

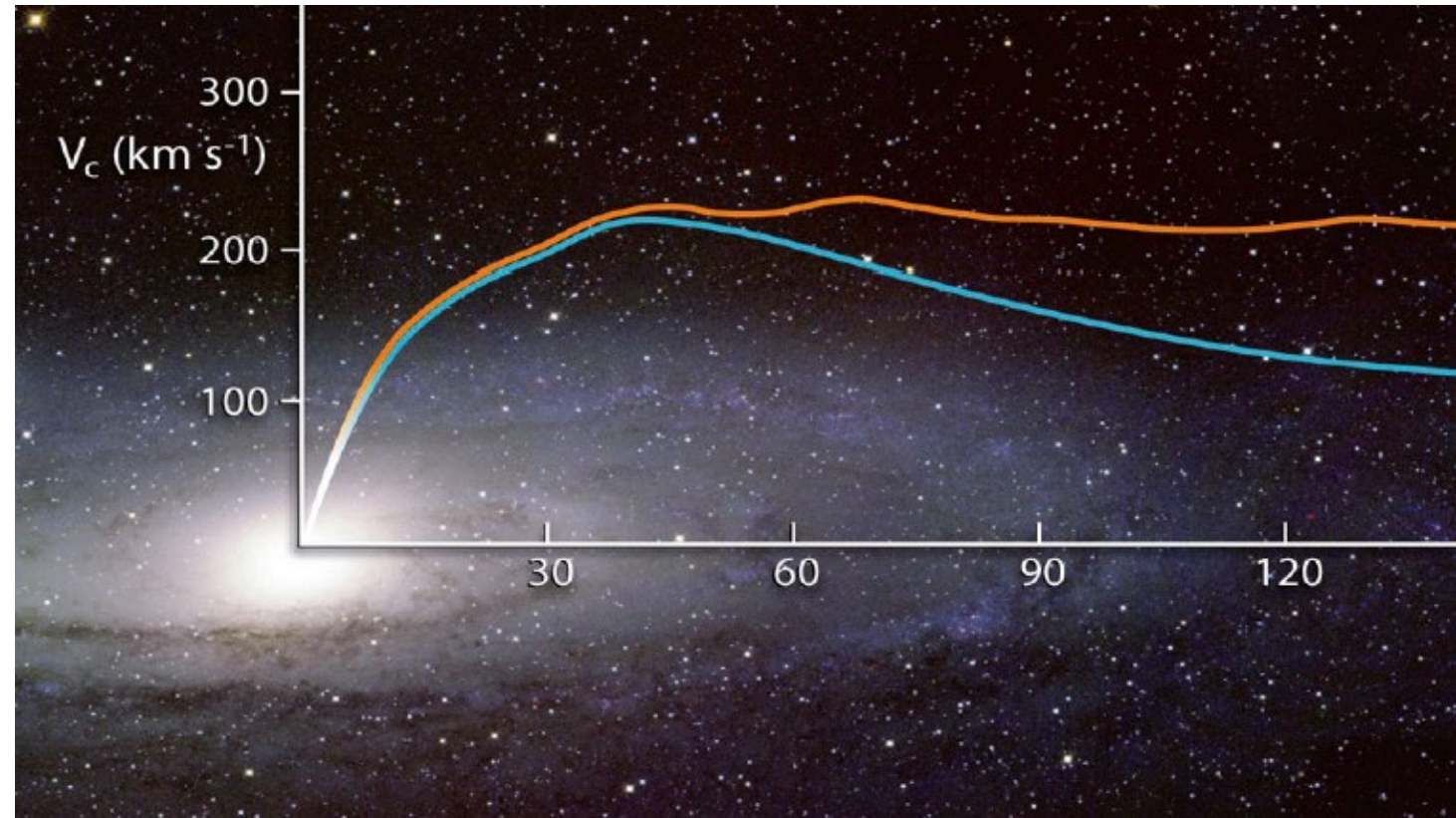


COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# La matière noire à l'échelle des galaxies

