



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

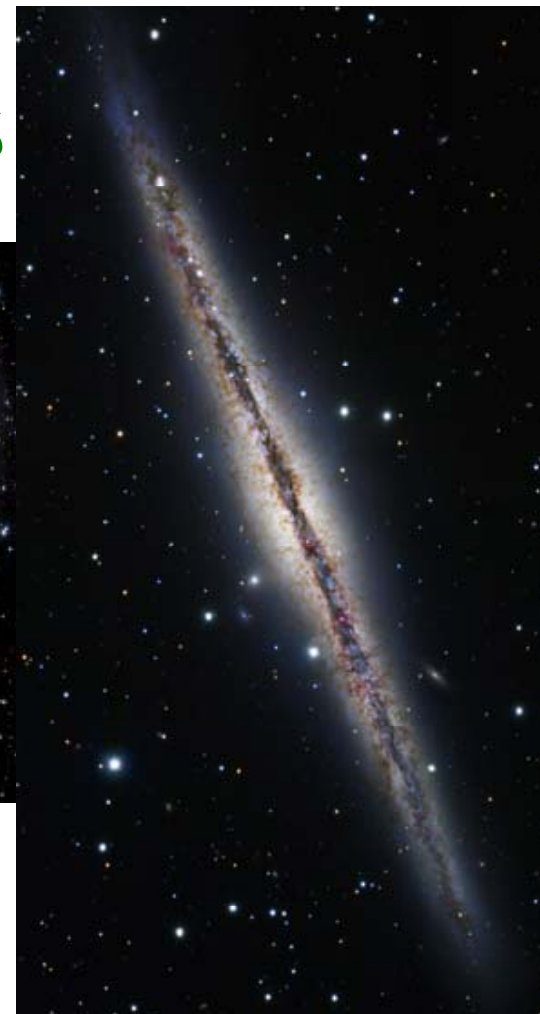
Le problème de la matière noire: galaxies elliptiques et naines



Françoise Combes

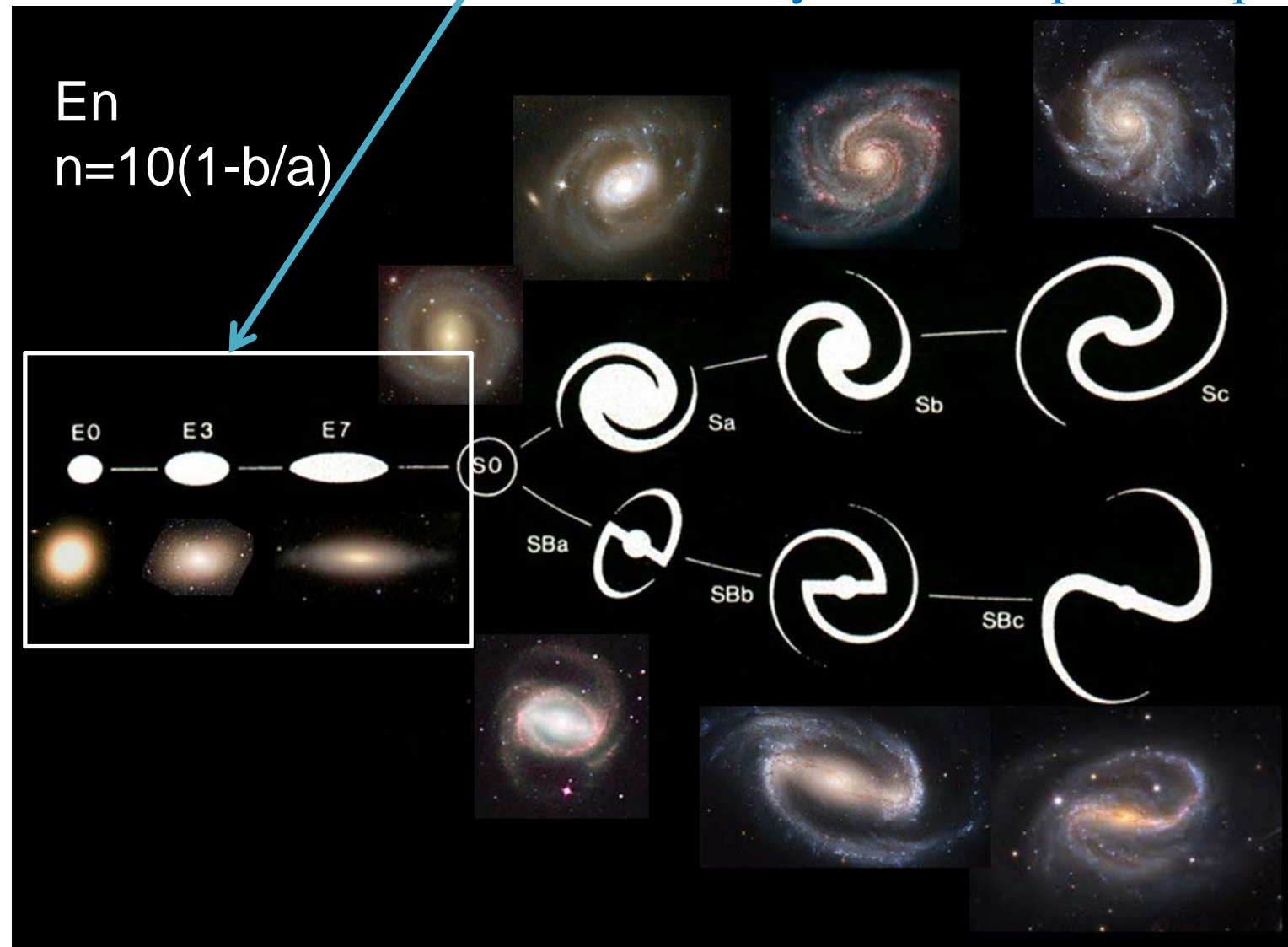


Parmi tous les types de galaxies



La partie « précoce » du diapason

Les systèmes les plus simples?



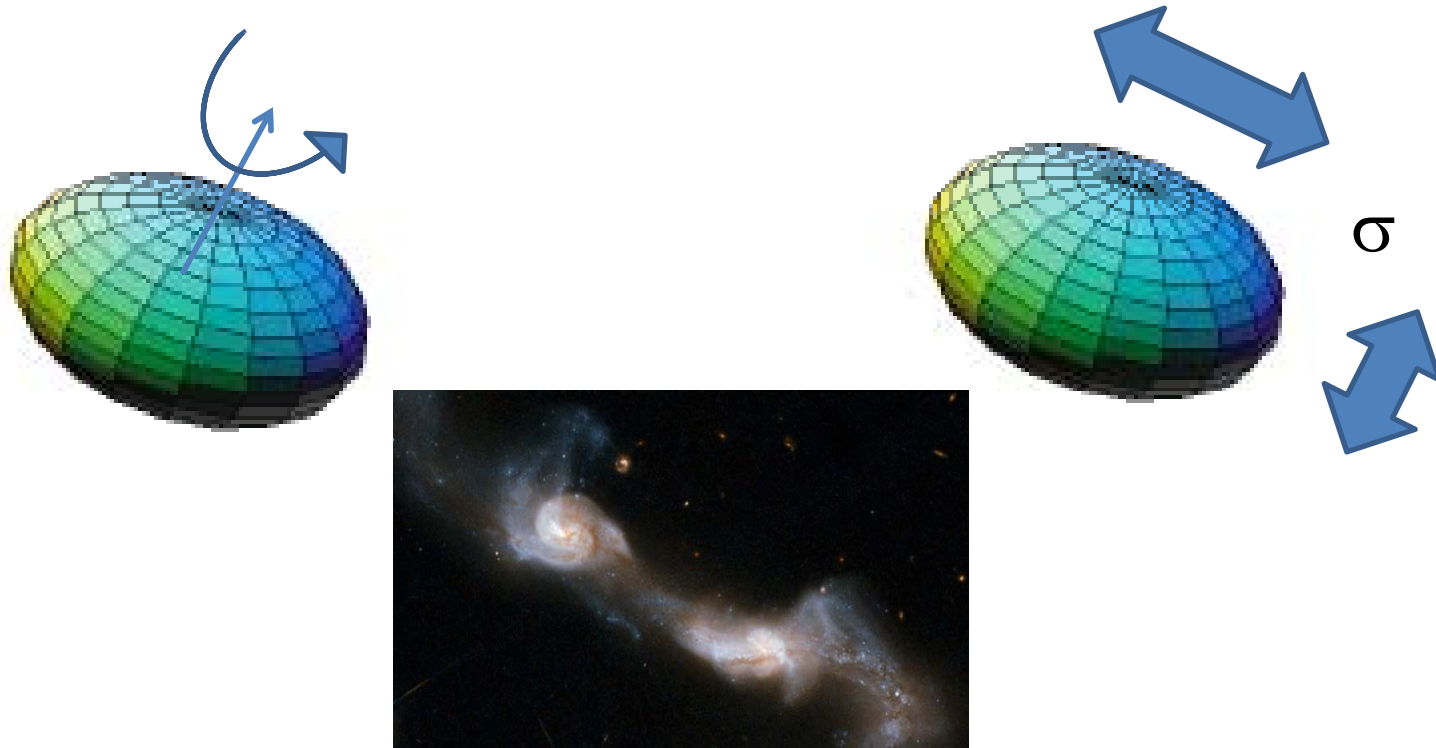
Rotation et Galaxies Elliptiques

Historiquement, on pensait que les elliptiques étaient aplaties par rotation, comme pour les spirales

En 1978, on comprend que ce n'est pas le cas

(Illingworth et al 1978)

**Le support cinétique est une dispersion de vitesse anisotrope
Cette propriété vient certainement de leur formation par fusion**



Mesure des vitesses des Elliptiques

Il est très difficile de mesurer la rotation des galaxies elliptiques

Les spectres stellaires (raies d'absorption) sont individuellement et intrinsèquement très larges ($> 200\text{km/s}$)

Dues à la haute pression de l'atmosphère chaude

On doit effectuer une déconvolution: corrélation avec des templates

Template en fonction du type et des populations stellaires

Spectres stellaires

- Raies d'absorption

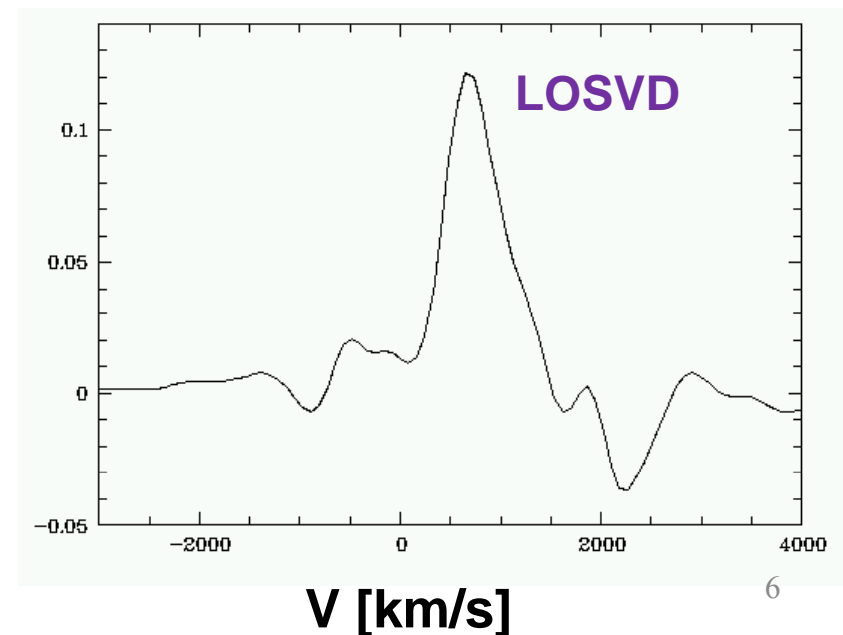
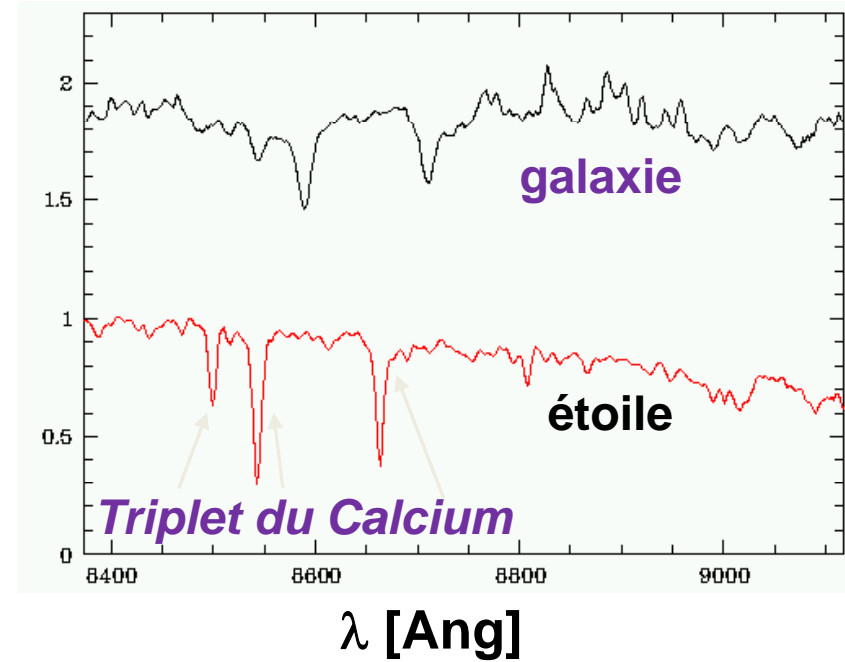
Déconvolution:

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

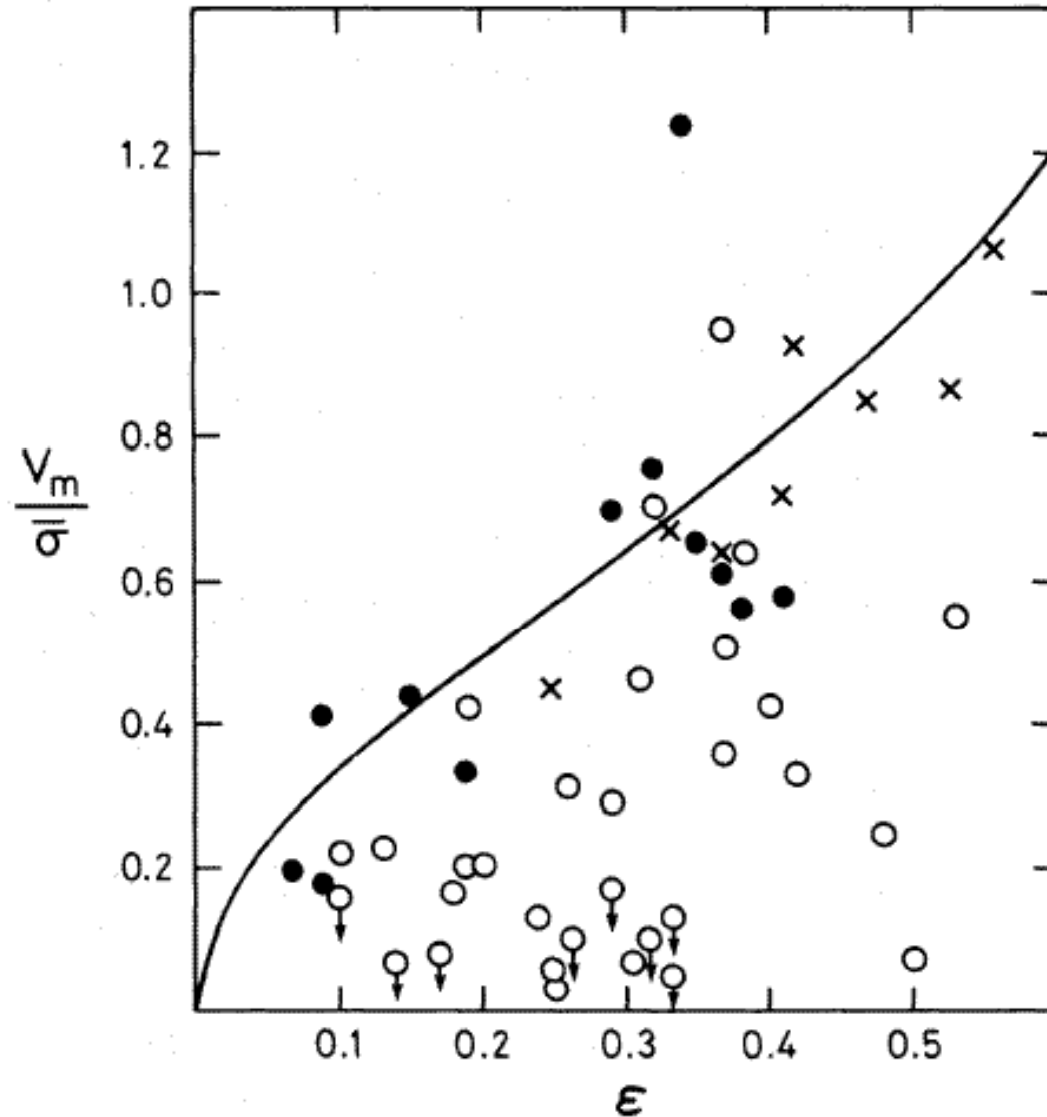
LOSVD :

“Line Of Sight
Velocity Distribution”

Distribution de vitesses sur
l'alignement de visée



Rotation des Elliptiques



Cercles pleins: faibles masses

Cercles vides: galaxies elliptiques massives

Croix= Bulbes

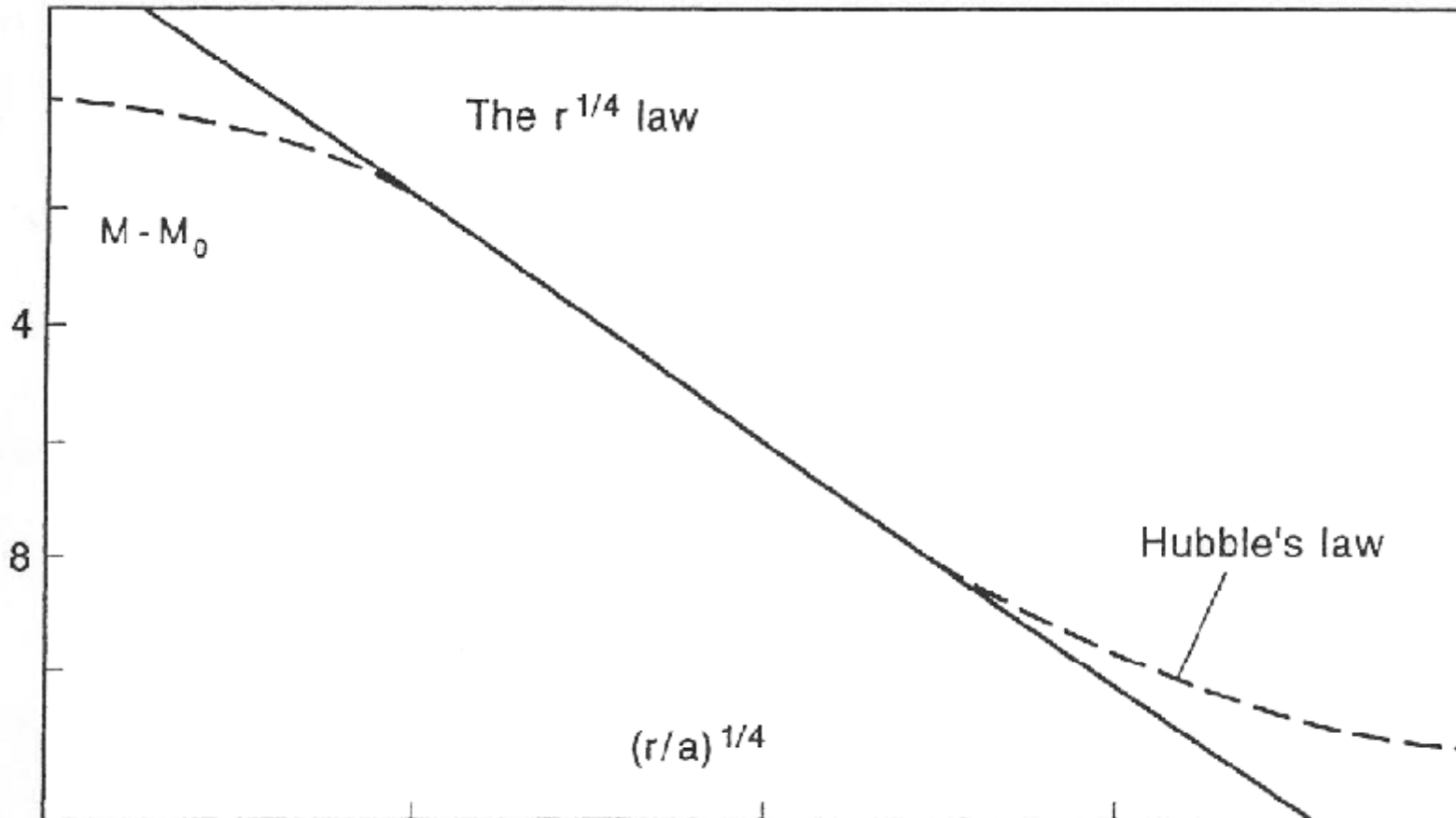
Davies et al (1983)

Courbe solide: relation pour des objets aplatis en rotation et une dispersion de vitesse isotrope
(Binney 1978)

Observation: Profils de Densité

Profil de lumière de Vaucouleurs en $r^{1/4}$ $\log(I/I_e) = -3.33 (r/r_e^{1/4} - 1)$

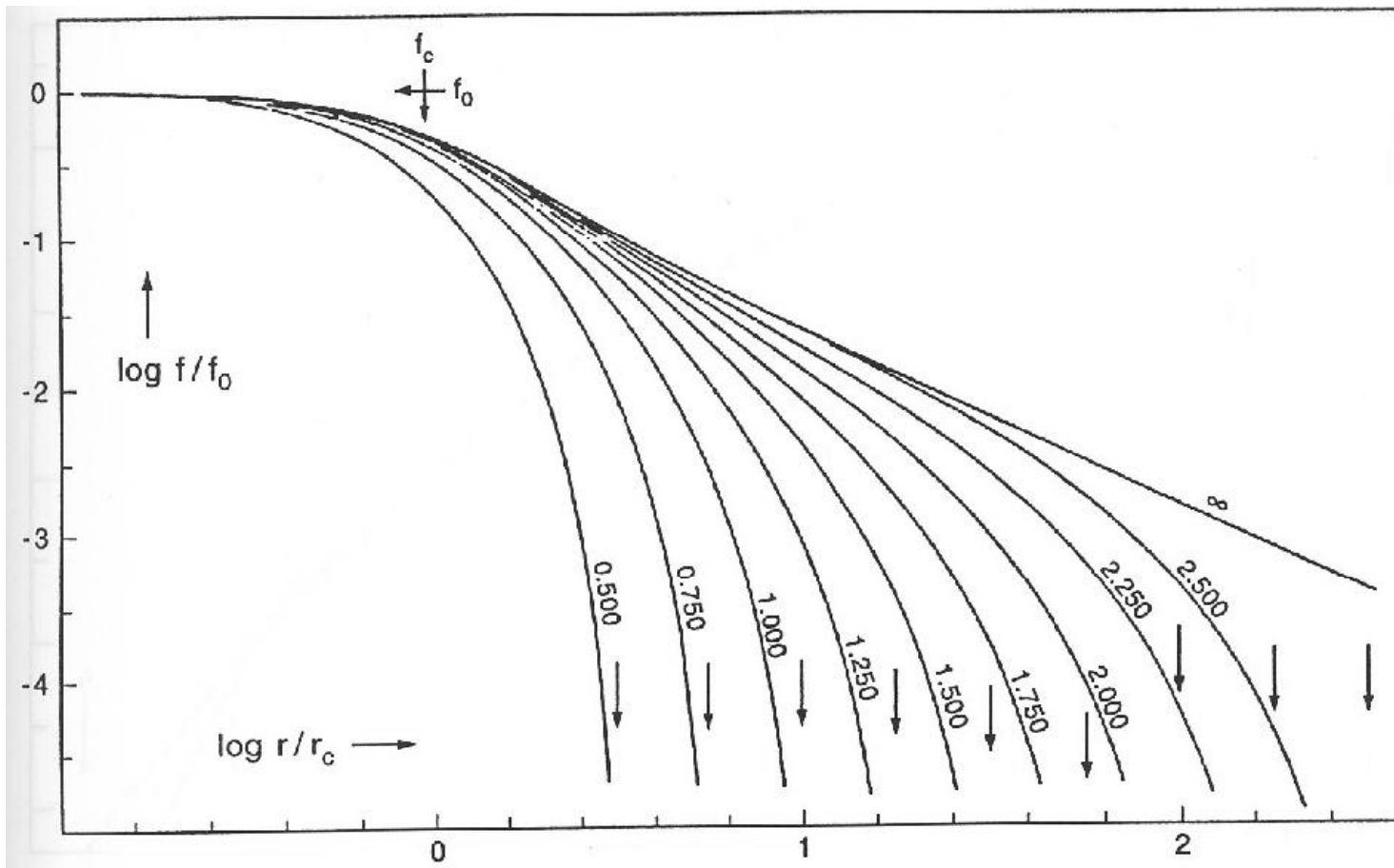
Le profil de Hubble $I/I_0 = [r/a+1]^{-2}$



