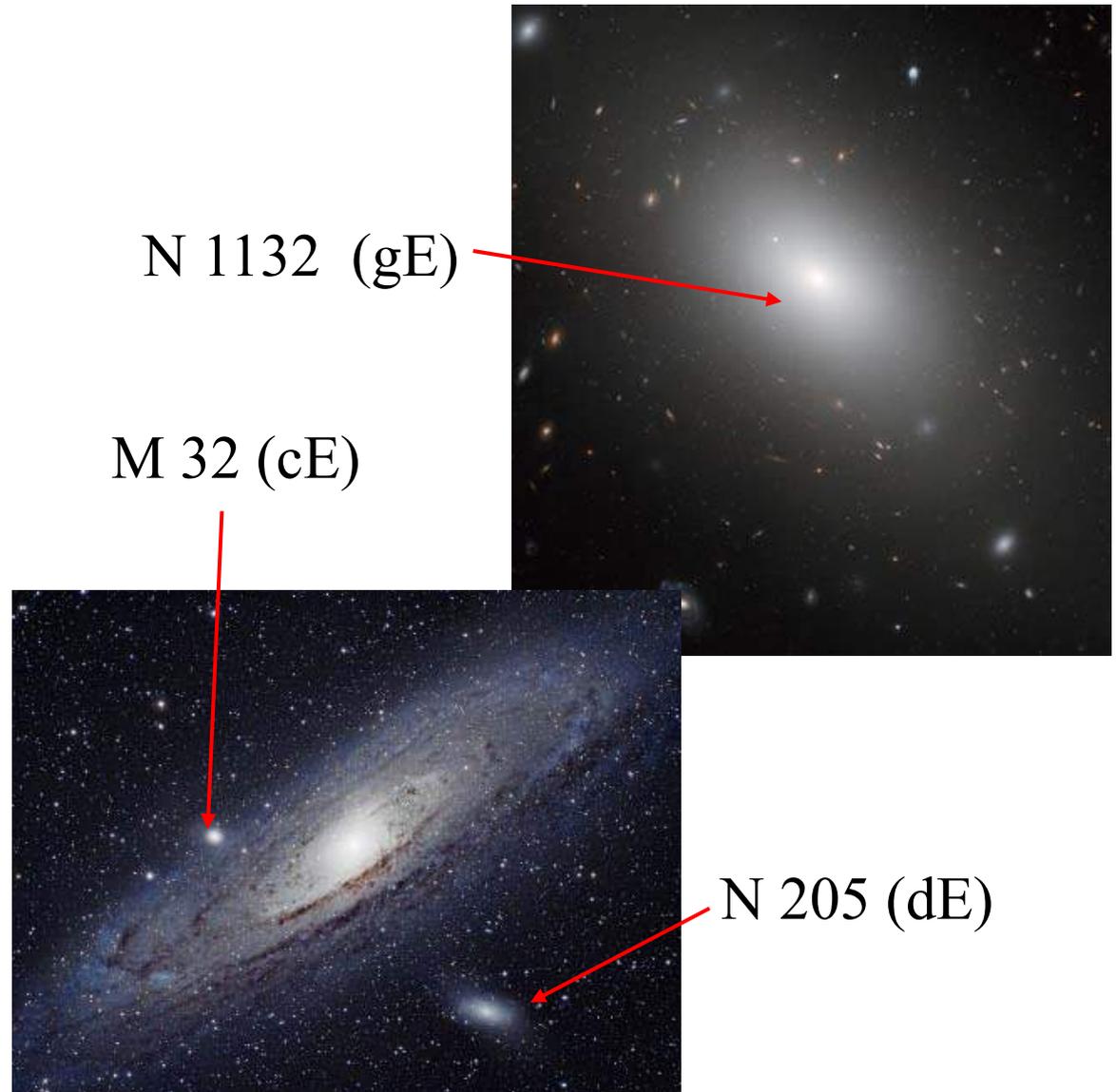
-- BCD, Blue Compact
Dwarf (Starburst)



N 1132 (gE)

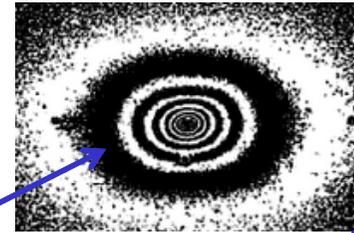
M 32 (cE)

N 205 (dE)

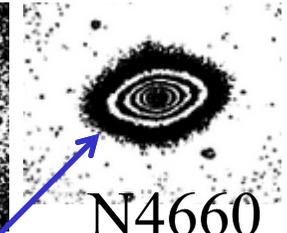


Les "Elliptiques"

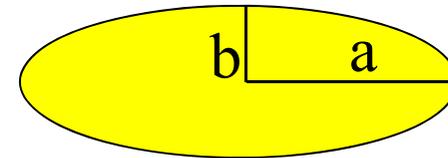
N5322



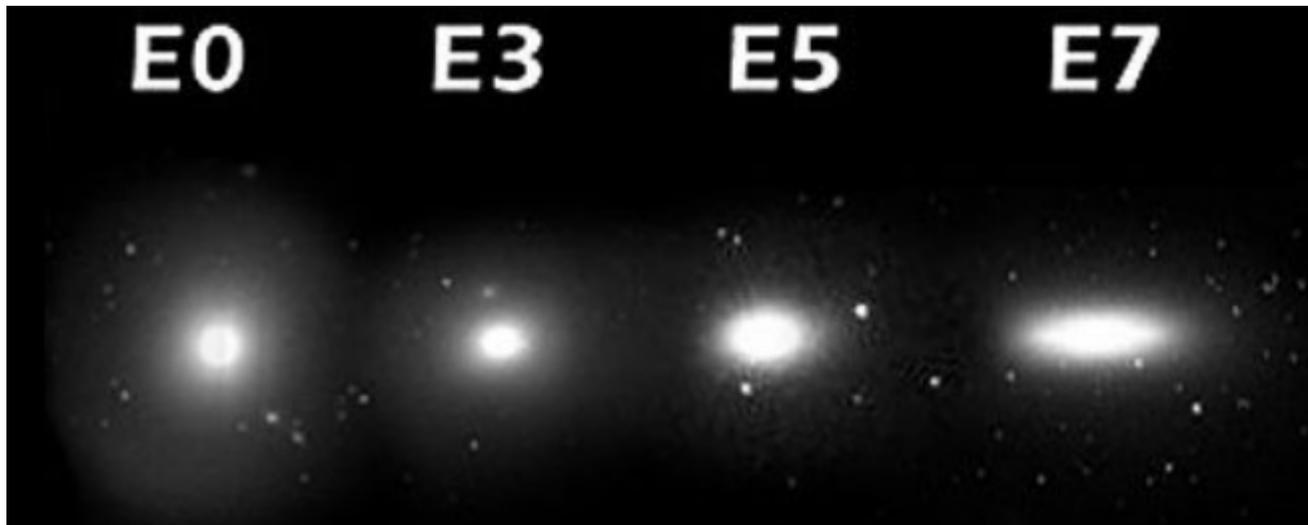
N4660



- isophotes quasi elliptiques (parfois boîte, ou disque)
- ~20% des galaxies sont elliptiques, contiennent >50% masse
- Ellipticité $\epsilon \equiv 1 - b/a$ $0 \leq \epsilon \leq 0.7$



En avec $n=10 \epsilon$

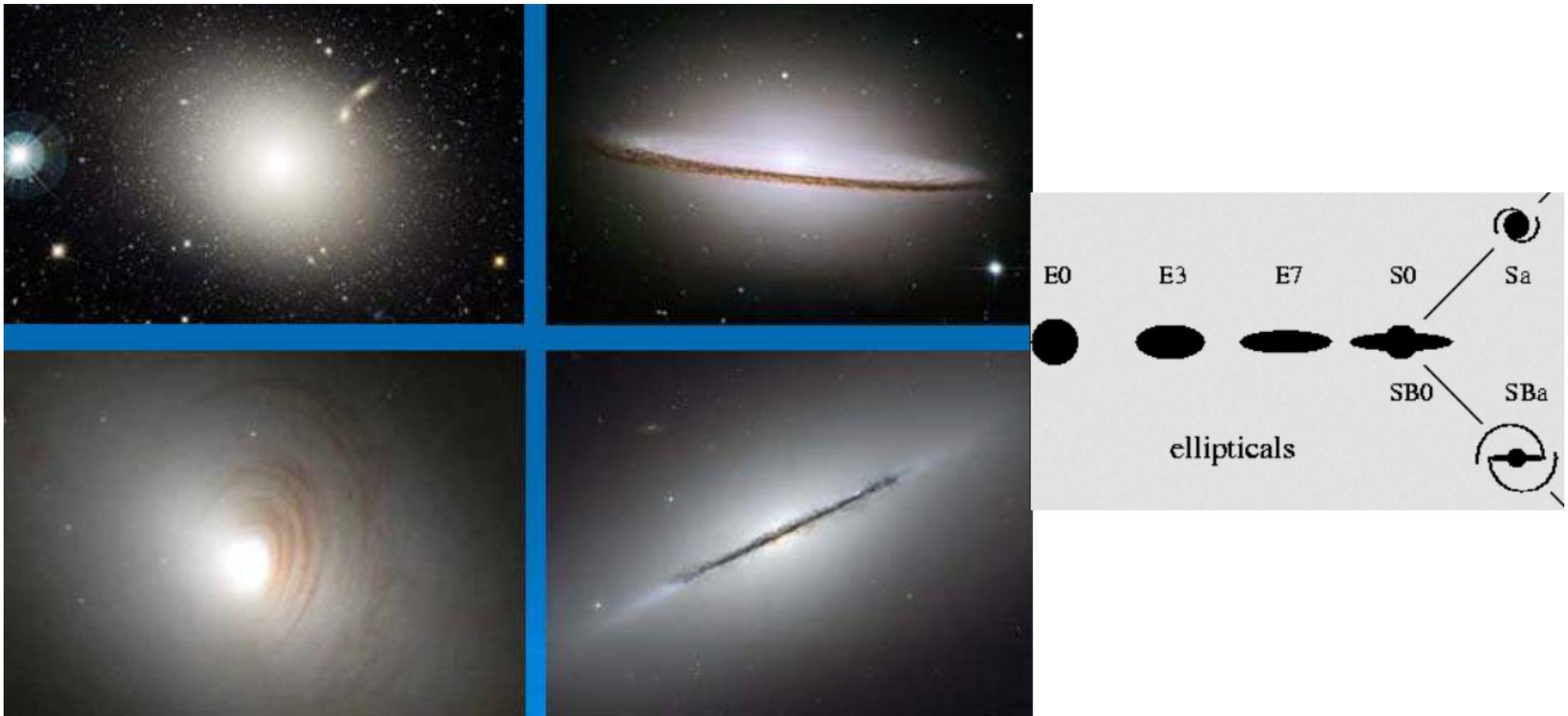


Instabilité
verticale

→ $n > 7$
impossible

Elliptiques & « Early-types » = ETG

Certaines galaxies sont difficiles à classer, entre lenticulaires et elliptiques. La plupart des E-gal ont un disque stellaire



ETG: les différentes sortes

Les E classiques sont massives (10^{10} - $10^{12}M_{\odot}$), profil $\log(I)$ en $R^{1/4}$
Les dE, dSph, cE. Peu massives (10^8 - $10^{10}M_{\odot}$), ou irrégulières

N3377 – E5



N1275 – cD amas de Persée



M110 – dE



N5866 – S0



cE0



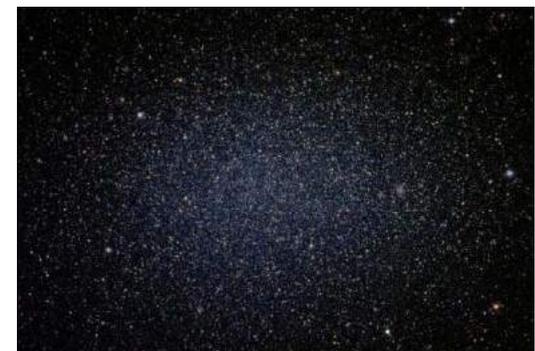
N4486b

cE4



IC767

Leo I – dSph



cD: les galaxies cannibales

Les galaxies cD: Elliptiques supergéantes dans les amas (c) avec un halo étendu, qui les fait apparaître diffuses (D)

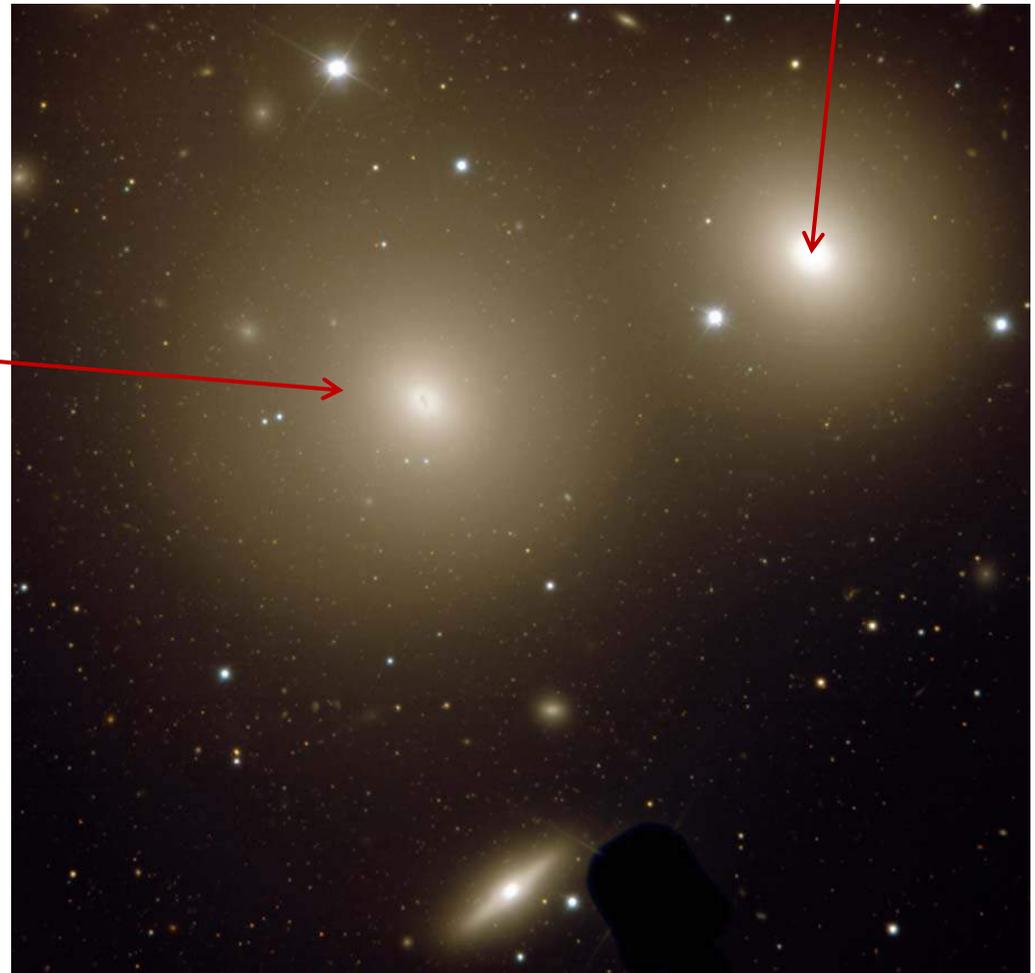
Avalent toutes les galaxies du voisinage → enveloppe

NGC 3311 (cD)

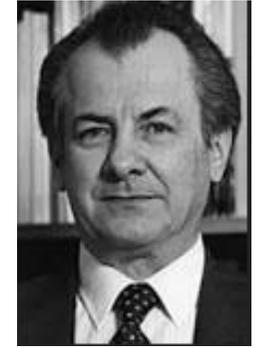
centre de l'amas de Hydra

Présence de milliers d'amas globulaires autour de ces galaxies

NGC 3309 (gE)



Profil de Luminosité



1918-95

Empiriquement, la meilleure distribution de lumière est la loi de De Vaucouleurs

$$I_{surf}(R) = I_e \exp\left(-7.669\left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/4} - 1\right]\right)$$

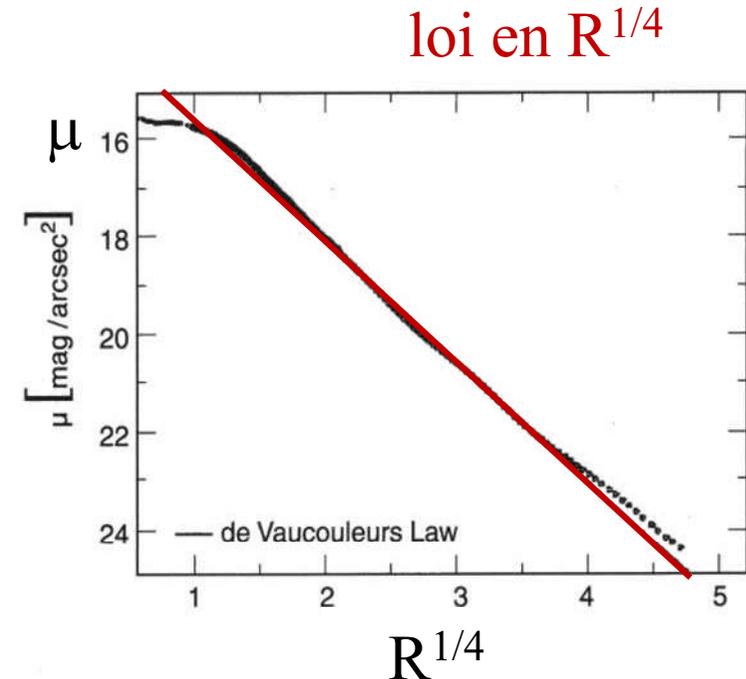
soit:
$$\mu = \mu_e + 8.33\left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/4} - 1\right]$$

R_e = Rayon effectif (contient la moitié de la lumière)

I_e = brillance de surface à R_e

Généralisé à $R_e = \sqrt{a_e b_e}$

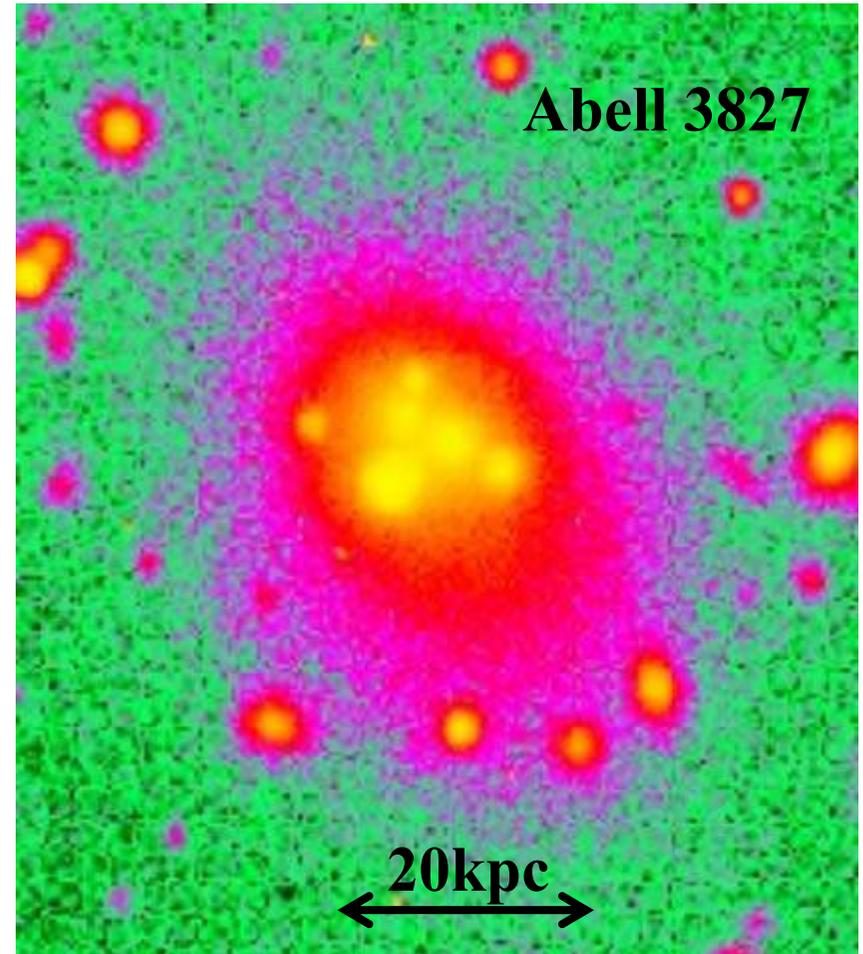
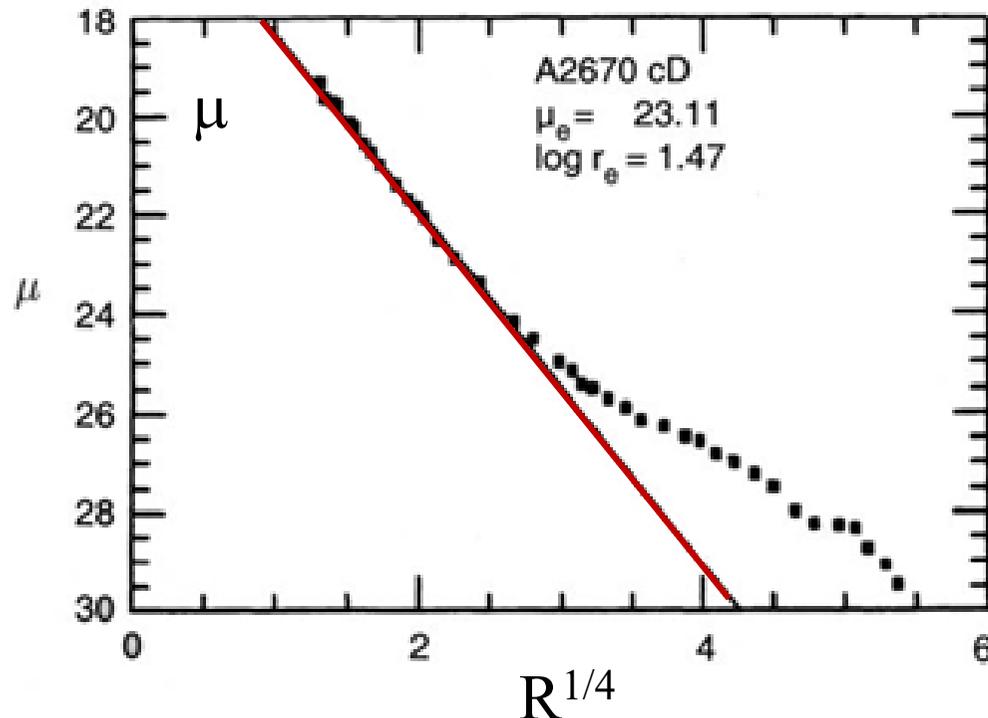
pour a_e et b_e les grand et petit axes



galaxies cD, profil étendu

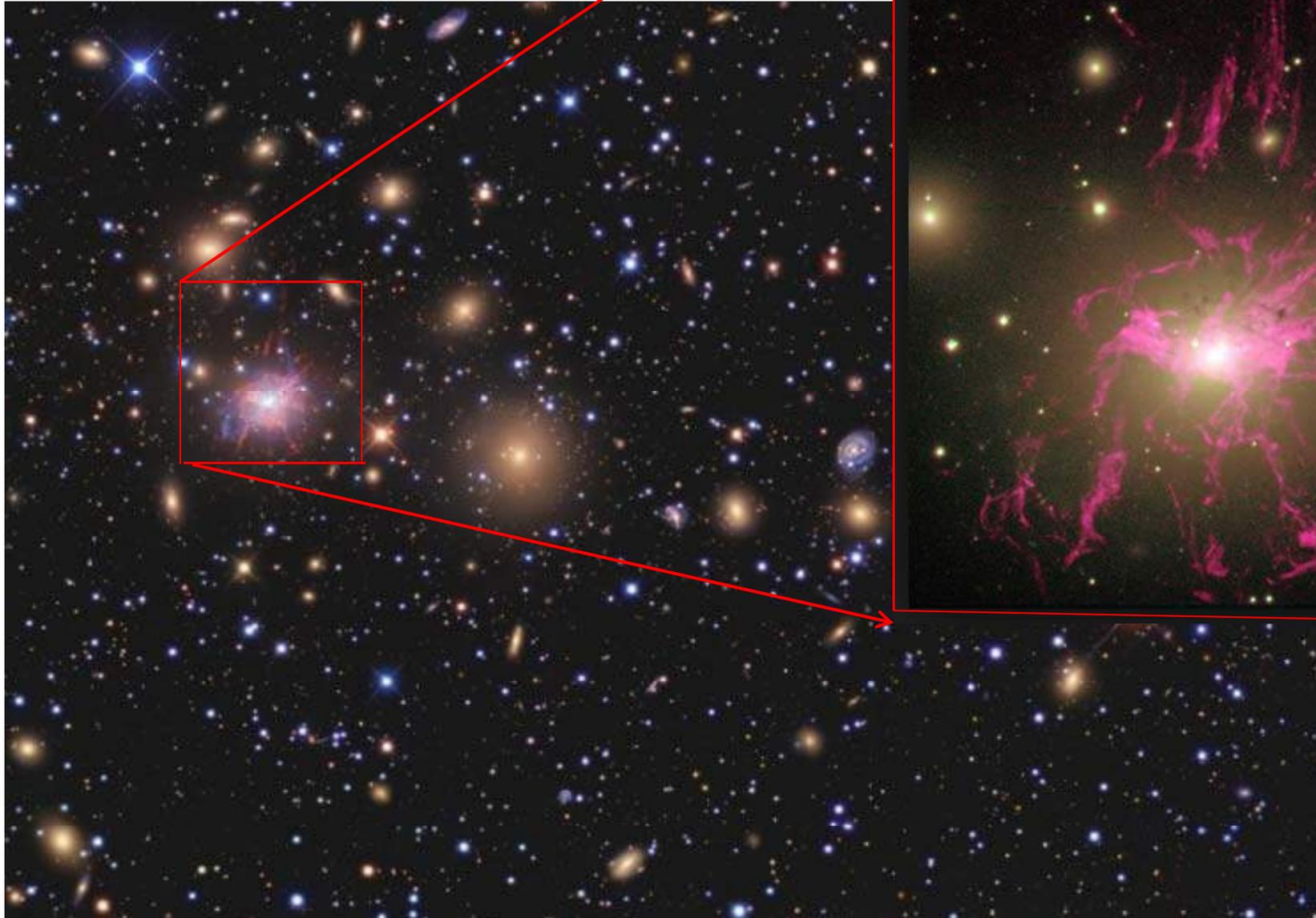
Les galaxies cD ont un excès de brillance à grand rayon par rapport au profil en $r^{1/4}$

→ Le halo brillant pourrait être dû aux étoiles des galaxies avalées



→ Ou bien la galaxie principale de l'amas est le centre où s'accumule le gaz qui se refroidit à partir du gaz X