Françoise Combes



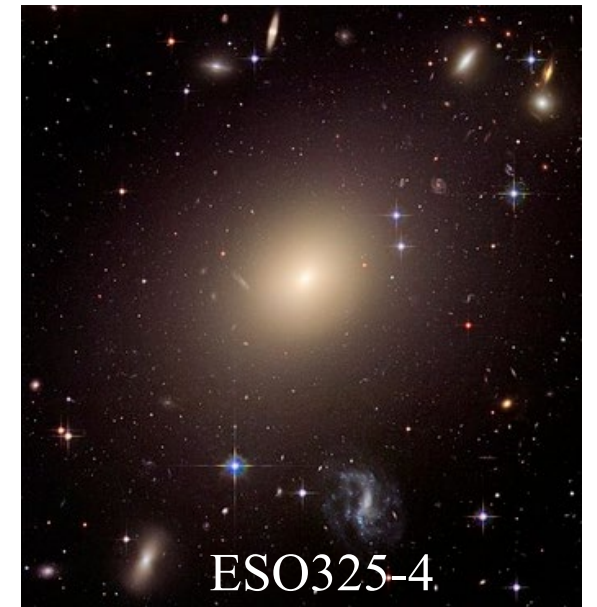
# Propriétés de la matière noire

- Les premiers travaux
- Etoiles ou gaz ionisé, Gaz atomique HI

- Les courbes de rotation des spirales

Fonction de la masse, de la densité de surface

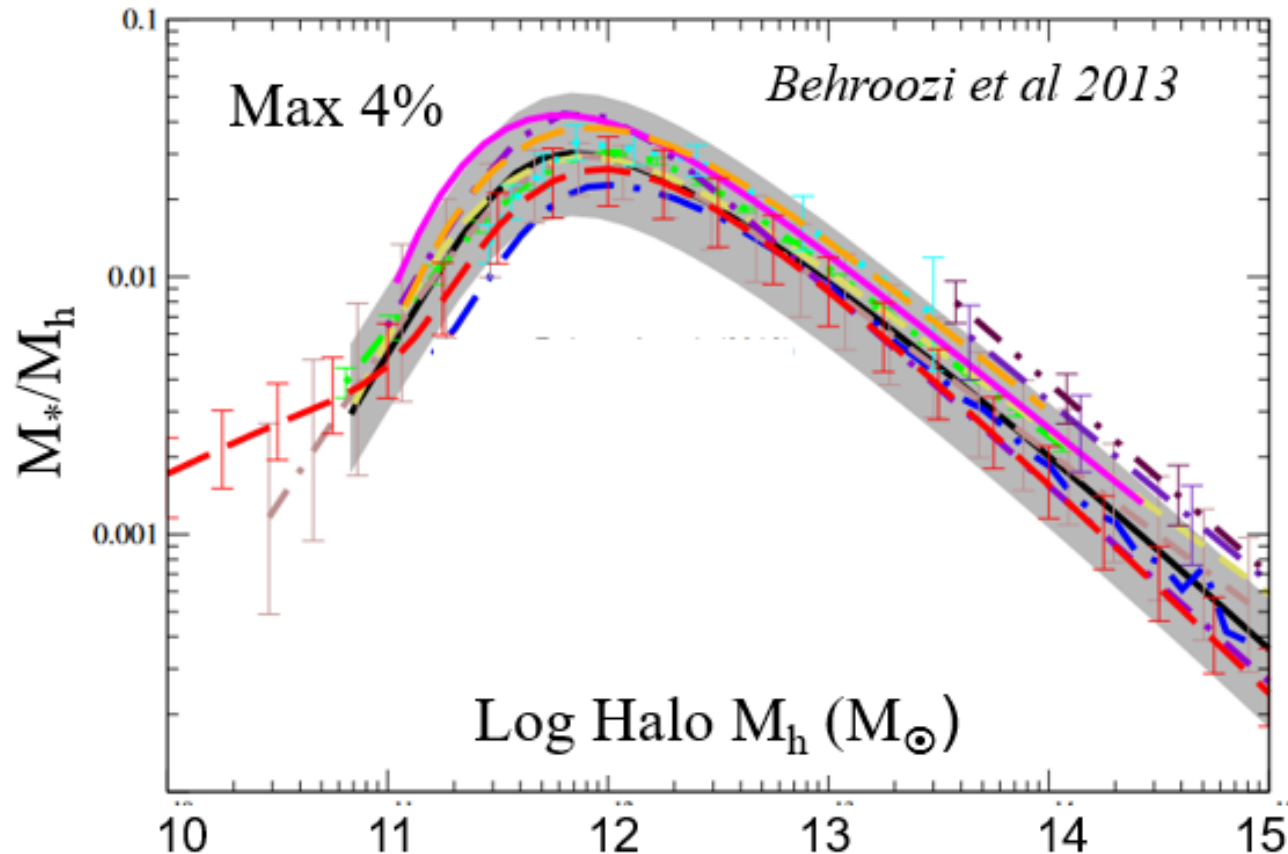
- La dynamique des galaxies elliptiques
- Relations d'échelle
- Evolution avec le redshift



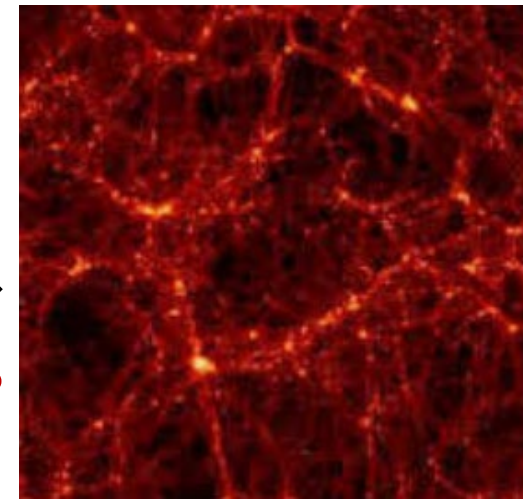
# La matière noire domine les galaxies

La matière ordinaire (baryons) correspond à  
la fraction universelle  $f_b = 5/(25+5) = 17\%$

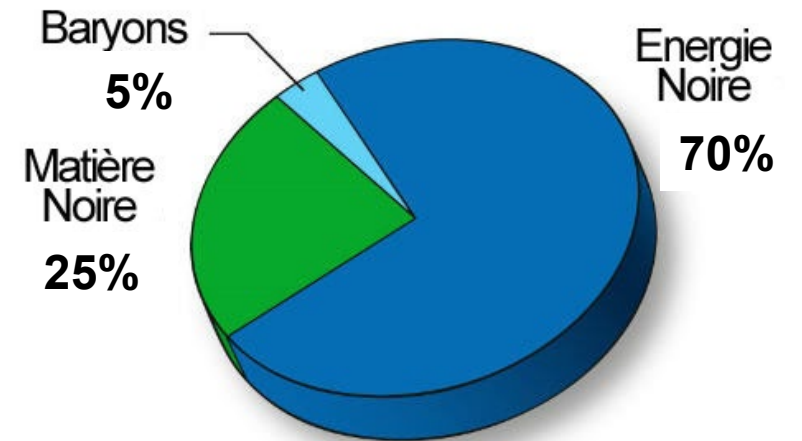
$$M_{\text{tot}}/M_b = 6$$



80%



Les baryons sont  
dans la toile cosmique



Satellite Planck, 2013

# Bref historique de matière noire dans les galaxies



Poincaré, 1906

Il y a des étoiles que nous voyons, parce qu'elles brillent.  
Mais n'y aurait-il pas des **étoiles obscures** qui circulent dans l'espace?  
.....**matière noire**.

Pouvons-nous considérer que l'évolution de la Voie lactée a commencé quand la **matière était encore noire**?



**1932:** Jan Oort trouve qu'il manque de la masse au voisinage du Soleil dans la Voie Lactée  
→ Solides, poussières, gaz, astres morts...