Théorie: Profils de King

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

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

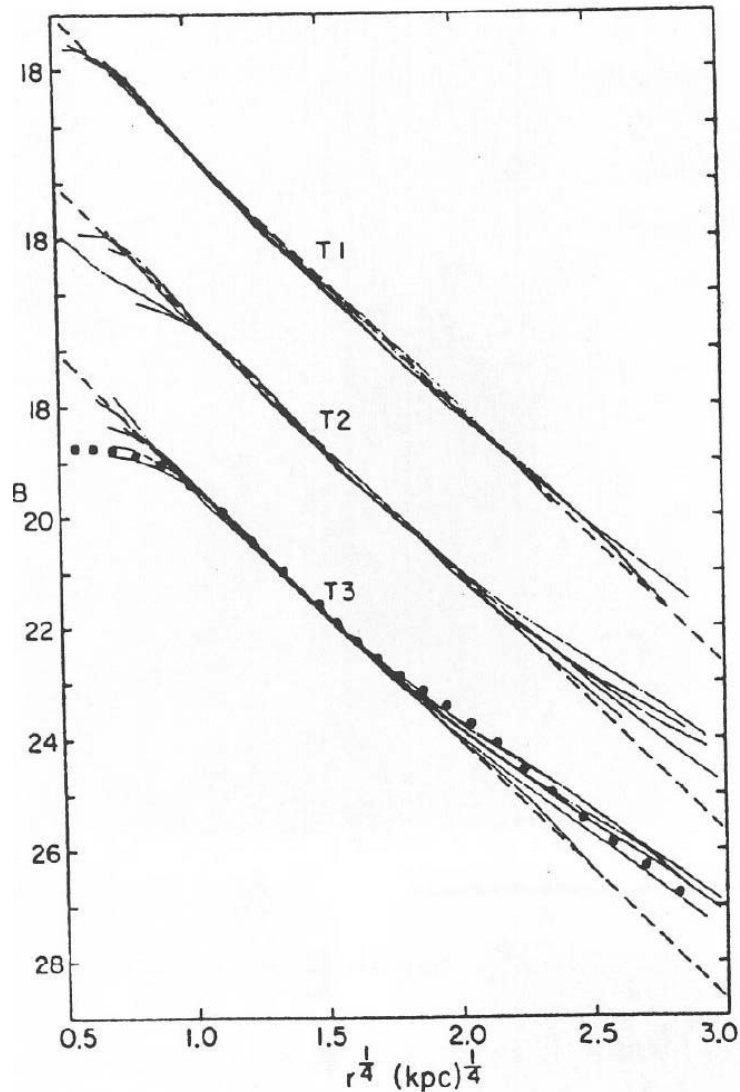


$$C = \log(r_t/r_0)$$

r_t = rayon de marée

r_0 = rayon de coeur

Déformations des profils de lumière



Les différents profils correspondent à des déformations de marée des galaxies elliptiques

T1: galaxies isolées

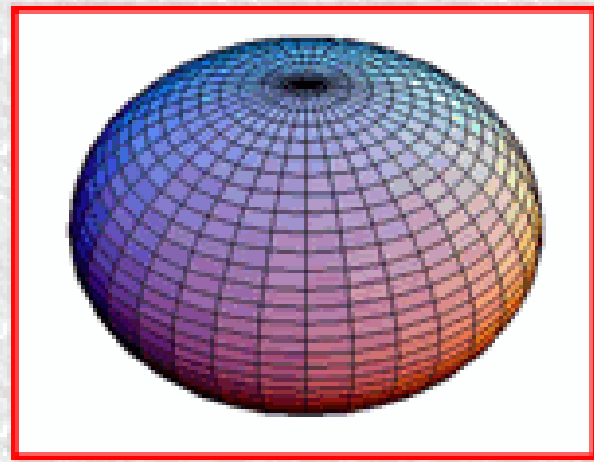
T3: avec voisins proches

Ecart au profil de de Vaucouleurs

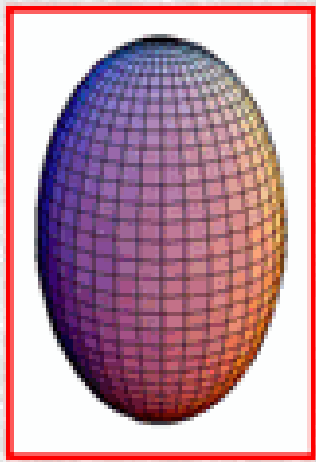
Kormendy 1982

Forme possible des sphéroïdes

Oblate



Prolate



Sphéroïdes de révolution

→ 2 axes égaux

Les grands axes égaux=
Oblat, disque, galette

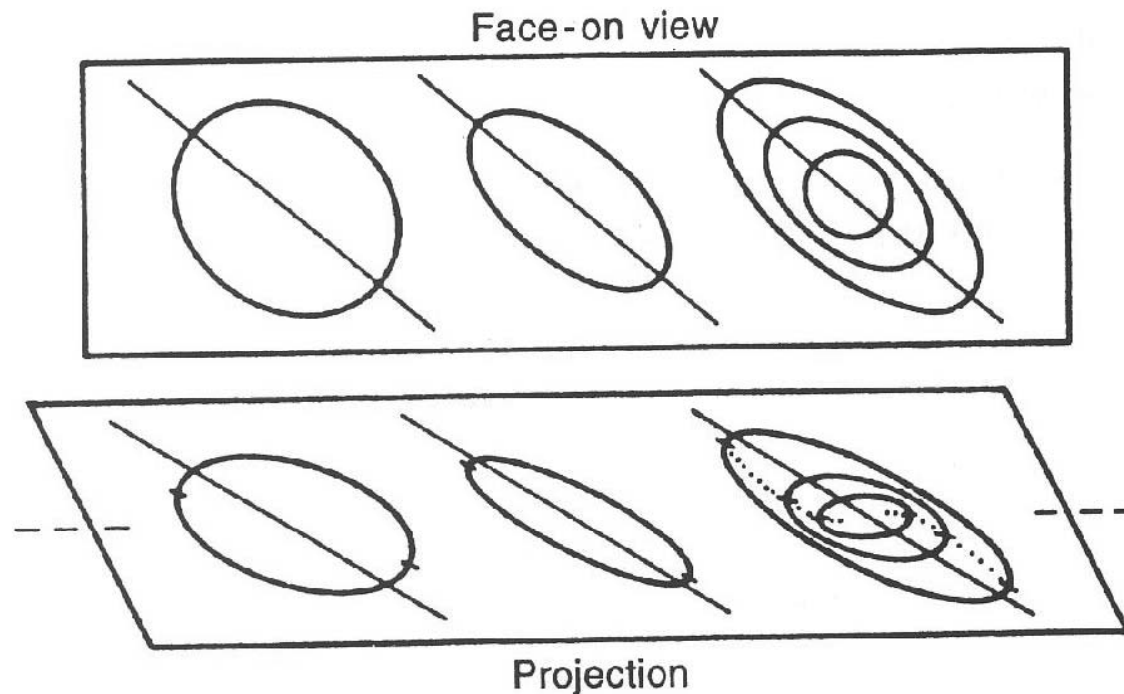
Les petits axes égaux=
Prolat, cigare, ballon de rugby

Espoir de pouvoir considérer 2 axes voisins,
même s'il ne sont pas égaux

Triaxialité des elliptiques

Les observations montrent que les galaxies elliptiques ont une forme triaxiale, plutôt que sphéroïdale avec 2 axes égaux, comme **oblat/prolat**

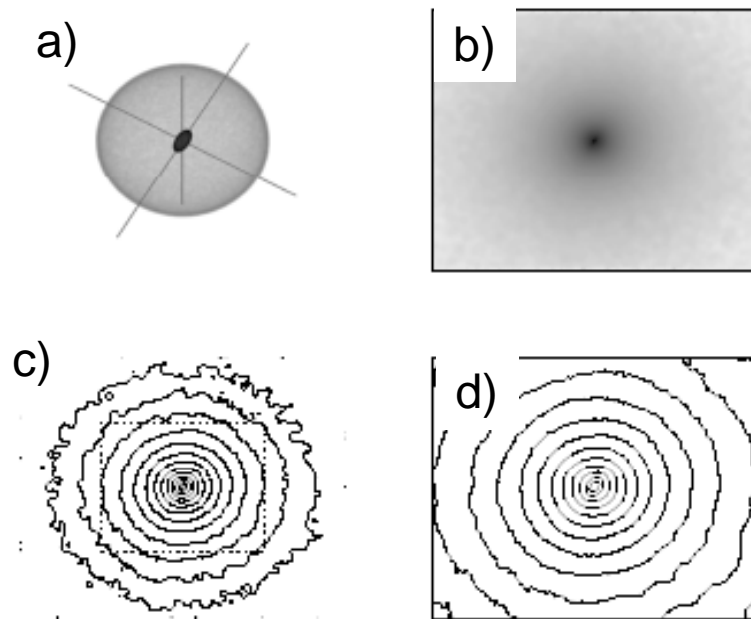
Avec la triaxialité et une variation de l'ellipticité avec le rayon,
→ Il existe une rotation des isophotes, ou twist



Pas de déformation intrinsèque!

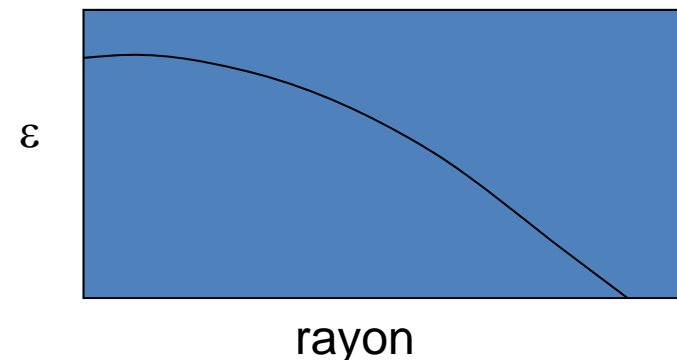
Twist d'isophotes et variation d'ellipticité avec le rayon

- Un corps triaxial vu d'une direction quelconque aura un twist d'isophotes, sauf vu le long des axes de symétrie (i.e. PA change avec le rayon)



- a) Surfaces de densité constante La surface externe est oblate avec $x:y:z = 1:1:0.46$. La surface interne est triaxiale avec $x:y:z = 1:0.5:0.25$.
- b) Image en projection
- c) Isophotes en projection
- d) Isophotes de la région centrale- noter le twist d'isophotes

- Variation de l'ellipticité des isophotes avec le rayon



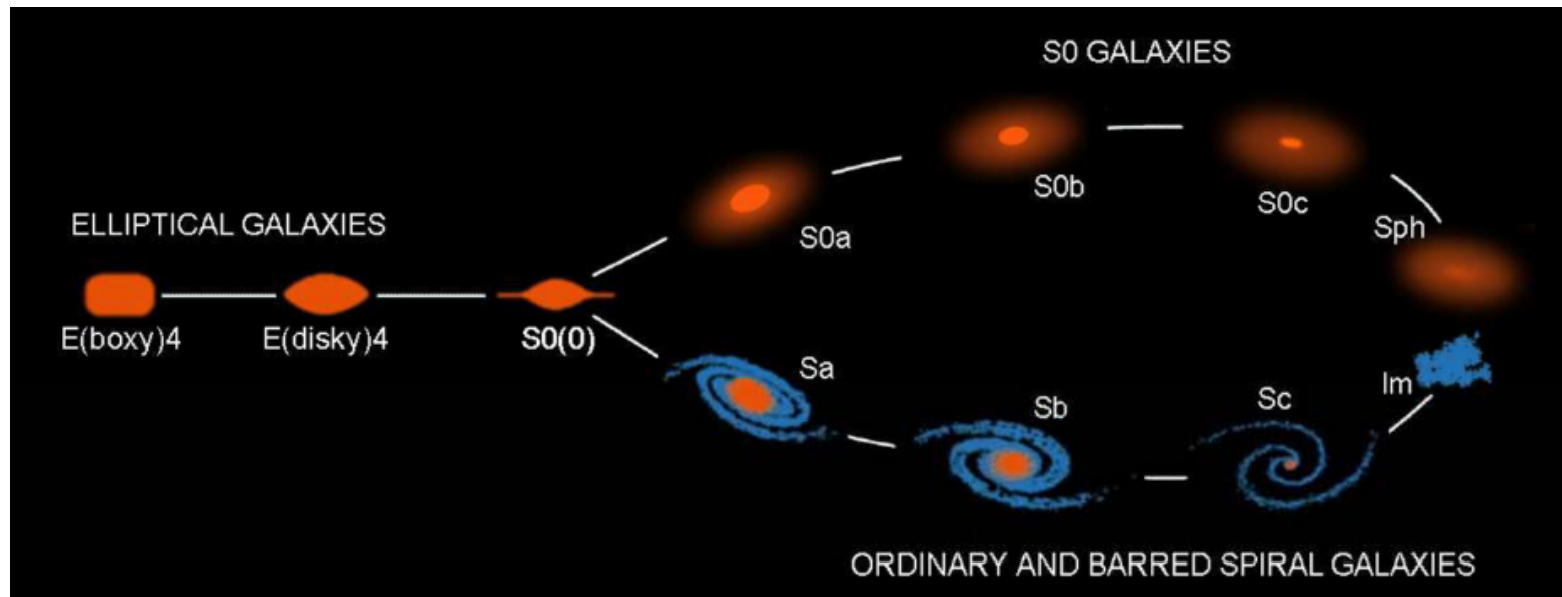
Morphologie en boîte ou disque

- 80% des Elliptiques: déviations des isophotes en pures ellipses
- Ces déviations à $\sim 1\%$ peuvent être paramétrées en décomposant les profils isophotes en série de Fourier en azimuth

$$I(\theta) = a_0 + a_2 \cos 2\theta + a_4 \cos 4\theta$$

ellipse composante "a4"

↙ ↙

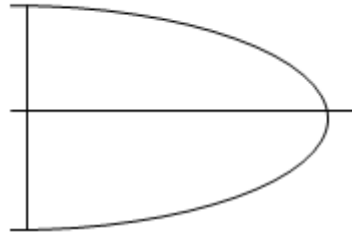


Modification du diapason de Hubble

Isophotes « boîte » ou « disque »

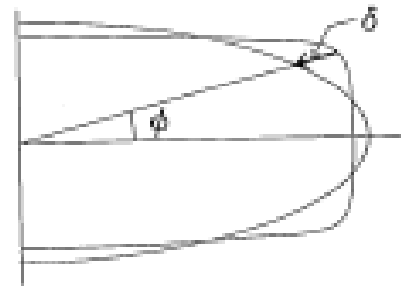
$a_4=0$

Ellipse pure



$a_4<0$

«boîte»

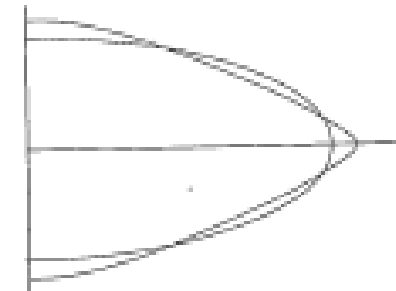


- Elliptiques massives
- Ont en général des twists d'isophotes

- Formées par des fusions de galaxies spirales
- Très peu de rotation
- Triaxiales

$a_4>0$

«disque»

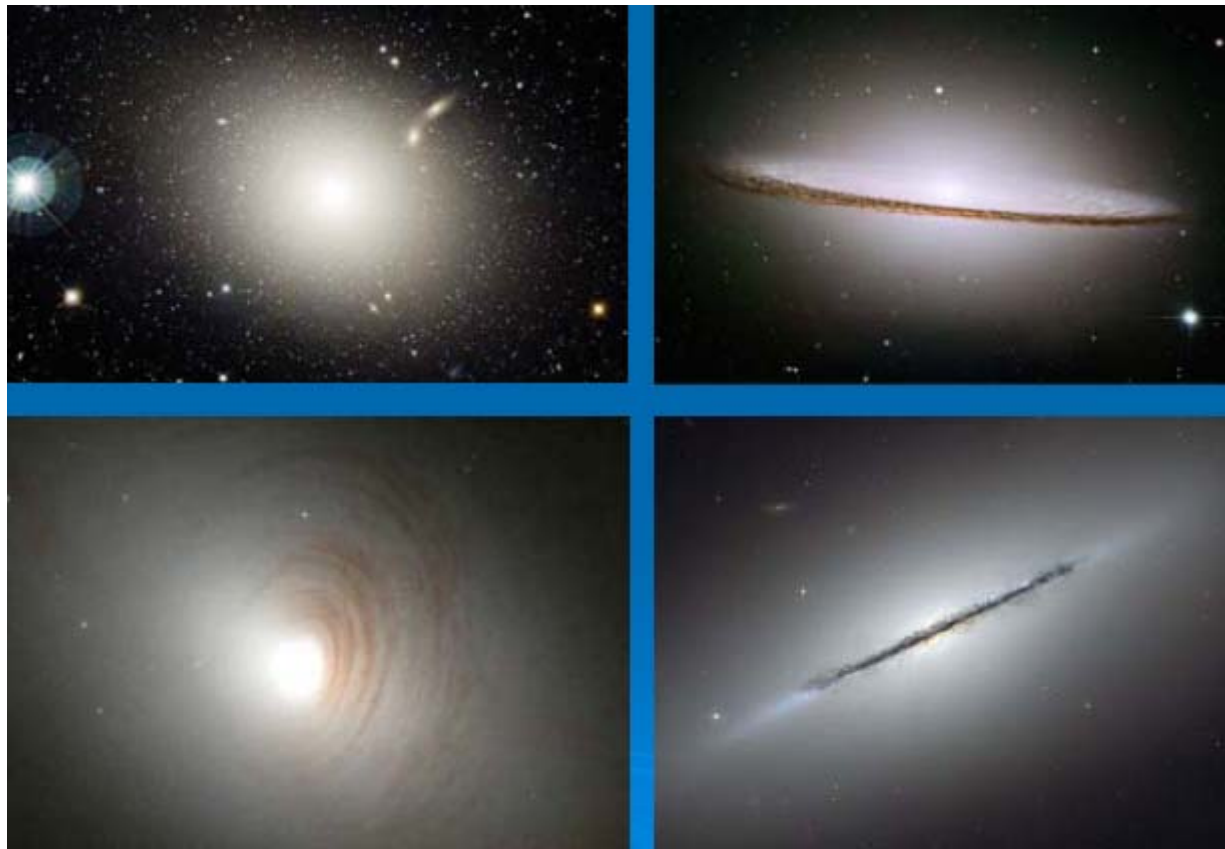


- Elliptiques de taille moyenne

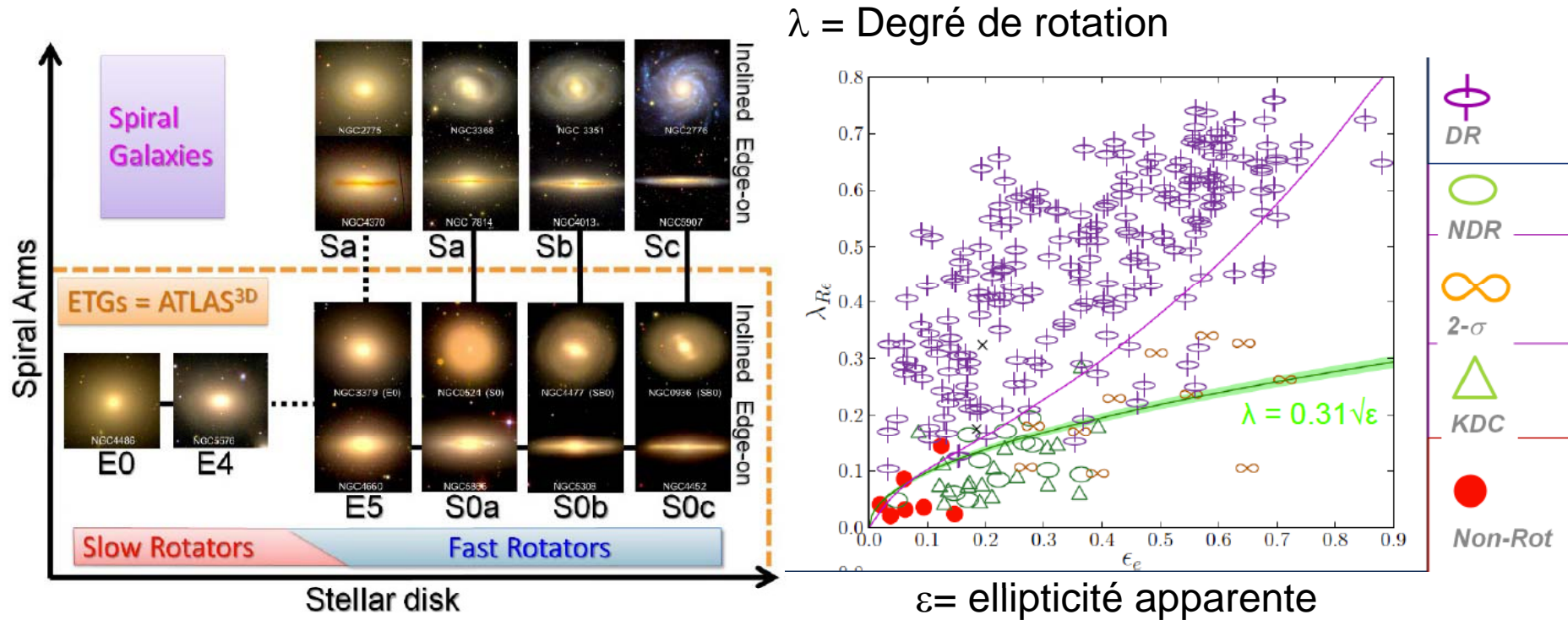
- Indication de la présence d'un disque faible
- Rotation plus prononcée
- Oblat

Elliptiques & Spirales de type précoce

Certaines galaxies sont difficiles à classifier, entre lenticulaires et elliptiques. La plupart des Elliptiques ont un disque stellaire



300 galaxies: ATLAS-3D



Environ 85% des galaxies de type sph roides ont de la rotation lente

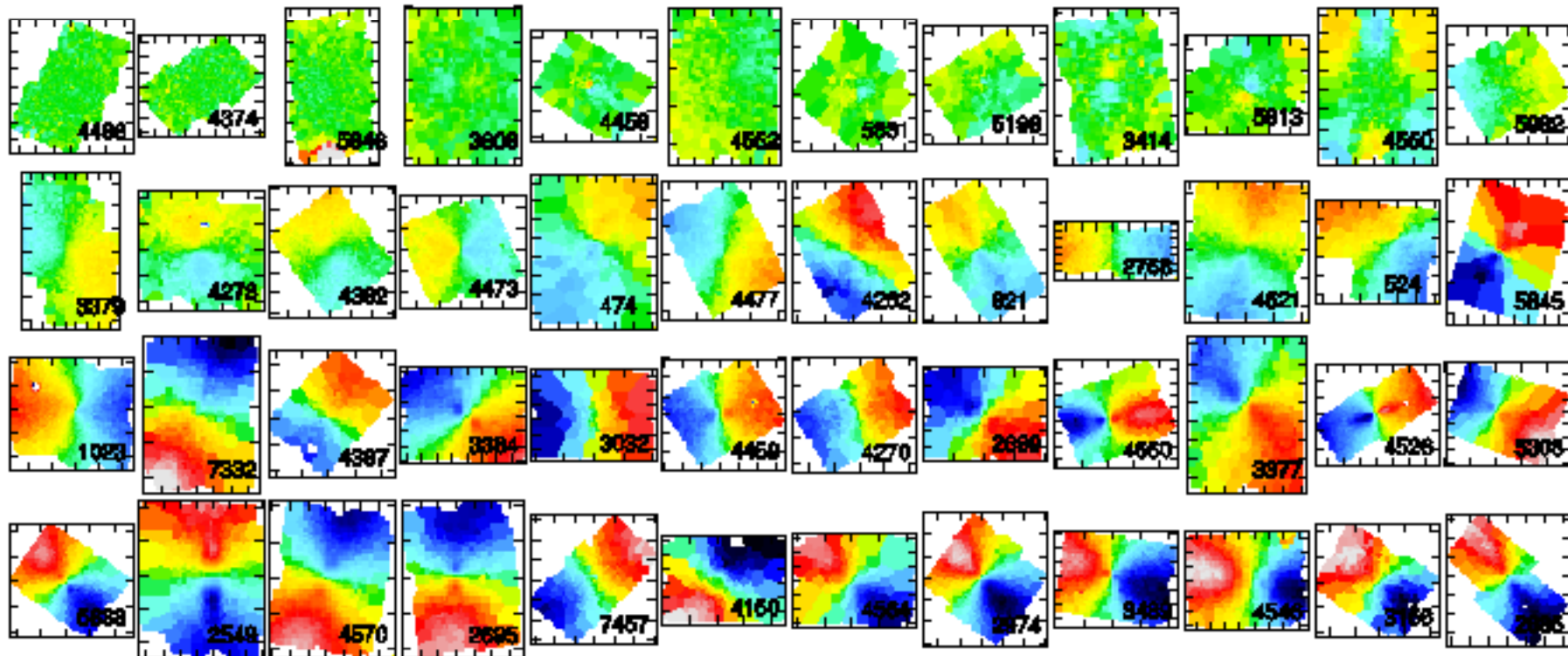
Les objets qui ne tournent pas ou très peu sont des elliptiques géantes, essentiellement dans les environnements denses