Amas de Persée: cD
flot de refroidissement



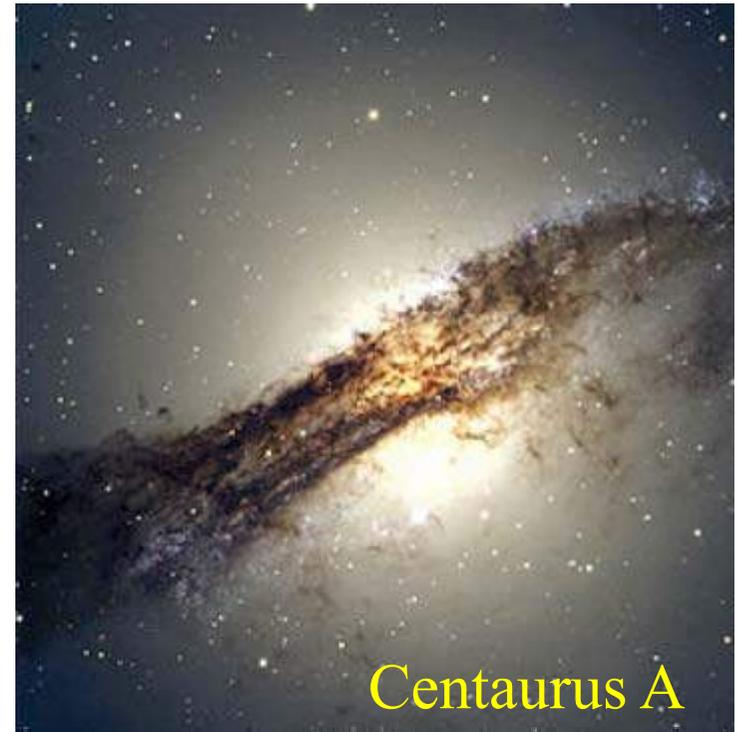
Pas aussi simples

Profil lisse, vieilles étoiles, pas de disque, pas de formation d'étoiles (SF)

→ Mais quand on regarde plus près: SF, poussière, disque

→ Signatures d'interactions récentes

→ Il existe des halos de gaz chaud (X)



Amas de
Fornax



Profils de densité

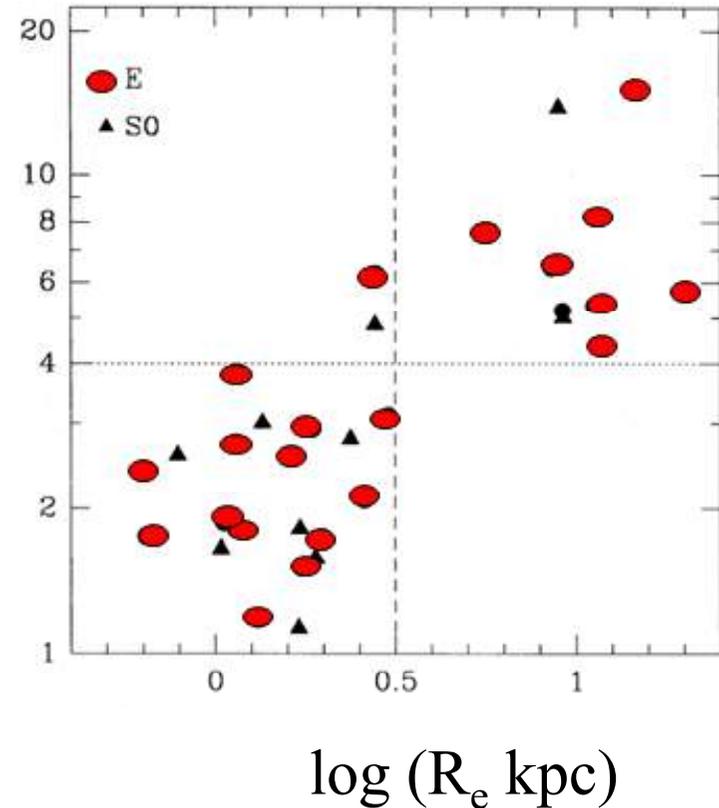
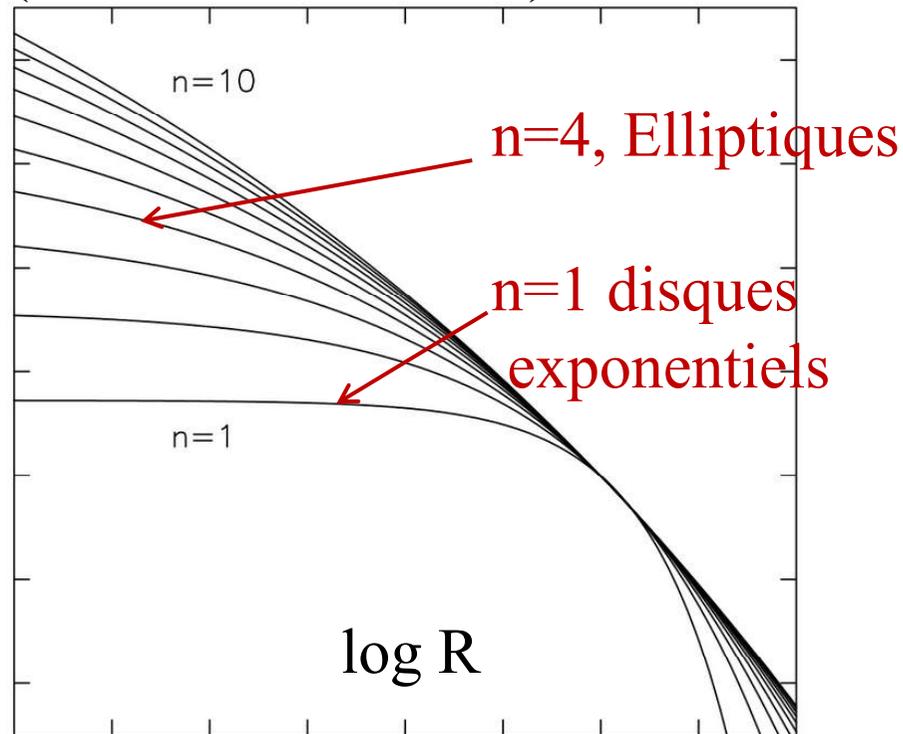
Le profil de de Vaucouleurs en $R^{1/4}$

$$\log(I/I_e) = -3.33 (R/R_e)^{1/4} - 1$$

Le profil de Sersic $\log I \propto R^{1/n}$

n (Sersic)

$\log I$ (brillance de surface)



Caon et al 1993

Avec HST: un cœur au centre (core)

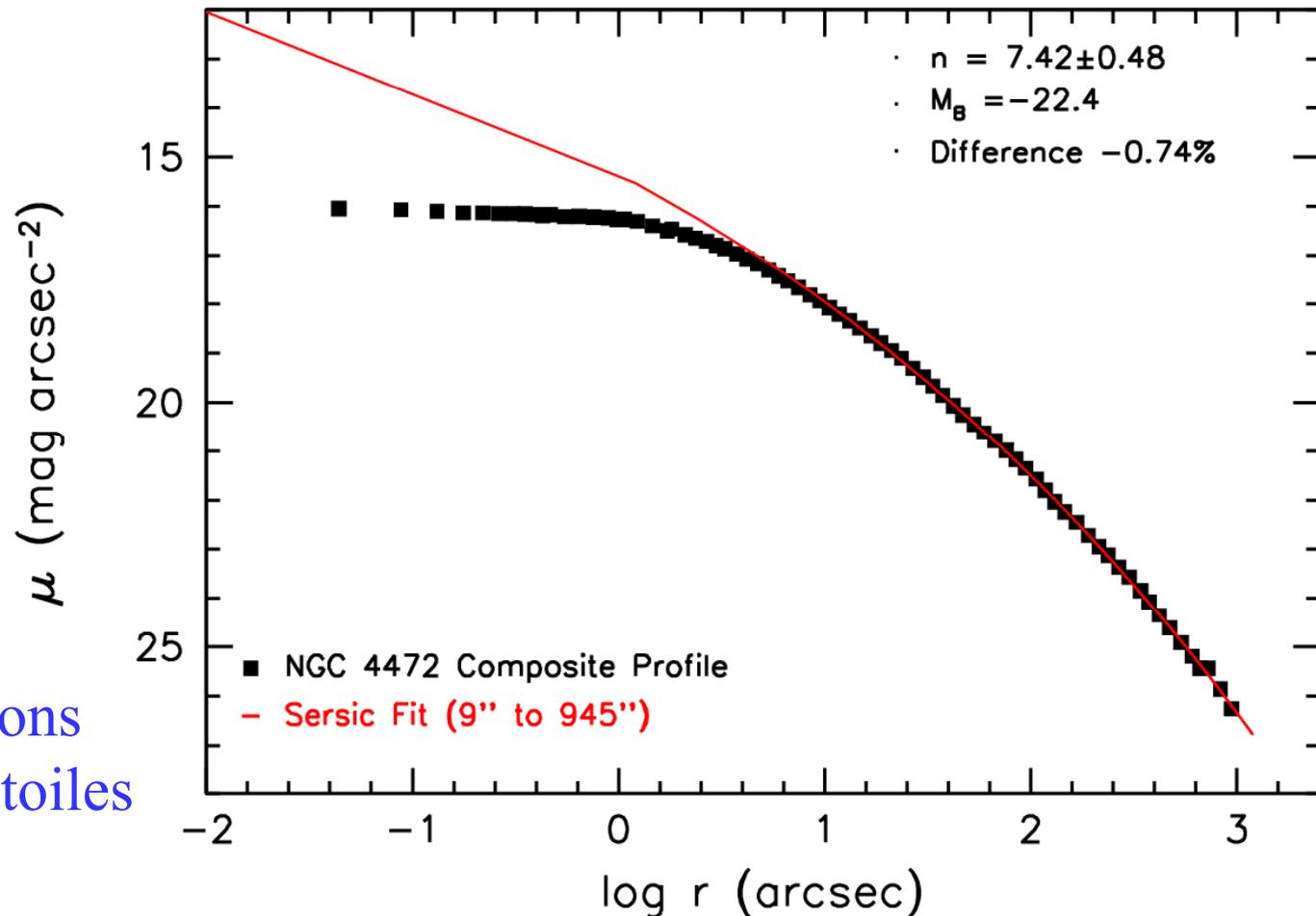
$$I(r) = I_b 2^{(\beta-\gamma)/\alpha} \left(\frac{r_b}{r}\right)^\gamma \left[1 + \left(\frac{r}{r_b}\right)^\alpha\right]^{(\gamma-\beta)/\alpha}$$

Loi des « Nuker »
 r_b rayon de coeur

Sersic + core
avec pente
 $\gamma \sim 0-0.2$

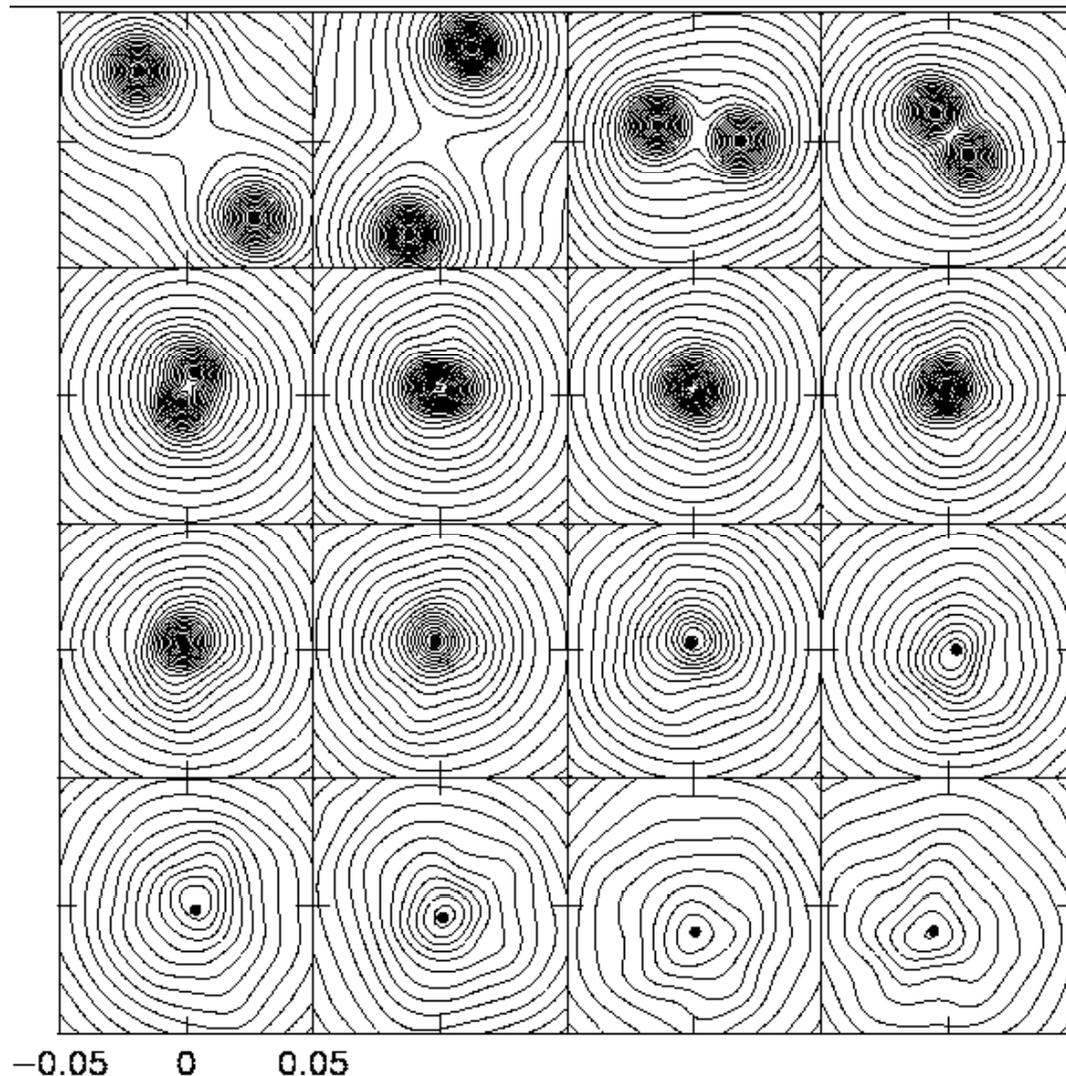
Trujillo et al 2004

Origine du cœur?
Trous noirs et fusions
qui chauffent les étoiles

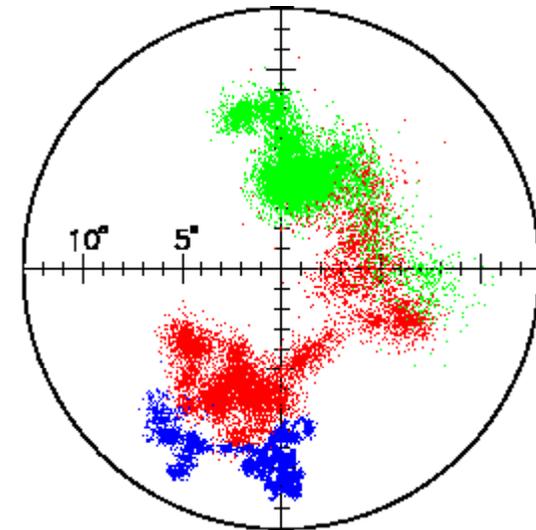


Fusions de trous noirs massifs

La fusion doit être assez rapide pour éviter la collision avec un 3^{ème} trou noir et son éjection *Milosavljevic & Merritt 2001*



Le cœur se forme avec la binaire, puis est détruit lentement par un trou noir isolé (*Merritt 2006*)



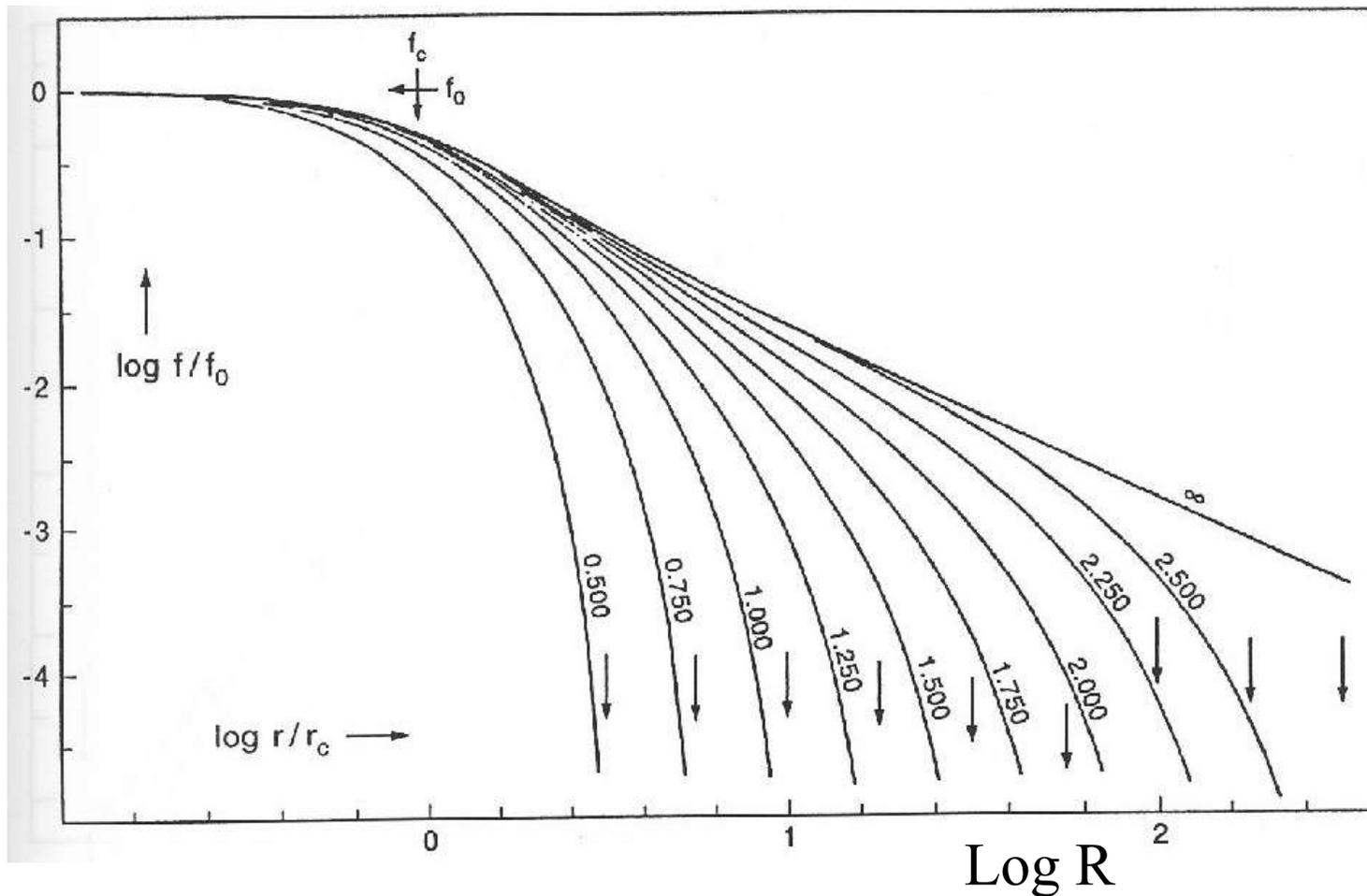
Simulations: errance du trou noir

Profils de King

Energie E: intégrale
du mouvement
Distribution de Boltzmann

$$F(E) = 0 \quad E > E_0$$

$$F(E) = (2\pi \sigma^2)^{-1.5} \rho_0 [\exp(E_0 - E)/\sigma^2 - 1] \quad E < E_0$$

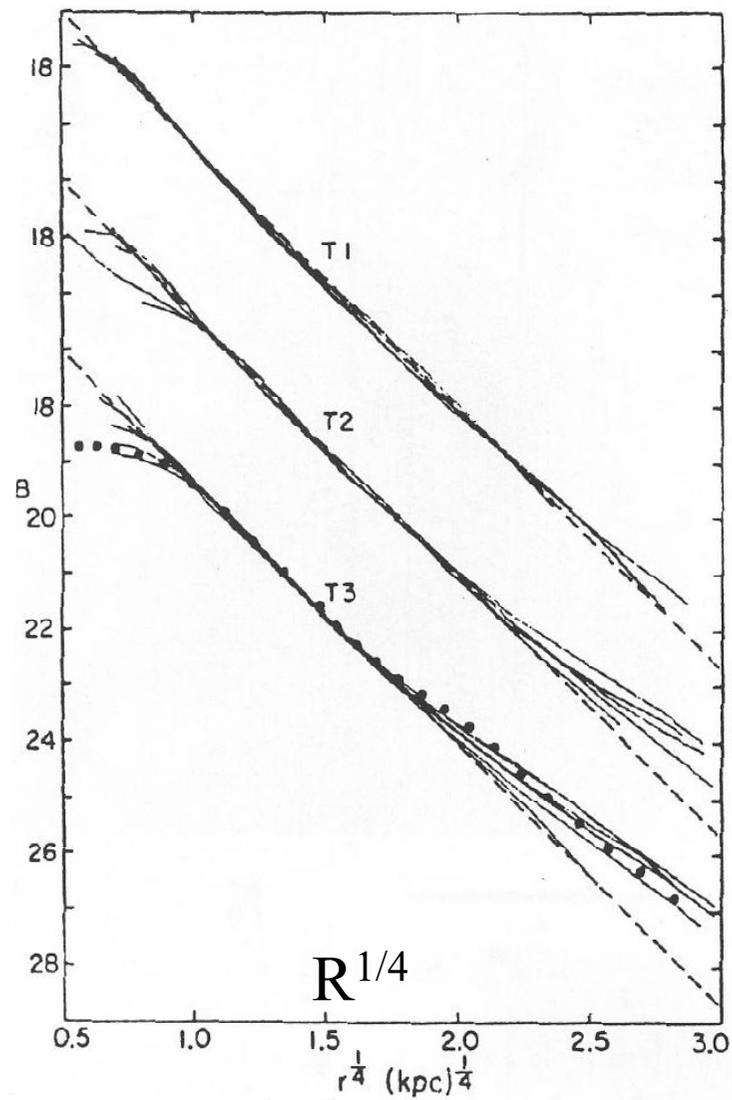


$$C = \log(r_t/r_c)$$

r_t = tidal radius

r_c = core radius

Déformations des parties externes



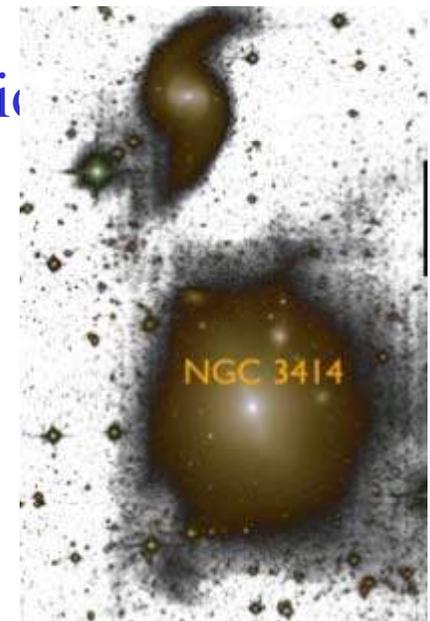
Les divers profils en fonction de la déformation de marée des elliptiques

T1: galaxies isolées

T3: voisins proches

par rapport à une distribution de Vaucouleurs en $R^{1/4}$

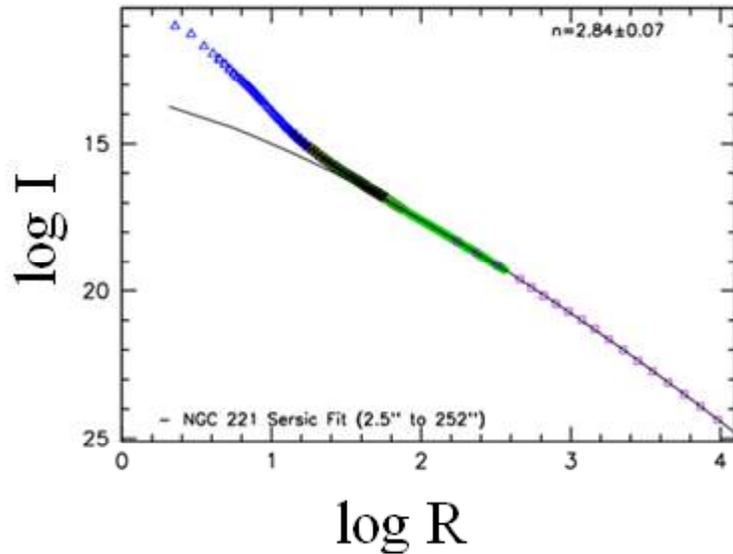
Kormendy 1982



Duc et al 2014

Avec ou sans coeur

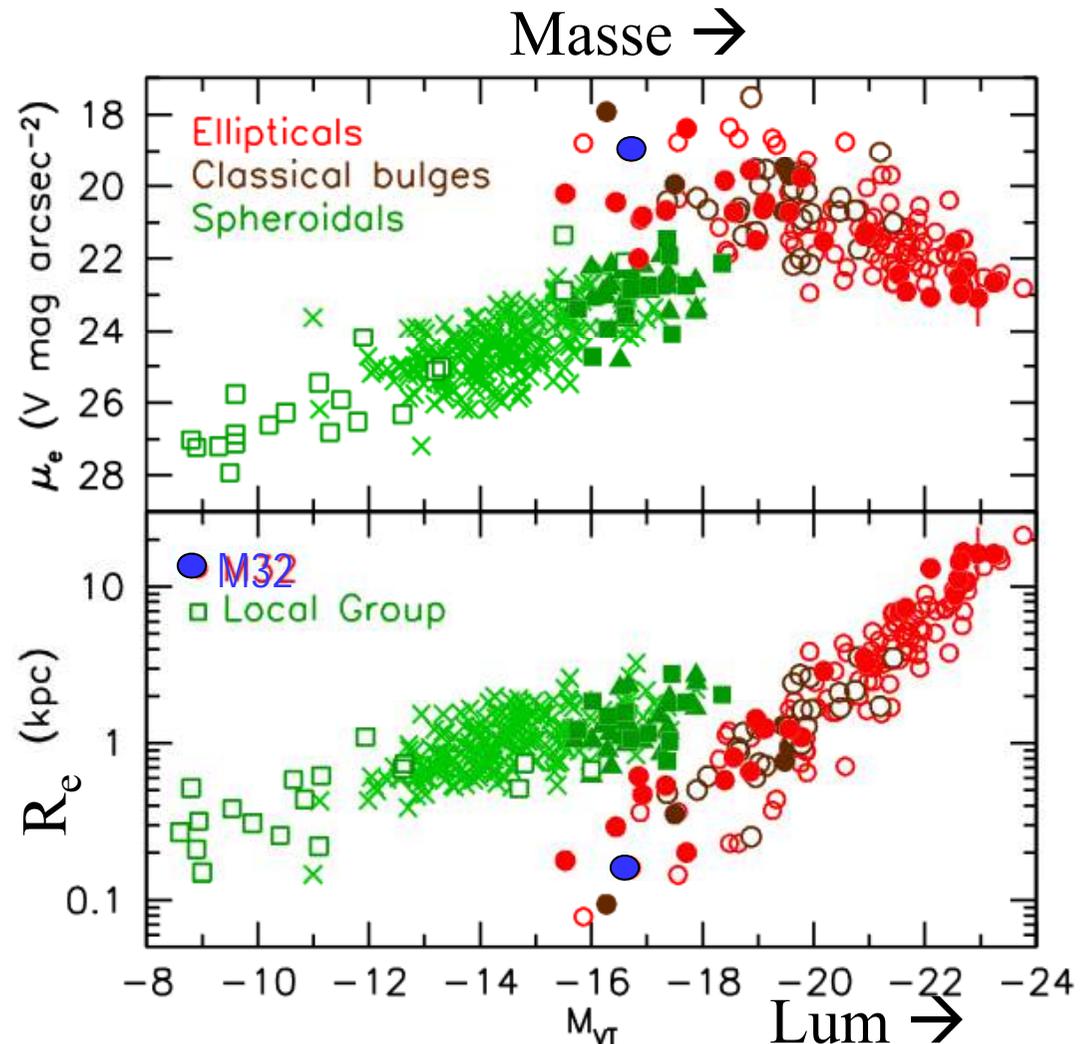
La brillance de surface décroît
pour les E massives
Au contraire pour les Sph