**1940:** NGC 3115 masse et lumière très différents  
 $M/L = 250$  dans les parties externes!



Voie lactée



NGC 3115

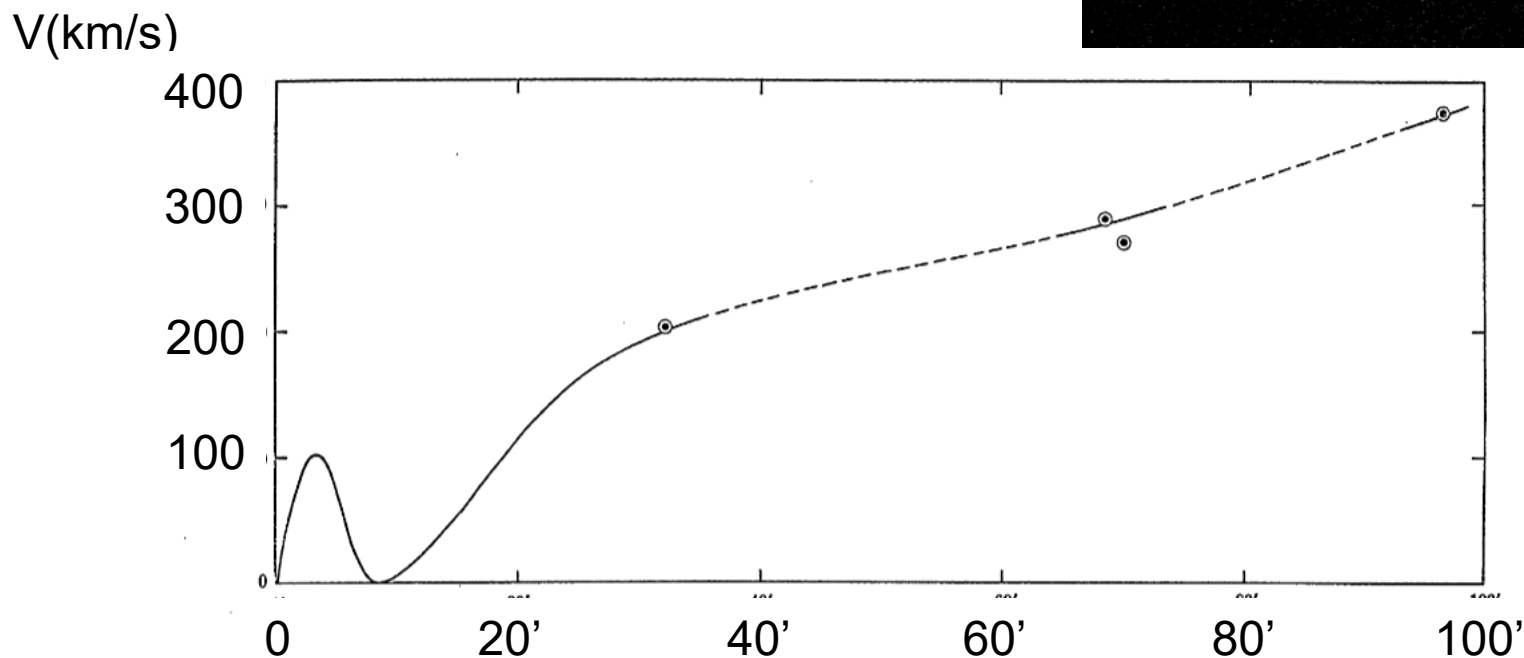
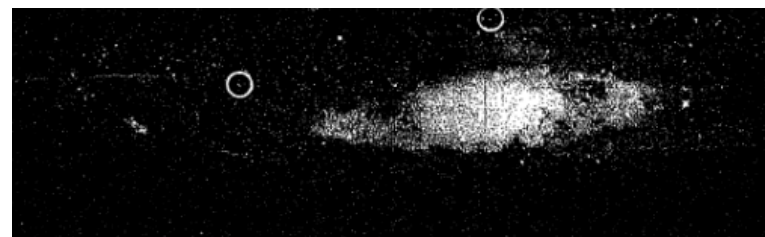
# Première courbe de rotation de M31

|                          |      |       |       |       |     |
|--------------------------|------|-------|-------|-------|-----|
| Rayon                    | 0'   | 0.5'  | 15'   | 50'   | 80' |
| Rayon (kpc)              | 0.11 | 3.3   | 11    | 17    |     |
| Lumière $L_{\odot}/pc^3$ | 1.25 | 0.083 | 0.021 | 0.014 |     |
| Masse $M_{\odot}/pc^3$   | 2.1  | 1.5   | 0.9   | 0.9   |     |
| M/L                      | 1.6  | 18    | 43    | 62    |     |

Observations de Août  
à Décembre 1937  
Le long du grand axe



Babcock 1939



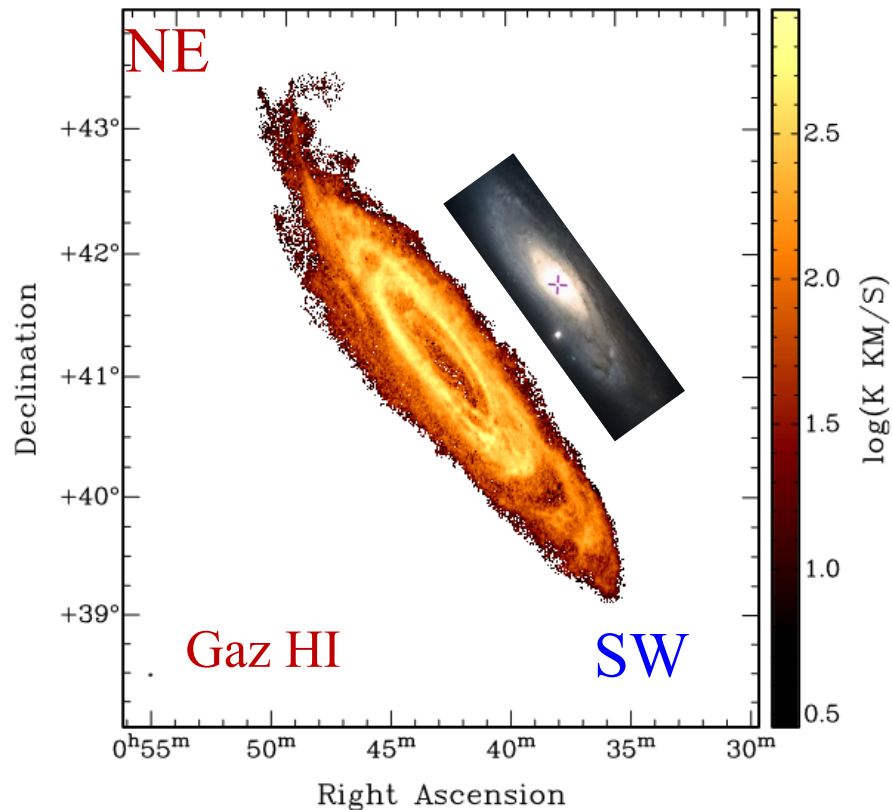
Raies en absorption  
des étoiles, H, K  
 $H\delta$   
Nébuleuses en émission  
[OII], [OIII]