Capellari et al 2011 Emsellem et al 2011

Emsellem et al 2007

Champs de vitesse des elliptiques/S0

○ Slow rotators

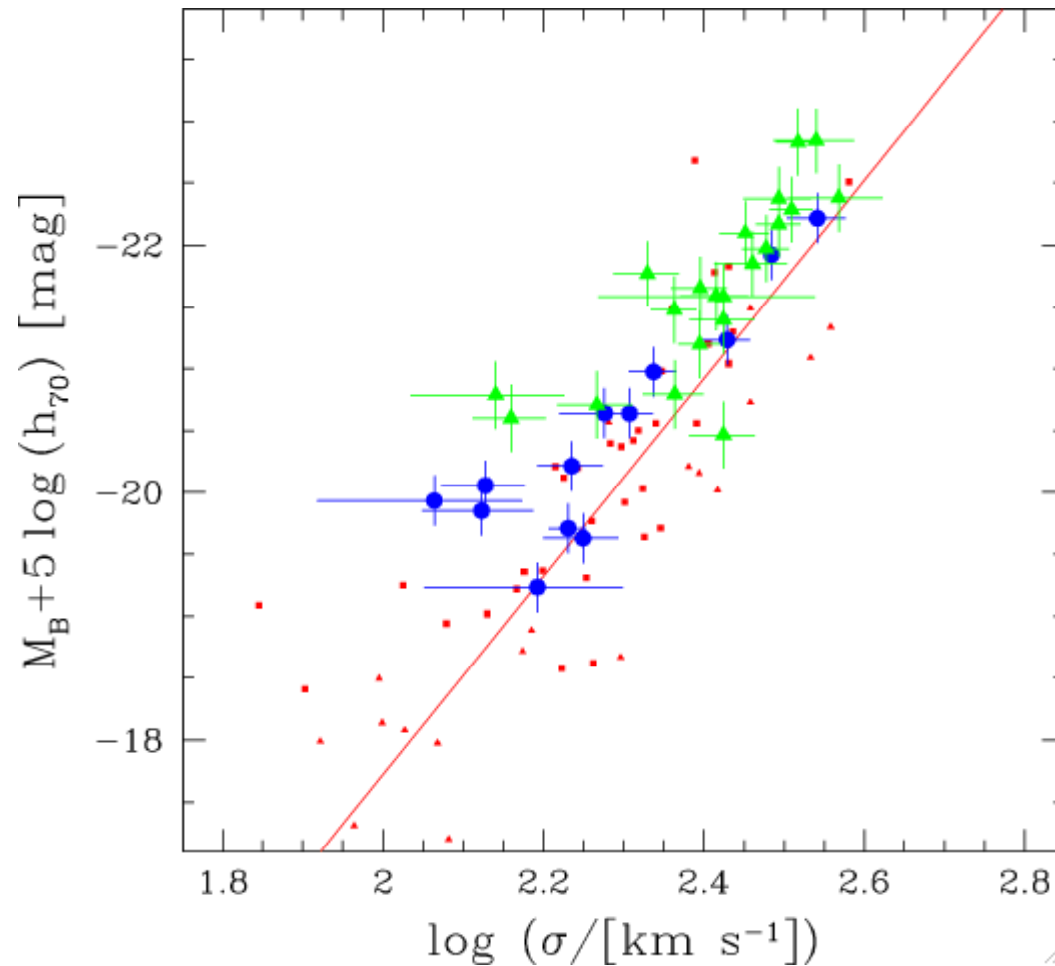


⊖ Fast rotators

λ_D →

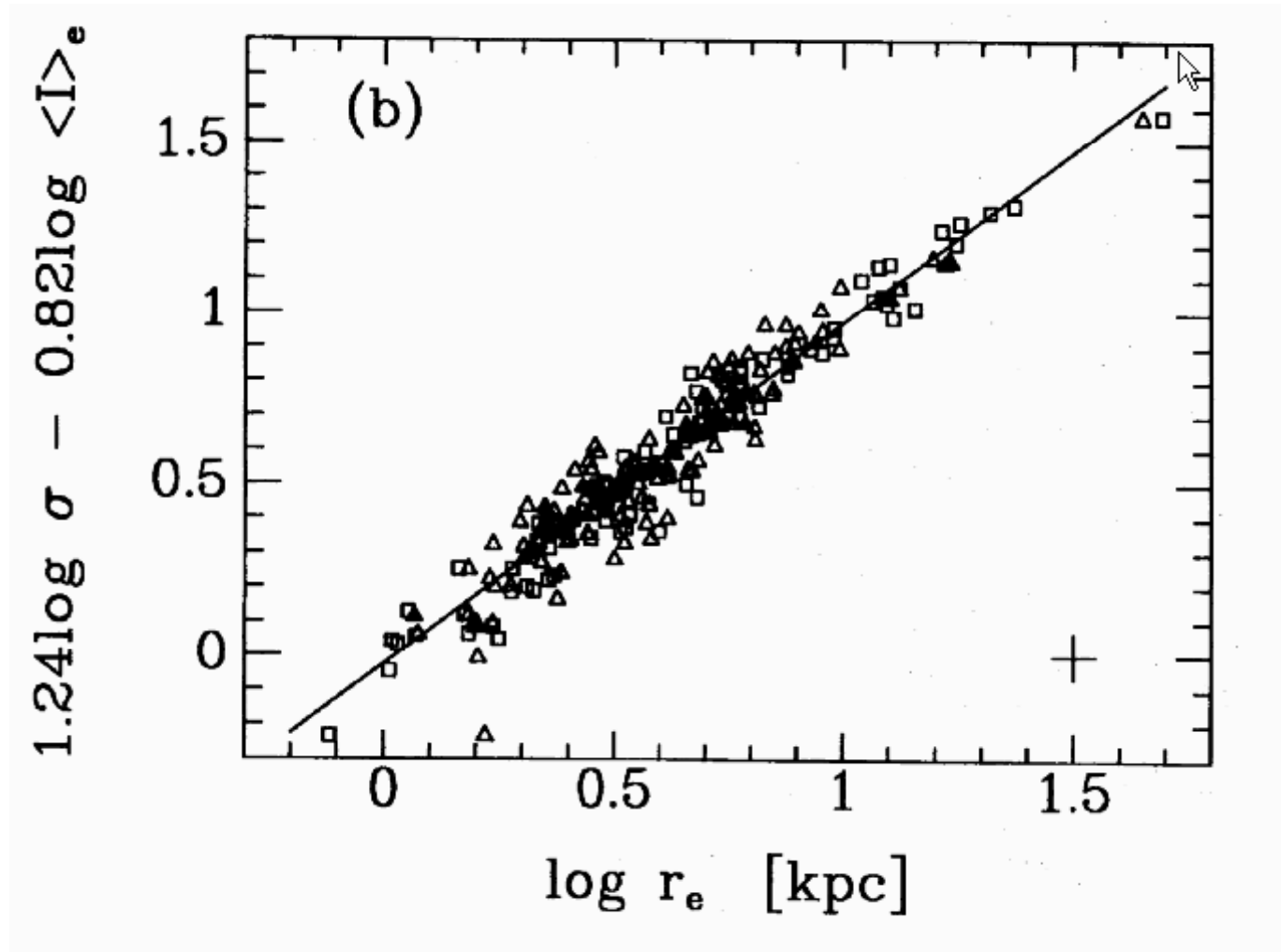
Relation Faber-Jackson pour les Elliptiques

- Amas de Virgo ▲
- Amas de Coma ■
- Amas distants ▲
- Galaxies de champ ●



Ziegler et al 2005

Plan fondamental des elliptiques



Découvert par Djorgovski et al 1987

Re contenant la moitié
de la lumière

Relations d'échelle

Reliant la matière noire, responsable de la cinématique V_{flat} pour les spirales, dispersion σ pour les Elliptiques

- Tully-Fisher: $M_{\text{baryons}} \sim v^4$
- Faber-Jackson: $L \sim \sigma^4$
- Plan Fondamental:

$$R_e \propto \sigma_0^{1.4} \langle I \rangle^{-0.85}$$

Equilibre dynamique simplifié

Equilibre hydrostatique $-dP/dr = G M(r) \rho(r)/r^2$ (sphère isotherme)

Pression $P = \rho(r) \sigma^2$ $\rho(r) \sim 1/r^2$

$\sigma^2 \sim GM(r)/r$, soit $M(r) \sim \sigma^2 r$

Luminosité $L = \Sigma r_e^2$ **$\rightarrow L \sim \sigma^4 / \Sigma$, si $M/L = \text{cste}$**

On ne s'attend pas à une loi simple, mais beaucoup de dispersion
selon la densité de surface Σ

Est-ce que cela implique $M \sim R^2$?

Traceurs à grande distance

- Nébuleuses planétaires PN (brillantes, 30km/s intrinsèque)
- Amas globulaires GC (mais cinématique différente?)
- Rayons X, équilibre hydrostatique (groupes, amas)

Les amas globulaires sont plus abondants que dans les spirales
Ils se forment dans la fusion de galaxies

Ils ne sont pas suffisamment abondants, loin du centre

→ Nébuleuses planétaires, raie 5007\AA [OIII]

Fin de vie d'une étoile comme le soleil, Géante rouge, naine blanche

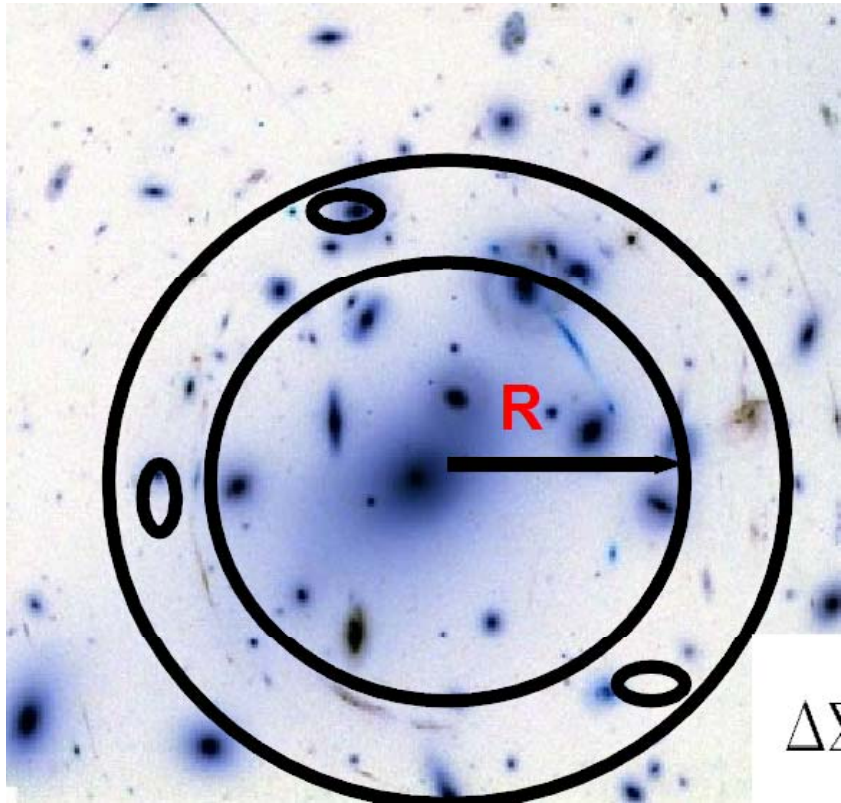
Branche asymptotique des géantes AGB

Observation multi-objet rapide
Mais nécessite Imagerie/Spectroscopie

→ Imagerie contra-dispersée



Lentille galaxie-galaxie (GGL)



Mesure la corrélation entre les galaxies et le champ de densité

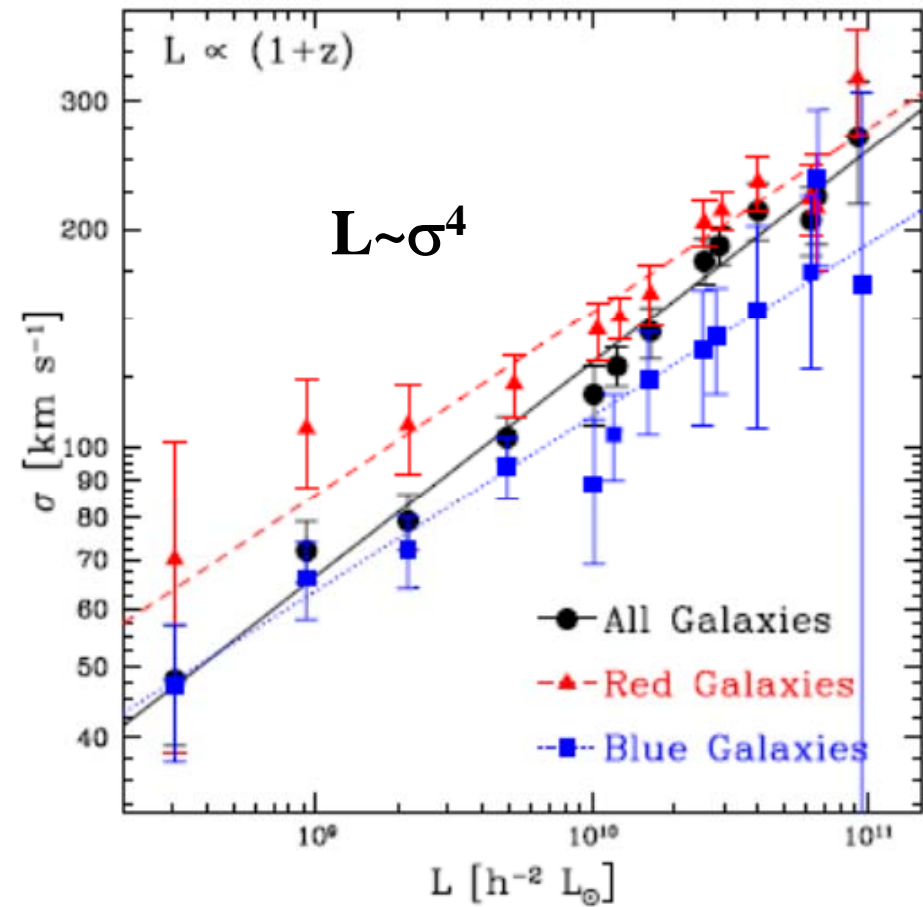
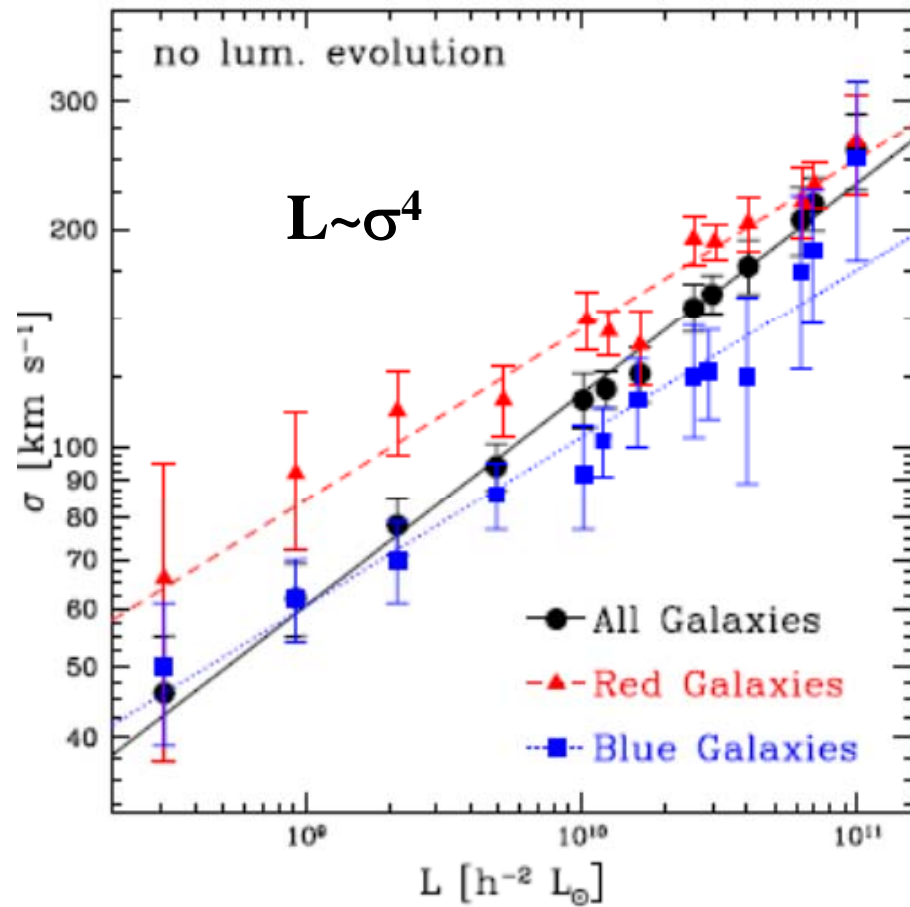
« Stacking »: superposition de N objets

Futur grands surveys LSST

Les halos noirs ont une distribution isotherme de Re à 150kpc
Brimioulle et al 2013

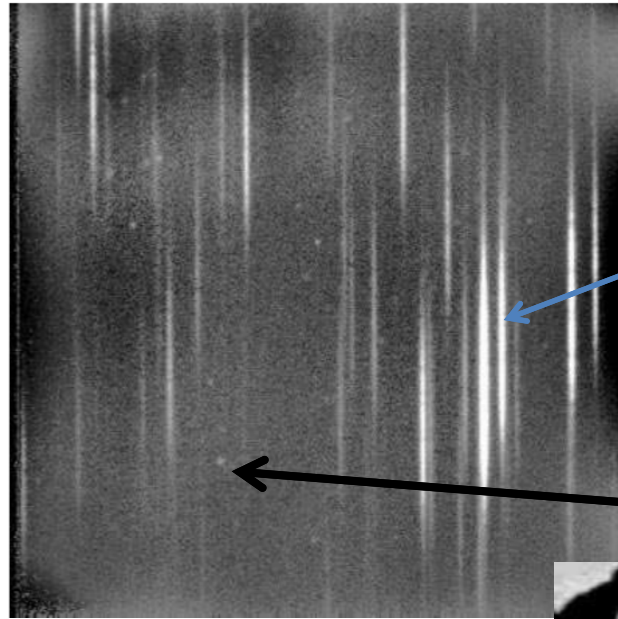
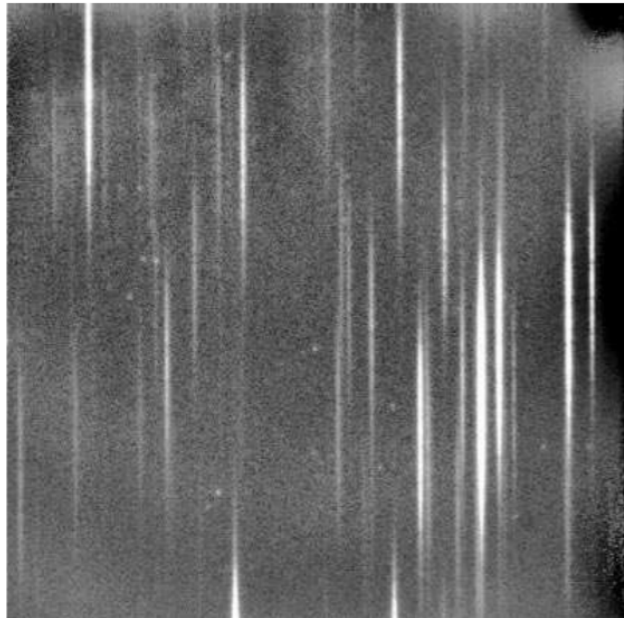
Résultats Galaxie-Galaxie

$z(\text{bleu}) \sim 0.35$, $z(\text{rouge}) \sim 0.28$, $M/L \sim L^{0.12}$, $M/L = 30-300$



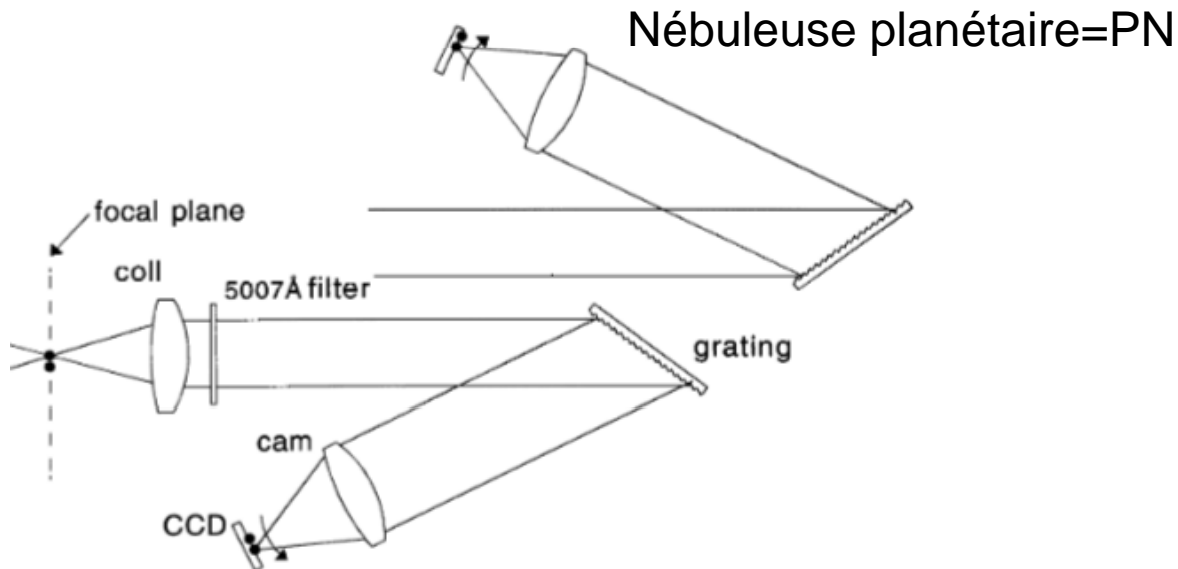
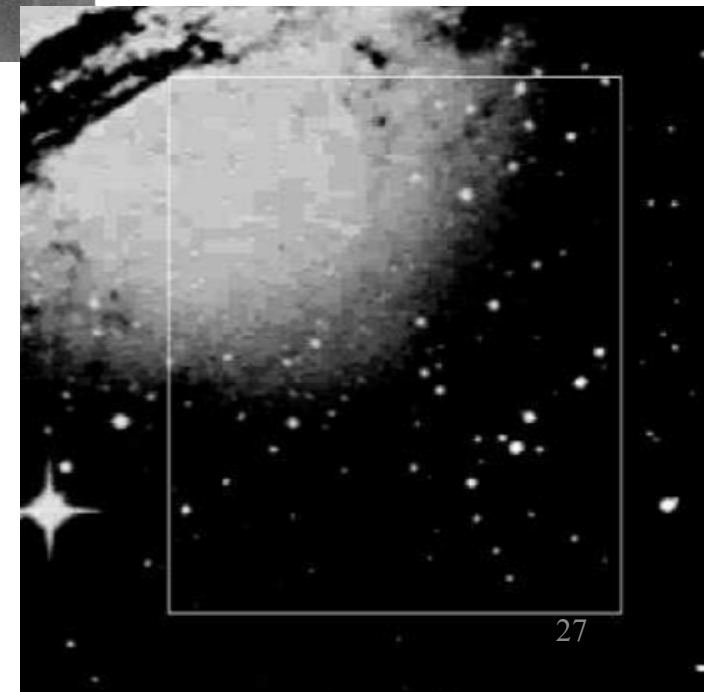
Brimioulle et al 2013

Imagerie contra-dispersée (CDI)