Parfois même excès de lumière
au centre (M32)

Peut correspond à un disque
nucléaire, formé après fusion
de galaxies riches en gaz

Kormendy 2008

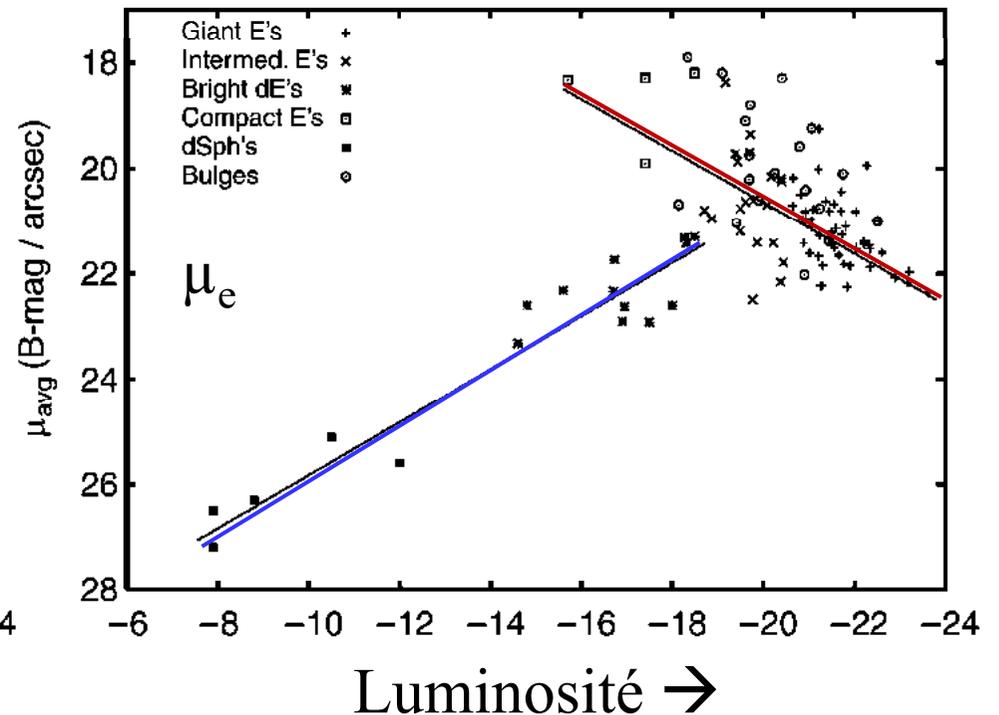
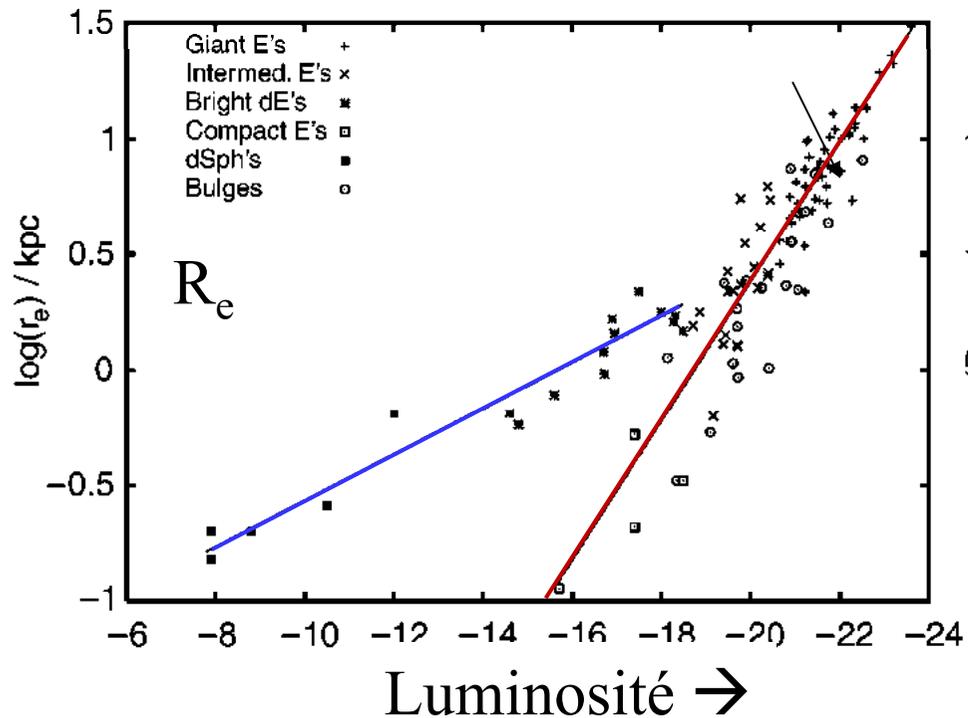


Brillance de surface et Luminosité

- R_e vs luminosité pour les Ell,
 $R_e \propto L^{0.75}$ $L \propto R_e^{1.3}$
- Les dE et dSph sont sur une
 pente différente $R_e \propto L^{0.25}$

La brillance de surface dans
 les Elliptiques normales
 décroît avec $\mu \propto L^{-0.5}$

C'est le contraire pour les
 dE et dSph $\mu \propto L^{0.5}$



Bimodalité des elliptiques

Elliptiques normales et faible L

- rotation rapide
- forme oblate
- aplaties $\sim E3.5$
- sans coeur (même excès)
- $n < 4$
- isophotes à disque

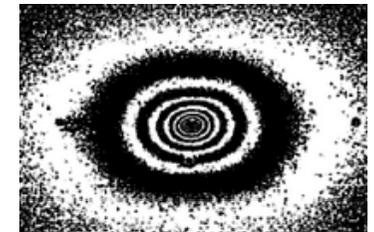


N4660

Elliptiques géantes

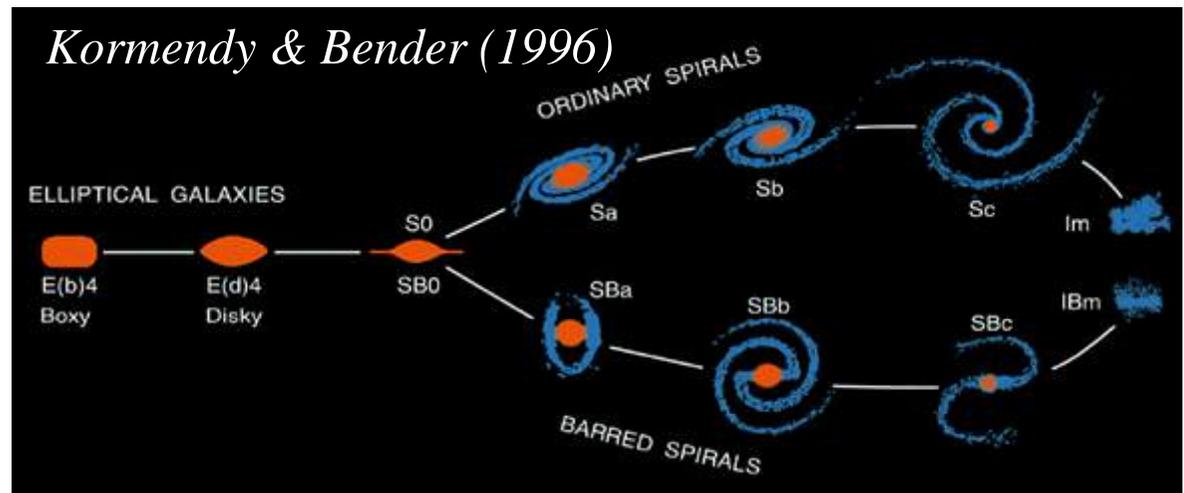
- sans rotation
- ΔV anisotrope, triaxiales
- moins aplaties $\sim E2.5$
- avec coeur
- $n > 4$
- isophotes en boîte

N5322



E après fusion avec gaz
gE fusion sans gaz

Dissipation \rightarrow sans coeur



Forme à 3D des Elliptiques

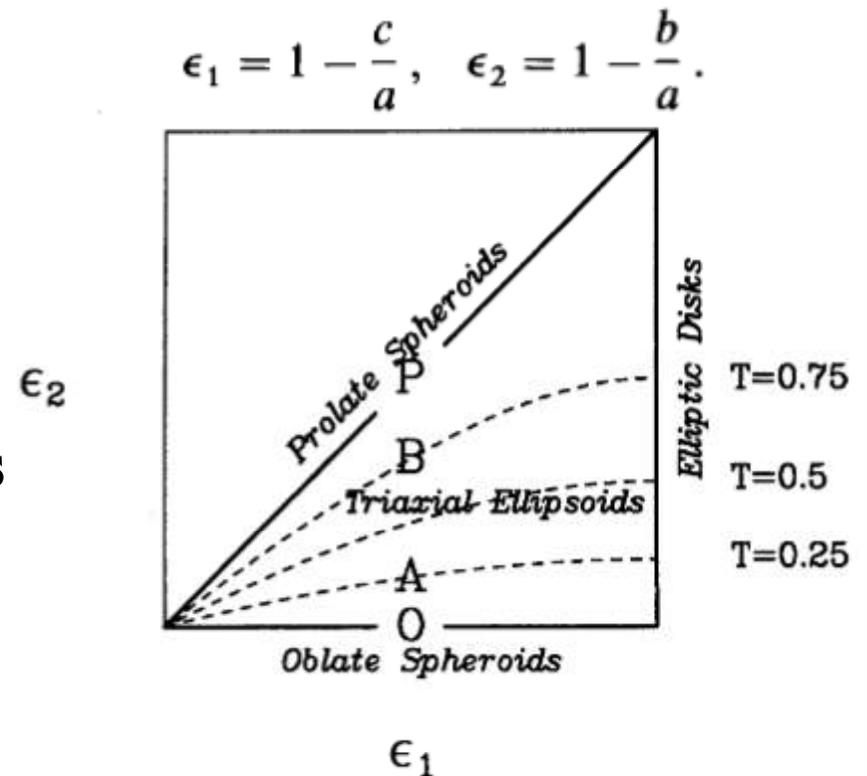
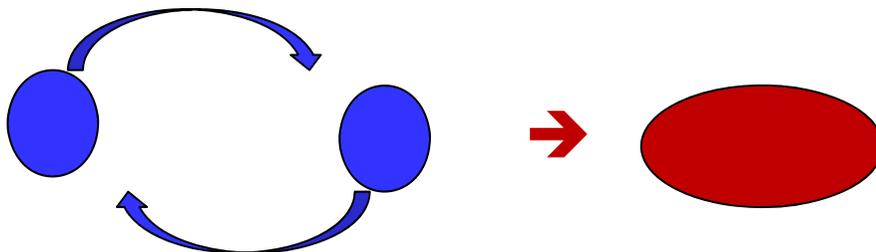
- Historiquement, jusqu'en 1978, on pensait que les Elliptiques étaient aplaties par rotation

Illingworth (1977) mesure les vitesses V_{rot} et dispersion σ de 13 Elliptiques, et trouve $V/\sigma < 1$

→ La rotation ne joue pas de rôle

L'aplatissement est dû à l'anisotropie des vitesses

Les Elliptiques peuvent être triaxiales



Franx et al 1991

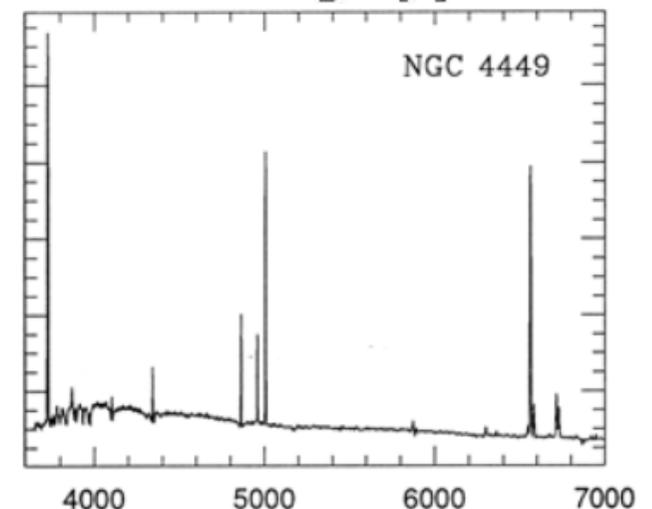
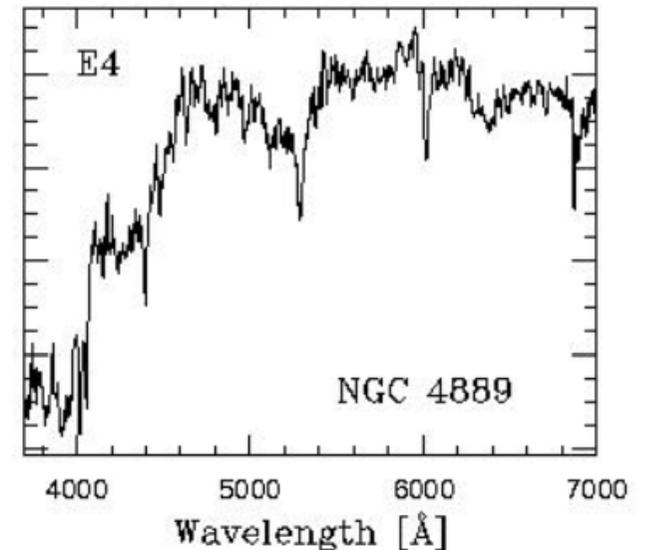
Cinématique des galaxies Elliptiques

Très difficile de mesurer la rotation des galaxies elliptiques
Les spectres des étoiles (raies d'absorption) sont individuellement très larges ($> 200\text{km/s}$)

Cette largeur correspond aux mouvements et à la température dans l'atmosphère de l'étoile

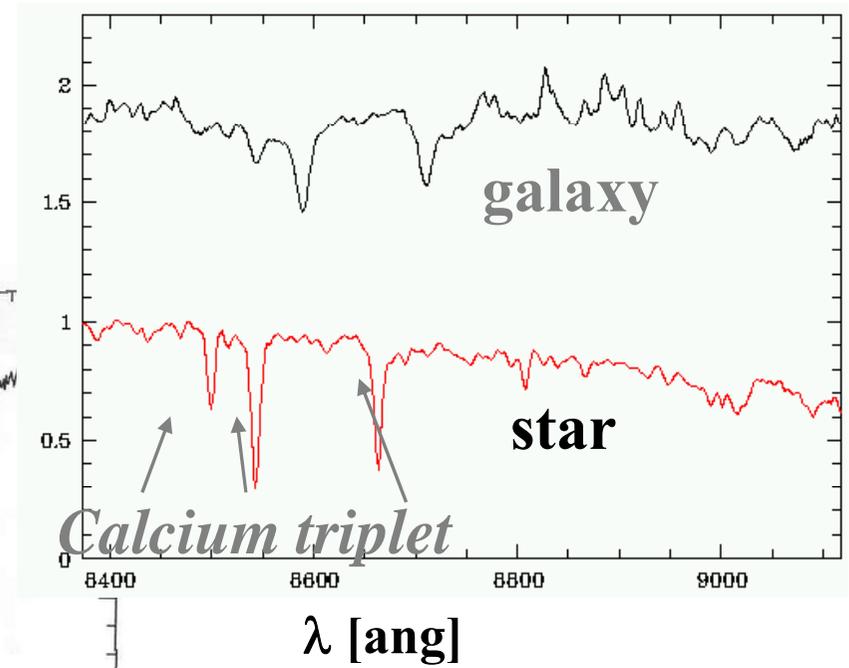
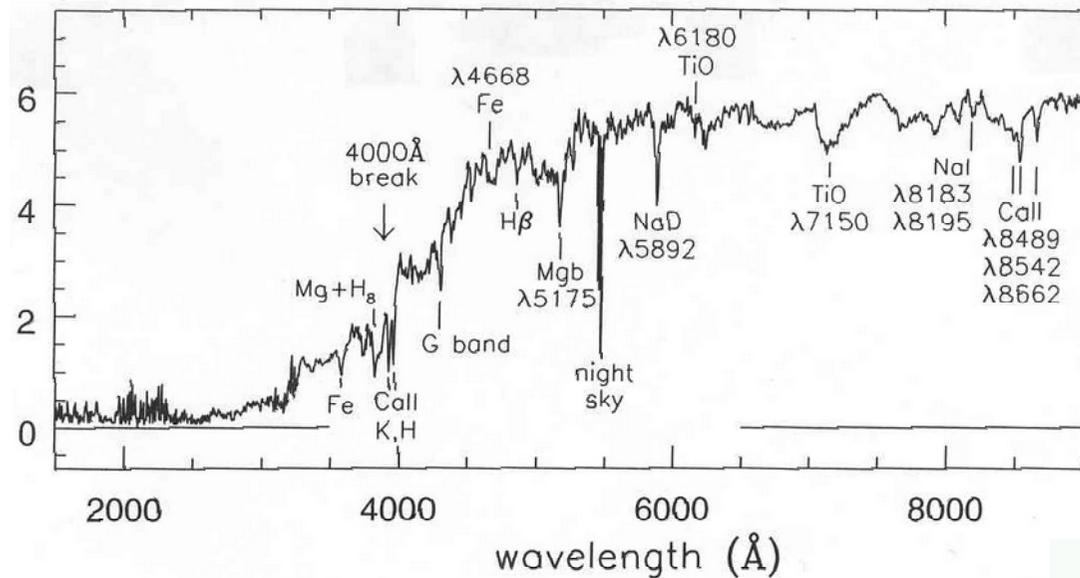
Il faut effectuer une déconvolution:
corrélation avec des templates
en fonction du type et des populations stellaires

Pour les spirales, il y a des raies d'émission,
du gaz HI, et H α grâce à la formation d'étoiles
 $\Delta V = 10\text{-}20\text{km/s}$



Spectres stellaires

- Raies en absorption



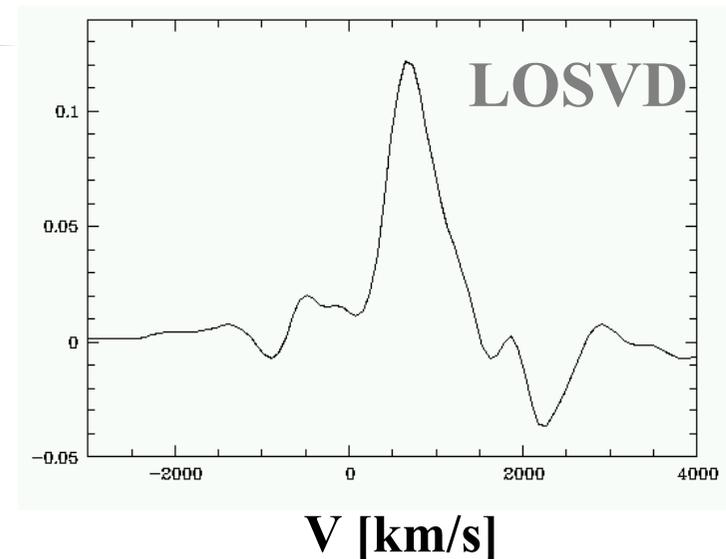
Déconvolution:

$$G = S^* \otimes \text{LOSVD}$$

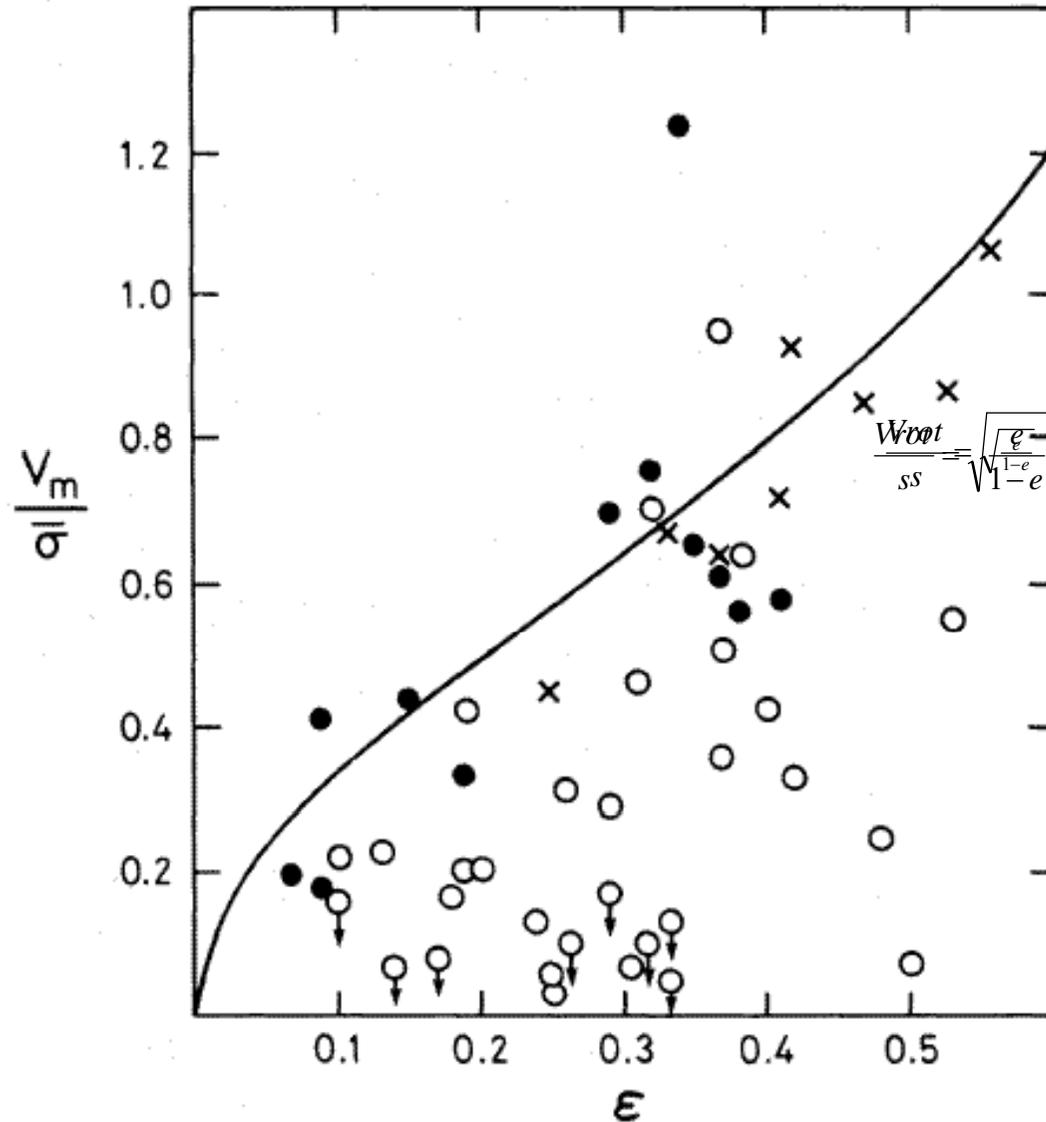
LOSVD :

Line Of Sight

Velocity Distribution



Rotation des Elliptiques



$M_B > -20.5$: symboles pleins
(elliptiques naines)

$M_B < -20.5$ vides (Massives)

Bulbes = croix

Davies et al (1983)