# M31=Andromède, aujourd'hui

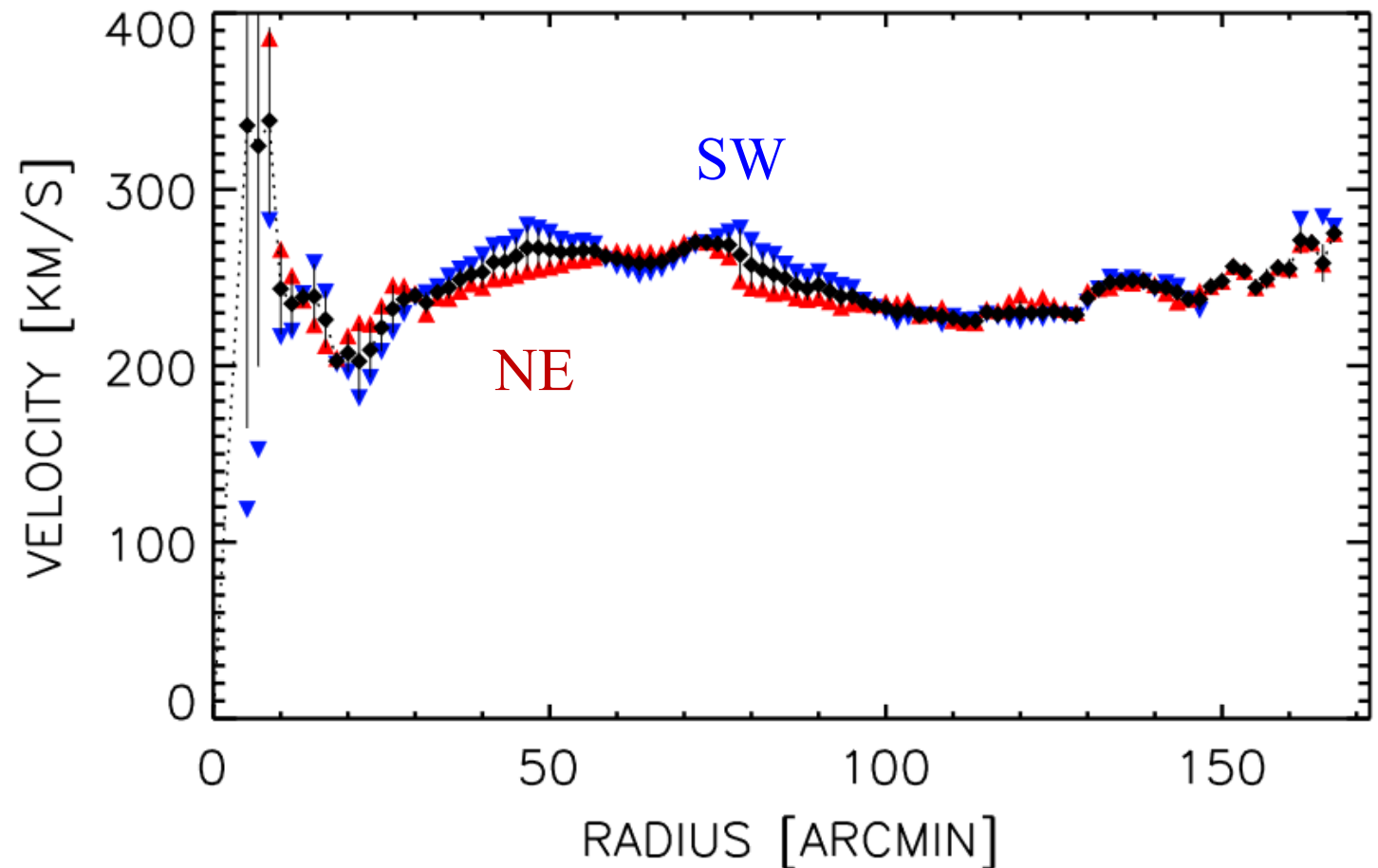
Plus de connaissance de la distribution de masse (infrarouge),

et du gaz à grande distance Pour  $R < 38$  kpc  $M = (4.7 \pm 0.5) \times 10^{11} M_{\odot}$ , soit  $M_{\text{tot}}/M_b = 4$

Pour le rayon du Viriel,  $R = 159$  kpc,  $M = 2.2 \times 10^{12} M_{\odot}$  soit  $M_{\text{tot}}/M_b = 20$



*Chemin et al, 2009*



# Le résultat commence à s'établir en 1960

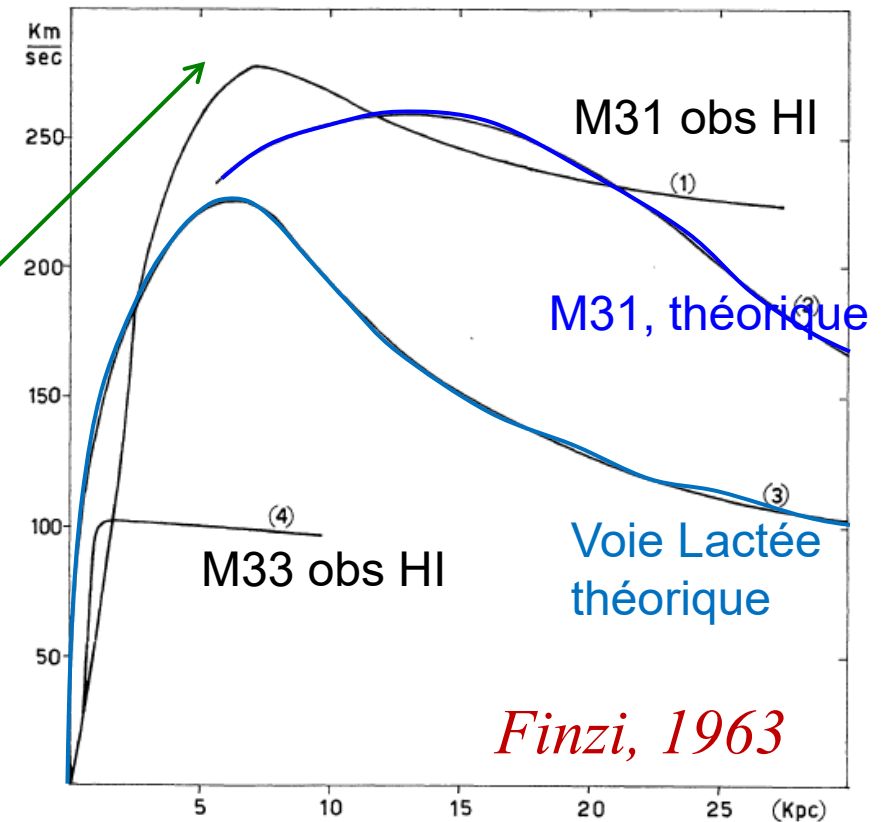
Courbes de rotation **optiques**: *Margaret & Geoffrey Burbidge: 10-20 courbes de rotation étoiles et gaz ionisé ( $H\alpha$  et  $[NII] 0.6\mu m$ )*

**Radio:** La raie à 21cm de hydrogène découverte en 1951 (Ewen & Purcell)

HI est 3-4 fois plus étendu en rayons (M31, van de Hulst 1957, M33 Volders, 1959)