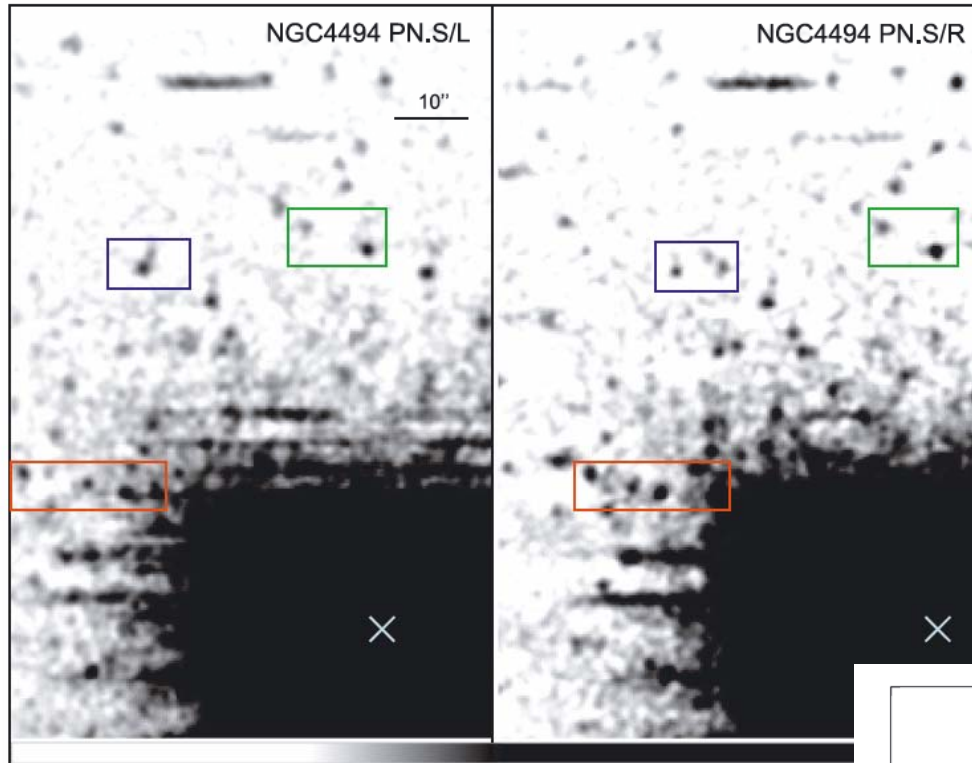


Les étoiles du champ ont une trace continue

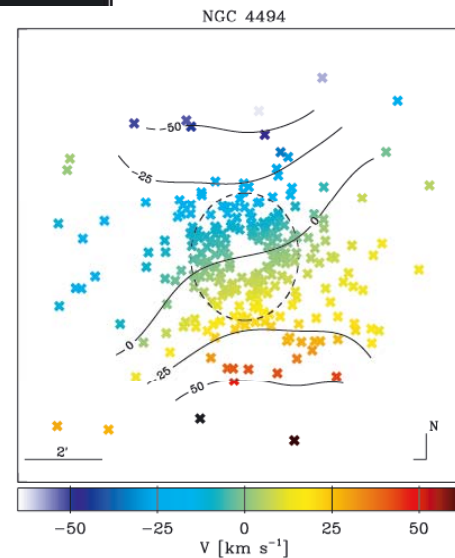
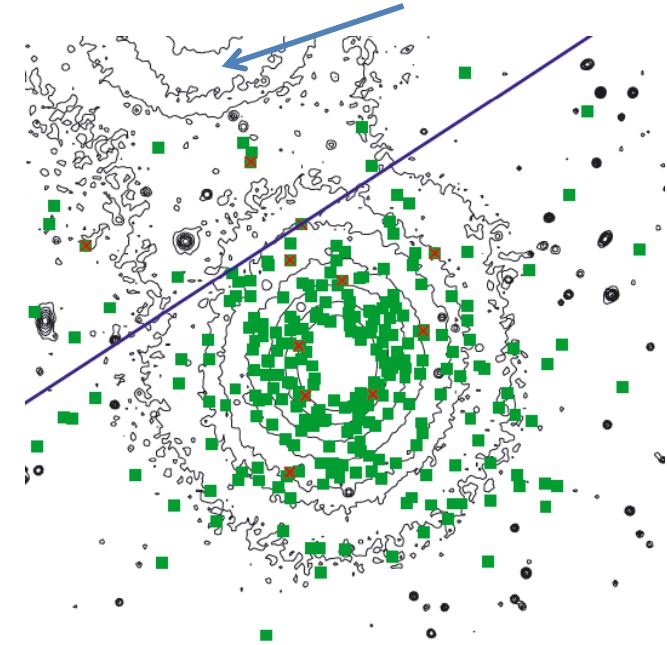
Les PN sont un point déplacé selon leur V
Douglas & Taylor 1999



NGC 4494, PNS

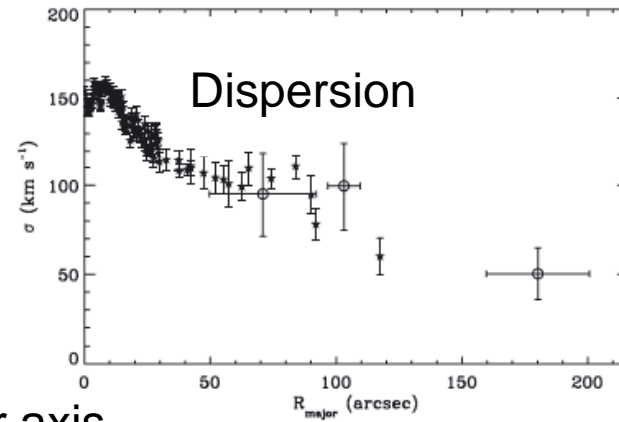
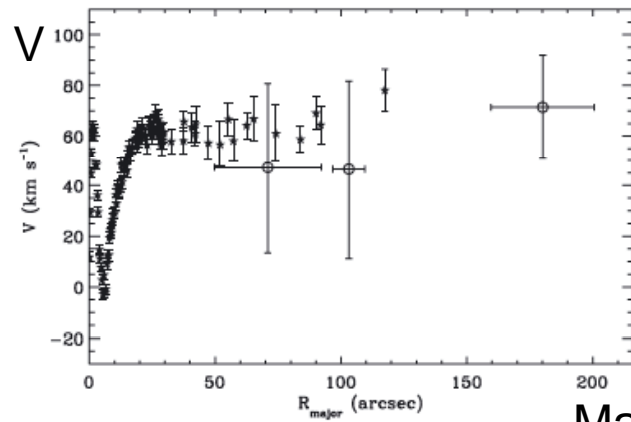


Etoile perturbatrice

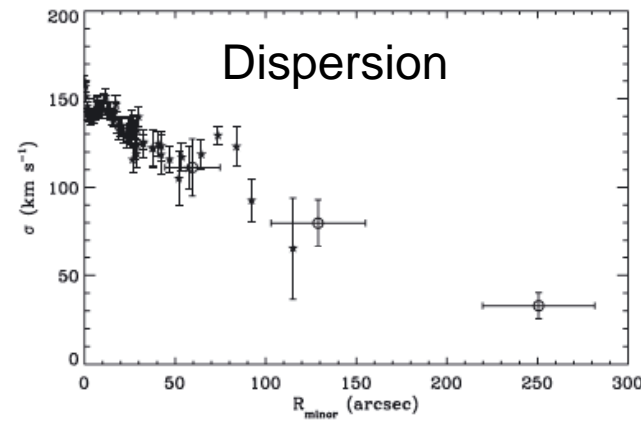
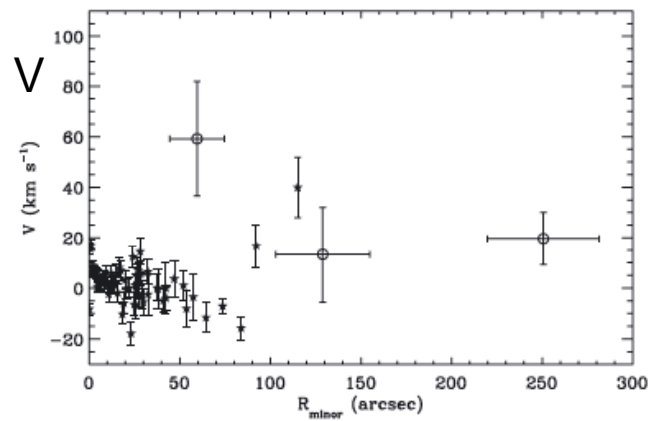


Champ de vitesses
des PNe

Cinématique de N4494



Major axis



Minor axis

Etoiles *
PN : o

Modélisation
Beaucoup
d'inconnues

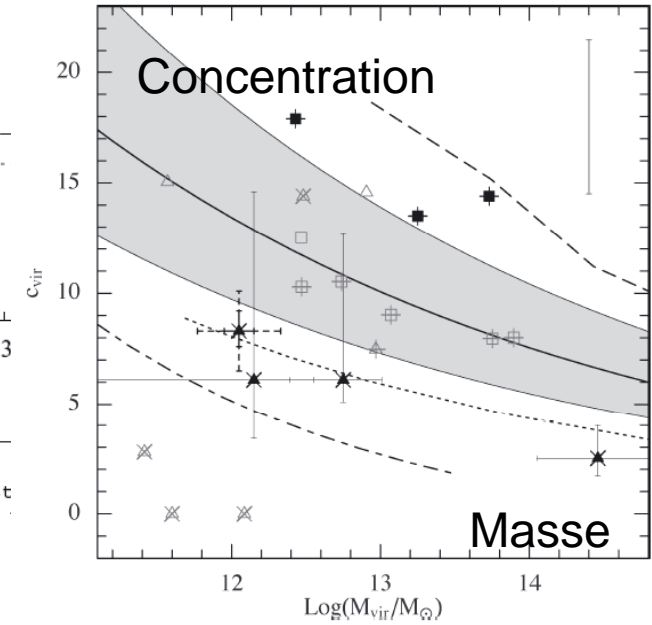
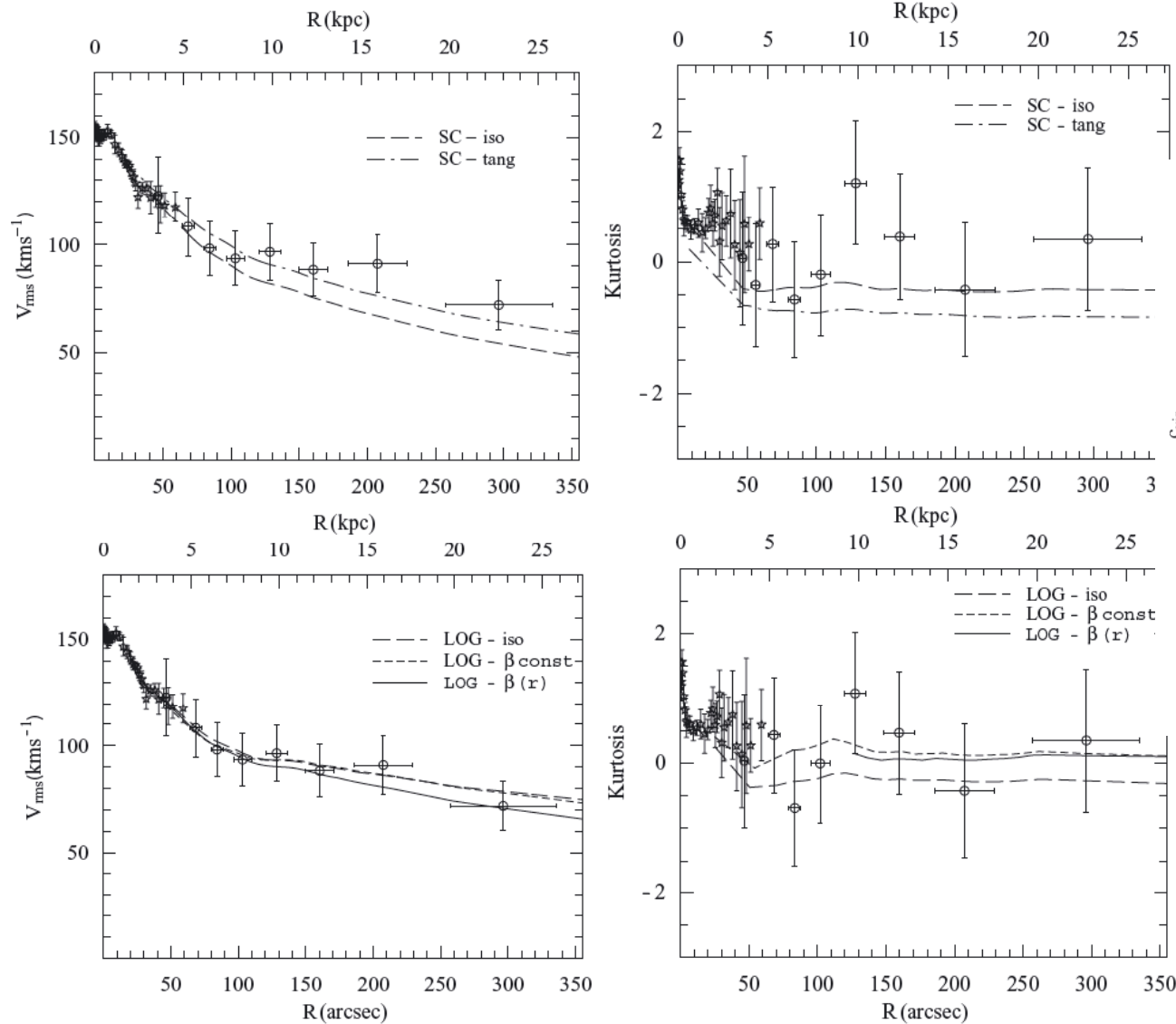
Projection
Vitesses
anisotropes

Modèles avec ou sans MN

Fraction de MN de 0 à 40%, à 5 Re

Anisotropie des vitesses

$$\beta(r) \equiv 1 - \sigma_{\theta}^2 / \sigma_r^2$$



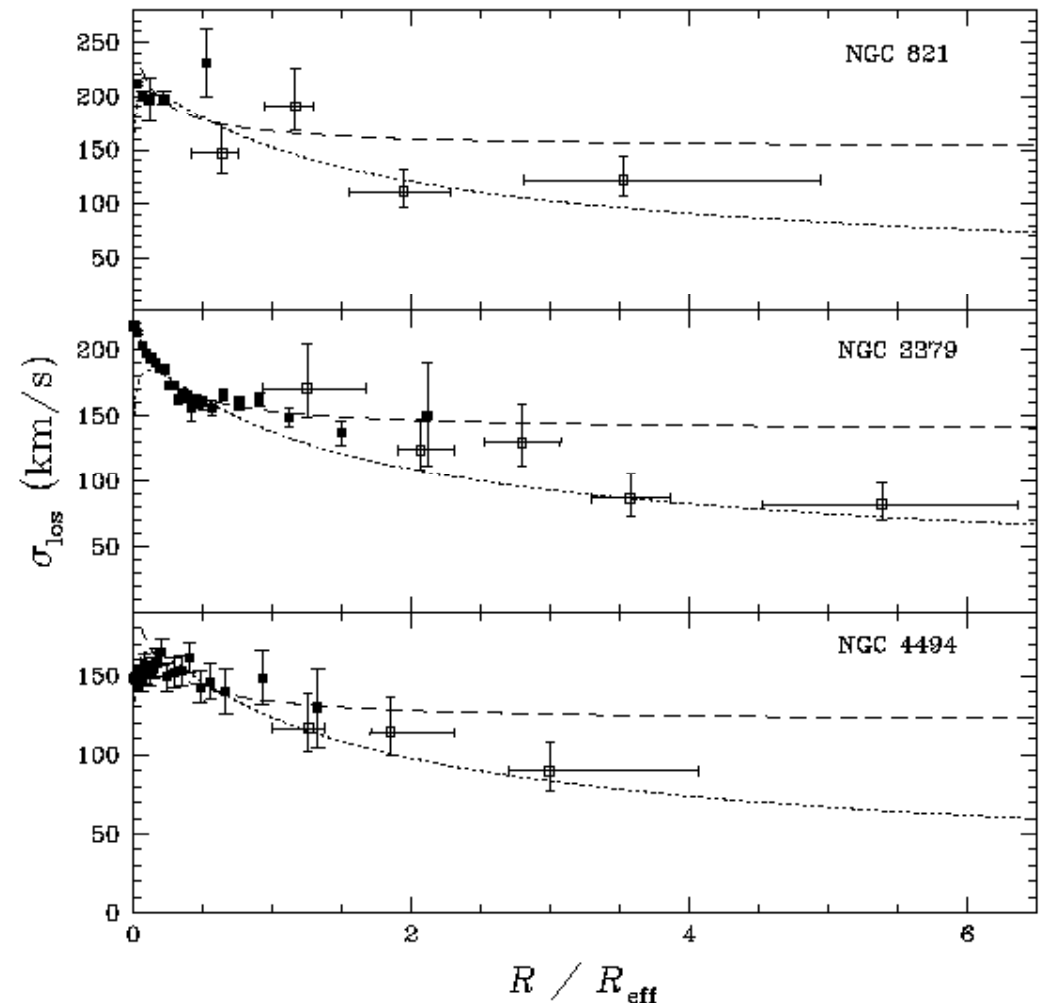
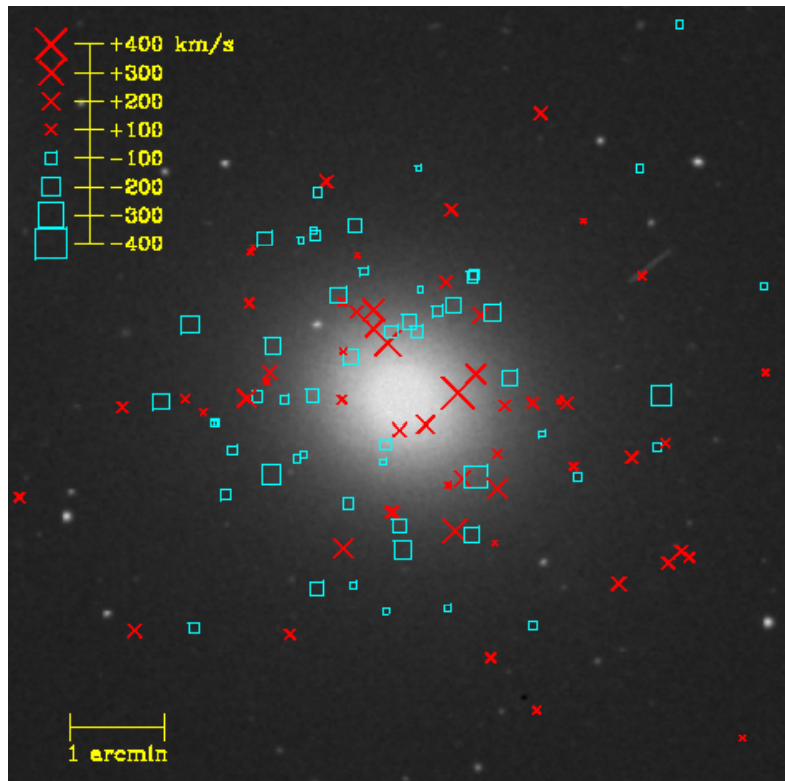
Etoiles *
 PN : o
 Triangle: fast
 Boite slow

Matière noire dans les Elliptiques

Nébuleuses Planétaires: Romanowsky et al 2003

Pas de matière noire?? N821, N3379, N4494

..... Matière visible (isotrope)
- - - isotherme (isotrope)

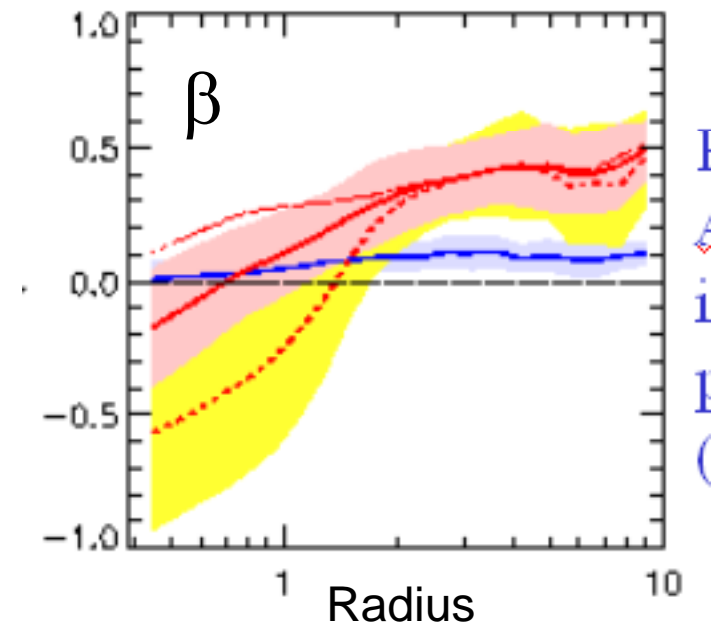


Anisotropie des vitesses

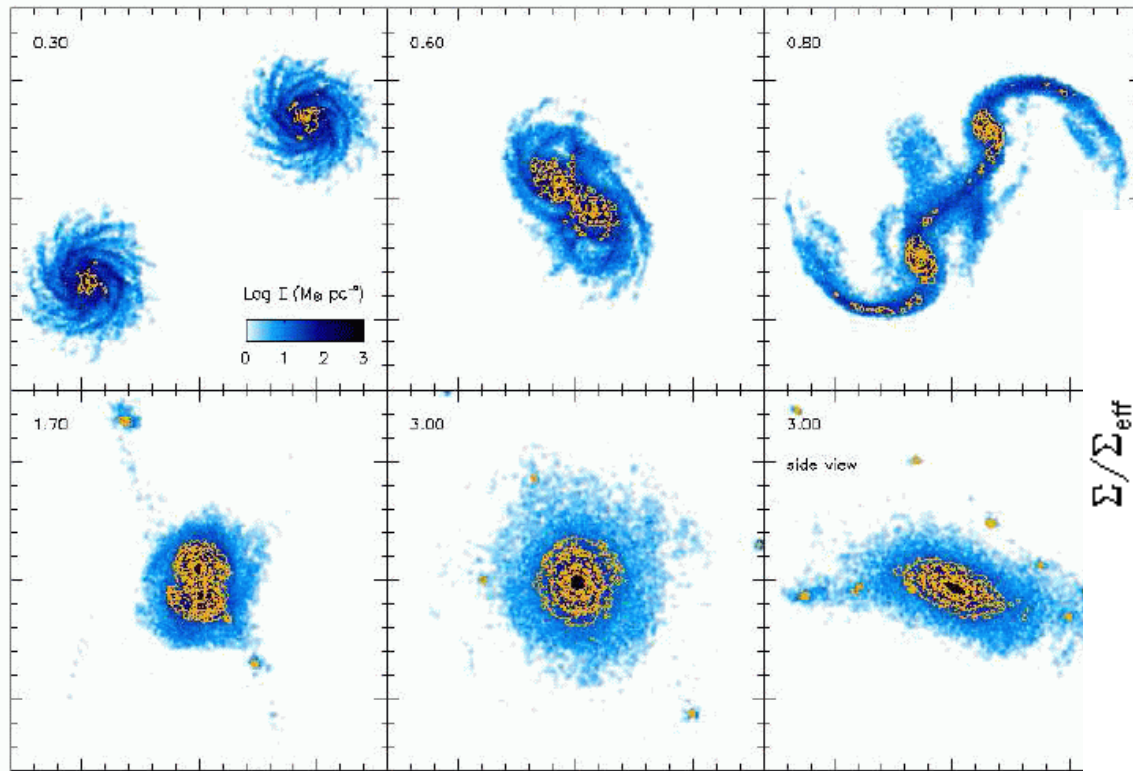
$$\beta = 1 - \sigma_{\theta}^2 / \sigma_{\rho}^2, \quad -\infty, 0, 1$$

circulaire, isotrope et orbites radiales

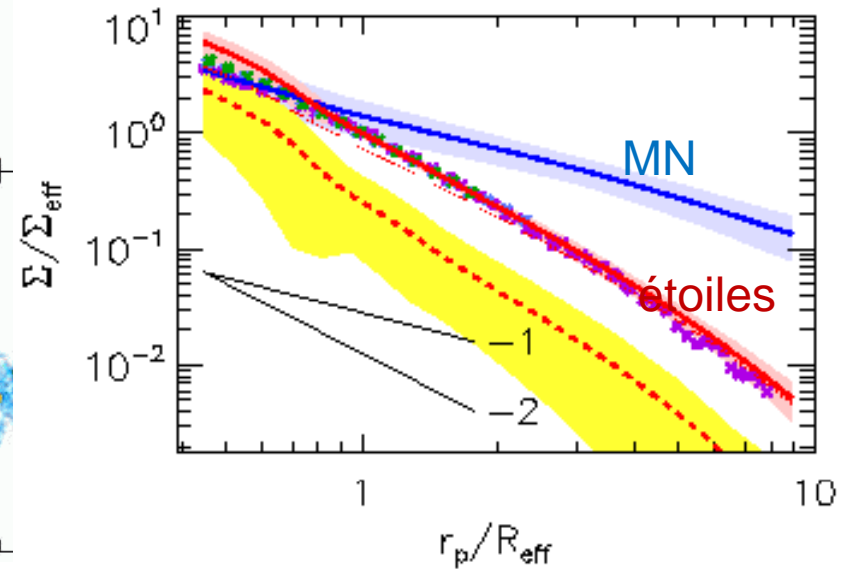
Quand les galaxies se forment par fusion, les orbites dans les parties externes sont très radiales, ce qui explique la faible dispersion de vitesses en projection (Dekel et al 2005)