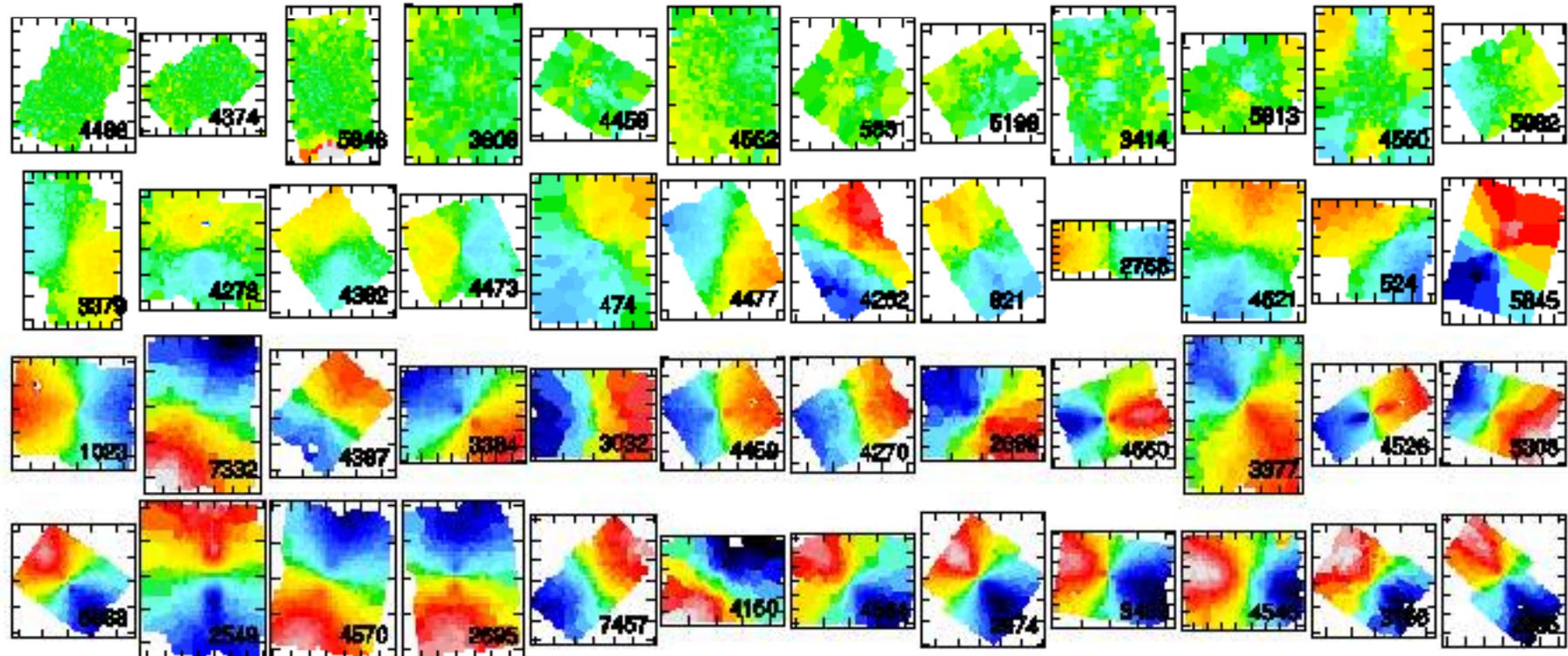
Courbe: relation pour des
des galaxies oblate en rotation
dispersion isotrope
(*Binney 1978*)

$$\frac{V_{rot}}{\sigma} = \sqrt{\frac{\epsilon}{1-\epsilon}}$$

Spectroscopie intégrale de champ SAURON

○ Slow rotators

Champs de vitesse des galaxies



○ Fast rotators

λ_R



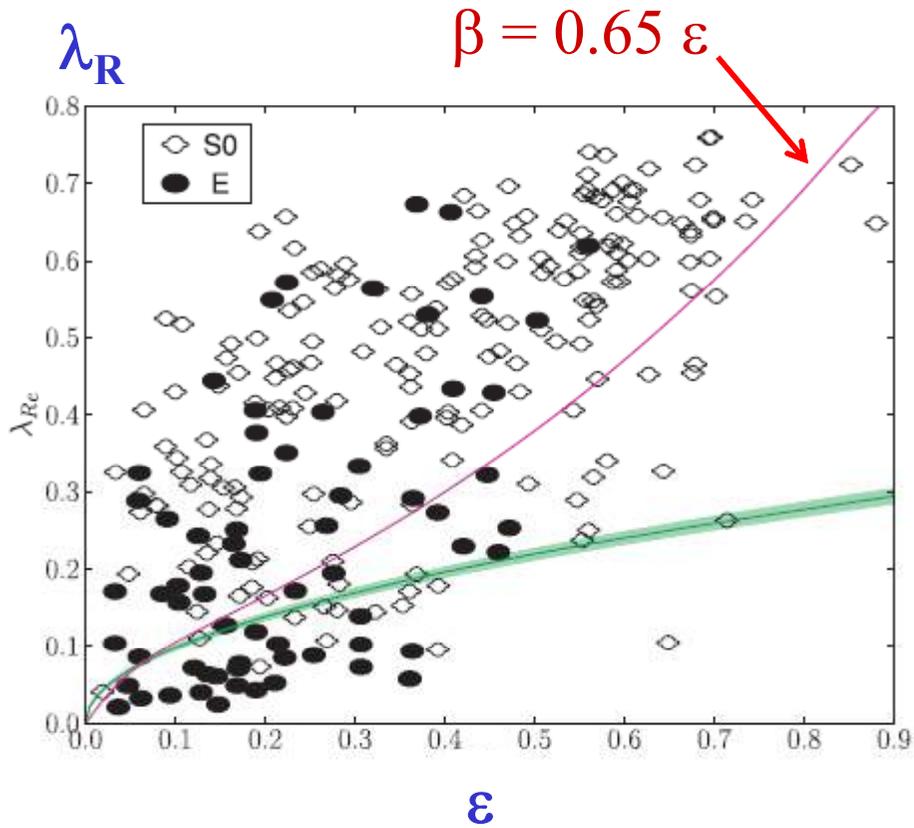
$$\lambda_R = \frac{\langle R \times |V| \rangle}{\langle R \times \sqrt{V^2 + \sigma^2} \rangle}$$

Emsellem et al 2007

Emsellem et al 2007

R/R_e

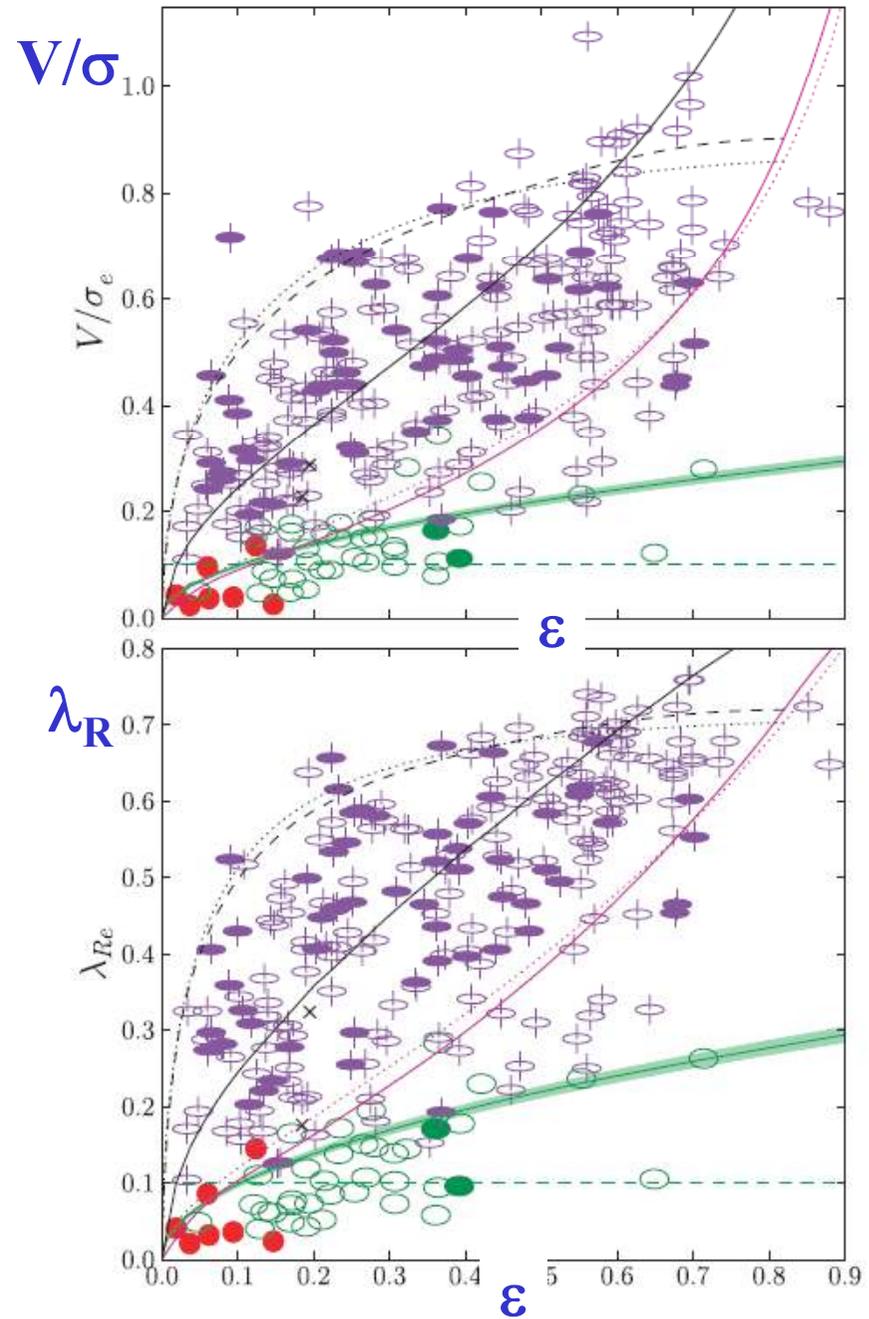
Atlas^{3D} : 260 galaxies



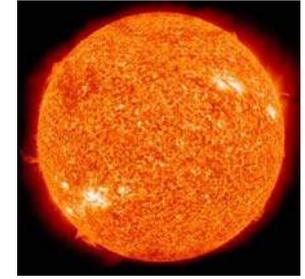
β = paramètre d'anisotropie
 $\beta = 1 - \sigma_z^2 / \sigma_R^2$

Emsellem et al 2011

Symboles pleins = barres



Stabilité de la forme ellipsoïdale



- Un gaz homogène soumis à des collisions (pression) acquiert très vite une forme sphérique, et une dispersion isotrope des vitesses
- Mais les étoiles dans une galaxie sont un milieu sans collision, dû au grand nombre N d'étoiles $\sim 10^{11-12}$

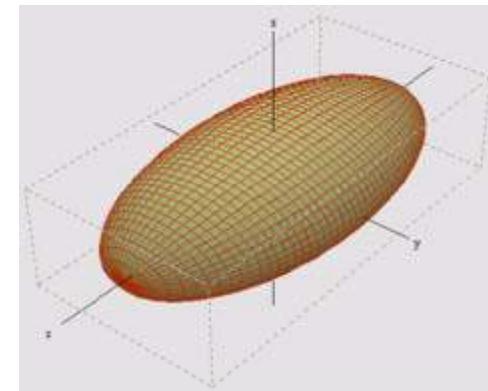
Le temps de relaxation

$$t_{relax} \approx t_{cross} N / \ln N$$

- $t_{cross} \sim 10^8$ yr $\rightarrow t_{relax} \sim 10^{18}$ yr

$t_{relax} \gg$ âge de l'Univers

→ La distribution des étoiles est le reflet de sa formation



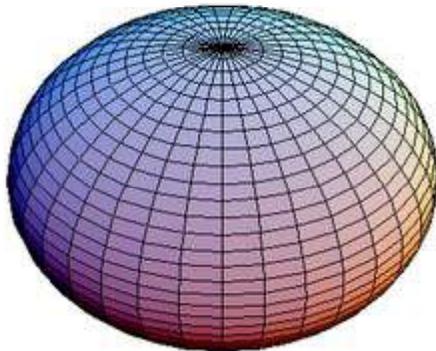
Forme à 3D des elliptiques

Ellipsoïdes: deux axes égaux

Grands axes

$$a=b > c$$

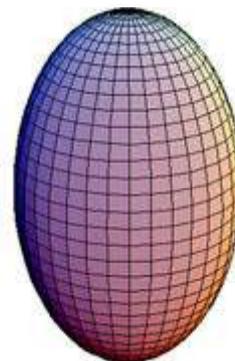
Oblate



Petits axes

$$a > b=c$$

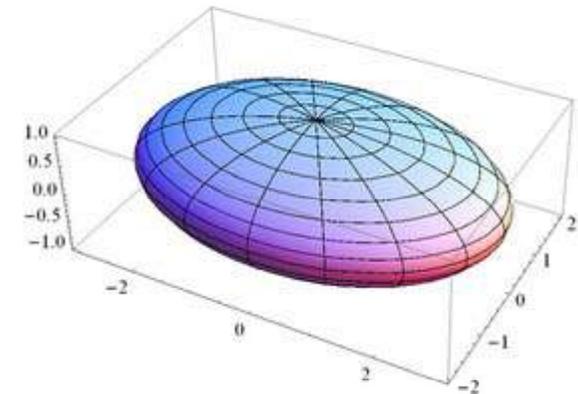
Prolate



Triaxes

a,b,c différents

Triaxiale



Comment tester?

-- **les vitesses** (difficile, dégénéré) + traînée de poussière

-- **Les coquilles autour des elliptiques**, soit enroulées au hasard dans le plan équatorial (oblate)

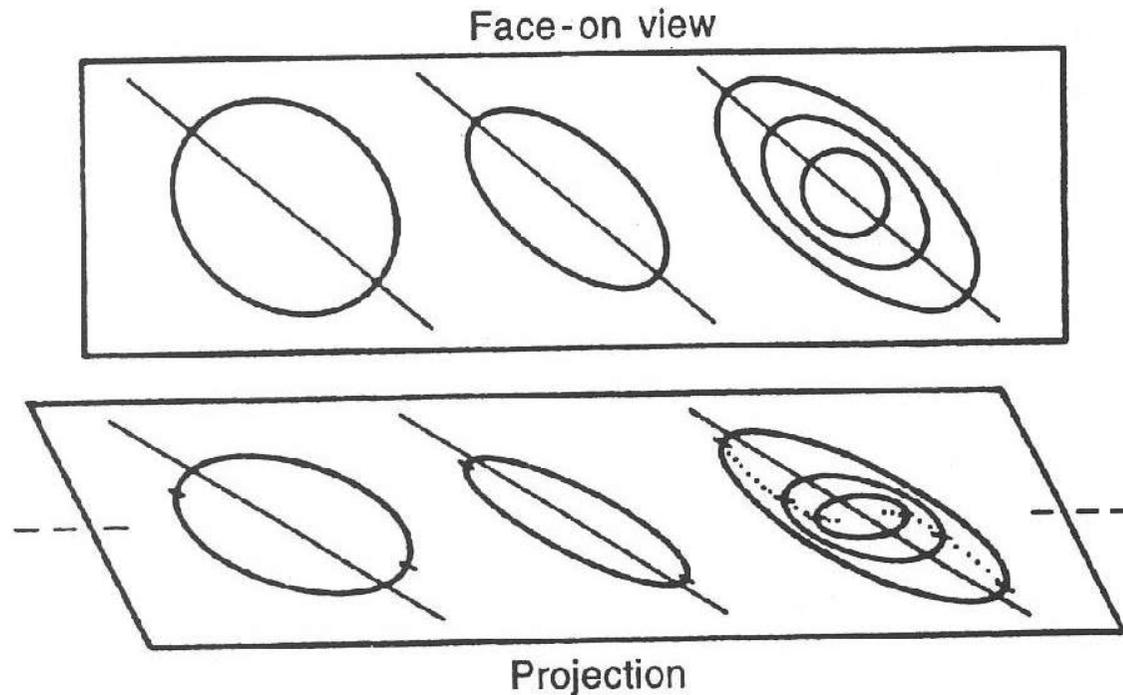
Soit alignées en alternance le long du seul grand axe (prolate)

Triaxialité des elliptiques

Parfois les isophotes tournent : **isophote twist**

L'ellipticité ε n'est pas toujours constante avec le rayon

Cela peut être dû à une perturbation, mais la plupart du temps à **la triaxialité**, si variation de l'ellipticité avec le rayon



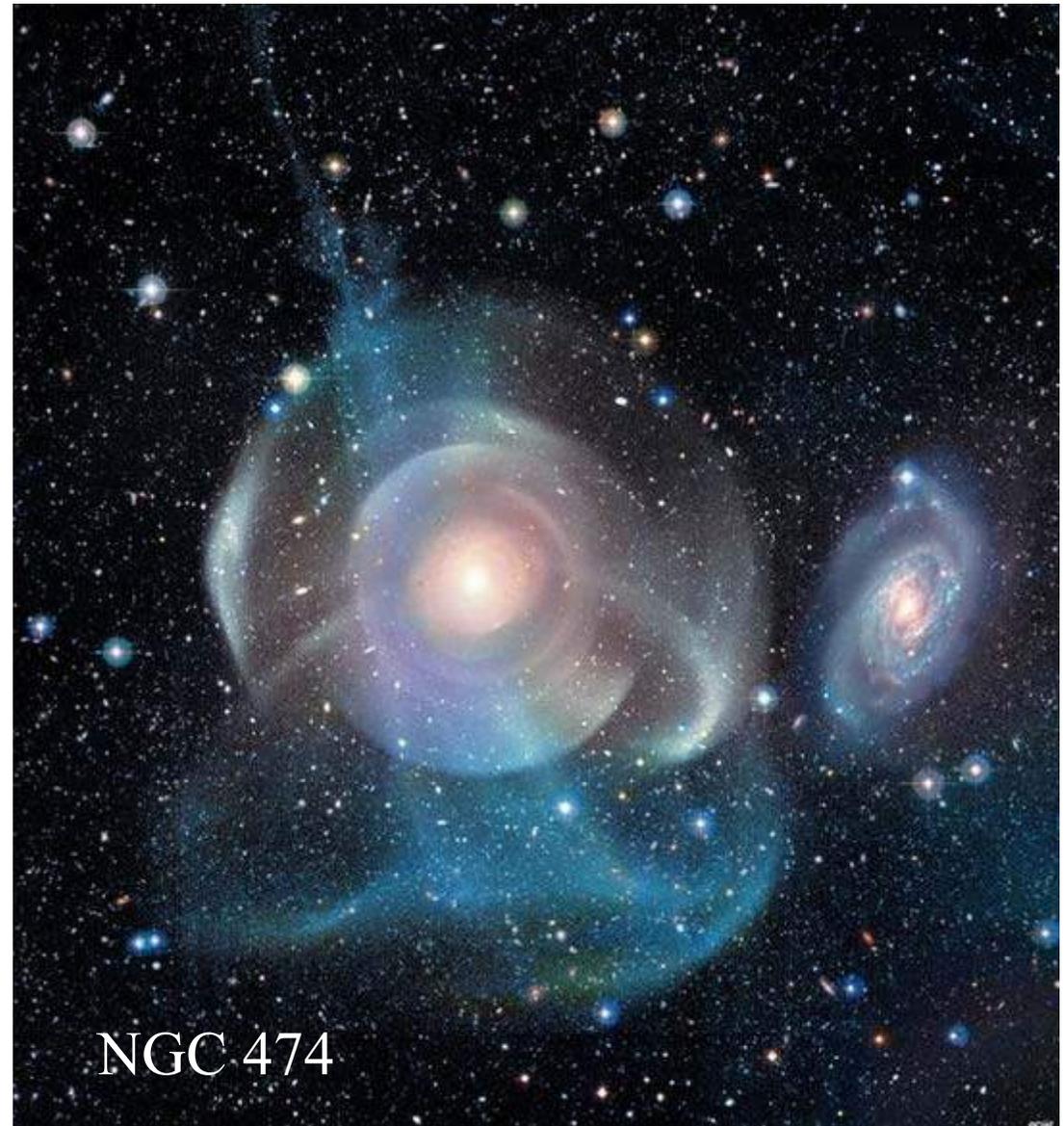
Pas forcément
une déformation!

La direction du grand
axe tourne, d'autant
plus que $\varepsilon \rightarrow 0$

Les coquilles

- Structures complexes, à faible brillance de surface
- Les coquilles sont les vestiges stellaires des compagnons avalés par la galaxie elliptique centrale

Elles peuvent co-exister avec des queues de marée, boucles, etc..



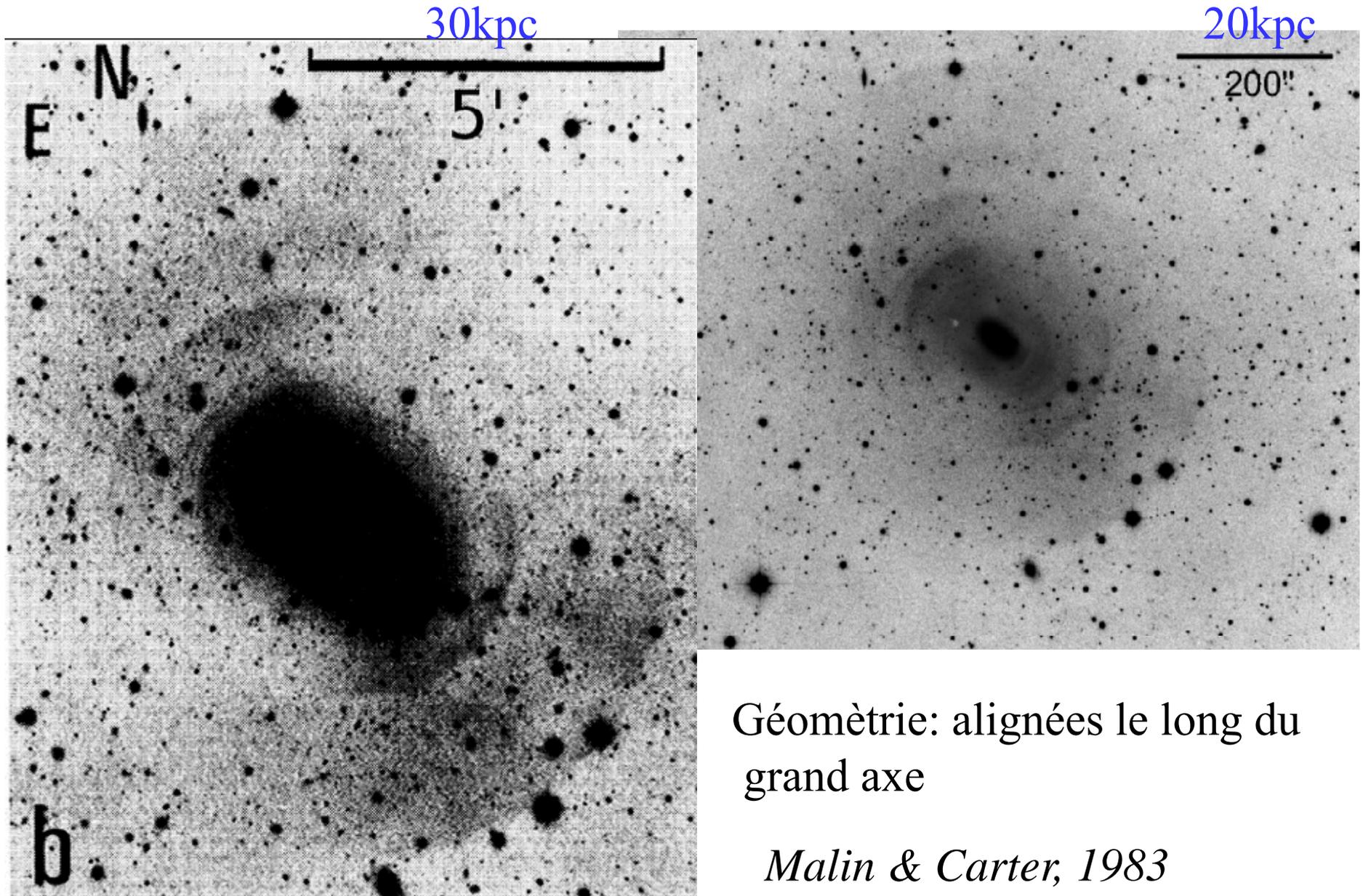
NGC 474

Exemples de coquilles



CFHT-Megacam, P-A Duc 2011

NGC 3923, 25 coquilles



Géométrie: alignées le long du grand axe

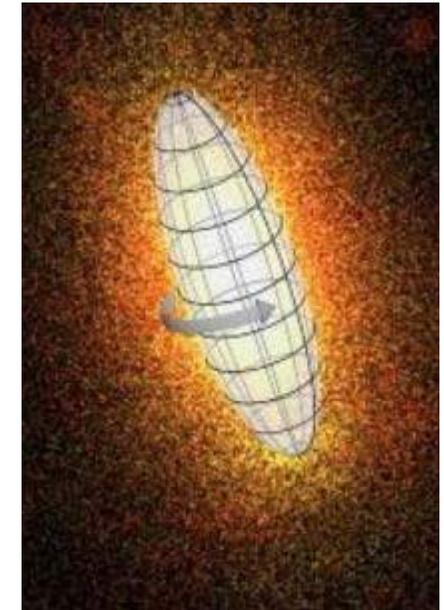
Malin & Carter, 1983

Orbites possibles dans un triaxe tournant

Selon l'orientation de la traînée de poussière

FIGURE ROTATION AXIS		TYPE OF ORBIT	DUST-LANE APPEARANCE	DUST-LANE KINEMATIC SIGNATURE
	Short	Equatorial		Prograde
		Anomalous		Perpendicular, then retrograde
	Long	Equatorial		Retrograde
		Anomalous		Perpendicular, then prograde

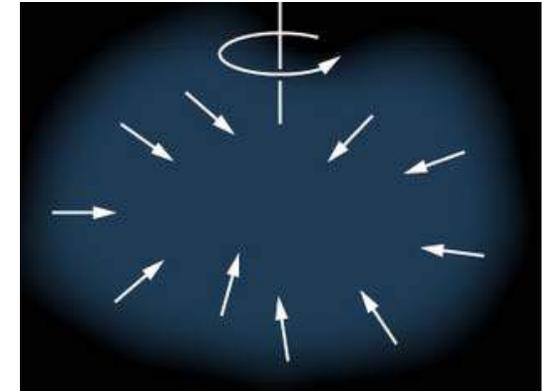
Tsatsi 2017



$\Omega_p \ll \Omega$ **rotation faible** relativement aux étoiles, orbites polaires
 $\Omega_p \gg \Omega$ à grand R, alors en moyenne le potentiel devient oblate
 et les orbites équatoriales