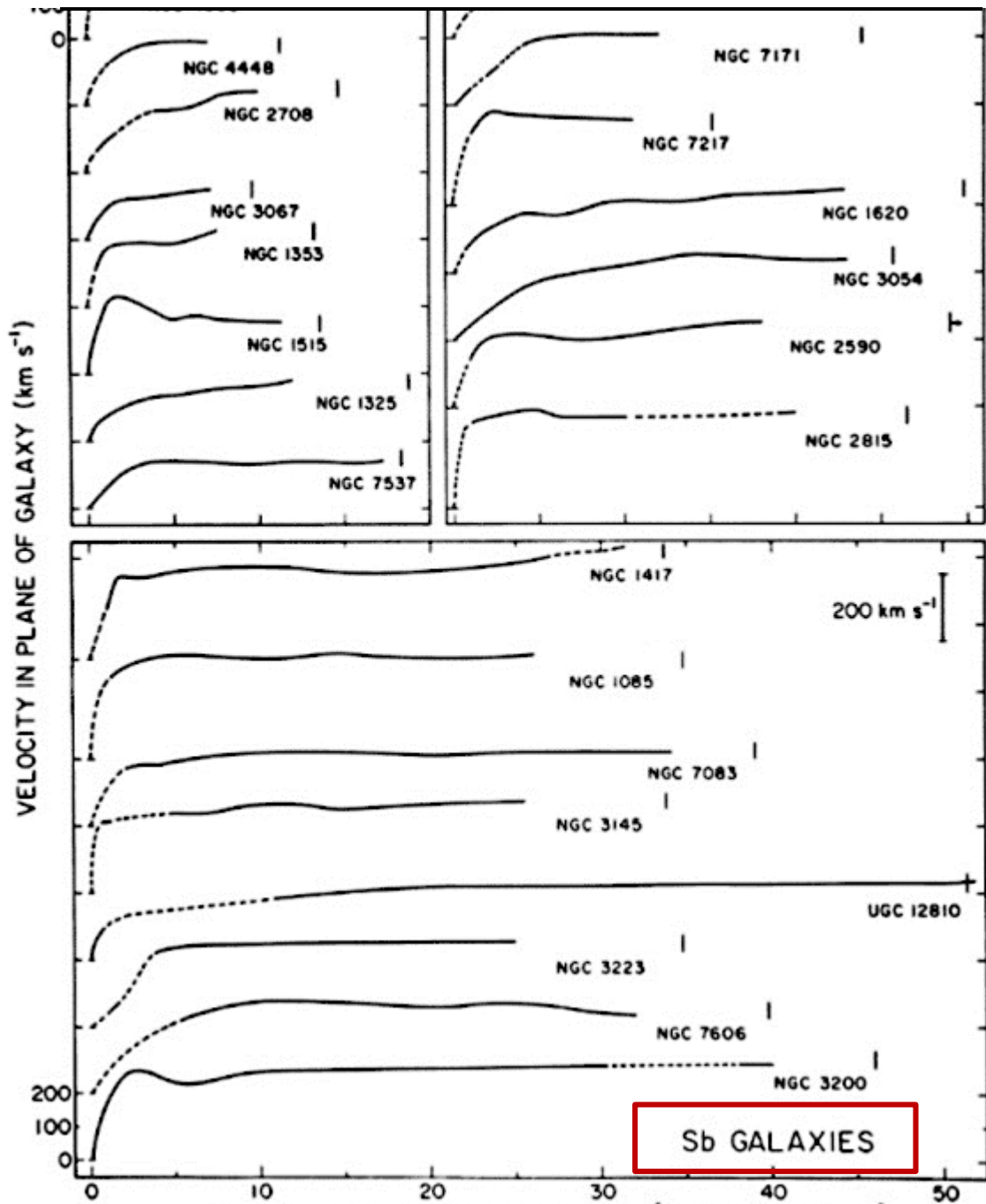
→ **Courbe plate pour M33 ( $M/L=10-13$ )**

Au centre courbe supérieure à la courbe théorique (Bulbe + Barre)  
M/L augmente avec le rayon



*Finzi, 1963*

**Arrigo Finzi (1963) loi de gravitation différente à grande distance**



## Courbes de rotation optiques plates



Vera Rubin  
1928-2016

23 Sb, jusqu'à  $R_{25}$   
25 mag par  $\text{arcsec}^2$

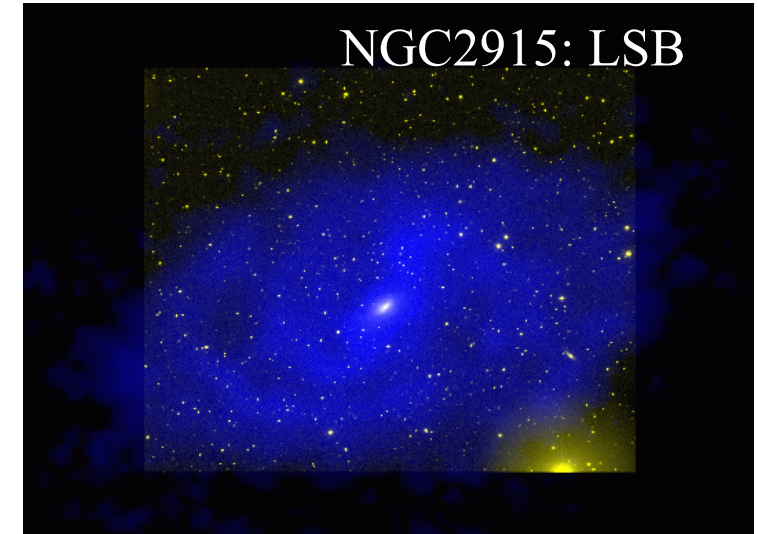
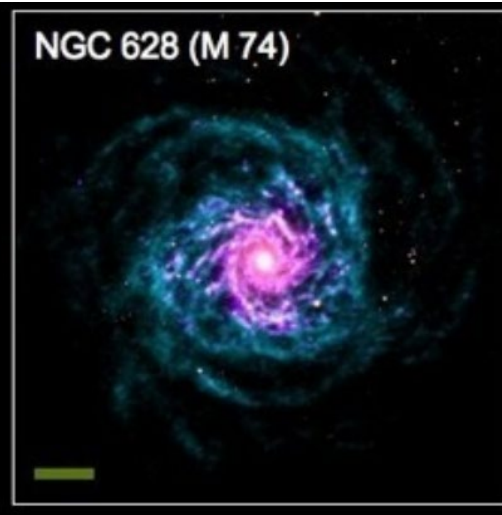
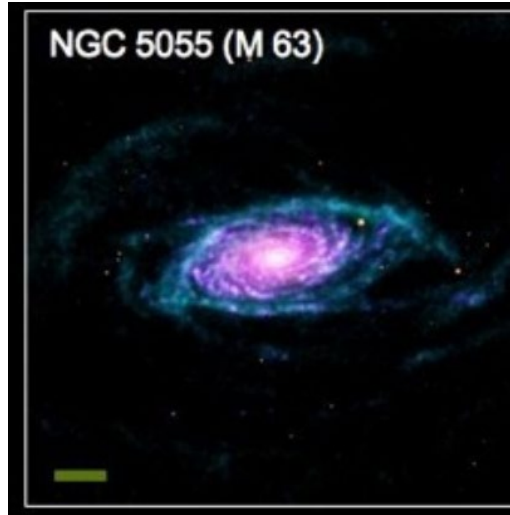
M/L varie selon les types  
et les populations stellaires

$M/L(*) = 2, 4, 6$   
Sc Sb Sa resp.