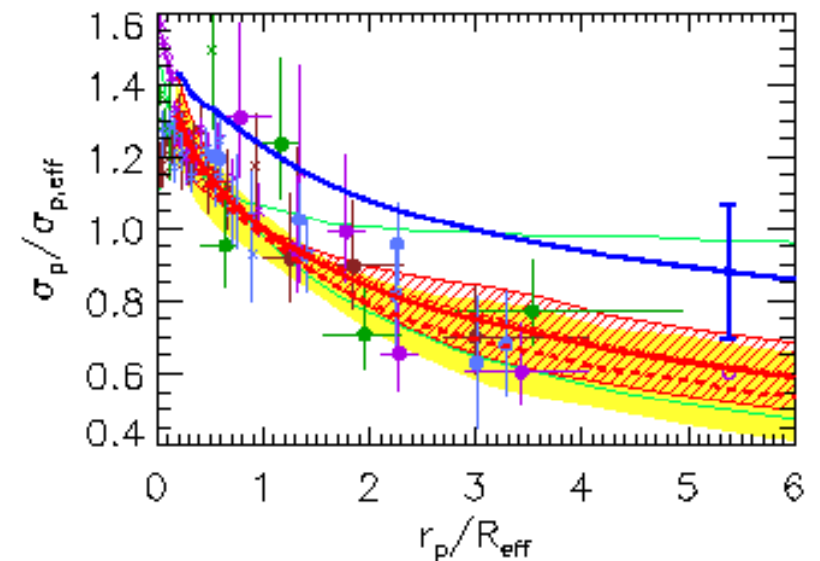
L'observation du profil de vitesses est plutôt dégénérée et ne peut pas donner le contenu en matière noire sans ambiguïté



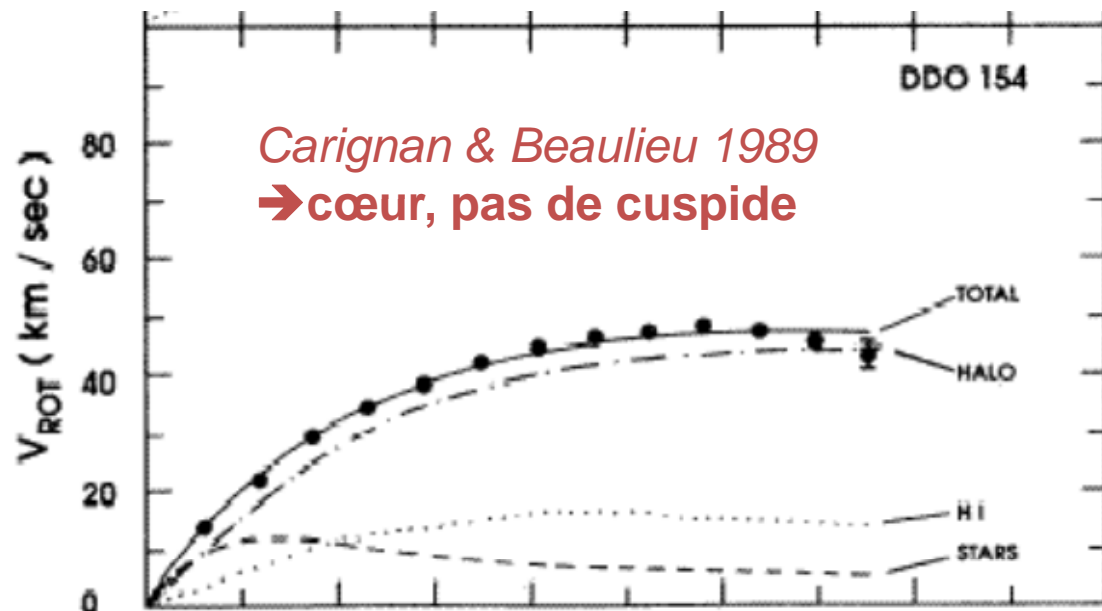
Les étoiles jeunes
= contours jaunes



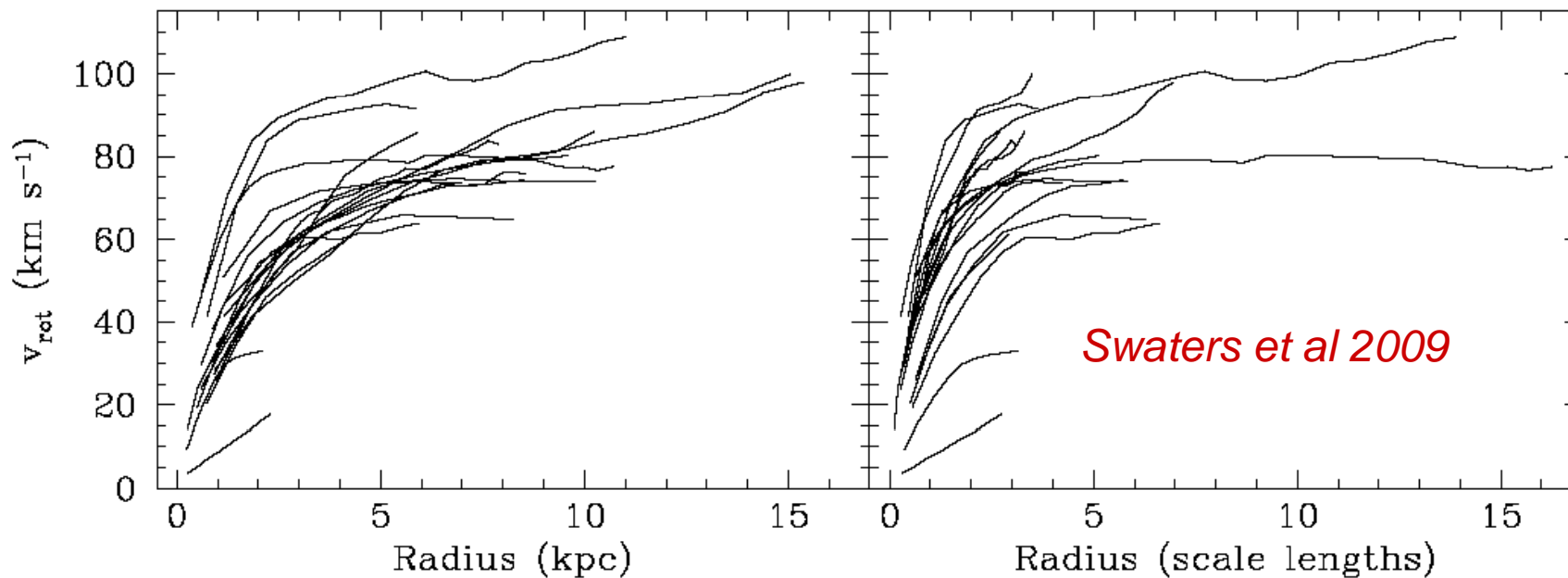
Comparison avec observations
 N821 (vert), N3379 (violet)
 N4494 (marron), N4697 (bleu)



Naines Irr : DDO154 le prototype

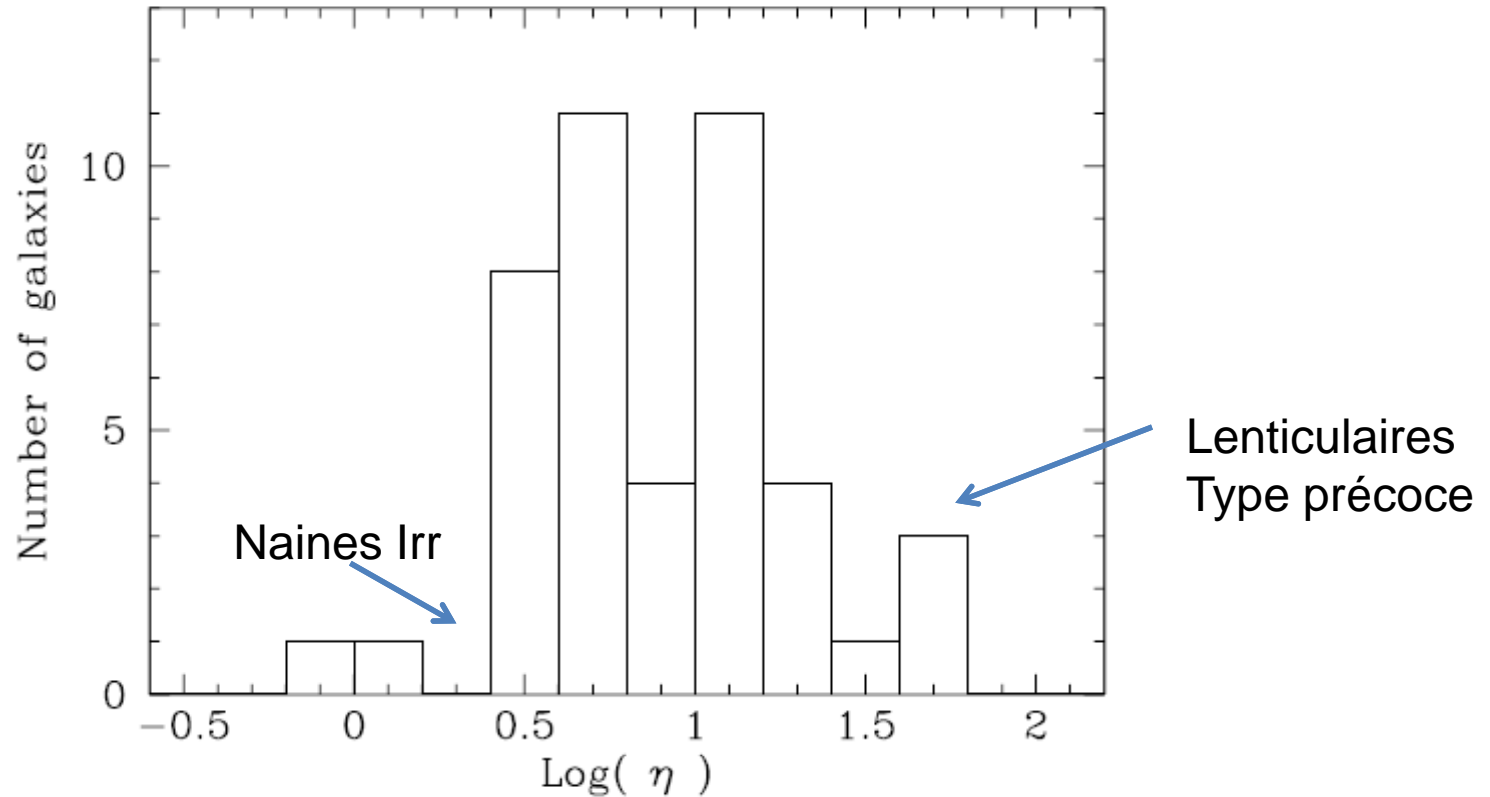


Galaxies à faible brillance de surface sont dominées par la matière noire
Il existe des halos de masse $10^{10}M_{\odot}$



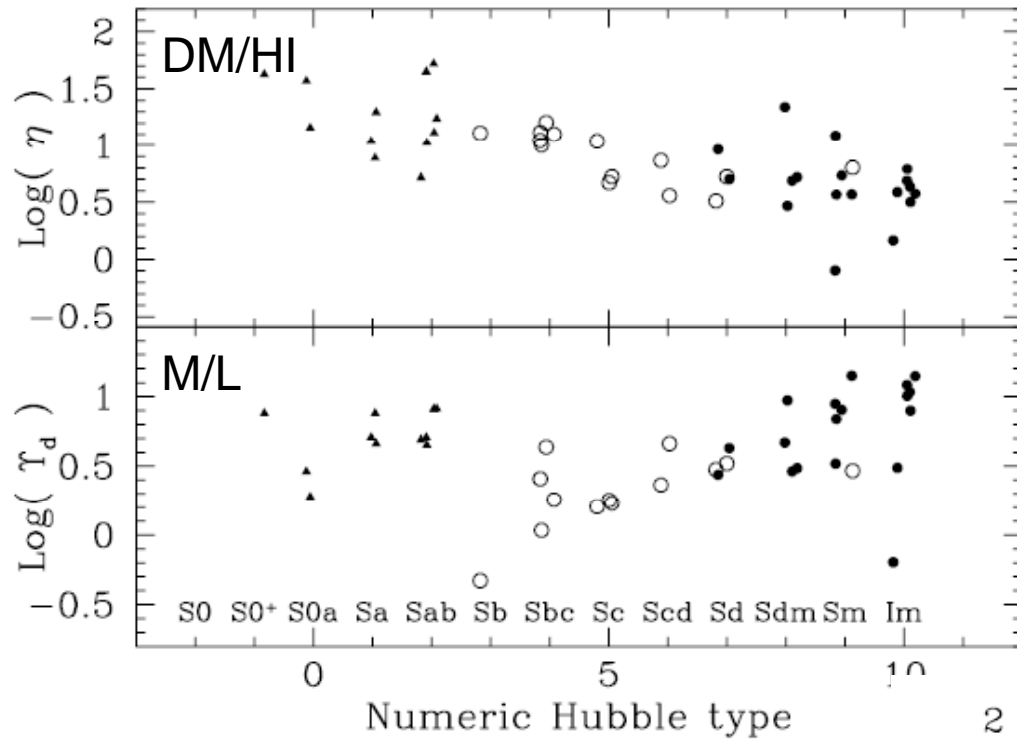
Rapport η de multiplication de HI

Facteur 8.2
(10 Hoekstra
et al 2001)

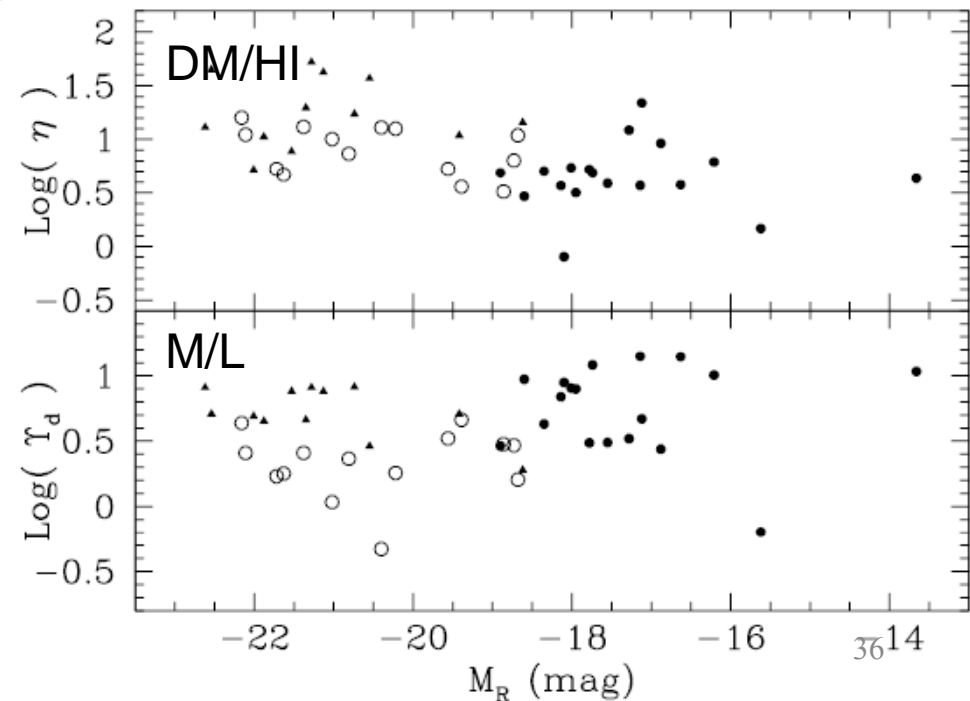


→ Couplage fort entre étoiles+gaz et matière noire

Rapport M/L des étoiles Γ , et η



Dépend du type morphologique
mais pas de la luminosité
totale



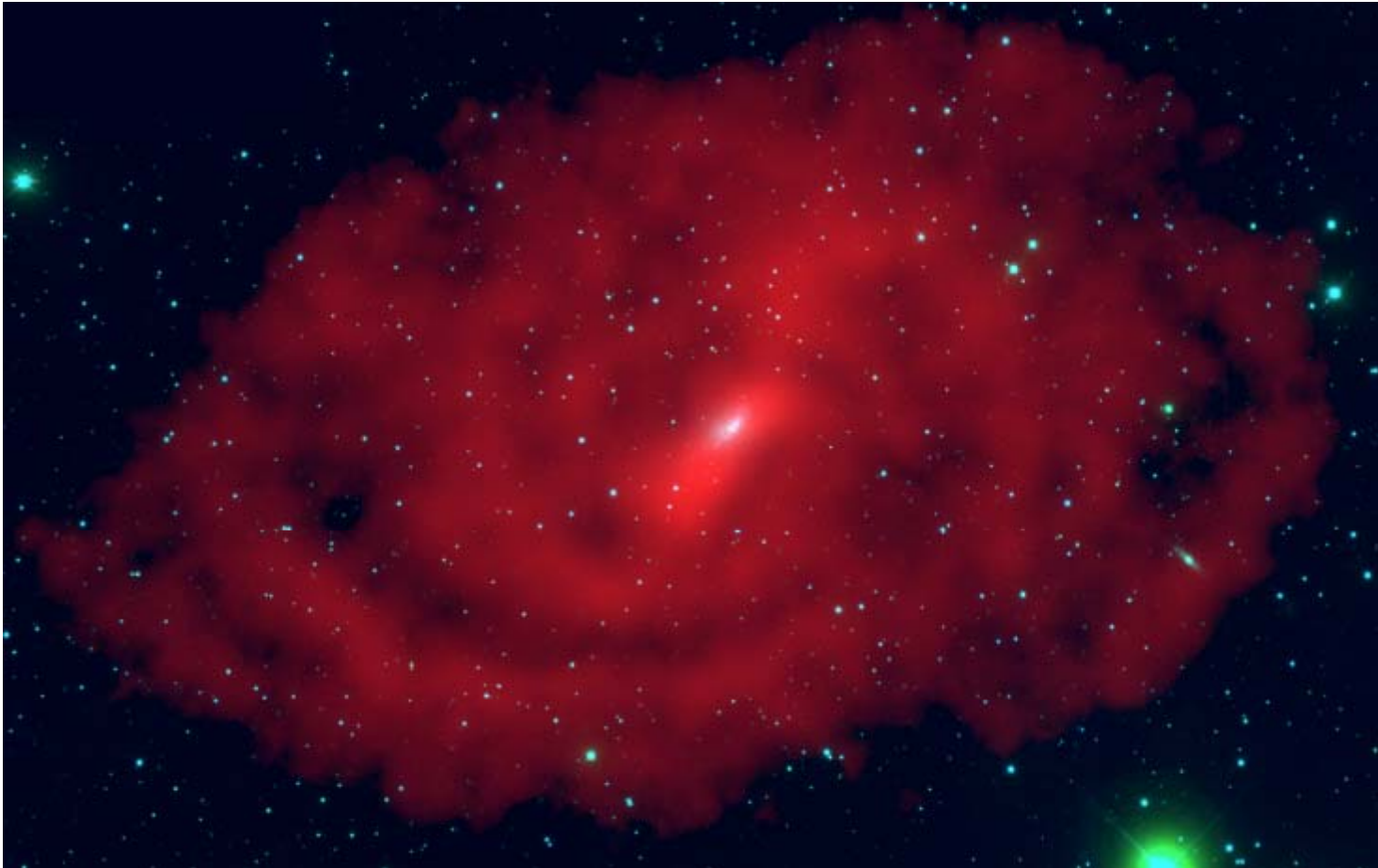
Structure spirale: galaxies naines

NGC 2915 (Masset & Bureau 2003)

Le disque de gaz est instable pour former des **spiraes**

Il doit être auto-gravitant, non dominé par la matière noire?

Ou alors la matière noire est dans le plan



Découverte des galaxies naines

Au bout de la classification des spirales, Irr, Im, petites masses

dwarf irregular (dIrr) possèdent du gaz, et un disque en rotation

dwarf Spheroidal (dSph) amas d'étoiles très faible brillance, sans gaz

dwarf elliptical (dE) sphéroïdes d'étoiles, sans gaz, compactes

Luminosités $10^3 - 10^9 L_{\odot}$

Autour de la Voie Lactée: Grand et Petit Nuage de Magellan

Le Catalogue DDO (David Dunlap Observatory) est un catalogue de 243 galaxies naines (1959-1966) par Sidney van den Bergh.

0.1 galaxie/Mpc³. Les naines sont plus nombreuses que les géantes

Naines en général en orbite autour des géantes

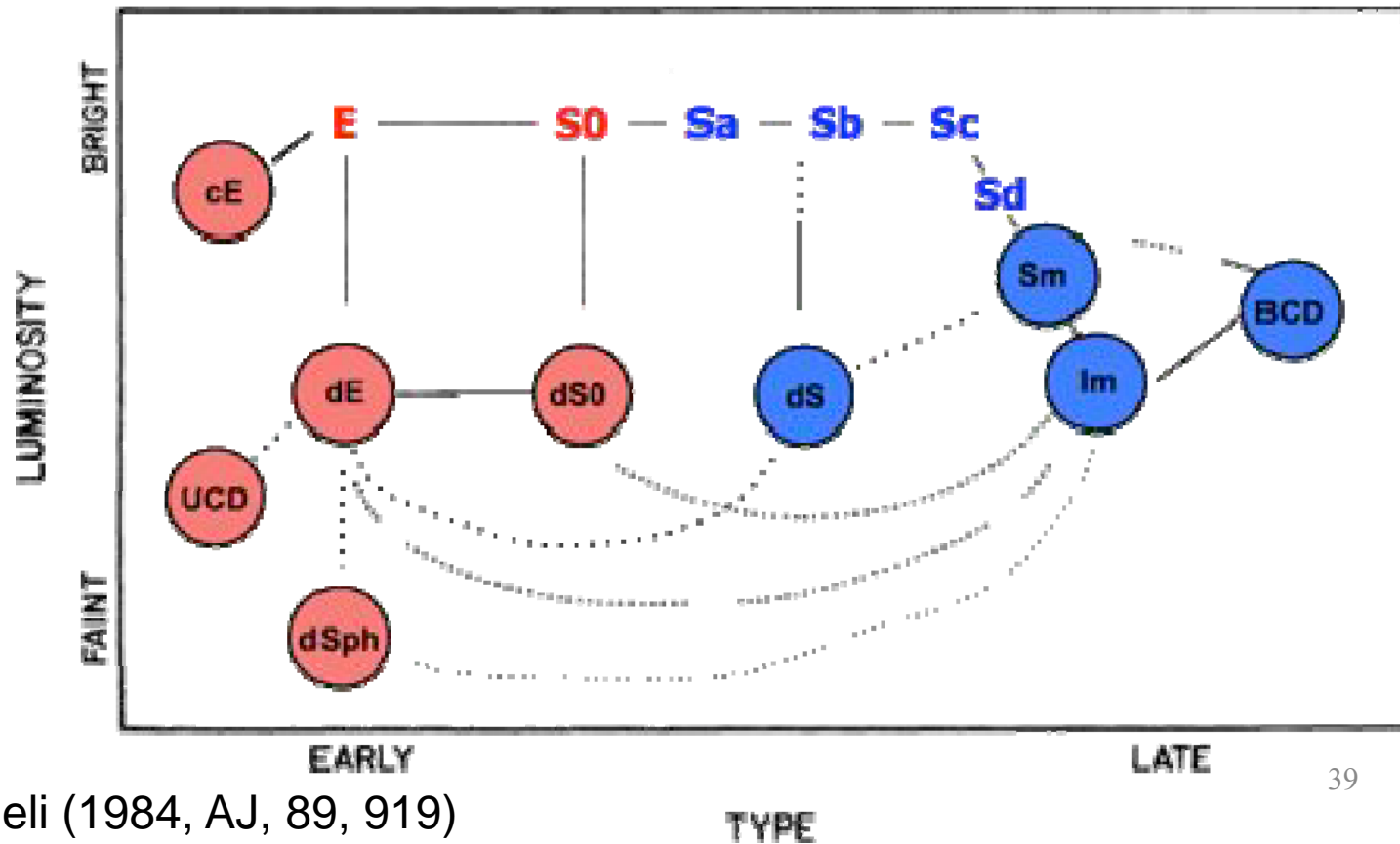
Mateo, 1998, ARAA Dwarf galaxies (~40) of the Local Group