Merritt & de Zeeuw 1983

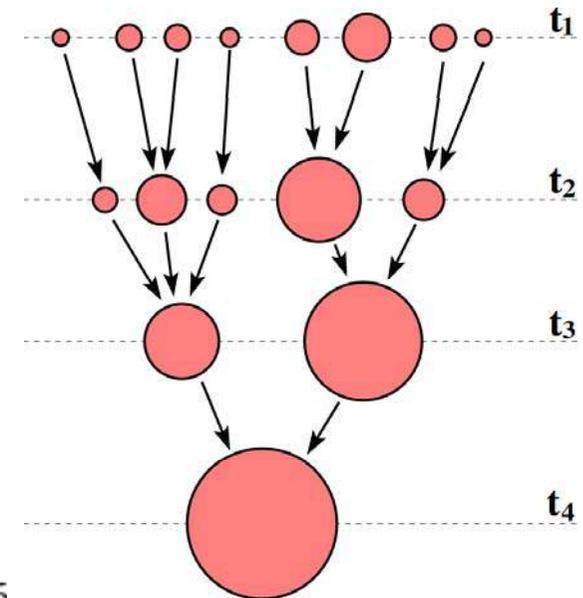
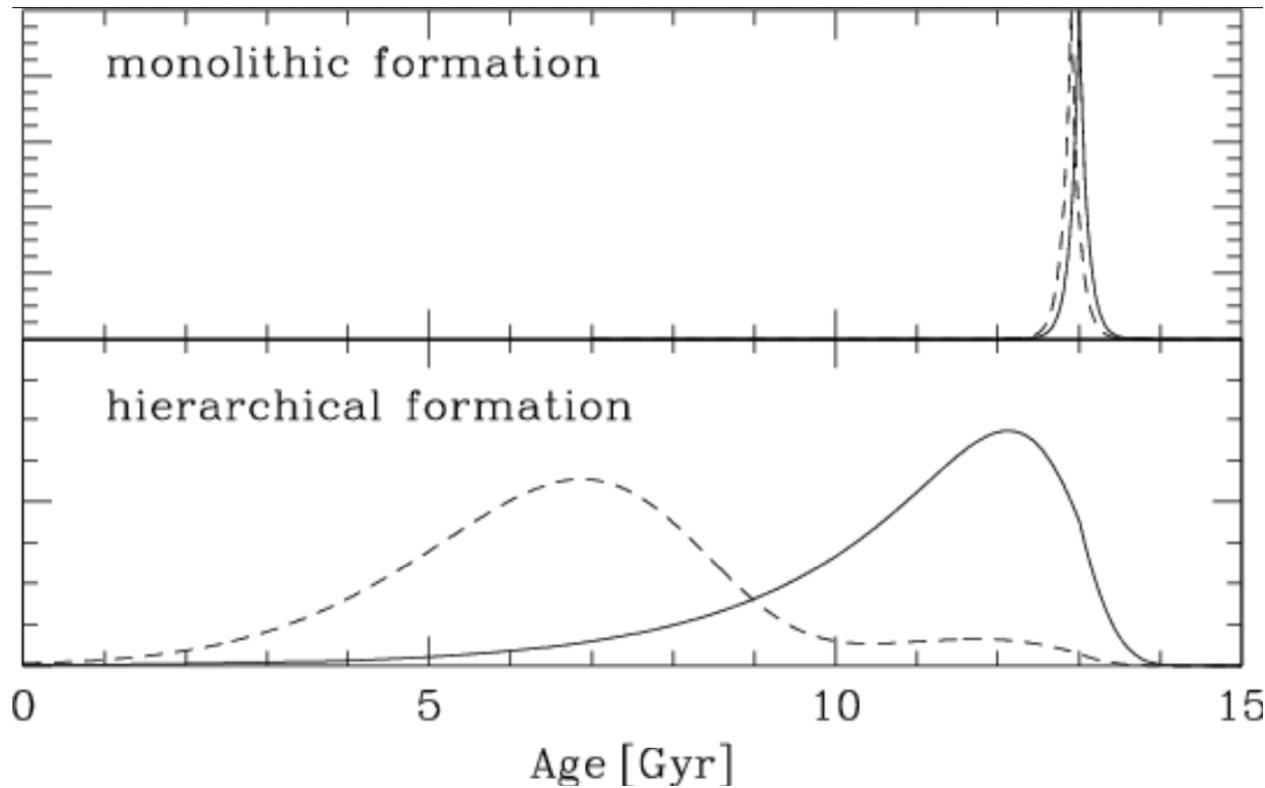
Scénarios de formation: Monolithique vs hiérarchique



Aujourd'hui

← Temps

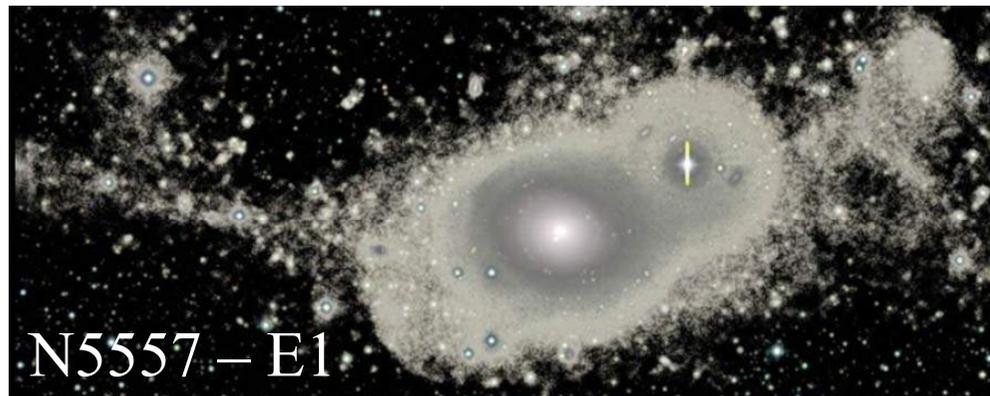
BB



Mo et al. (2011)

Formation des Elliptiques: scénarios

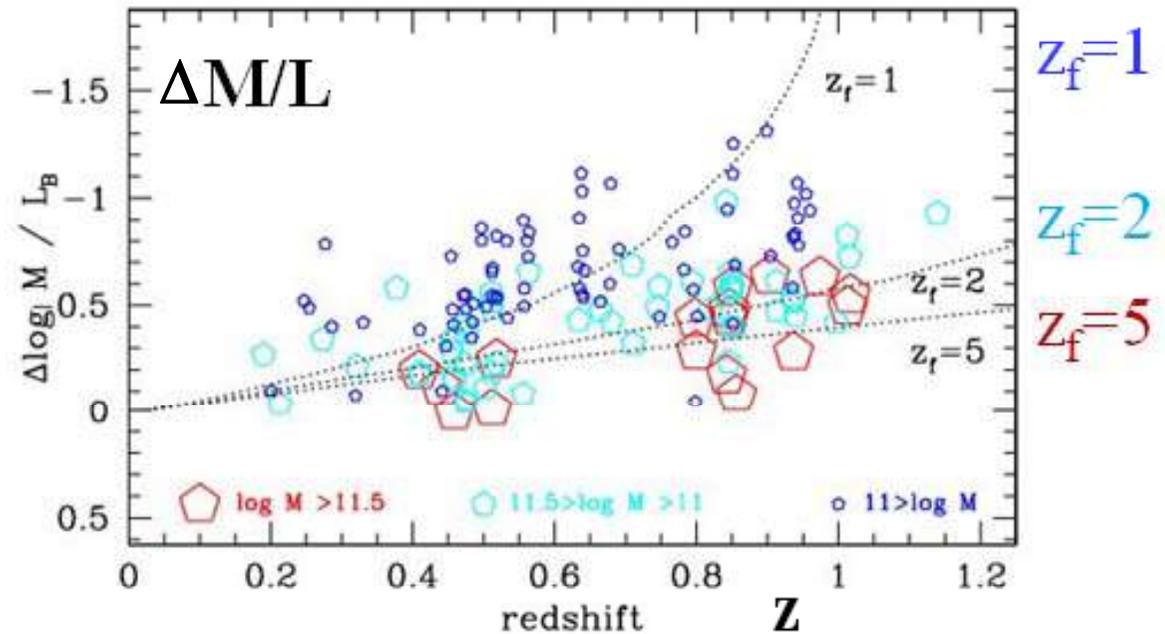
- Populations vieilles, SF très rapide (grand $[\alpha/\text{Fe}]$) < 1Gyr
→ Formation **monolithique**?
- **Fusions majeures de spirales** (*Toomre & Toomre 1972*)
- Observations plus récentes: disques, gaz, poussière: accrétion de **au moins 30% de la masse depuis $z=1$**
- **Bimodalité**: Faible M, forme de disque, sans coeur, rotation
Grande M, forme de boîte, coeur, pas de rotation
- Structures à faible brillance de surface



Duc et al 2014

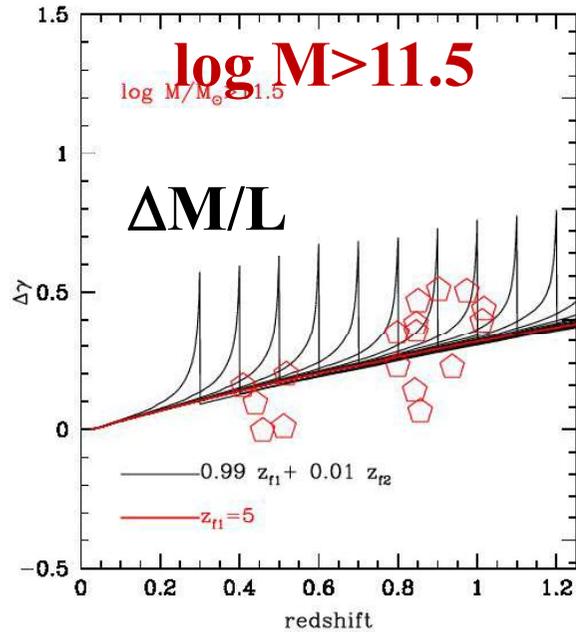
Evolution du rapport Masse/Luminosité

- L'évolution du rapport M/L est fonction de la masse dynamique
- Les galaxies les plus massives évoluent plus lentement que les plus légères, i.e. ont de plus vieilles étoiles (“downsizing”)

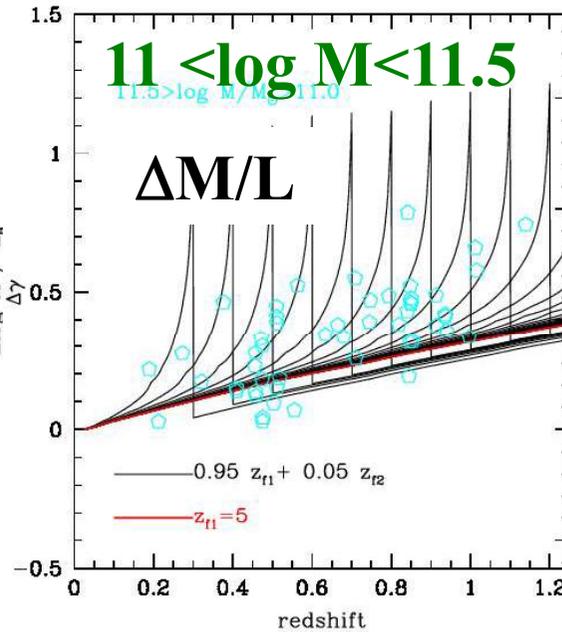


$\log M < 11$
 $11 < \log M < 11.5$
 $\log M > 11.5$

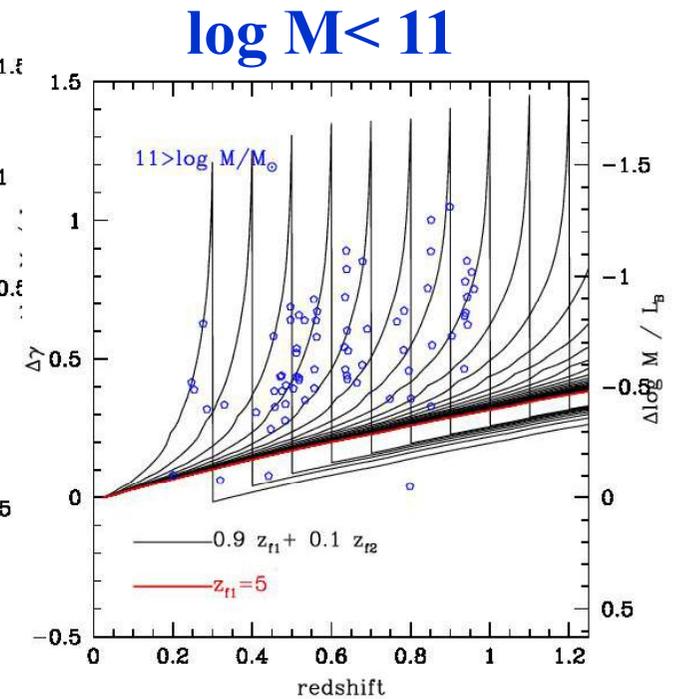
Downsizing et formation d'étoiles



Z



Z



Z

Etoiles jeunes <1%

Etoiles jeunes ~5%

Etoiles jeunes 20-40%

Les étoiles se sont formées très vite et très tôt dans les ETG massives
Par contre, plus lentement dans les ETG moins massives

→ Est-ce compatible avec la formation hiérarchique?

Treu et al. 2005

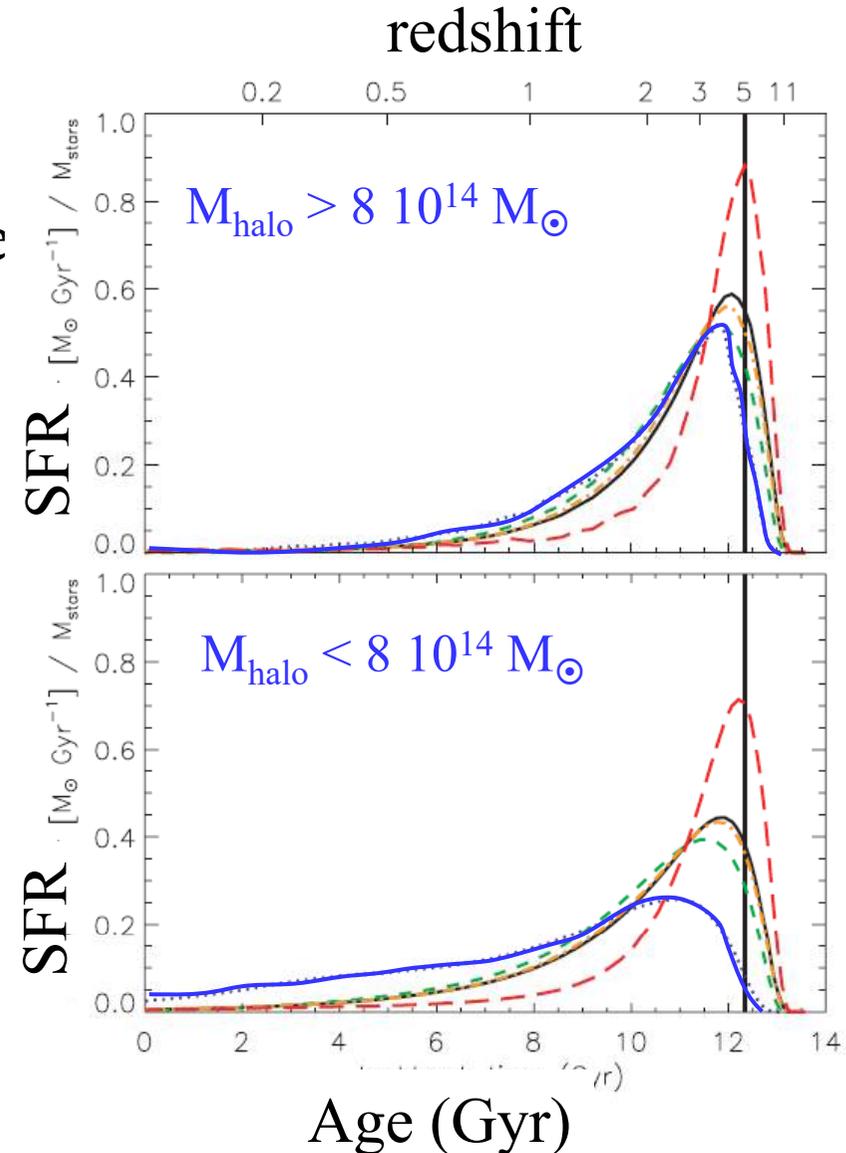
Formation hiérarchique

Les modèles hiérarchiques sont encore possibles, si les ETG massives assemblent leur masse sans former de nouvelles étoiles (AGN feedback?)

- L'évolution est bien plus rapide dans les amas de galaxies

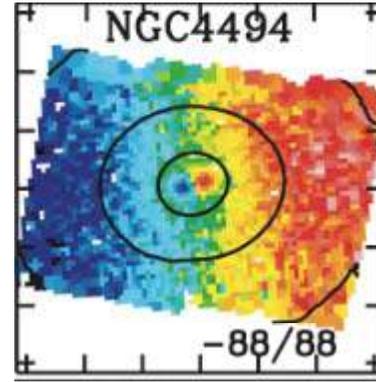
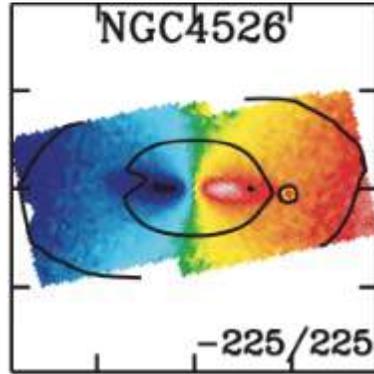
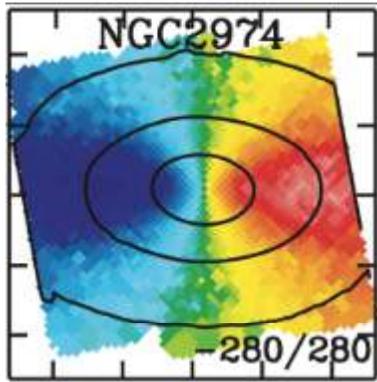
$$M_{\text{halo}} > 8 \cdot 10^{14} M_{\odot}$$

- Les galaxies E massives ont une SF maximum plus tôt $10^{11-12} M_{\odot}$
- Les galaxies E les moins massives se forment encore aujourd'hui, après un SF_{max} plus tard $10^{9-10} M_{\odot}$

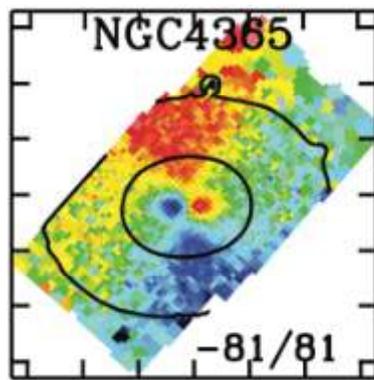
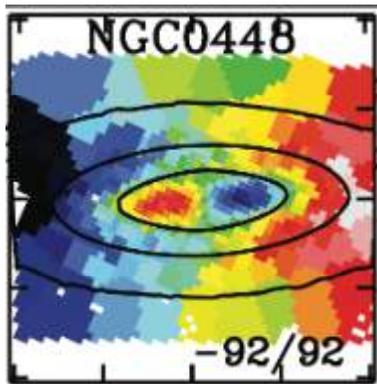


De Lucia et al 2006

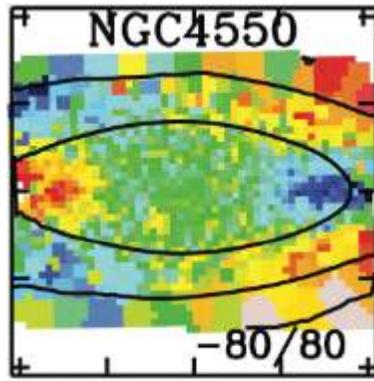
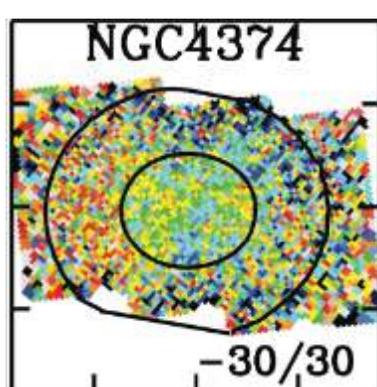
Cœurs à cinématique découplée (KDC)



Dans le même sens
Mais le centre se
distingue nettement



En contre-rotation (CRC)
Ou axe différent de $> 30^\circ$



CRC + peu de rotation
Ou pas de rotation du tout

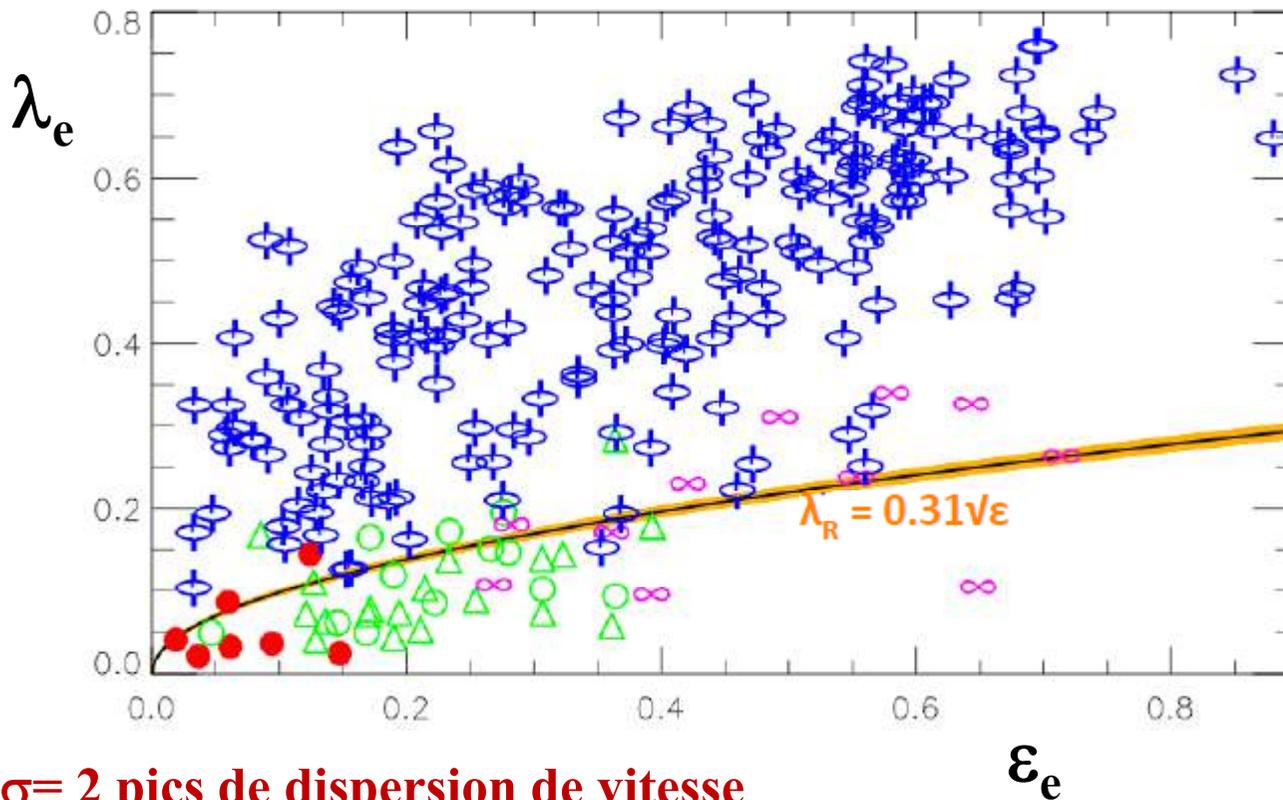
Krajnovic et al 2011

$$\lambda_R \equiv \frac{\langle R \cdot |V| \rangle}{\langle R \sqrt{V^2 + \sigma^2} \rangle} \quad \text{Rotateurs lents ou rapides}$$

86% de rotateurs rapides parmi les 260 ETG

66% des Elliptiques tournent

Les KDC sont surtout parmi les rotateurs lents



$2\sigma = 2$ pics de dispersion de vitesse

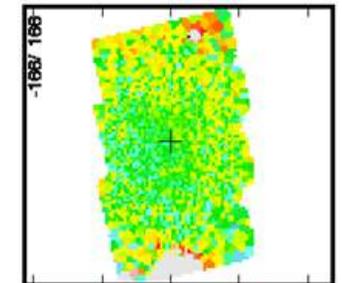
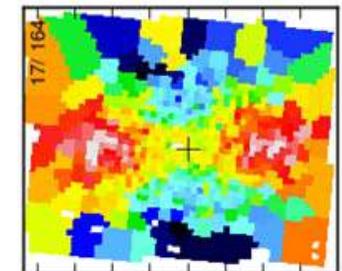
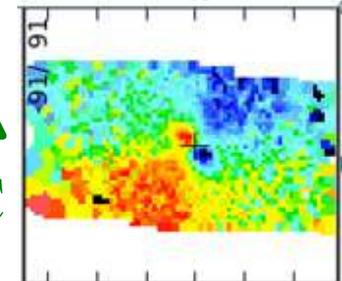
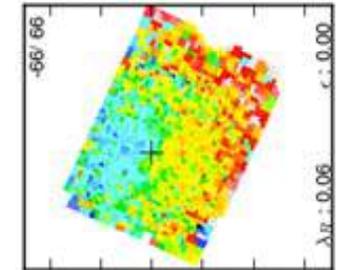
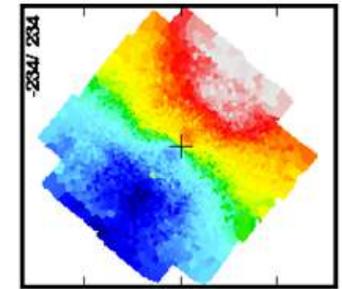
Emsellem et al 2011