*Rubin et al 1978*

# Hydrogène atomique (HI) très étendu

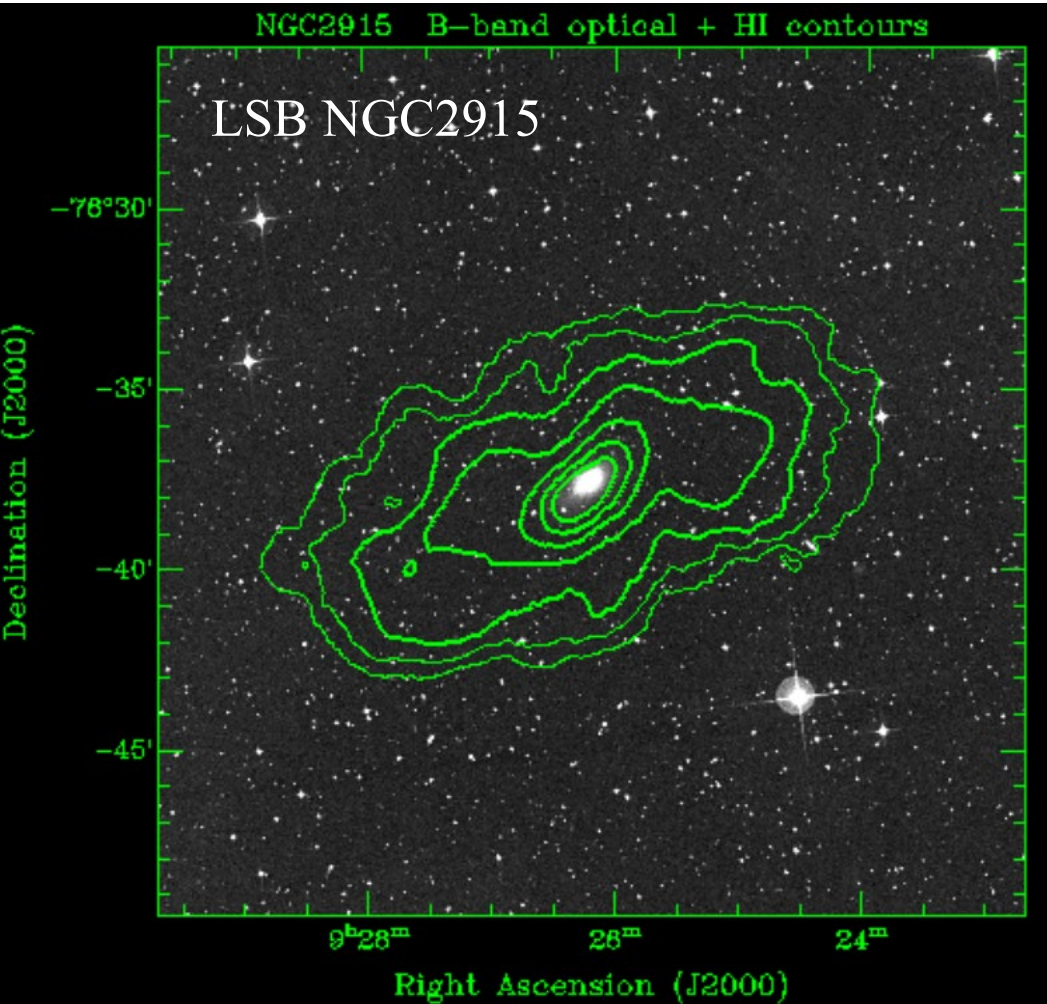
Rose: optique  
Bleu : HI



$R(\text{gaz}) \sim 2-4 R(\text{optique})$

LSB= Low Surface Brightness



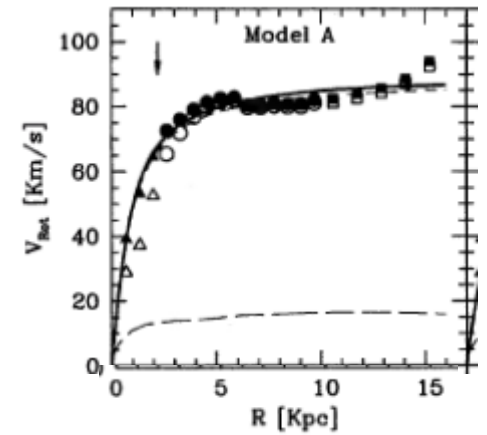


Champ de vitesses  
Diagramme de l'araignée

NGC 2915, LSB

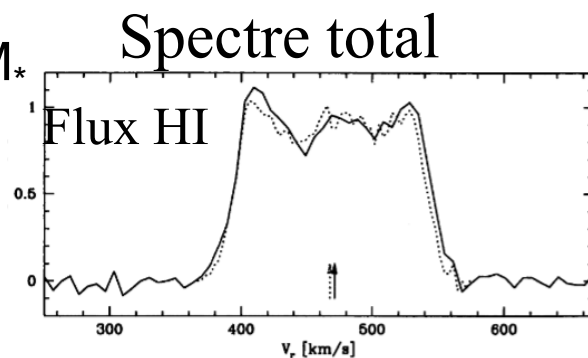
$M/L \sim 80$

La matière noire domine partout

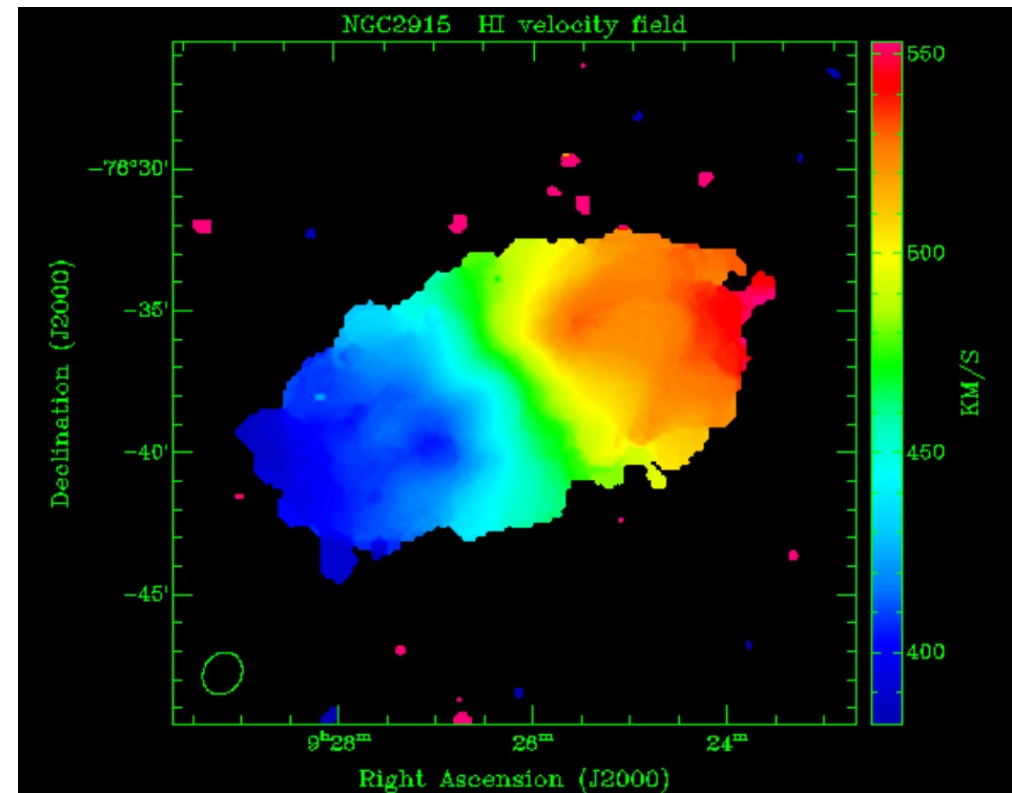