Classification des galaxies naines



Grebel 2013

$L < L^*/100$



Les naines elliptiques: peu de MN



Satellite d'Andromède

Haute densité de surface au centre,
Parfois noyau brillant, **profil exponentiel**
Certaines contiennent un disque d'étoiles
(Lisker et al 2006, 2007)
Etude de 476 dE dans Virgo (Sloan)

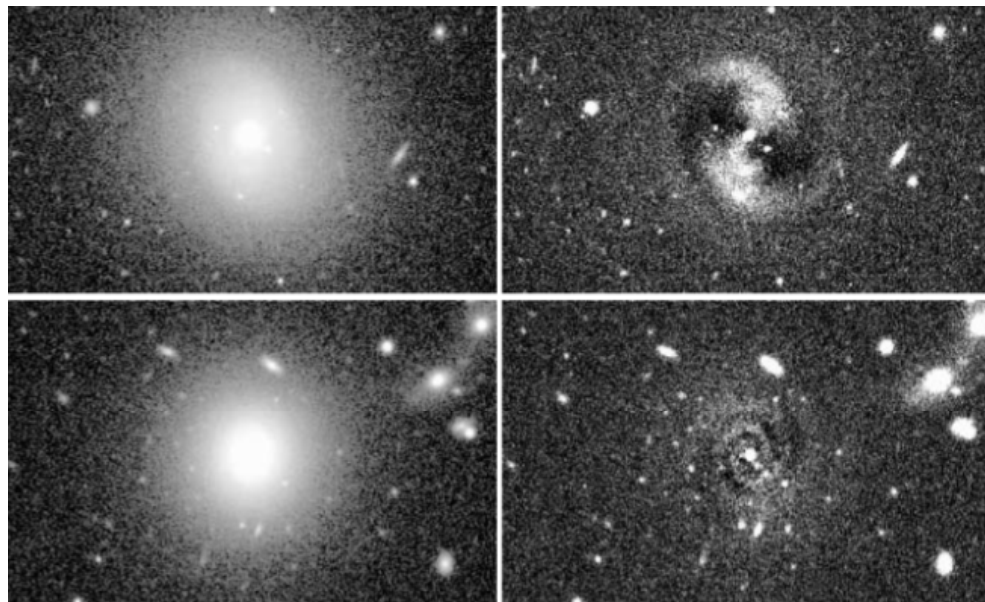


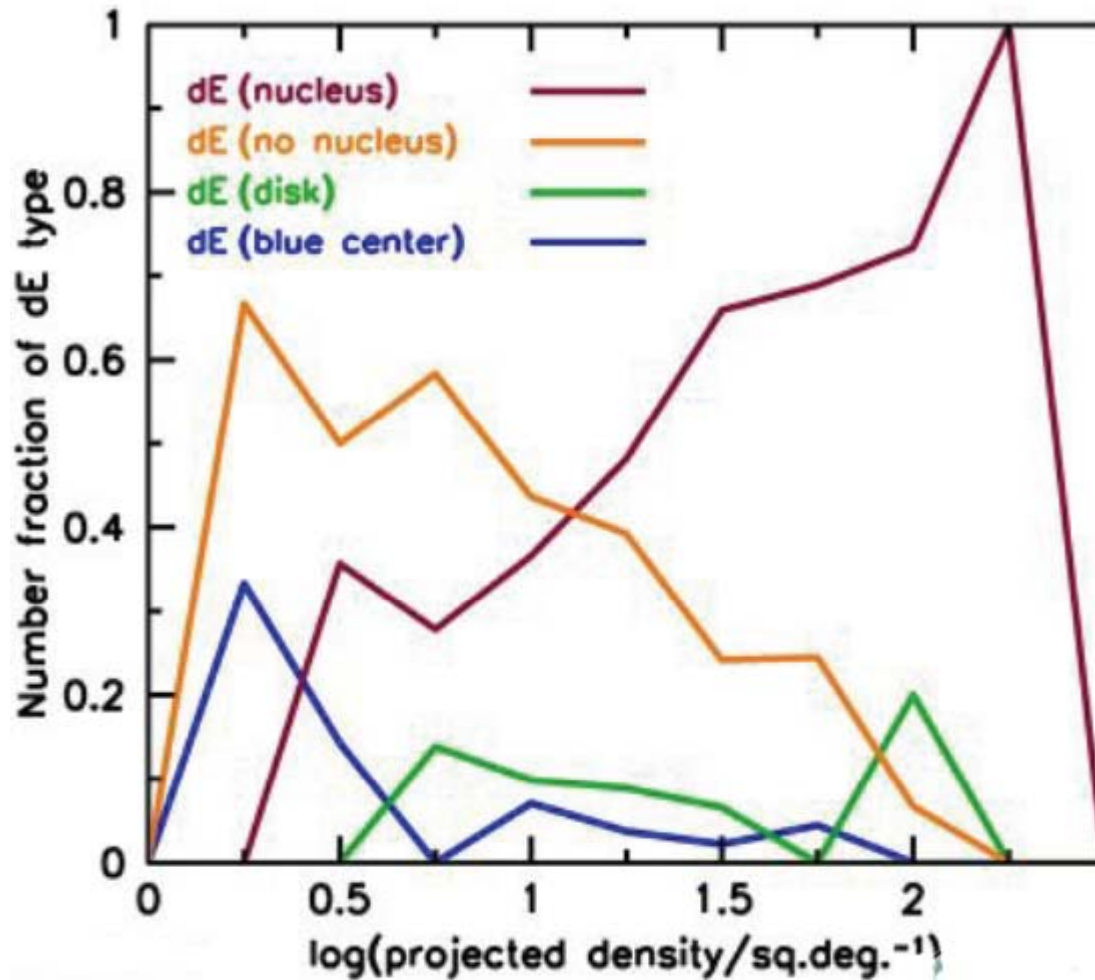
Image totale

Après filtre flou

Plusieurs voies de formation
Pression dynamique
Harcèlement dans les amas

Temps de vie de ces spirales?

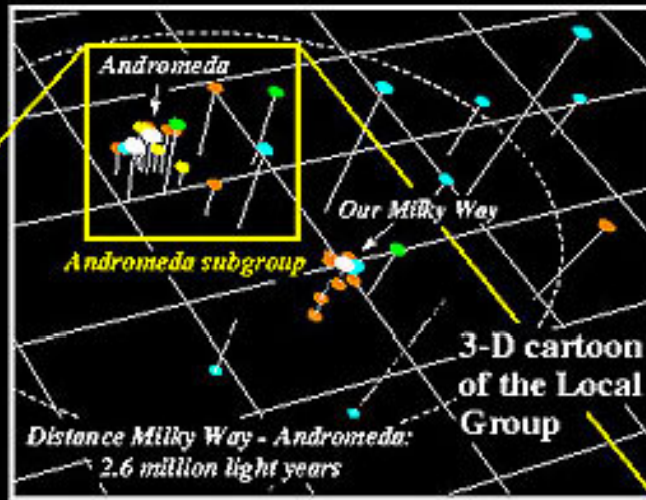
Influence de l'environnement



Densité projetée de galaxies dans l'amas

Les galaxies dE à noyau
→ relaxées dans l'amas

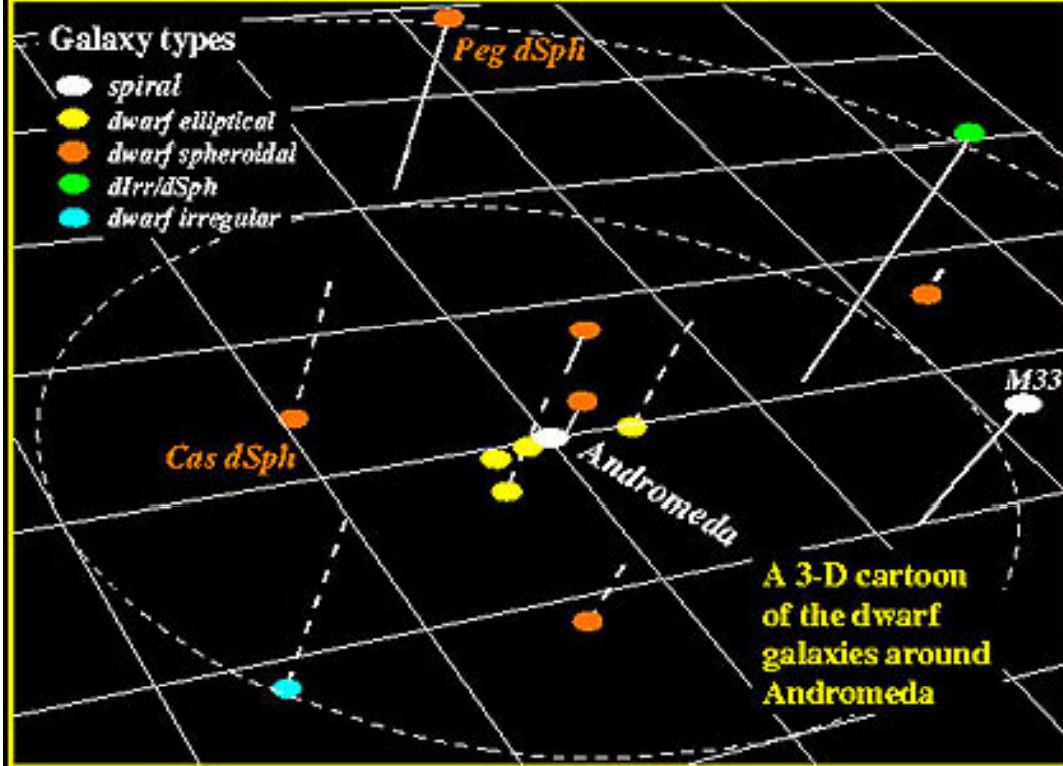
Les autres, avec un résidu
de formation stellaire
viennent de rentrer
→ proviennent de galaxies
de type spiral



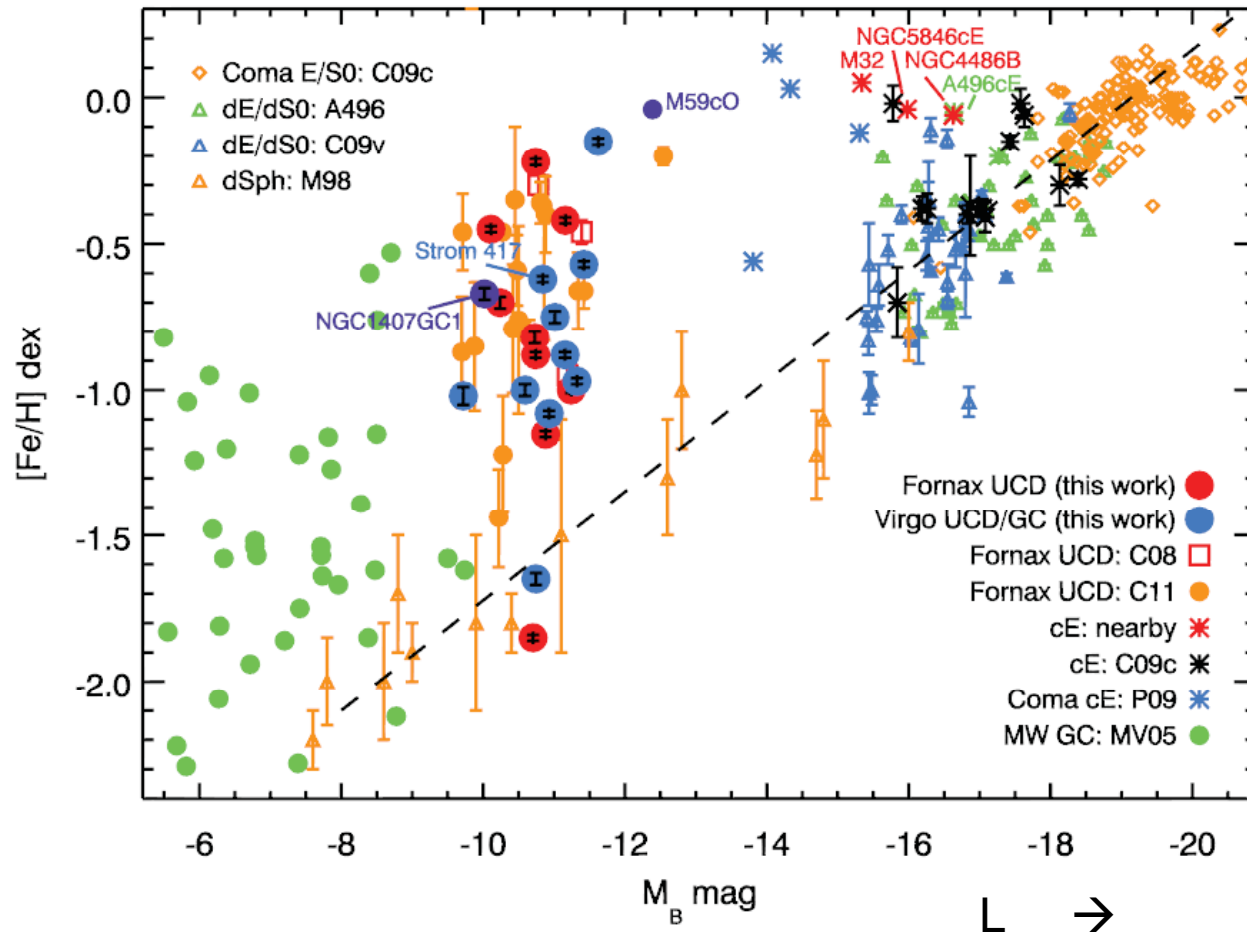
Les galaxies naines sont associées à des géantes

Halo central +
Satellites

Grebel & Guhathakurta



Naines Ultra-compactes UCD



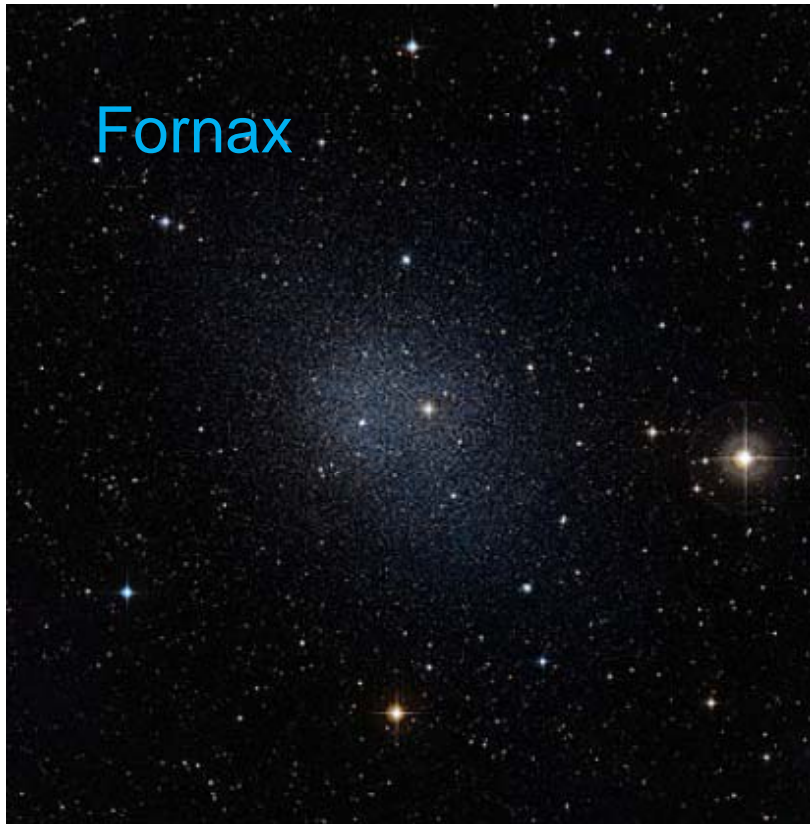
Pourraient provenir des dE avec noyau?

Mais excès de Fe/H

Se rapprochent des amas globulaires

Pas de MN..

Naines dSph (sphéroïdales)



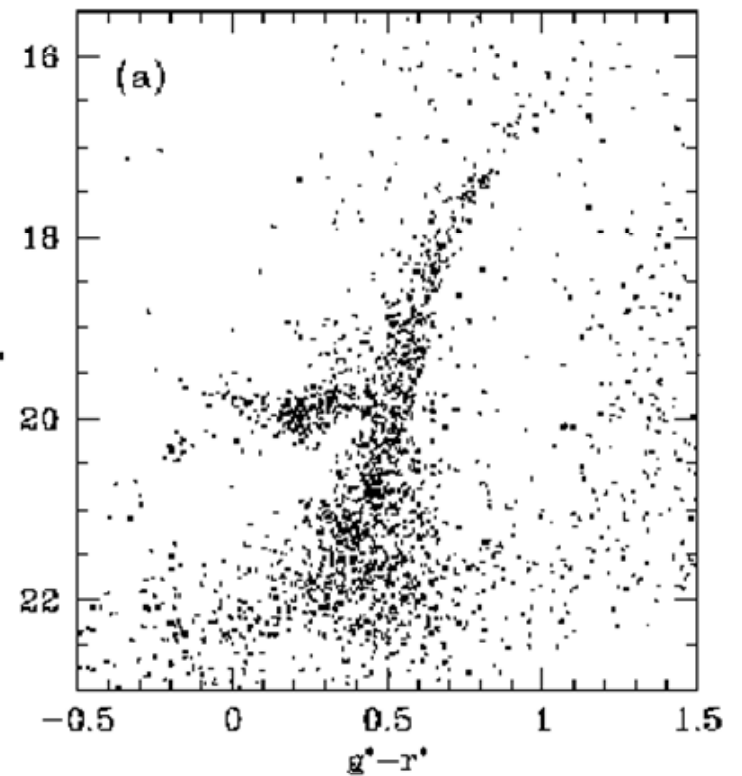
Galaxies de faible brillance de surface
Les plus petites connues,
et les plus dominées par la MN
Profil de lumière exponentiel

Leurs masses ~ Amas globulaires
 $M^* \sim 10^5 M_{\odot}$

Dispersion de vitesse ~10km/s

Exemple de Draco, à 71kpc

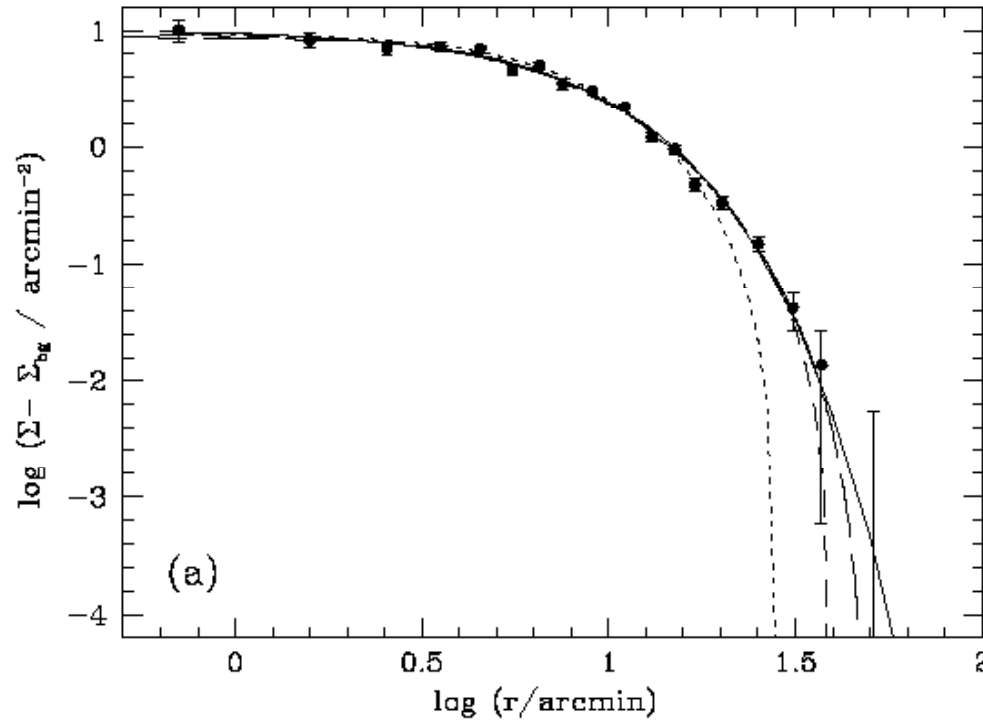
Contours de densité d'étoiles, SDSS
40% plus grand, *Odenkirchen et al 2001*



systeme lié en équilibre, pas d'extensions de marée, contrairement aux études précédentes⁴⁵

Profil radial et cinématique de Draco

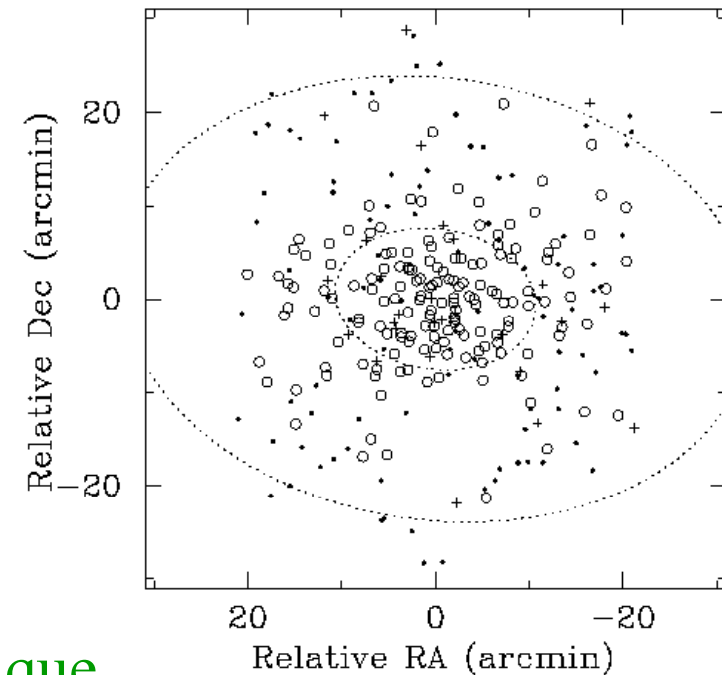
Densité stellaire de Draco



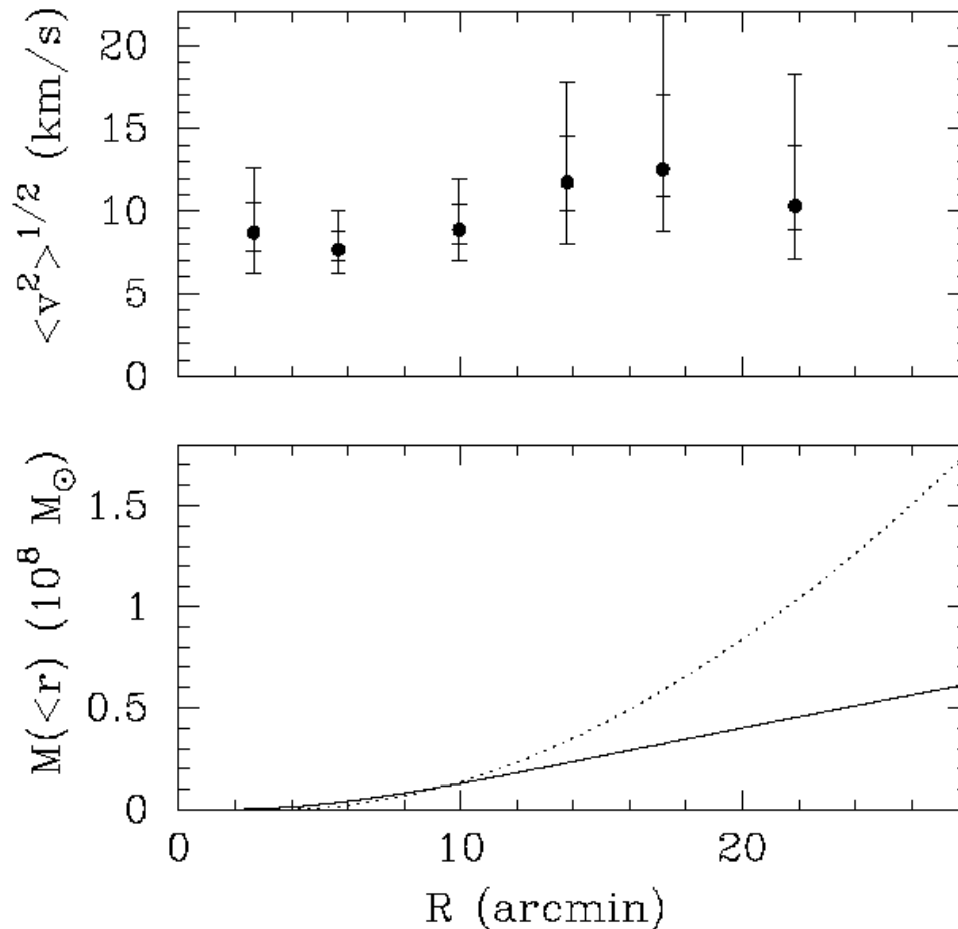
- Estimation $\Phi_*(r)$ de la distribution stellaire
- Etoiles géantes comme traceur cinématique
précision requise ≤ 3 km/s