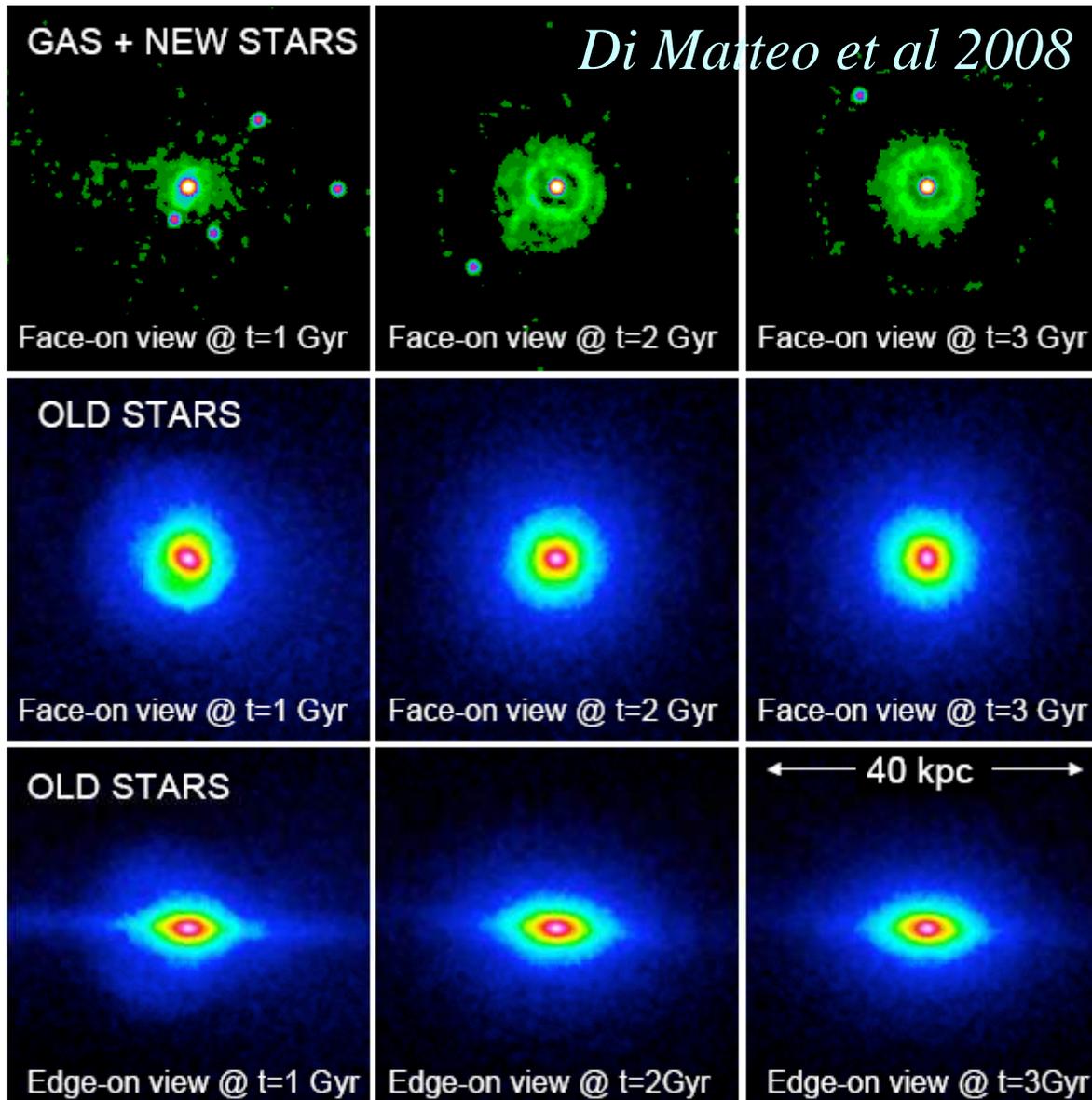
KDC



2σ



Formation des cœurs en contre-rotation



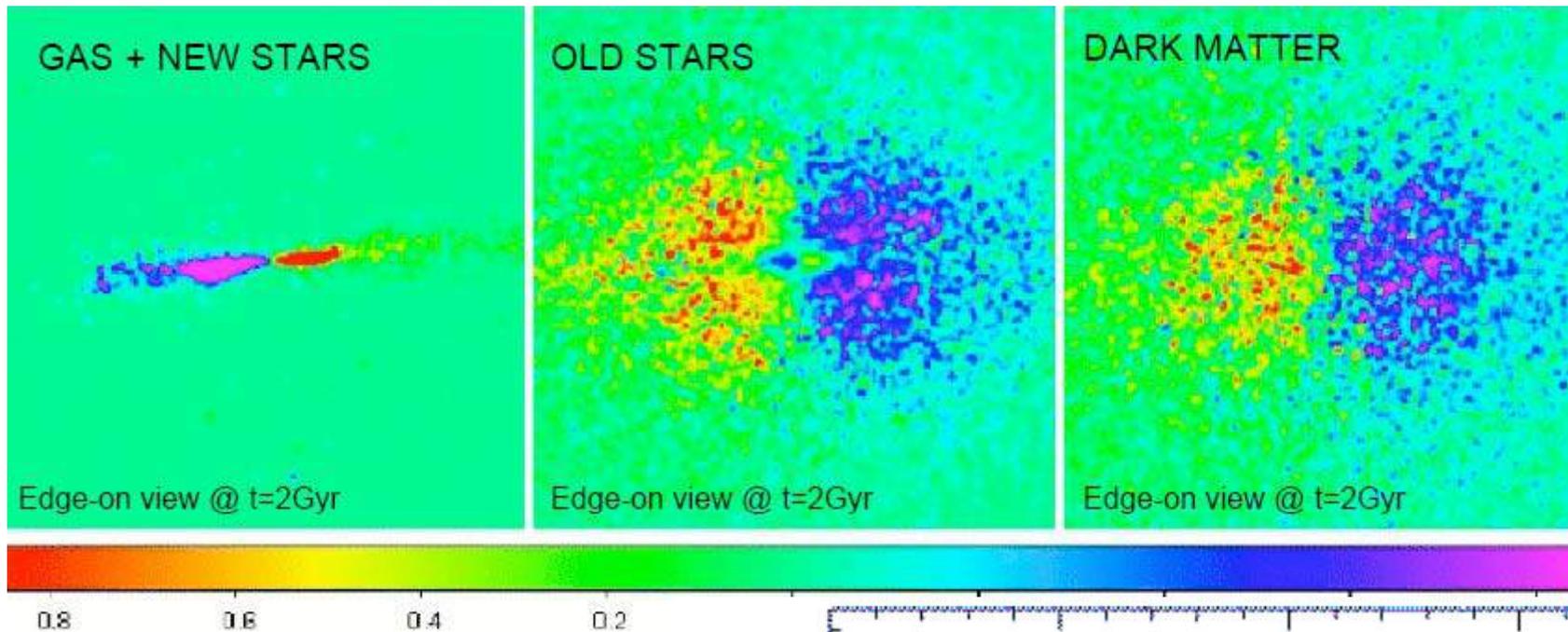
**Rencontre dissipative
entre une spirale et une
elliptique**

→ orbite rétrograde

Les forces de marée sont
fortes vers l'extérieur

**Le centre non affecté
Garde son spin/orientation**

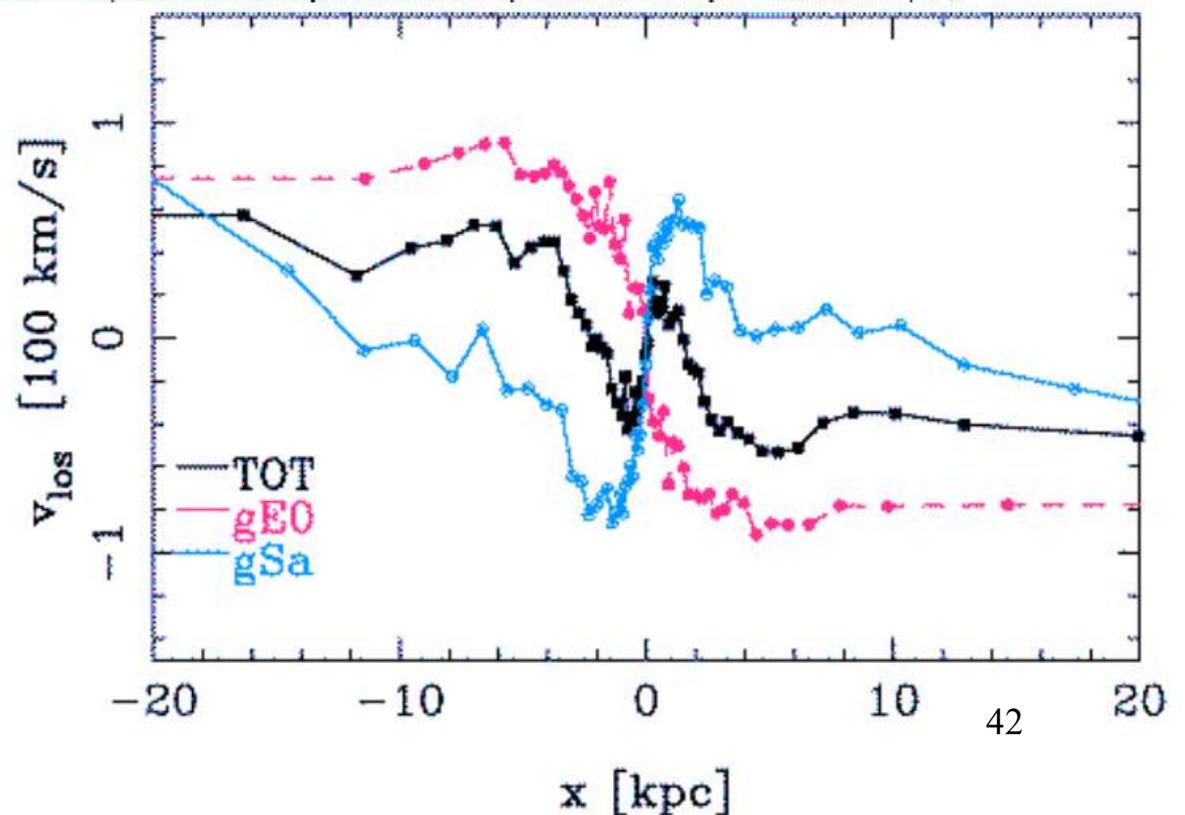
Effet opposé dans
Balcells & Gonzalez 98



Fusion Elliptique + spirale

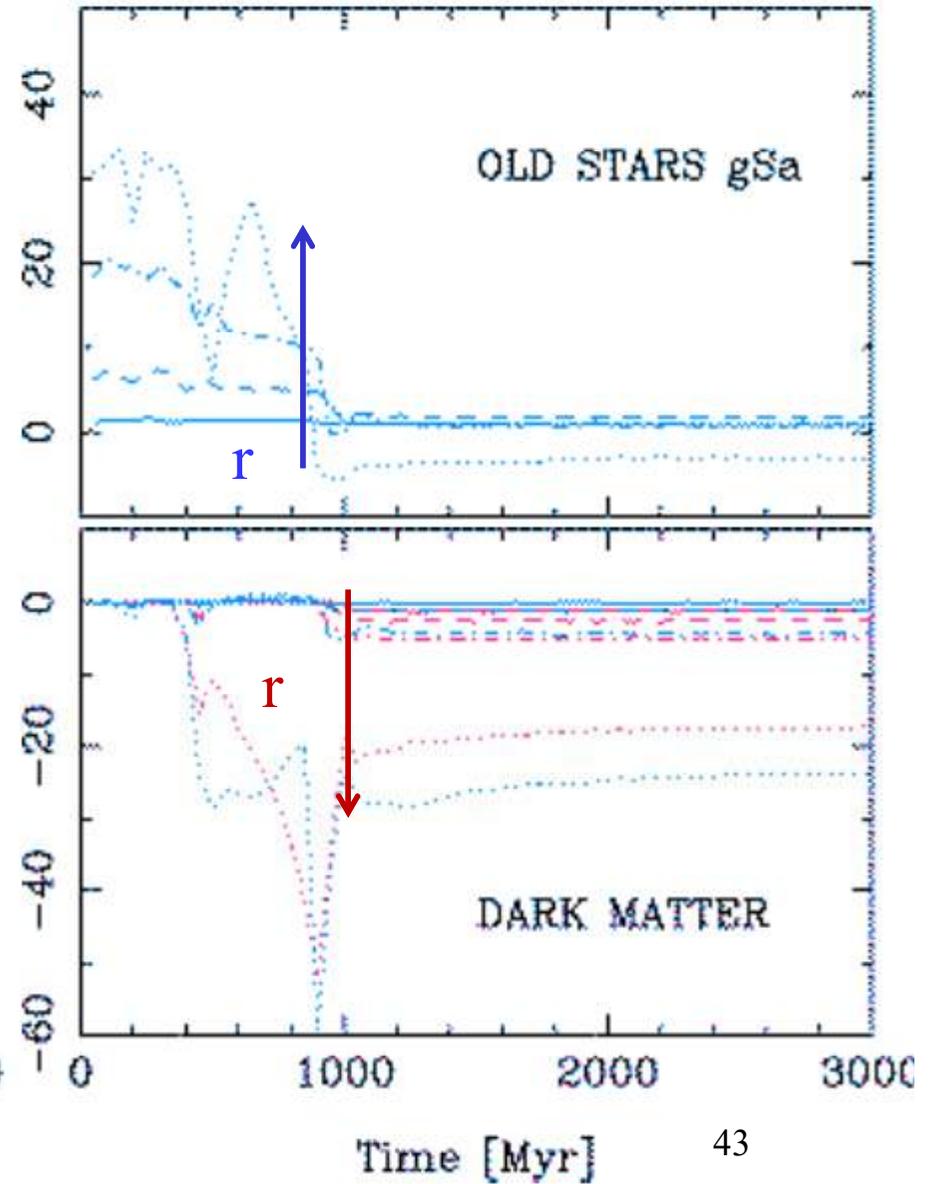
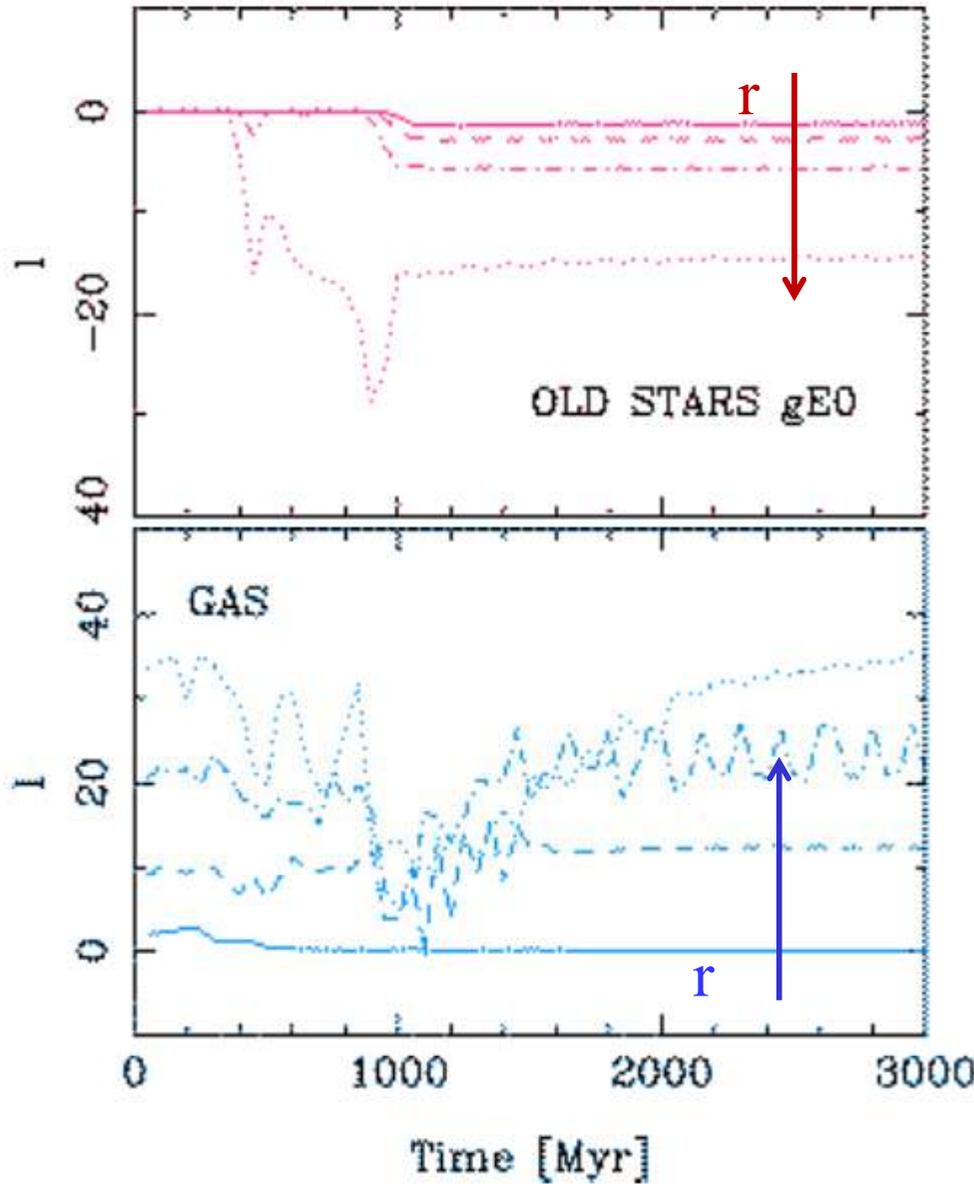
Sans ou avec gaz,
Mécanisme efficace

Di Matteo et al 2008

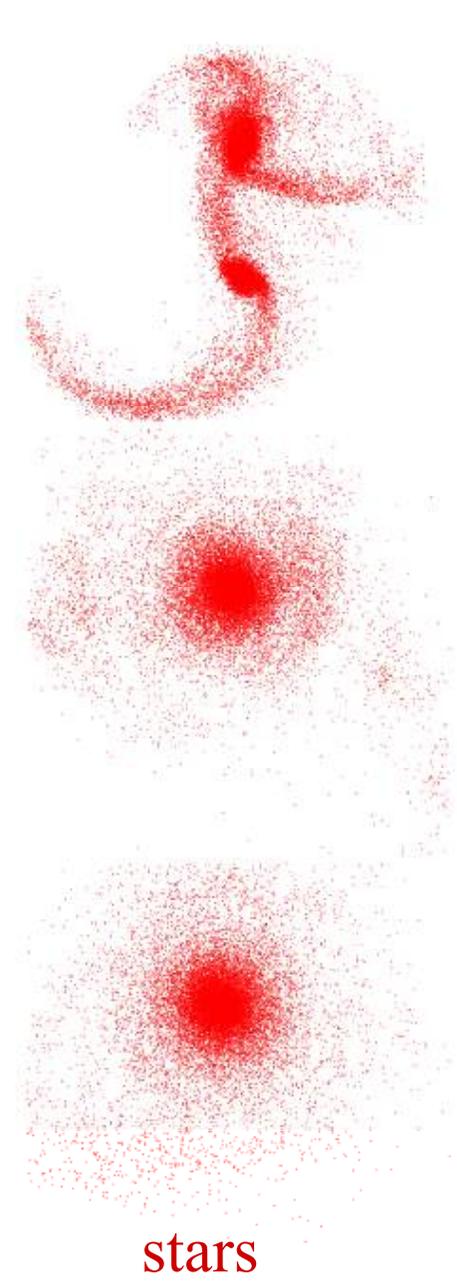
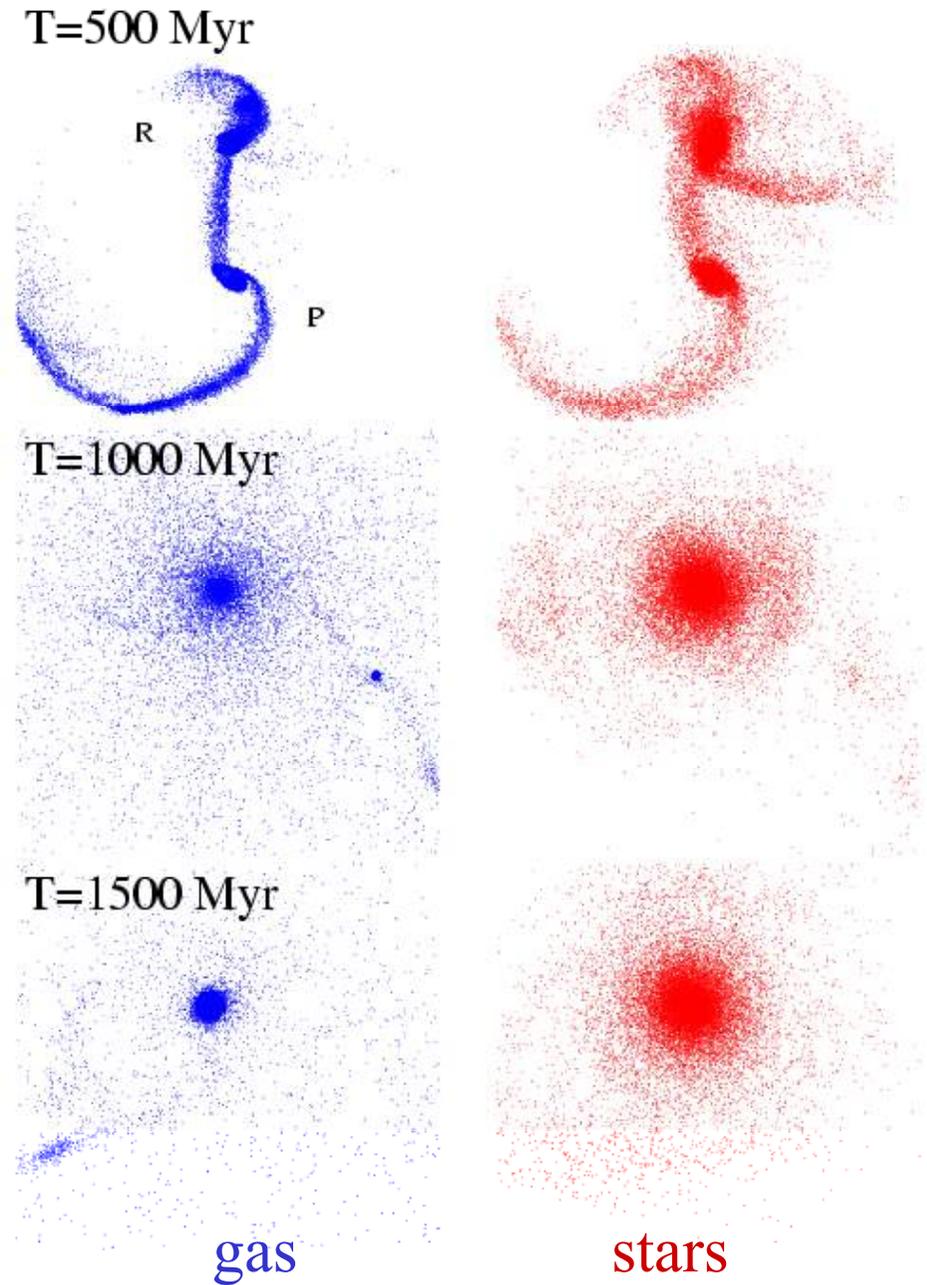
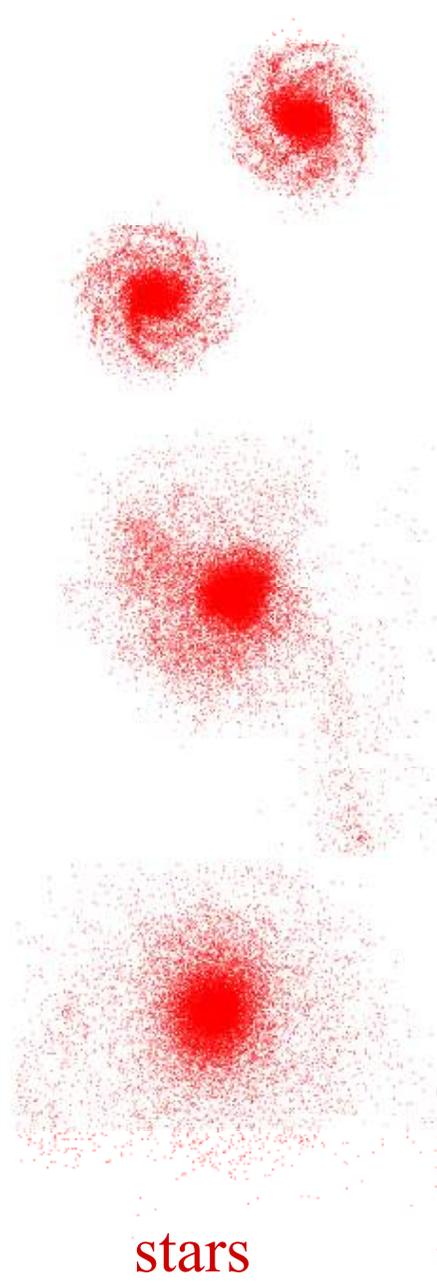
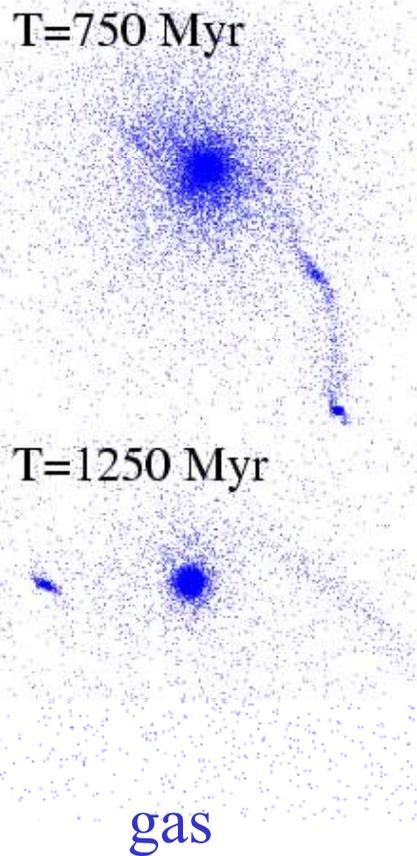
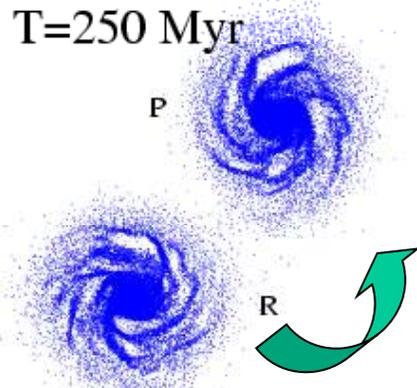


Echange de moment angulaire

Solid $r < 2\text{kpc}$ Dot-dash $5 < r < 10$
 Dash $2 < r < 5\text{kpc}$ Dots $r > 10\text{kpc}$

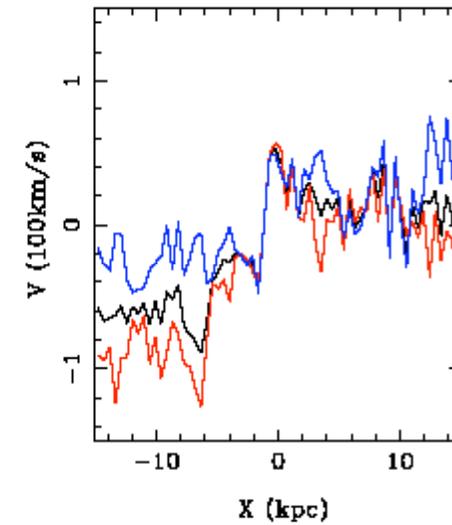
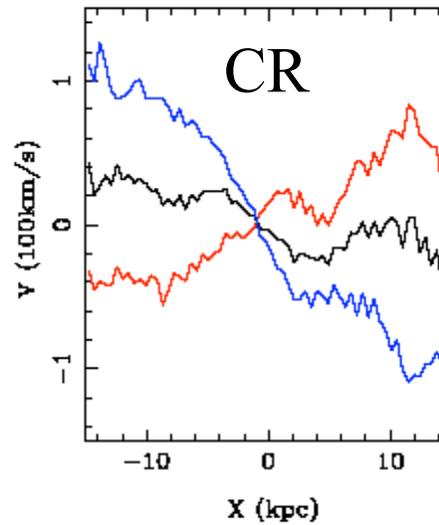
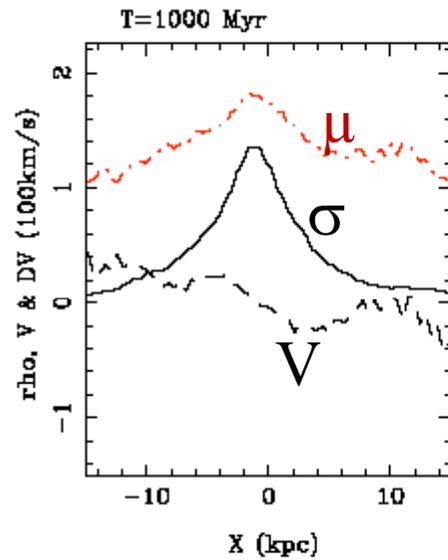