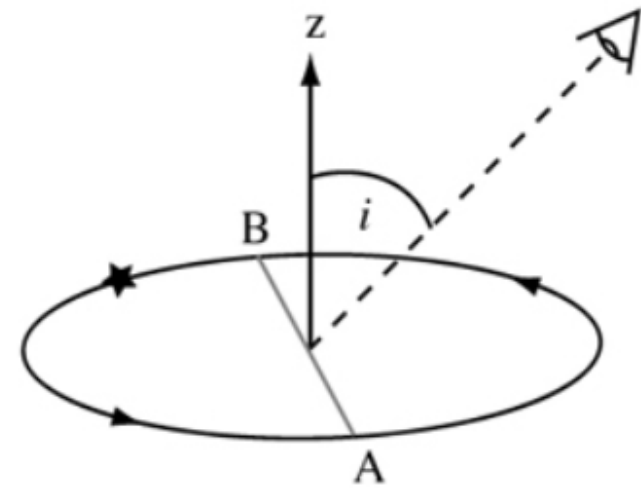
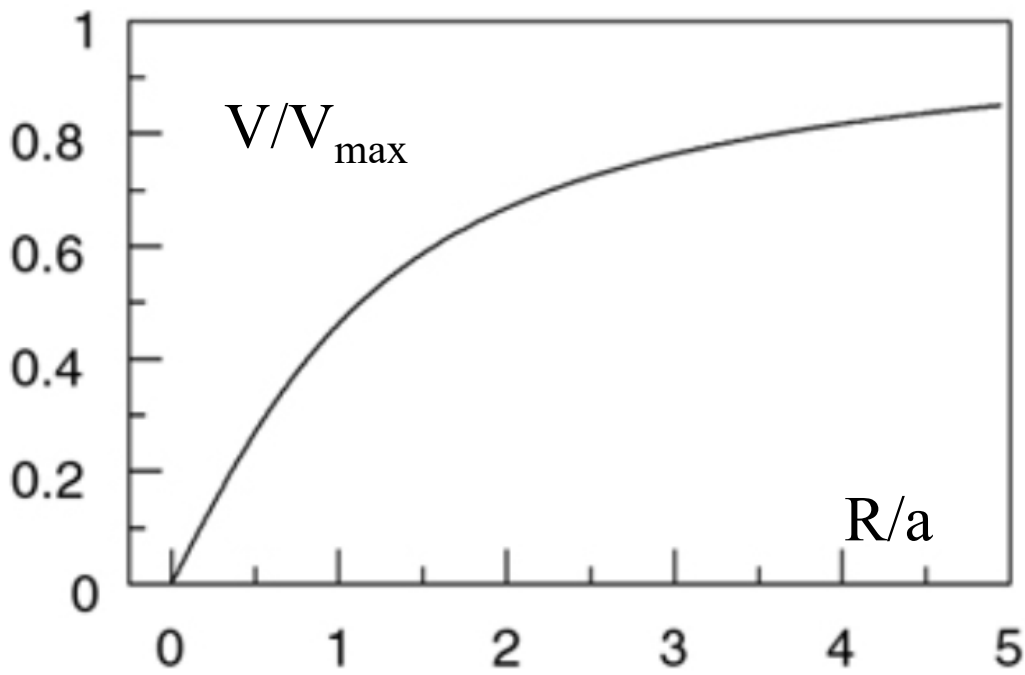
$M(\text{HI}) = 1.3 \cdot 10^9 M_{\odot} \gg M_*$

$M_{\text{dyn}} = 3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$

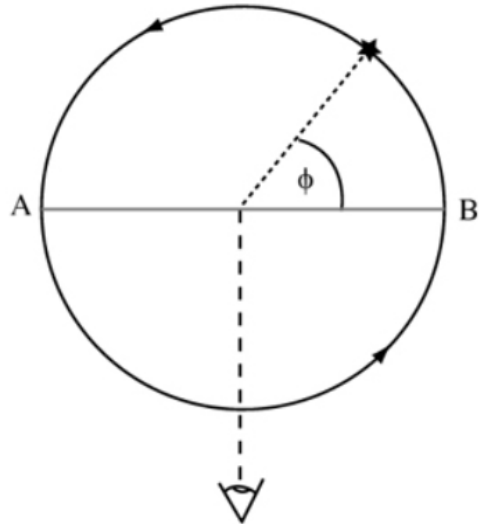


*Meurer et al 1996, Bureau et al 1999*

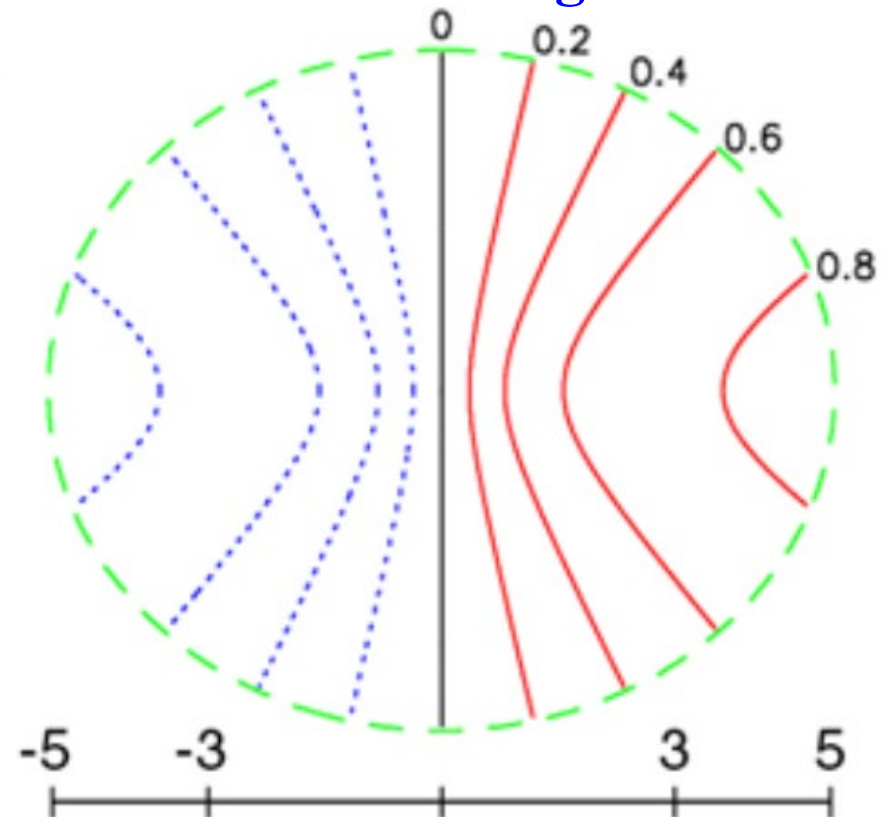




**Diagramme de l'araignée**



$$V_{\text{obs}} = V_{\text{sys}} + V_{\text{rot}} \sin i \cos \phi + V_{\text{r}} \sin i \sin \phi$$