Modèles

- 1) Etoiles seules $\Phi_{\text{tot}}(r) = \Phi_*(r)$
- 2) Etoiles + MN: $\Phi_{\text{tot}}(r) = \Phi_*(r) + \Phi_{\text{DM}}(r)$

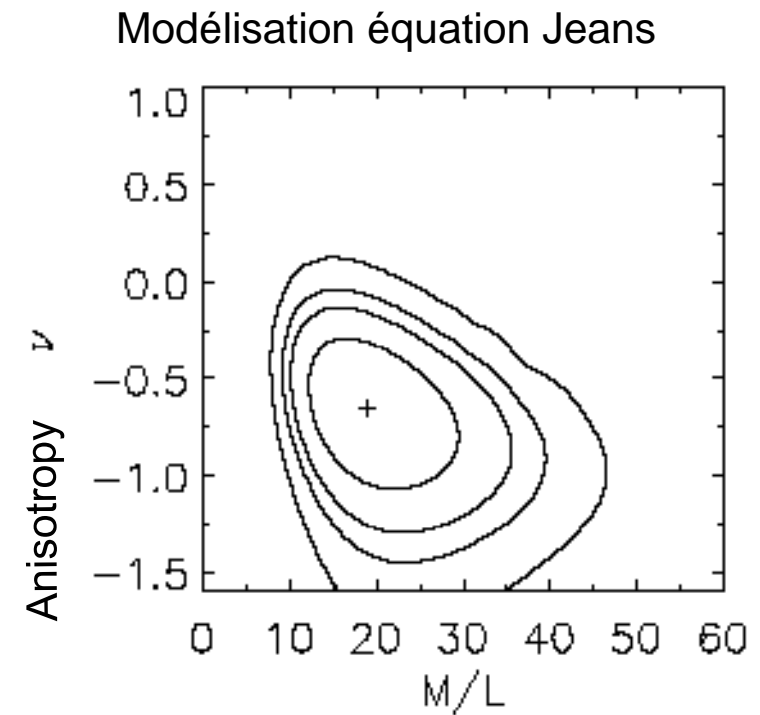


Draco: modèle de masse



Pour les étoiles $(M/L)_* \sim 2$

→ **Draco est dominée par la MN**



Modèles avec différents profils de MN
→ $M(<10')$ bien contraint

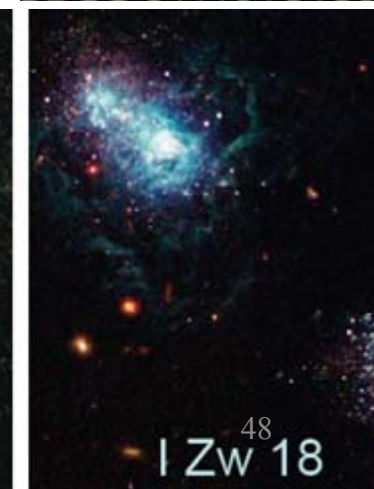
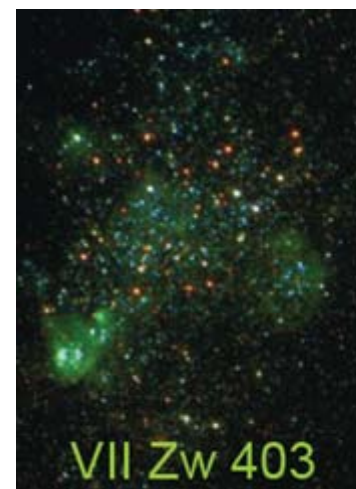
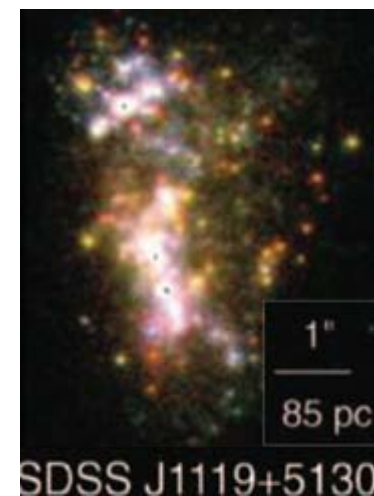
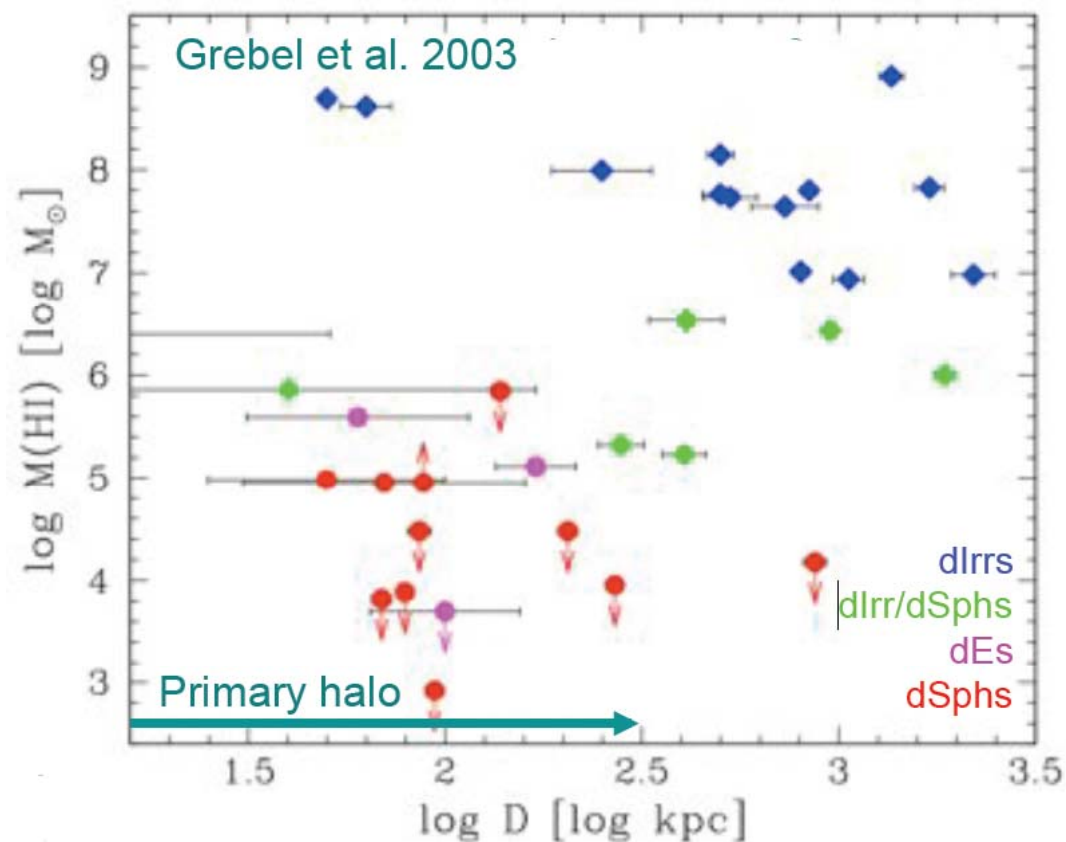
BCD: Naines Bleues Compactes

Des galaxies à flambées de formation d'étoiles, très fragmentées

Régions compactes et bleues

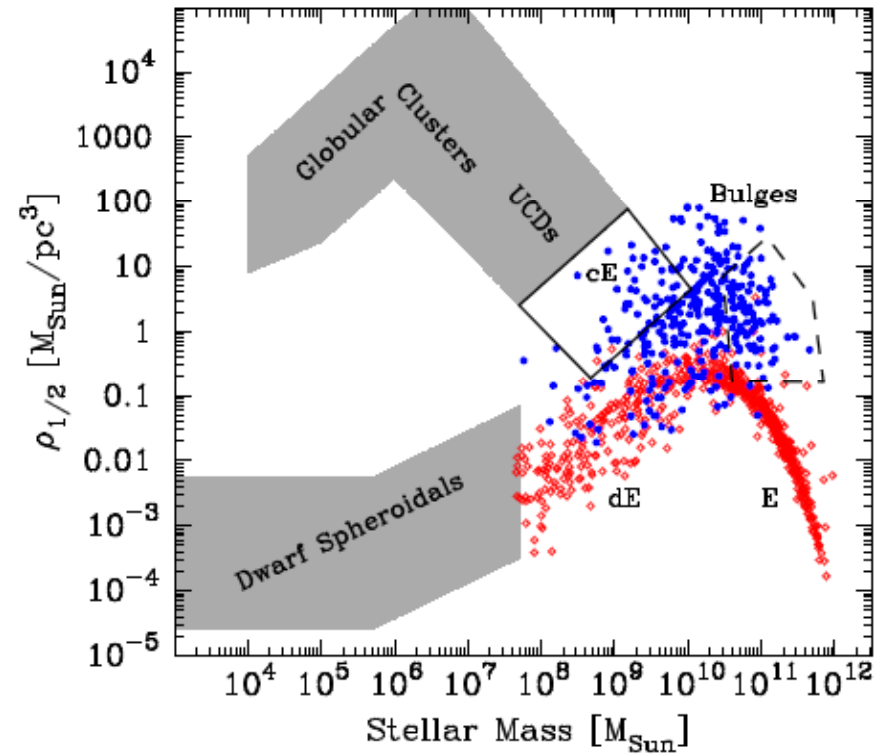
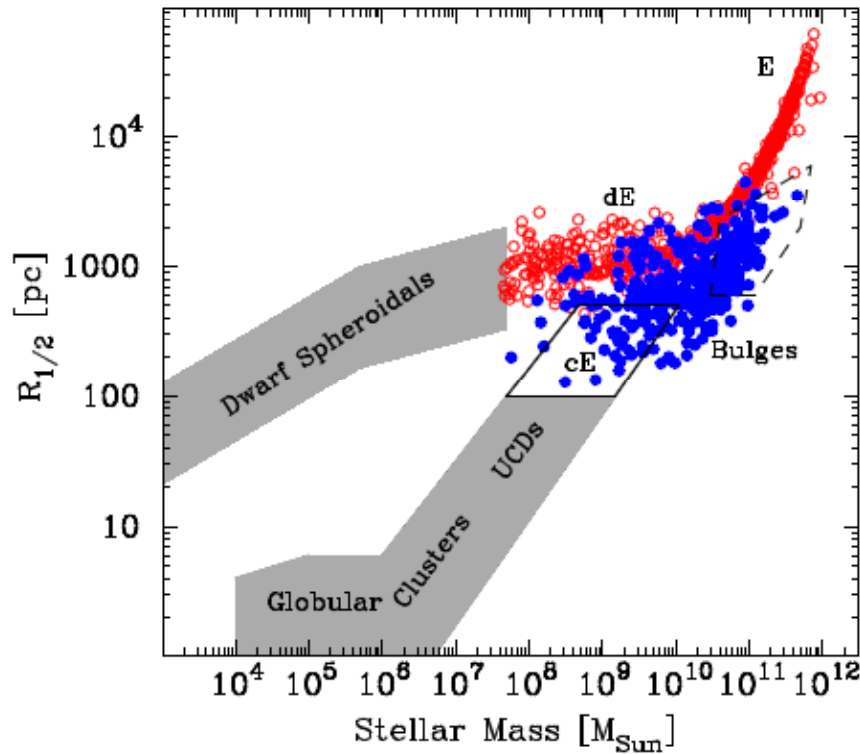
Pauvres en métaux, Rotation, souvent riches en gaz

Galaxies en train de se former, flambées engendrées par l'interaction entre galaxies?

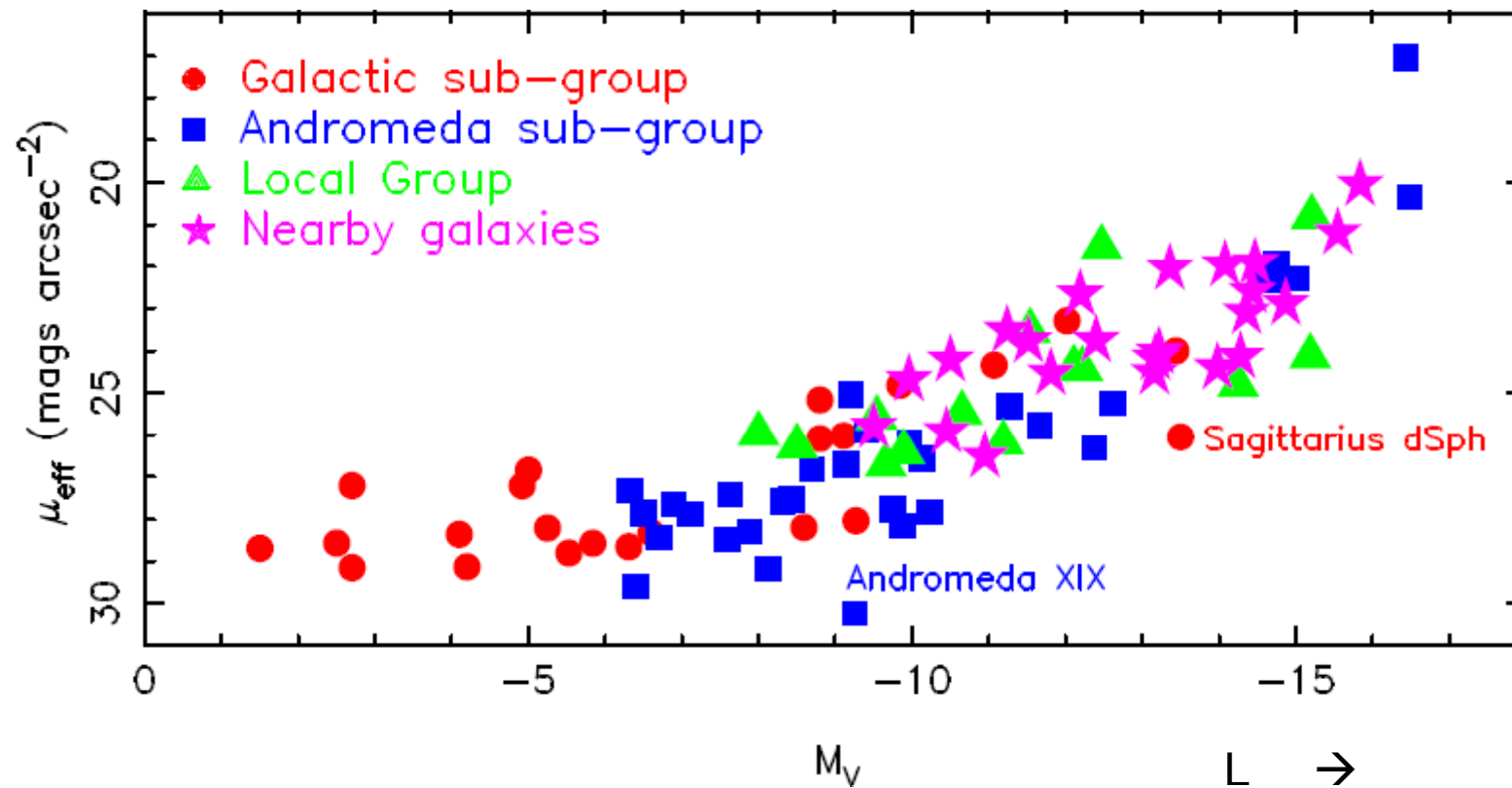


Relation Masse-taille ($R_{1/2}$)

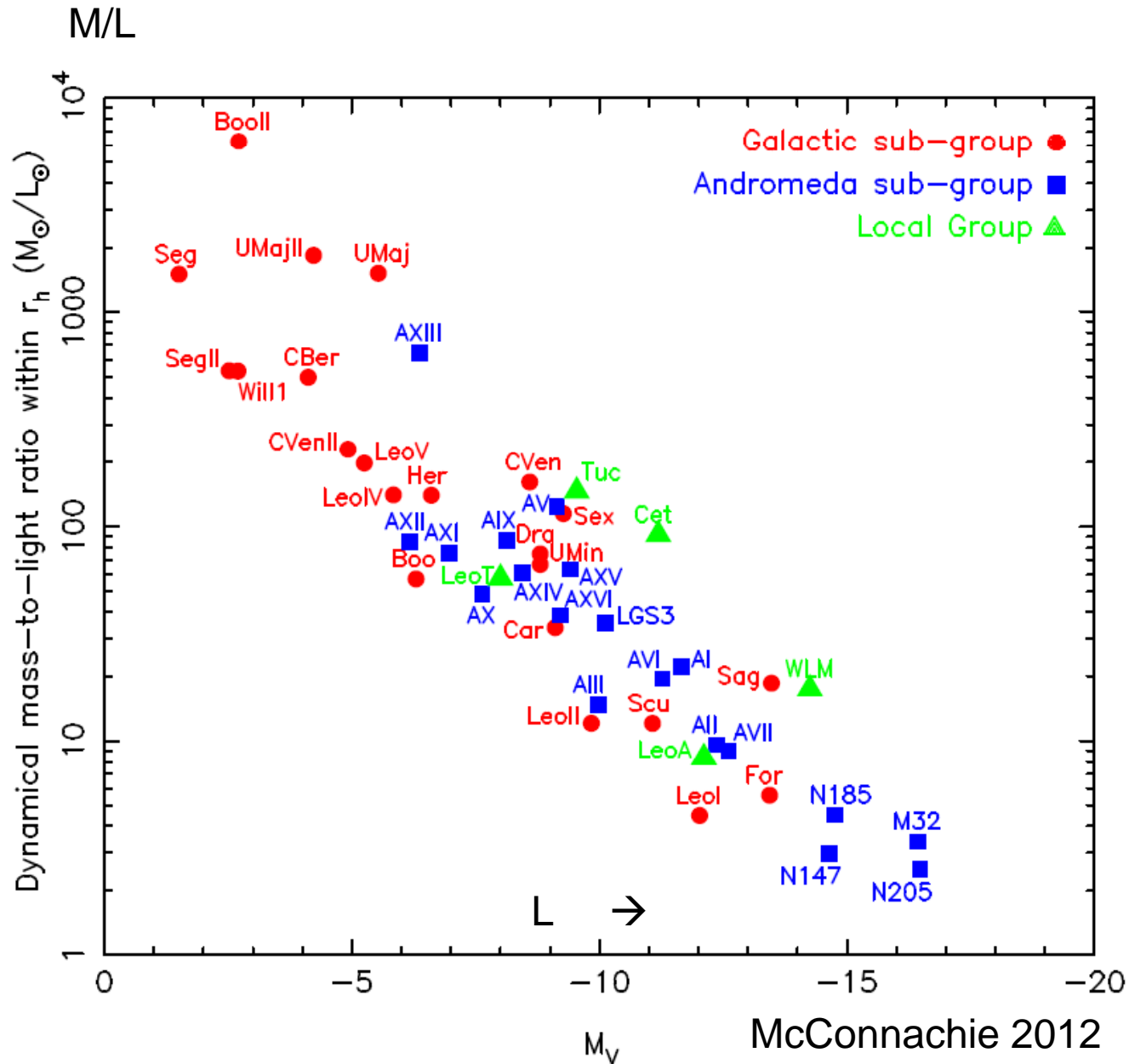
Ces relations permettent de distinguer les modes de formation
Seules les dSph sont dans la continuité des E and dE
UCD et GC se forment différemment et sans MN