Fusion de 2 spirales → disque en CR, N4550 prototype



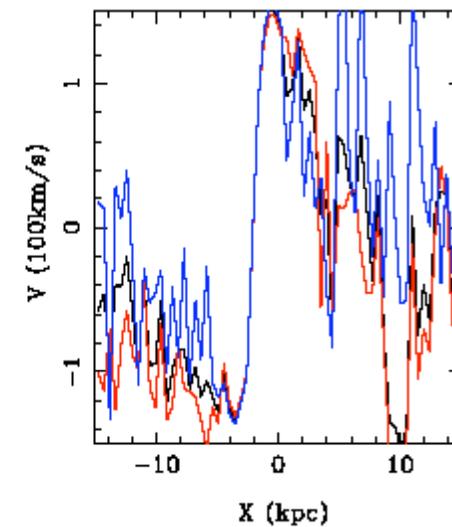
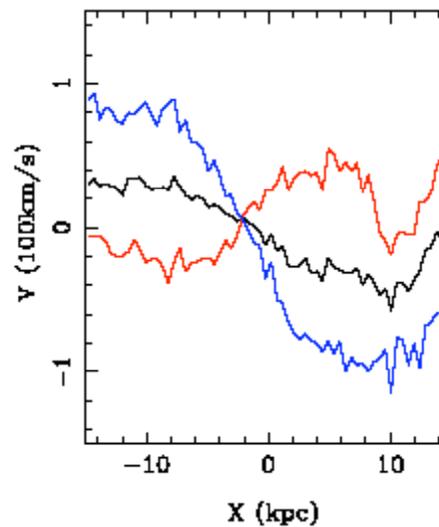
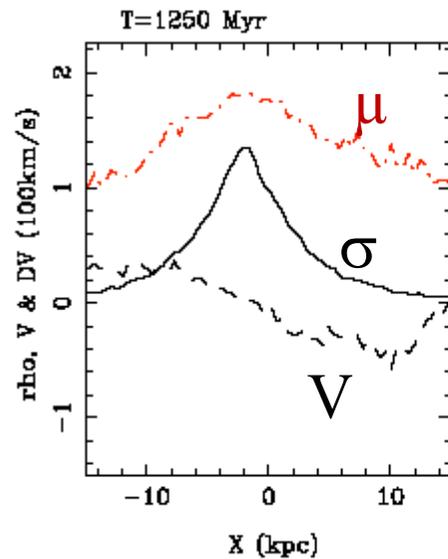
2 disques en CR-- un seul disque de gaz en rotation

Rouge= galaxie prograde, Bleu= galaxie retrograde, Noir=total

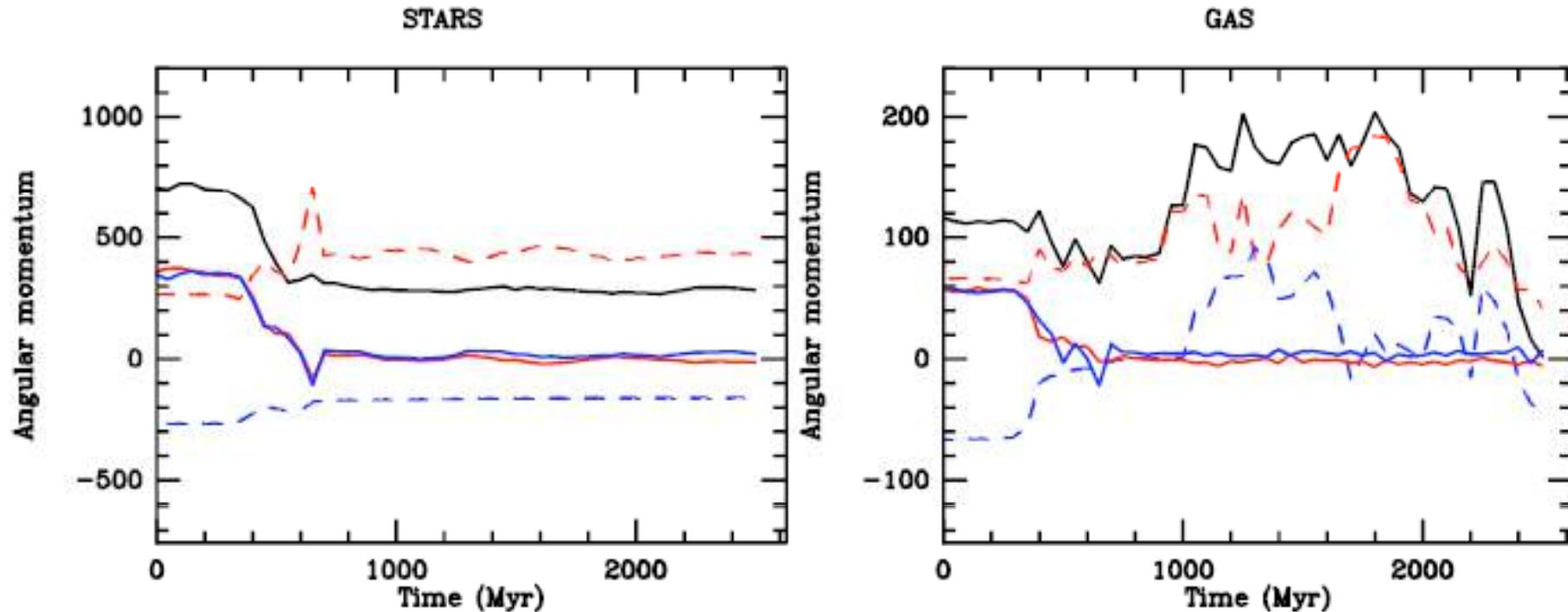


stars

gas



Echange de moment angulaire



Rouge= galaxie prograde, Bleu= galaxie retrograde, Noir=total
Trait plein= AM orbital, Pointillé= spins individuels

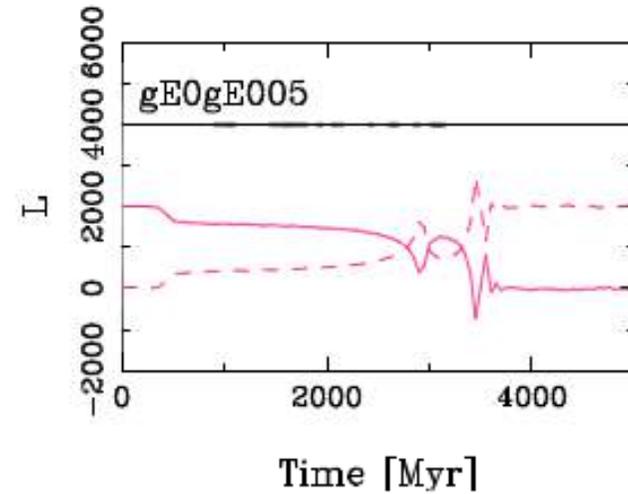
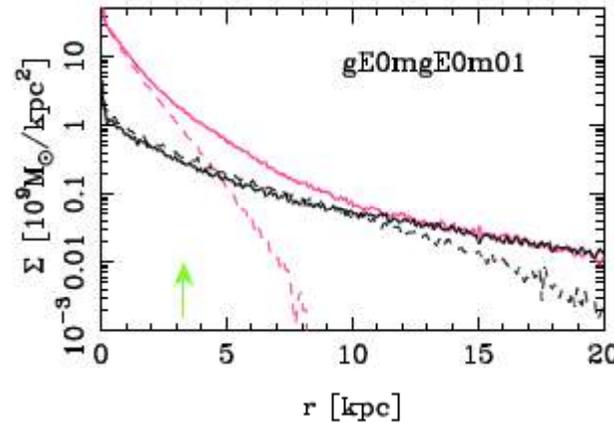
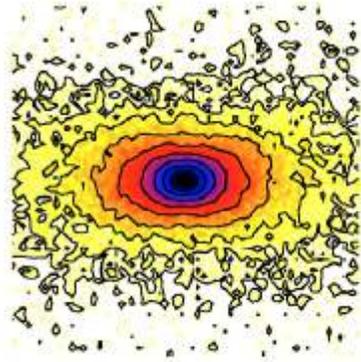
Le gaz finit en corotation avec le disque le plus épais et perturbé

Formation d'un bulbe avec $n \sim 1-2$

→ Cette fusion majeure **ne forme pas une Elliptique**

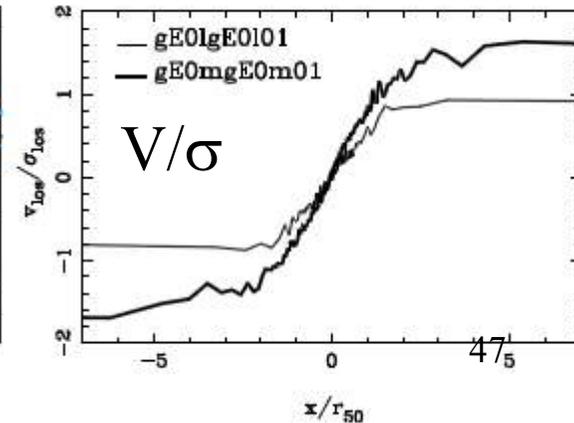
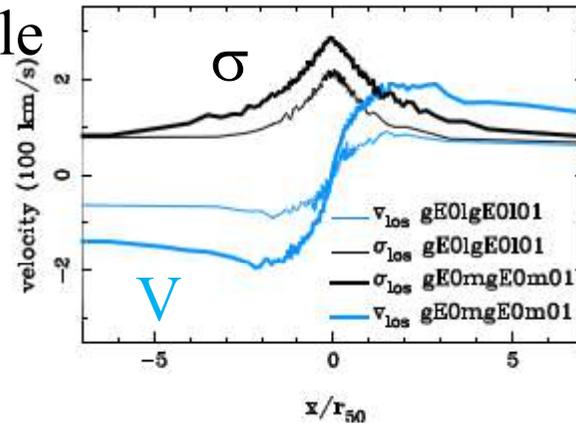
Crocker et al 2008

La fusion de 2 E-gal peut donner une Elliptique en rotation rapide



Echange entre spins interne et orbital
A la fois les baryons et la DM gagnent L

Dépend de l'orbite initiale
Les parties externes tournent plus vite

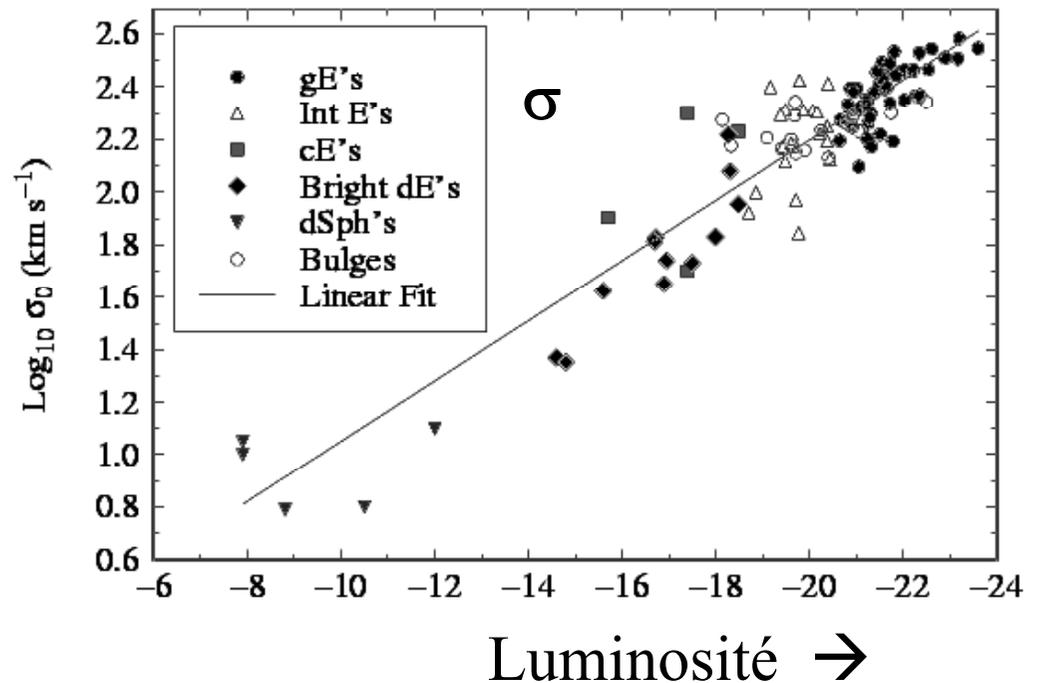


La relation de Faber-Jackson

La dispersion de vitesse au centre σ_0 et la luminosité L
Faber & Jackson 1976 $L \propto \sigma_0^4$

Il existe aussi des relations
 L avec R_e , concentration, etc..
 $L = 2\pi R_e^2 I_e$

Aussi $R_e \propto I_e^{-0.25}$



Le plan fondamental (*Djorgovski & Davis 1987*)
Analyse en composants primaires: L, σ, R_e

Le plan fondamental

La distribution des galaxies elliptiques dans l'espace des paramètres à 3D

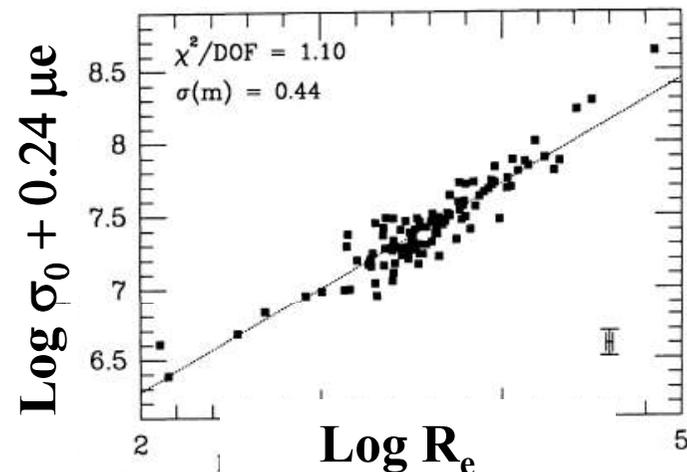
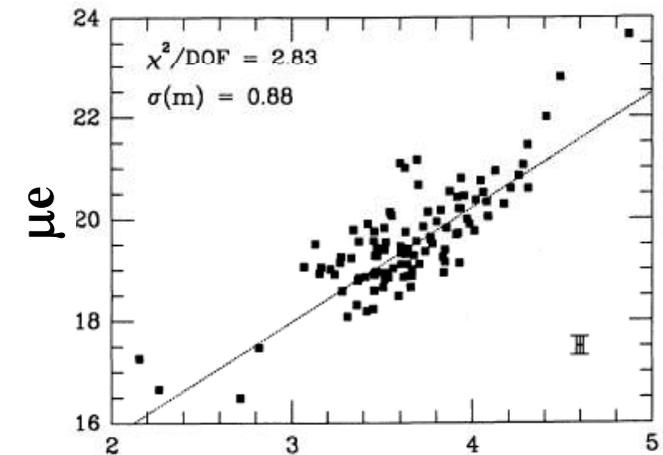
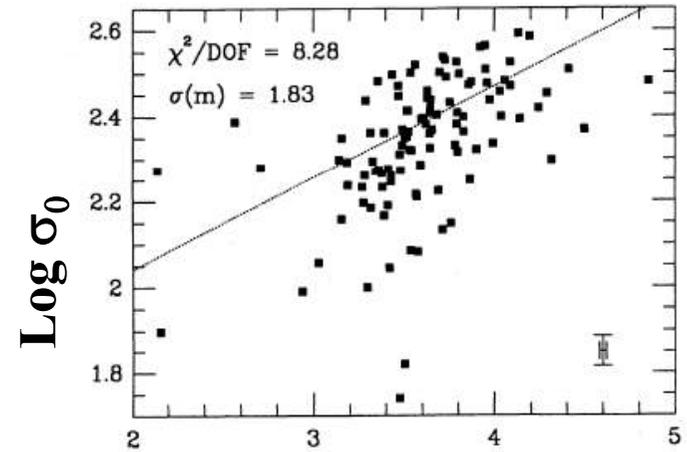
R_e , σ_0 , I_e (ou $\mu_e = 2.5 \log I_e$)

$$R_e \propto \sigma_0^{1/4} \langle I \rangle_e^{-0.85}$$

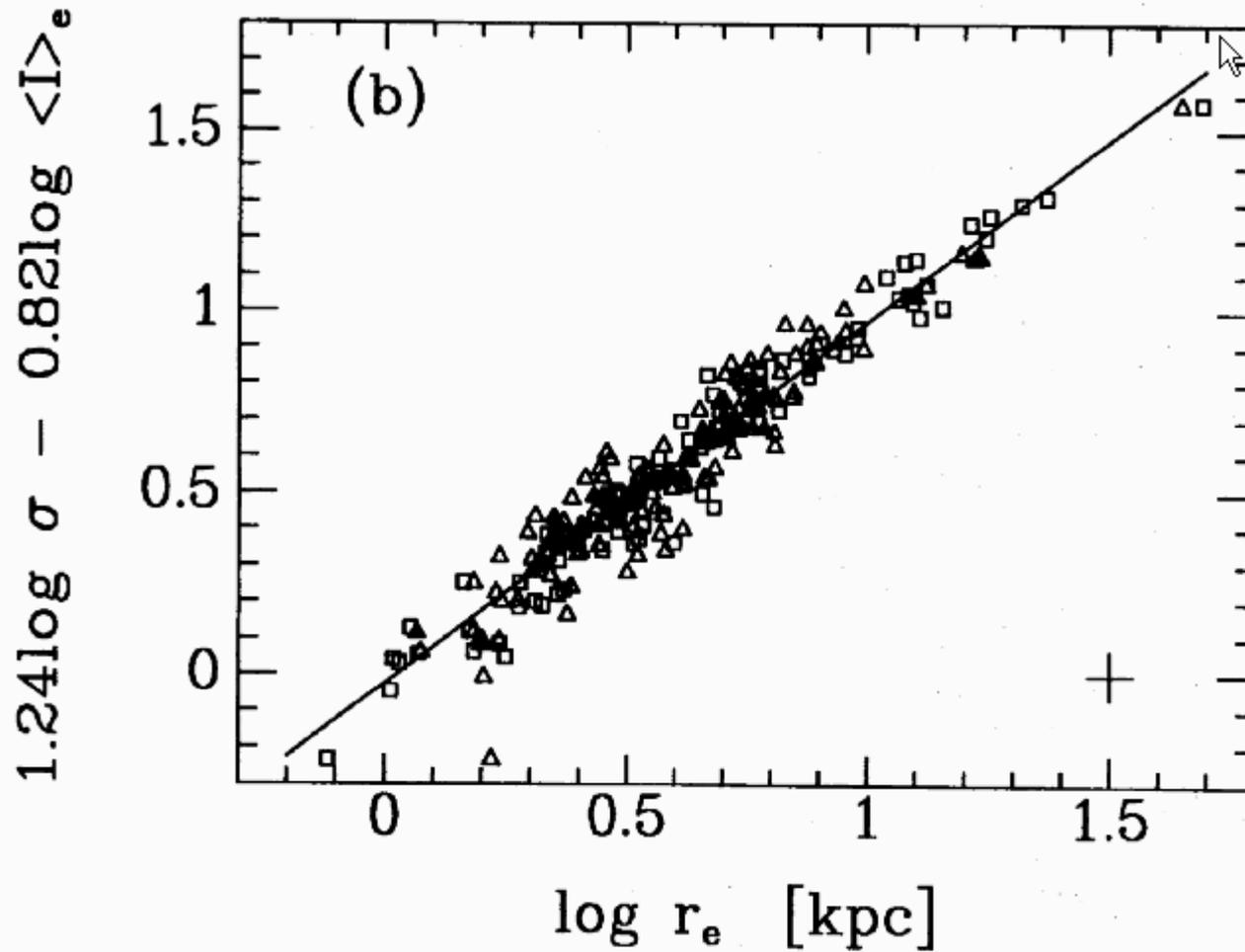
$$\log R_e = 0.34 \langle \mu \rangle_e + 1.4 \log \sigma_0 + \text{cste}$$

Projection du plan dans plusieurs directions

Djorgovski & Davis 1987



Plan Fondamental vu par la tranche



$$R_e \propto \sigma_0^{1/4} \langle I \rangle_e^{-0.85}$$

Jorgensen et al 1996

Plan fondamental et théorème du Viriel

Les galaxies sont en équilibre, énergie potentielle et cinétique $2T + V=0$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Viriel} \quad \mathbf{M} \propto \sigma_0^2 \mathbf{R}_e \\ \mathbf{L} = 2\pi \mathbf{R}_e^2 \langle \mathbf{I} \rangle_e \end{array} \right\} \boxed{R_e \propto \frac{L}{M} \frac{\sigma_0^2}{\langle I \rangle_e}}$$

qui est la relation du plan fondamental

$$\mathbf{R}_e \propto \sigma_0^{1.4} \langle \mathbf{I} \rangle_e^{-0.85}$$

Pourvu que

$$\left(\frac{M}{L} \right) \propto M^{0.2}$$
$$\left(\frac{M}{L} \right) \propto L^{0.25}$$

Le rapport M/L croît avec M

Relation Tully-Fisher pour les spirales

Relation entre la vitesse du plateau
et la luminosité

ΔV corrigée de l'inclinaison

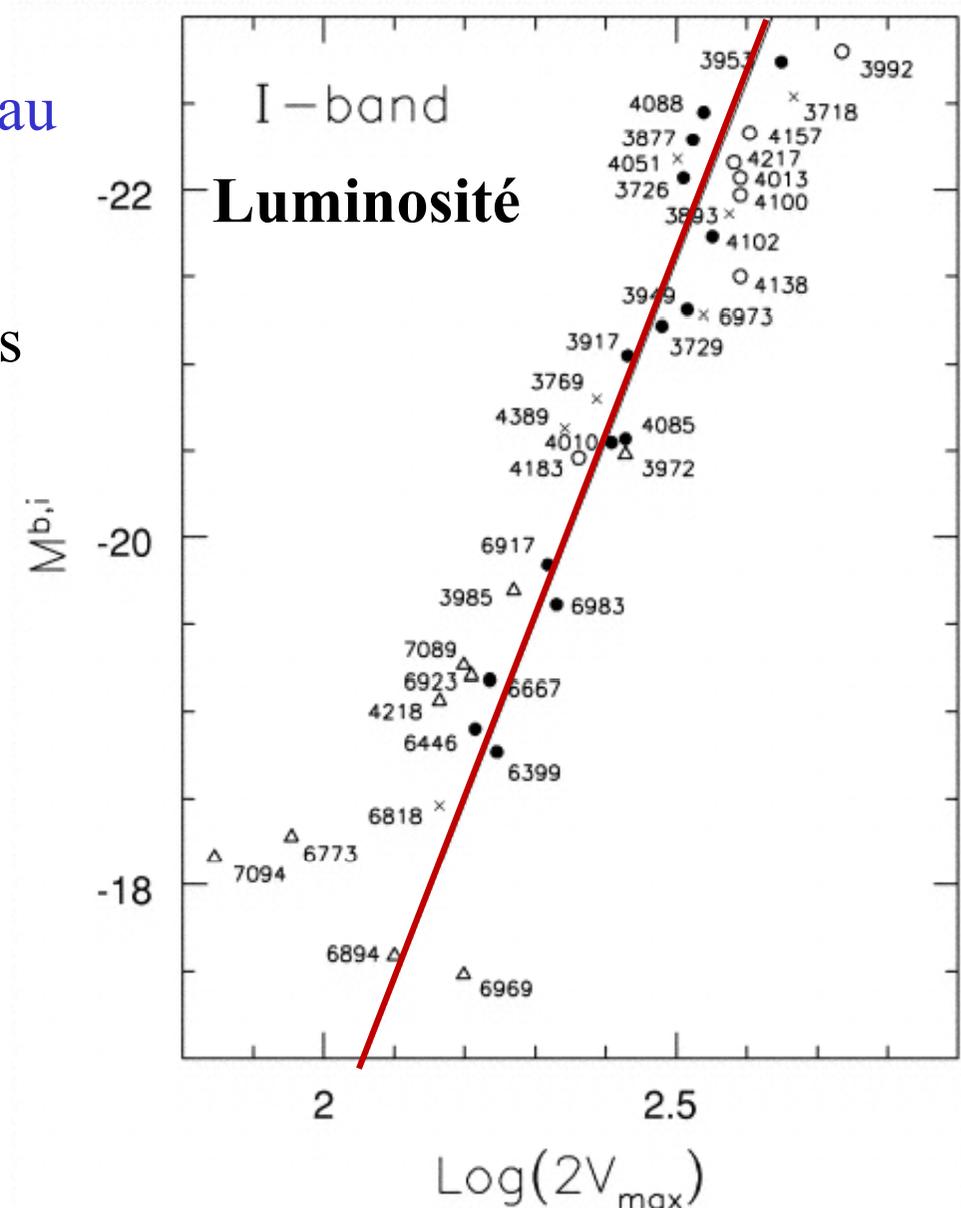
Bien meilleure relation en bandes
I ou K (pas d'extinction)

Correlation avec V_{flat}

Meilleure que V_{max}

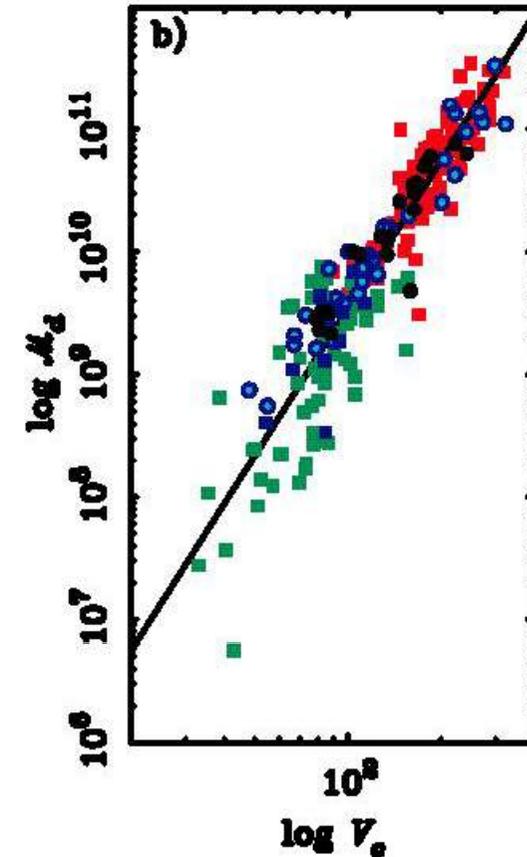
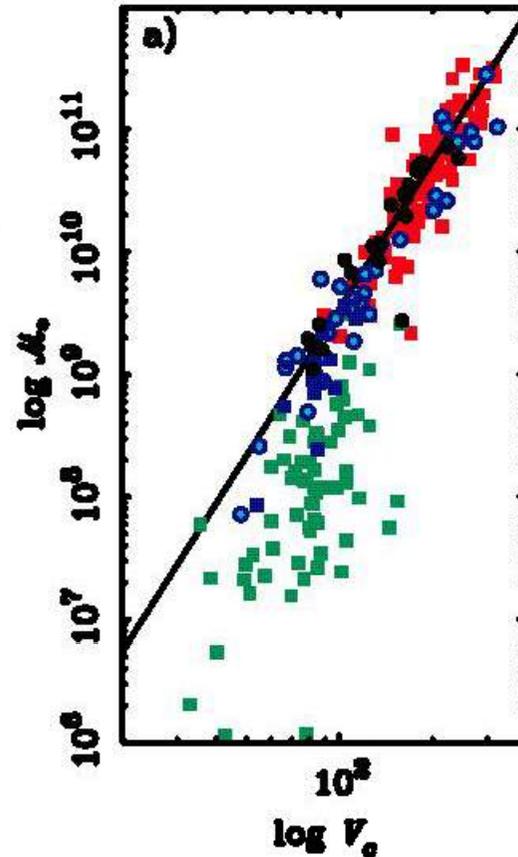
Ursa cluster