Caractéristiques des naines autour des galaxies du Groupe Local



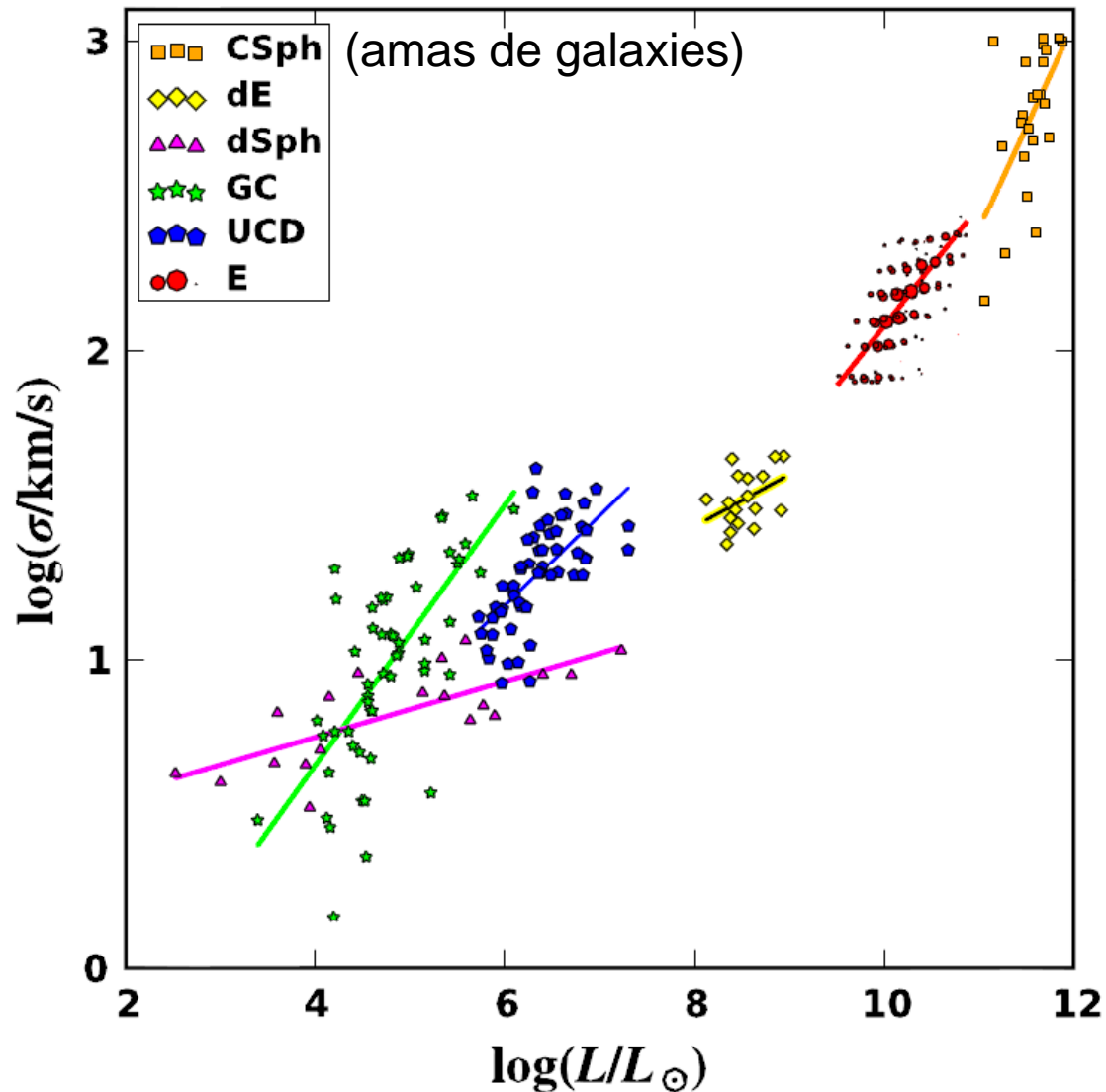
Rapport M/L des naines



Masse dynamique
 Pour $r < r_h$
 r_h rayon contenant
 $1/2$ lumière

Les plus exotiques
 sont des dSph
 autour de la Voie
 lactée

Relation de Faber-Jackson



Analogie de Tully-Fisher
pour les spirales

Dispersion σ au lieu de V_{rot}

$$\sigma^2 \sim M_{1/2}/r_{1/2}$$

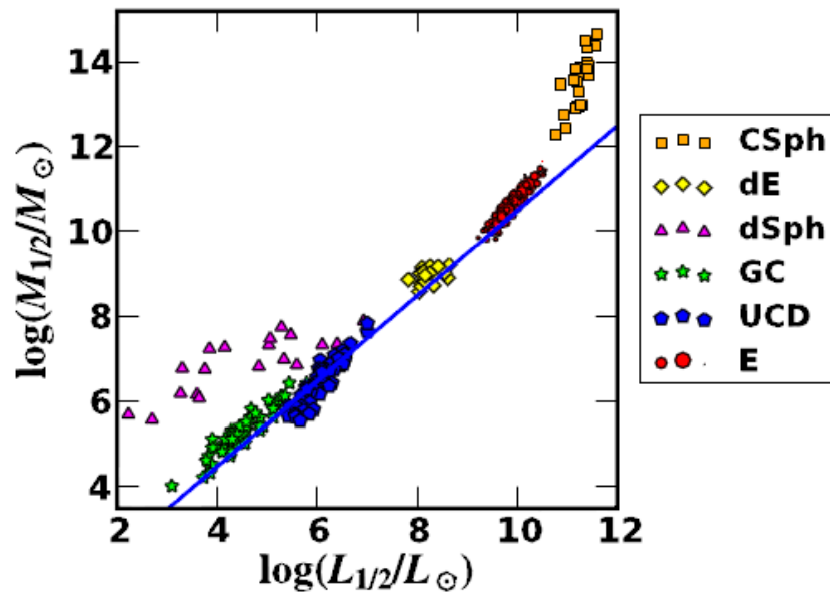
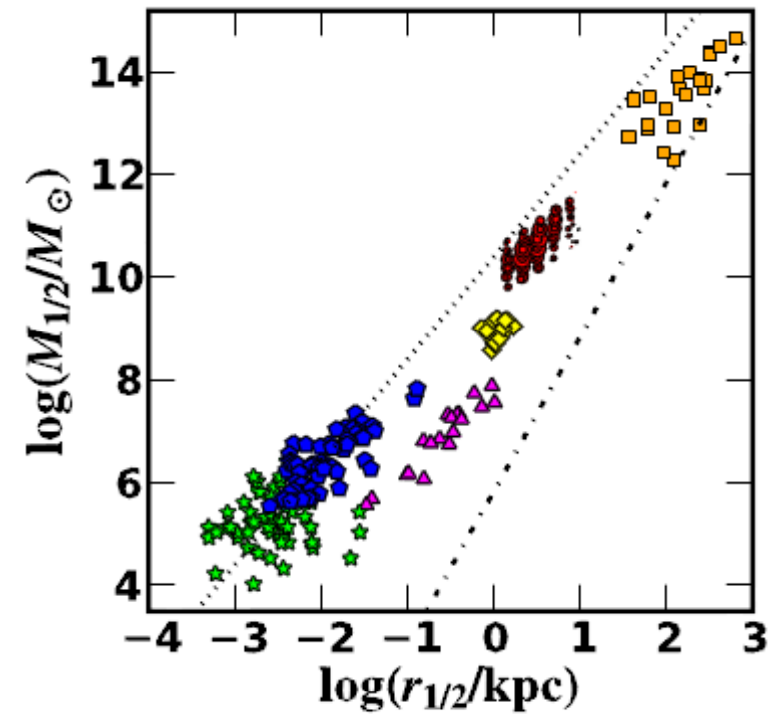
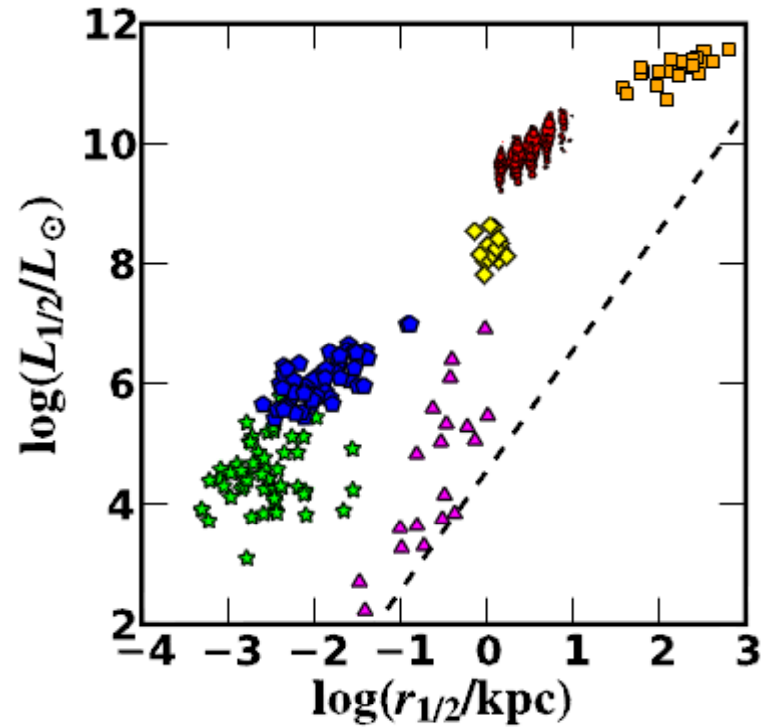
$$r_{1/2} = 4R_e/3$$

$r_{1/2}$ à 3D, R_e en projection

$$L_{1/2} = L/2 = I_e \pi R_e^2 .$$

Tollerud et al 2011

3 quantités
mieux vues
en 3D



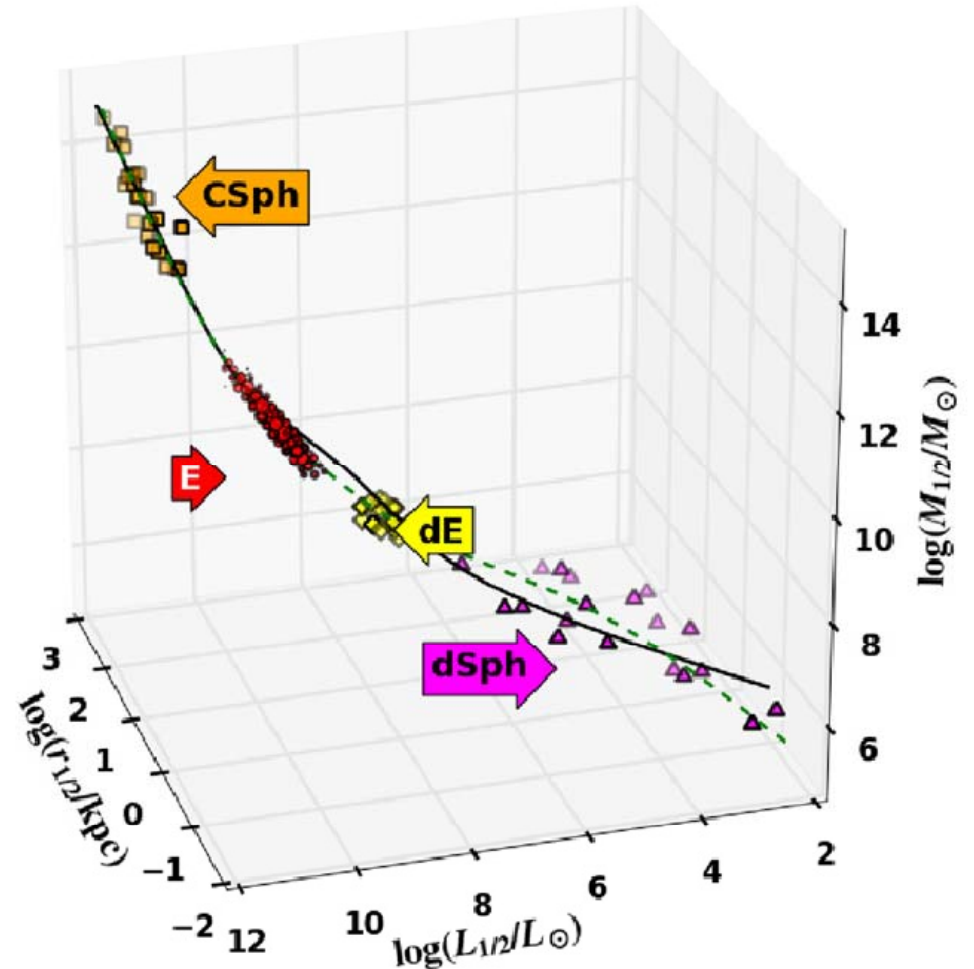
M/L des systèmes sphéroïdes

$M/L \sim 3$, uniquement pour dSph et CSph besoin de MN

Tollerud et al 2011

Plan Fondamental: relations MRL

- $M_{1/2} \propto r_{1/2}^{1.44} \propto L_{1/2}^{0.30}$
pour les naines dSph, dIrr..
- $M_{1/2} \propto r_{1/2}^{1.42} \propto L_{1/2}^{3.20}$
pour les géantes CSph

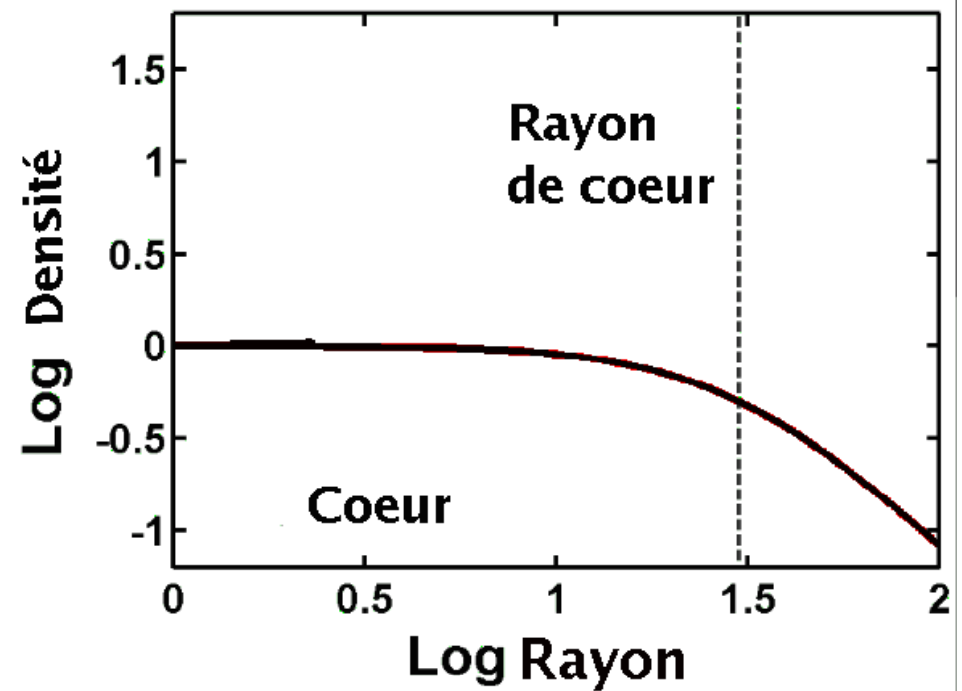
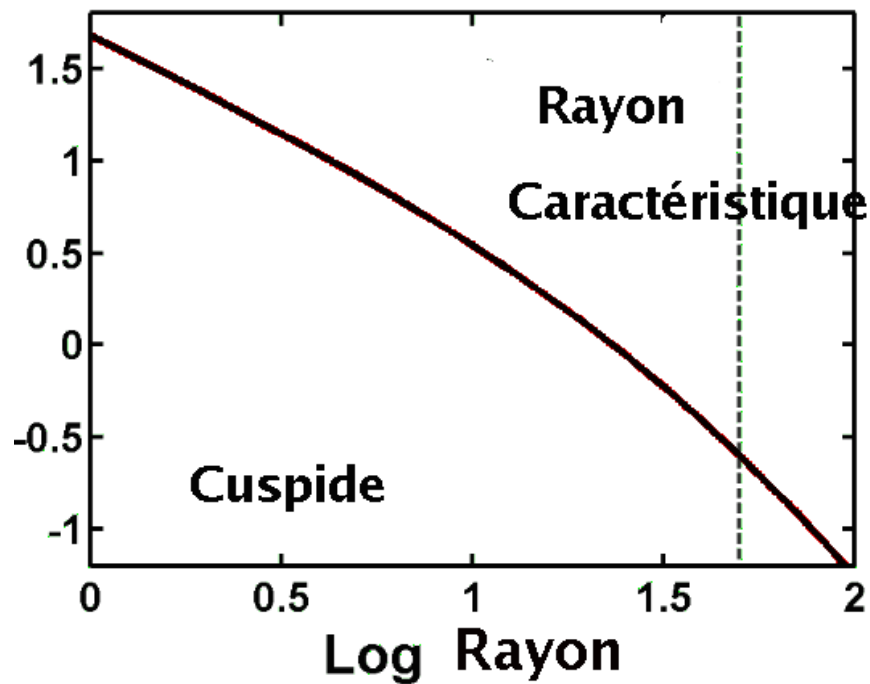


Tollerud et al 2011

Prédictions CDM: 'cuspidé' ou 'cœur'

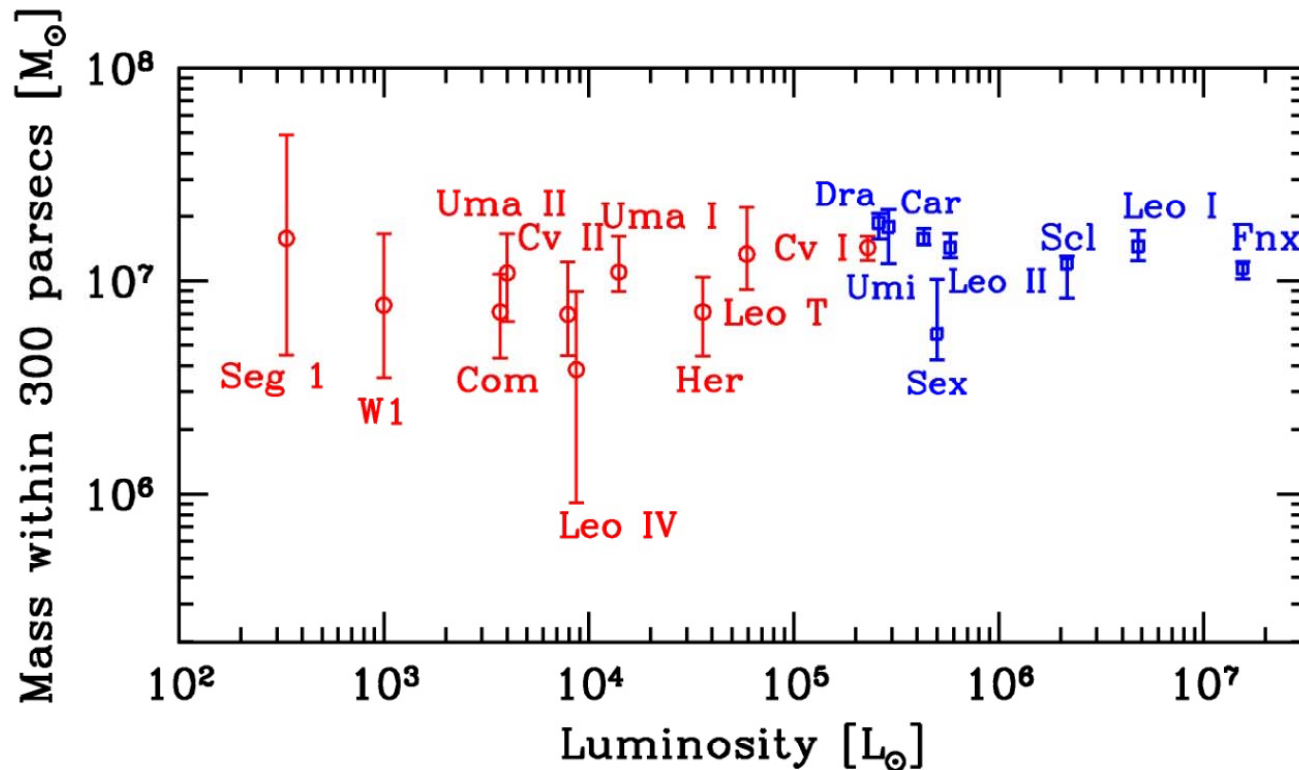
Distribution radiale de la densité de matière noire

Loi de puissance de la densité $\alpha \sim -1-1.5$, observations $\alpha \sim 0$



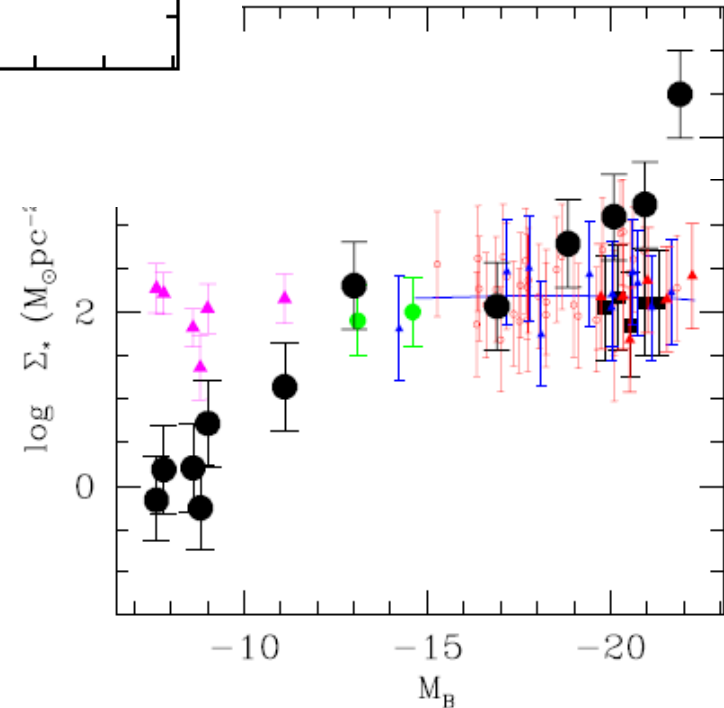
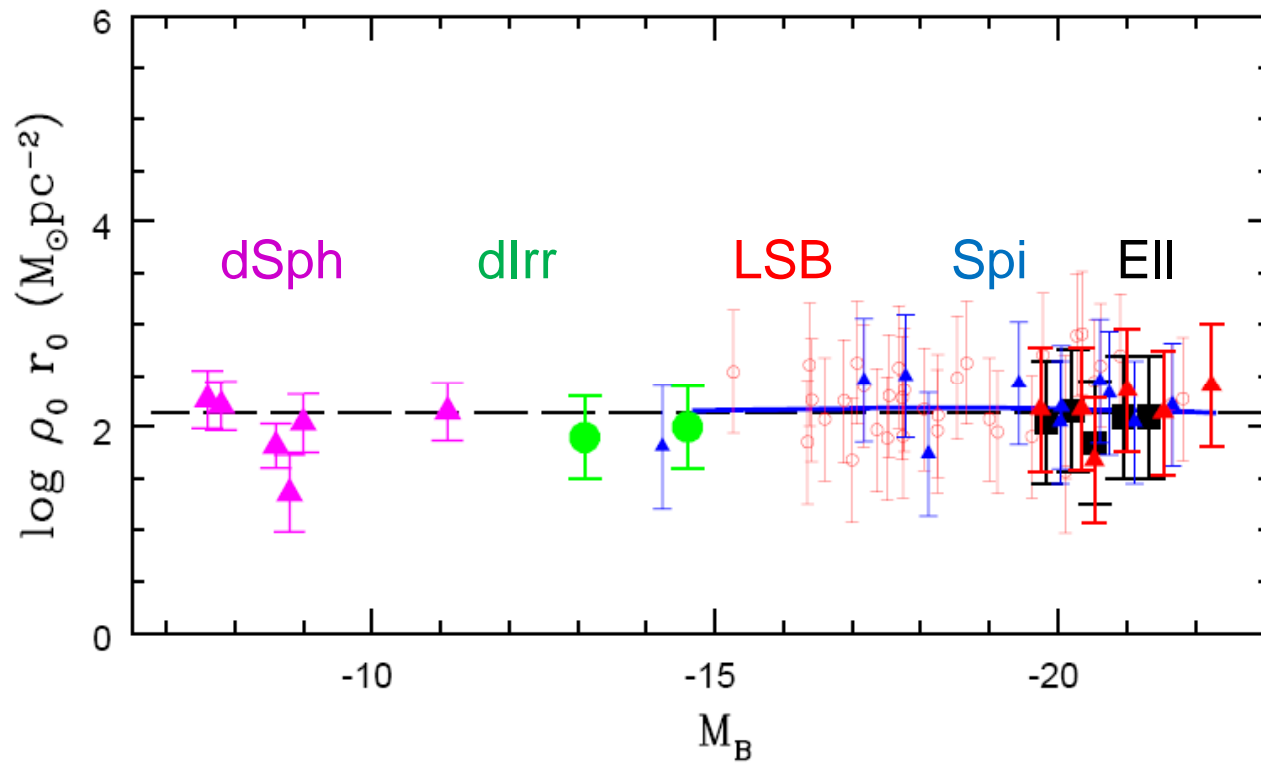
Naines Sphéroïdales, satellites de VL

Plus de la moitié ont été découvertes récemment, grâce au SDSS (Sloan Digital Sky Survey, démarré en 2000)



Toujours MN
 $10^7 M_{\odot}$ pour
 $R < 300 \text{ pc}$

Densité de surface de la matière noire

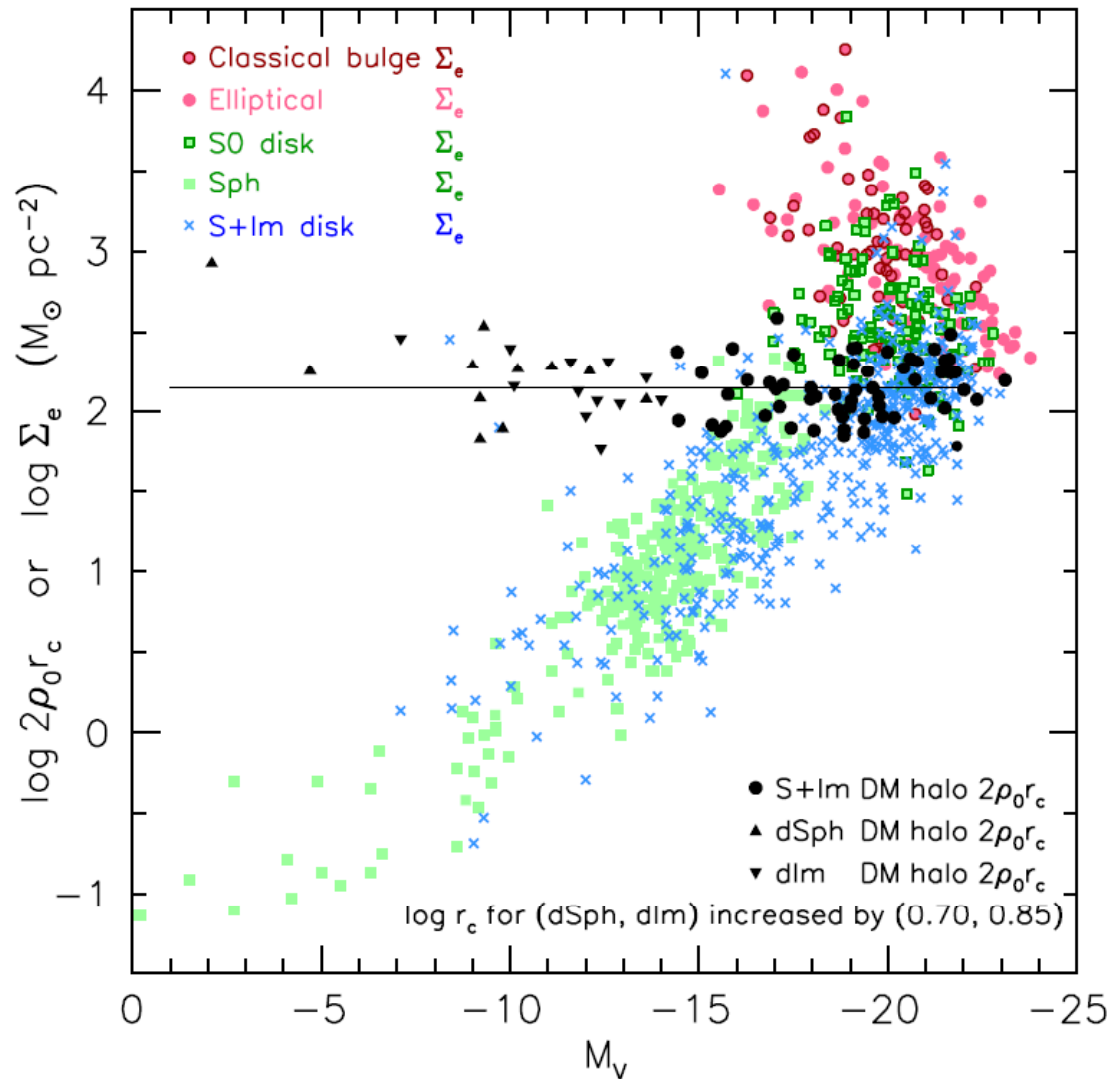


Kormendy & Freeman 2004

Gilmore et al 2007, **Donato et al 2009**

$$\Sigma_M = 142 M_\odot / \text{pc}^2$$

Lois d'échelle, L- Σ



Re: rayon effectif
 Contenant la moitié
 de la masse
 $M/L_V = 8$ pour E, 5 pour
 S0, bulbes, 2 pour S, dw

Kormendy & Freeman 2014

Conclusion: MN Elliptiques et Naines

Difficile de tester la masse totale, avec seulement la dispersion
Problème de déprojection 3D

Elliptiques et dE: la densité de surface des étoiles est forte
→ Peu d'évidence de Matière Noire, de même UCD

Les naines Irrégulières riches en gaz

- Les courbes de rotation montrent la domination de la DM
- **Couplage avec les baryons. Rapport DM/HI ~10**
- Relation de Tully-Fisher

Les naines sphéroïdales: dSph, dominées par la MN

Très petites masses (GC?) et faible brillance

→ Ces deux types de naines montrent des cœurs et non des cuspidés