Verheijen 2001



Relation Tully-Fisher
pour les galaxies naines
riches en gaz
Meilleure corrélation
avec la masse totale
baryonique

Relation M_{baryons}
avec V_{rot}
 $M_{\text{b}} \sim V_{\text{c}}^4$

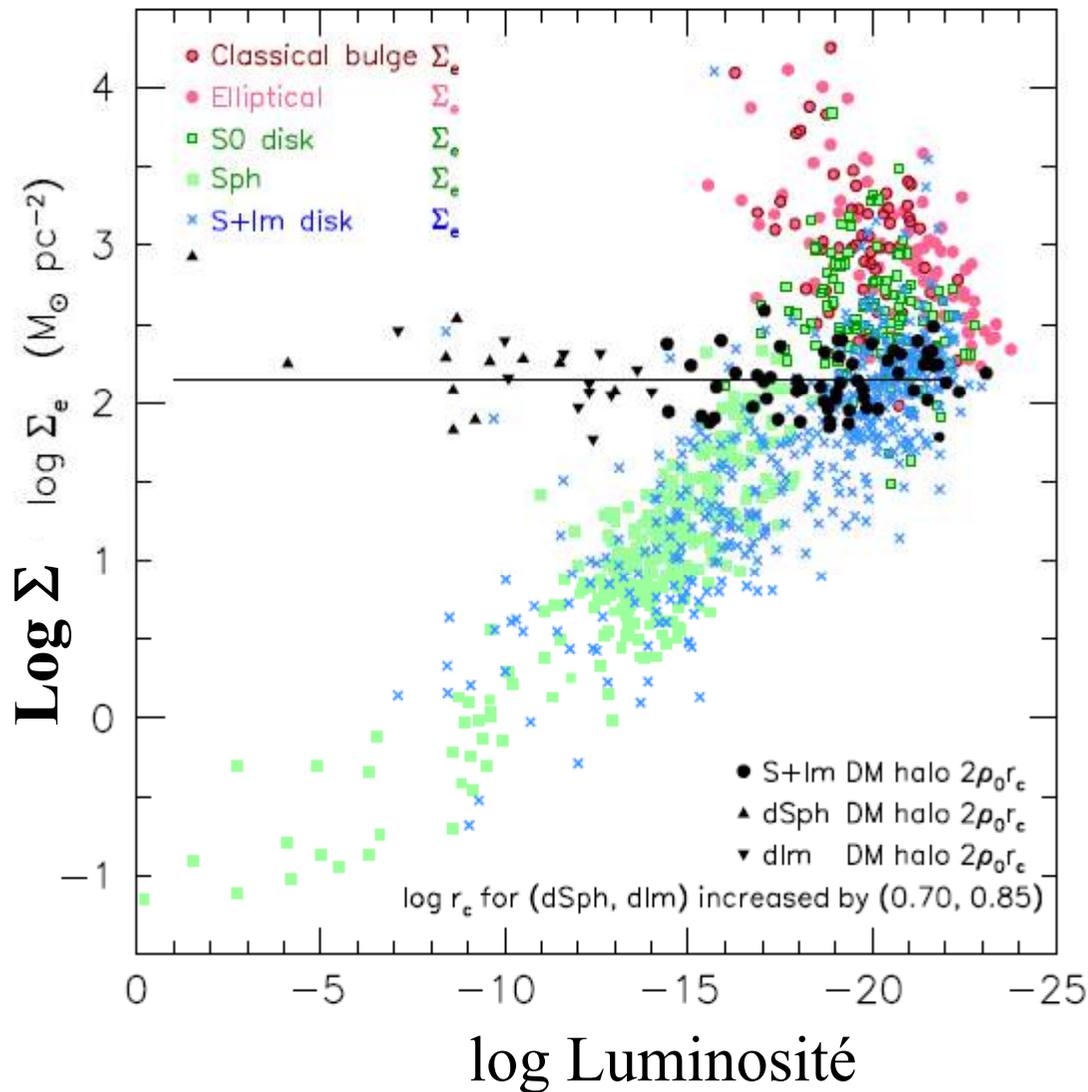


McGaugh et al (2000) → **Tully-Fisher baryonique**

Pour les ETG, le gaz est négligeable (ou alors gaz très chaud??)

Densité surfacique constante pour la DM

Toutes les galaxies en optique (couleur) (M_B , r_c , σ)



La densité surfacique des étoiles Σ^* change de dominante (grand L) à négligeable, (faible L)

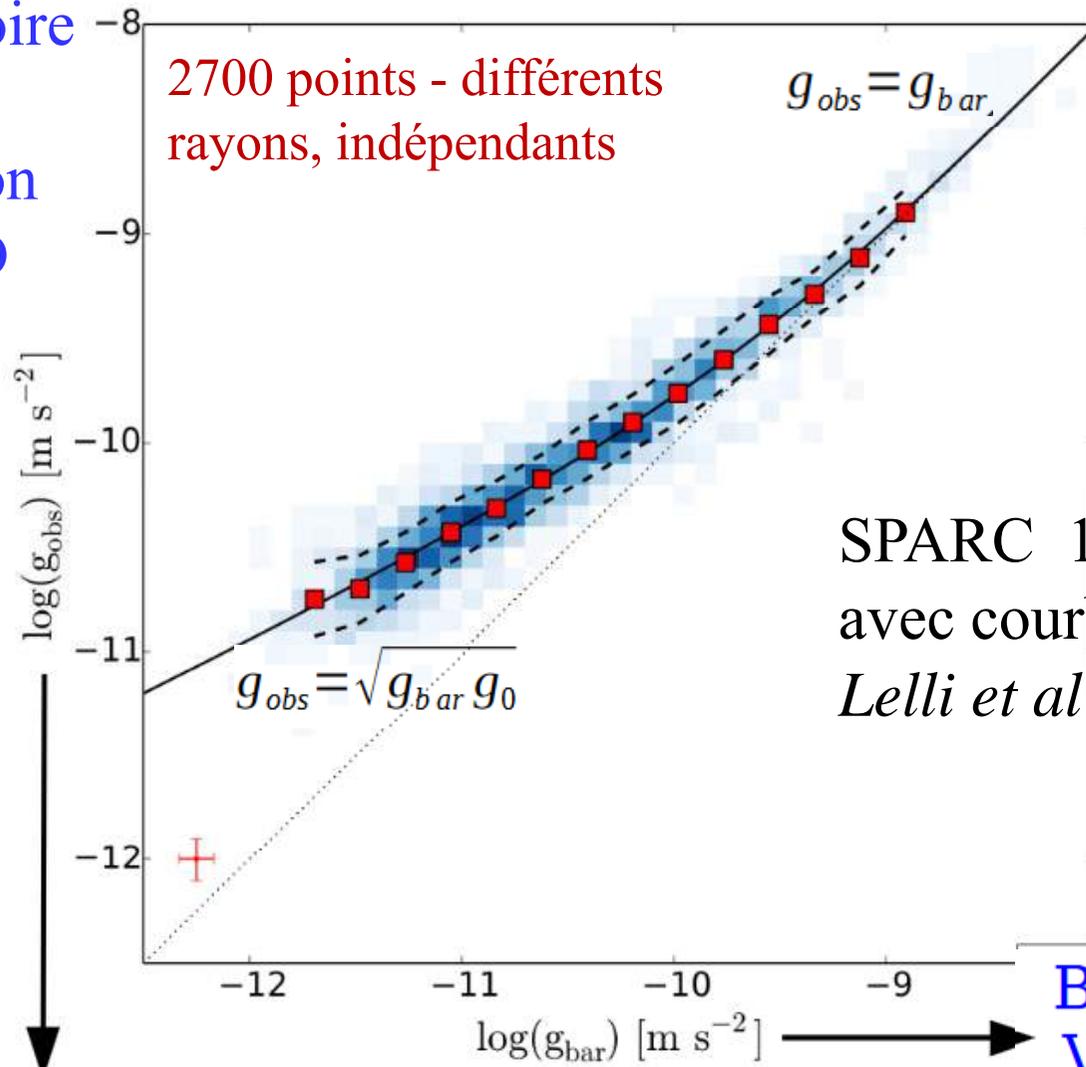
Pour les Elliptiques, les petits objets sont plus Brillants

Matière noire: $\Sigma = \text{cste}$

Kormendy & Freeman 2016

Relation de l'Accélération Radiale (RAR)

Matière noire
à faible
accélération
→ MOND



SPARC 175 galaxies,
avec courbe de rotation claire
Lelli et al 2016, 2017

Total Acceleration: $V_{obs}^2 / R = -\nabla\Phi_{tot}$

Baryonic Force:
 $V_{bar}^2 / R = -\nabla\Phi_{bar}$
 $\nabla^2\Phi_{bar} = 4\pi G \rho_{bar}$

RAR pour les elliptiques?

La relation est compatible avec celle des spirales et aussi l'hypothèse de MOND

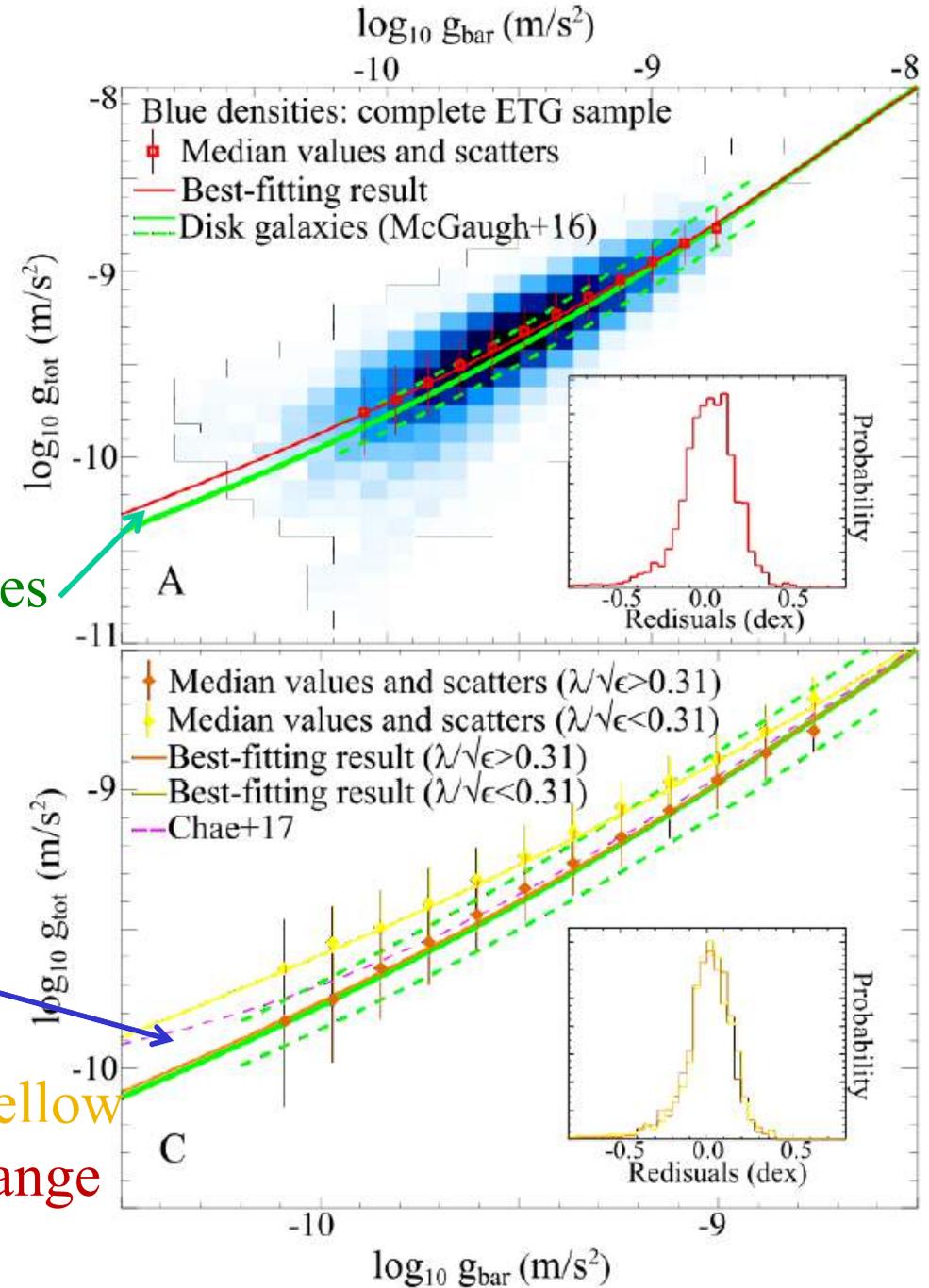
Chae et al 2017

7000 galaxies rondes, des bulbes purs, sans rotation

spirales

Slow yellow
Fast orange

Rong et al 2017



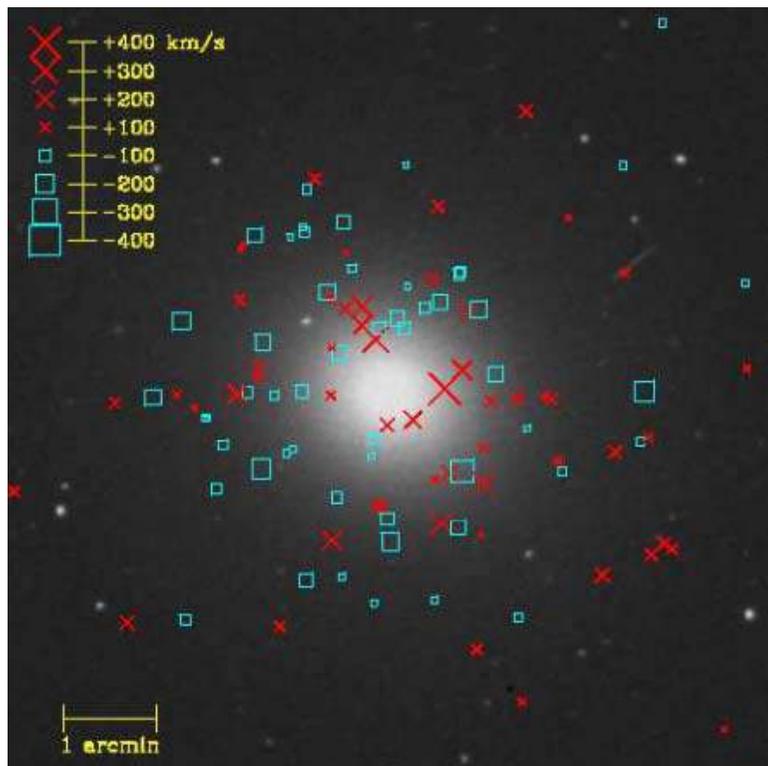
Matière noire dans les elliptiques?

Mesure des vitesses par des nébuleuses planétaires (~ 100 par galaxie)

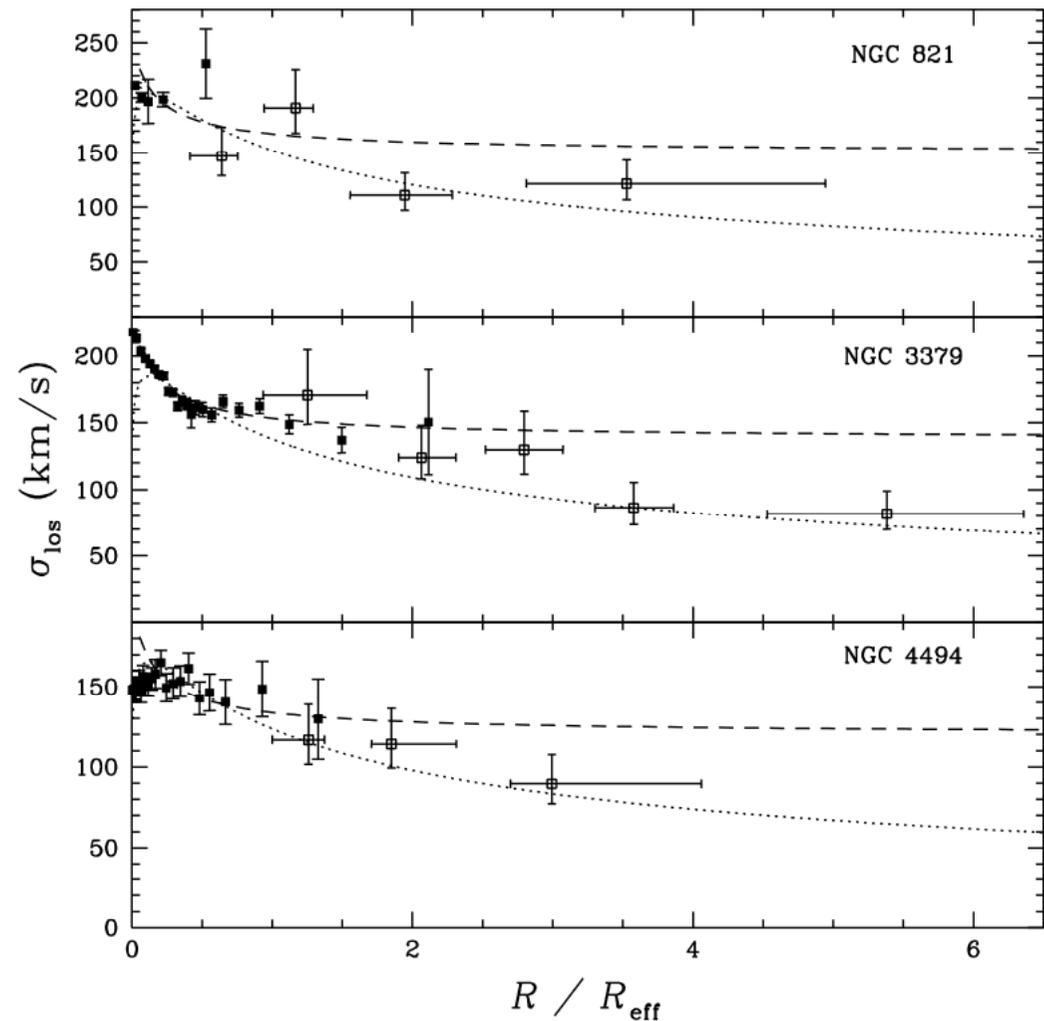
La dispersion σ tombe avec le rayon

de façon képlérienne

→ Pas de matière noire



Romanowsky et al 2003

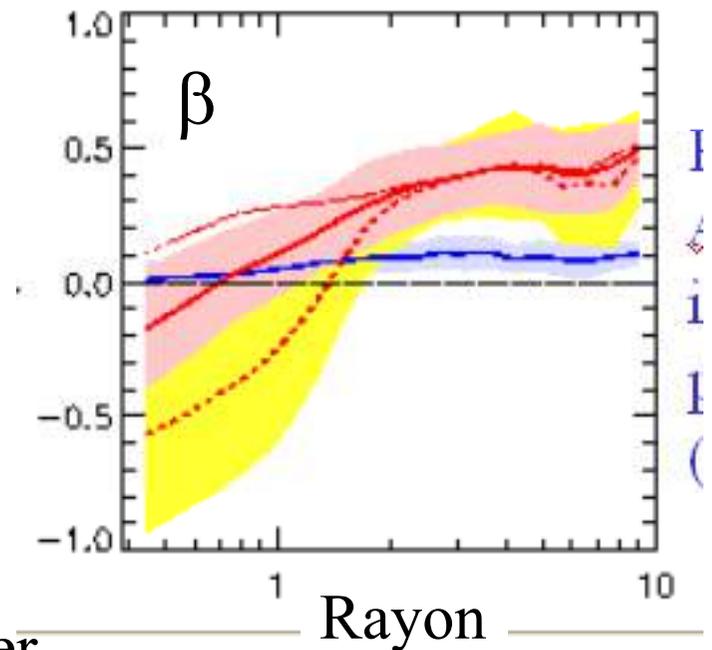


Anisotropie des vitesses

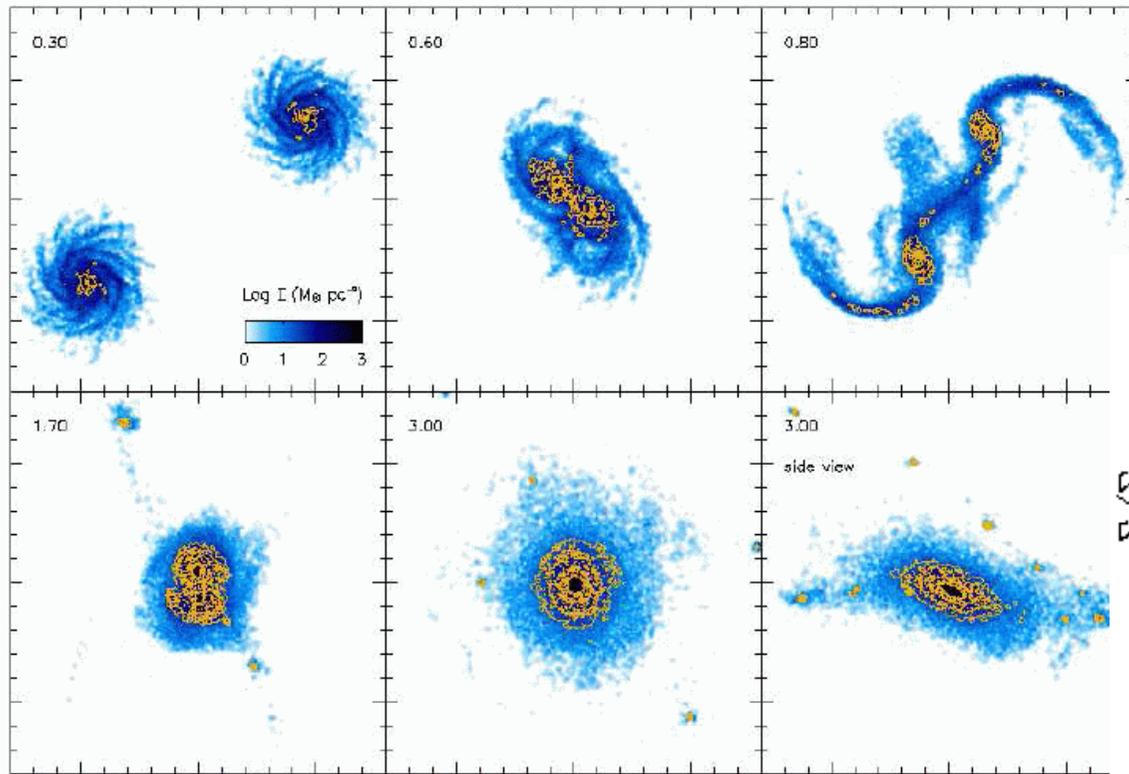
$$\beta = 1 - \sigma_{\theta}^2 / \sigma_r^2 = -\infty, 0, 1$$

orbites circulaires, isotropes et radiales

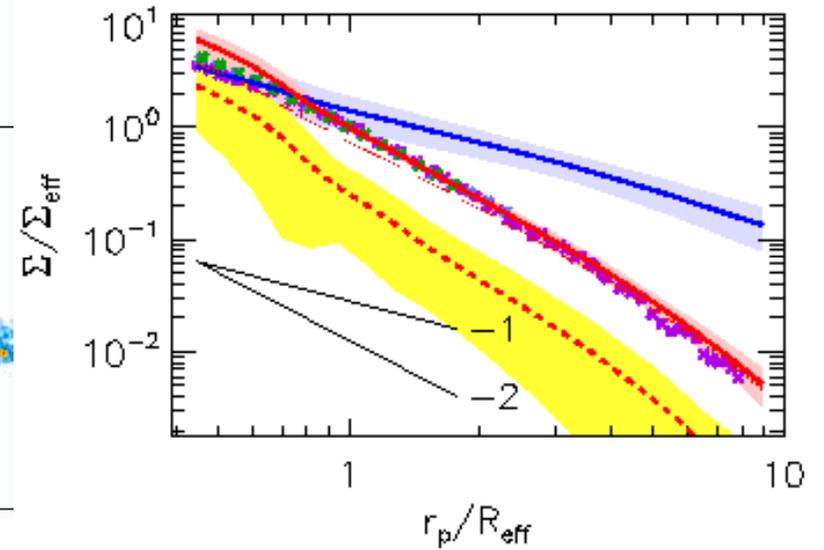
Quand les galaxies se forment par fusion, les orbites dans les parties externes sont fortement radiales, ce qui pourrait expliquer les faibles dispersions en projection
(*Dekel et al 2005*)



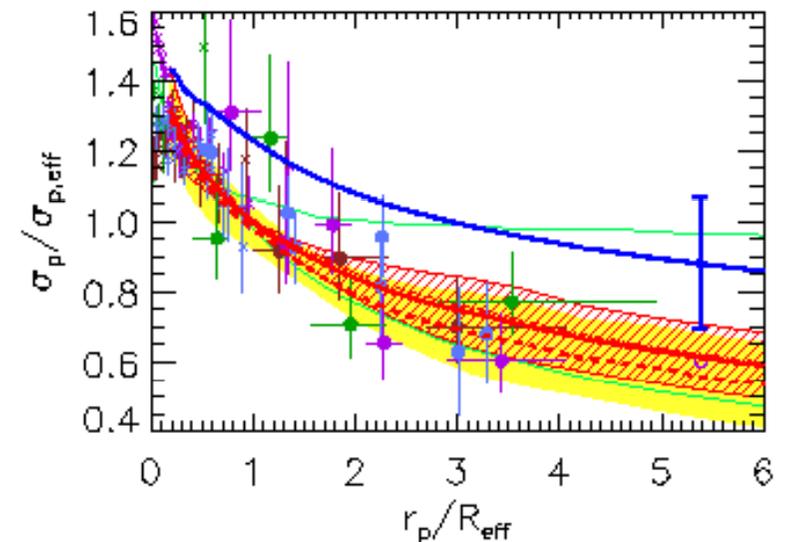
L'observation des profils de vitesses est **dégénérée**



Les étoiles jeunes= **jaune**
 DM=bleu,
 vieilles étoiles=**rouge**



Comparaison avec les data pour
 N821 (vert), N3379 (violet)
 N4494 (marron), N4697 (bleu)



Étoiles jeunes // nébuleuses planétaires
Dekel et al 2005

Résumé

- Profils de densité, Sersic avec ou sans cœur, selon M
- → Bimodalité: rotation, n, aplatissement, disque/boîte
- Les elliptiques plus complexes que prévu: 66% en rotation
- Les plus massives, centres découplés, triaxialité
- Scénarios de formation: fusions majeures de spirales rares
- Fusion mineures, sans dissipation ou avec gaz, ou bien accréation continue
- Relations d'échelle, Faber-Jackson,
- Le plan fondamental: le Viriel, plus évolution de M/L