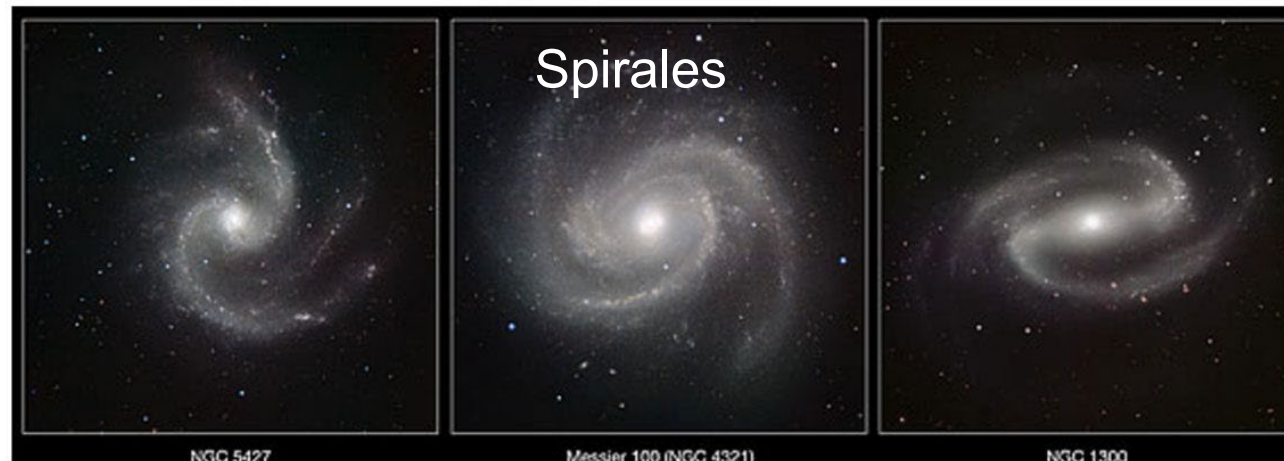
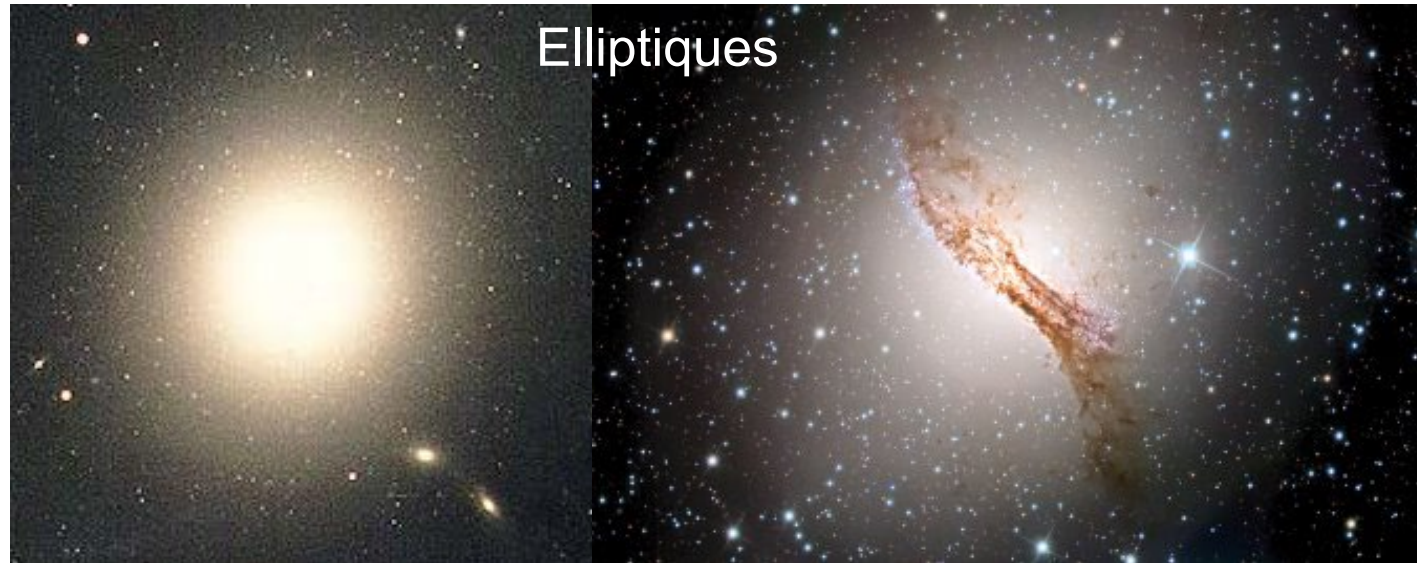


# Matière noire fonction du type

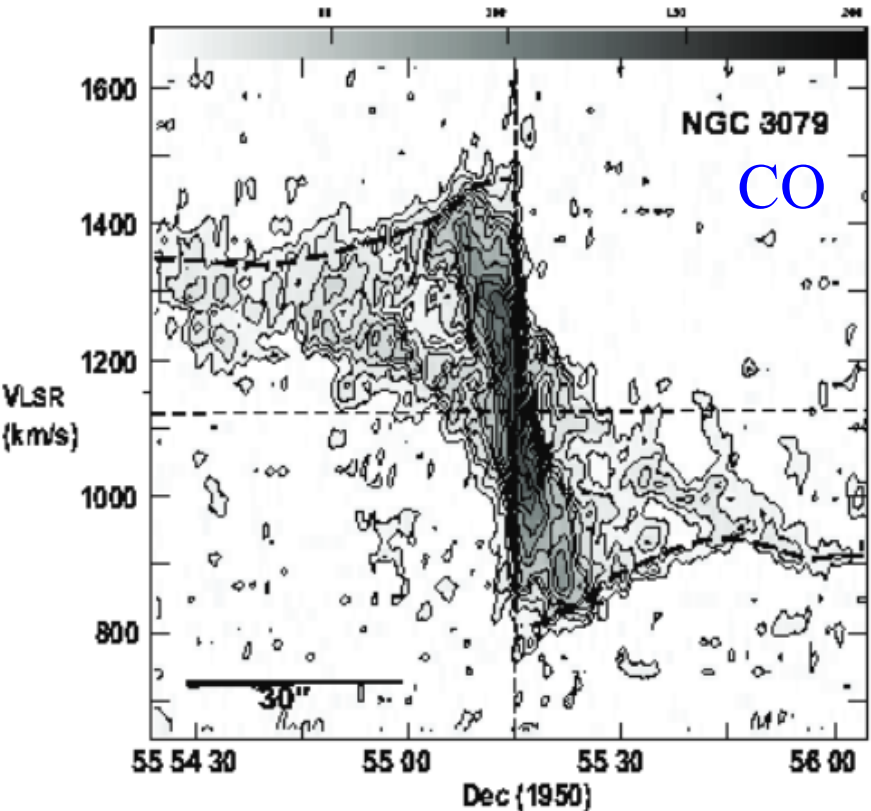
Plus les étoiles sont concentrées, moins il y a de masse noire

Elliptiques plus dominées par les baryons

Les naines et LSB dominées par la matière noire



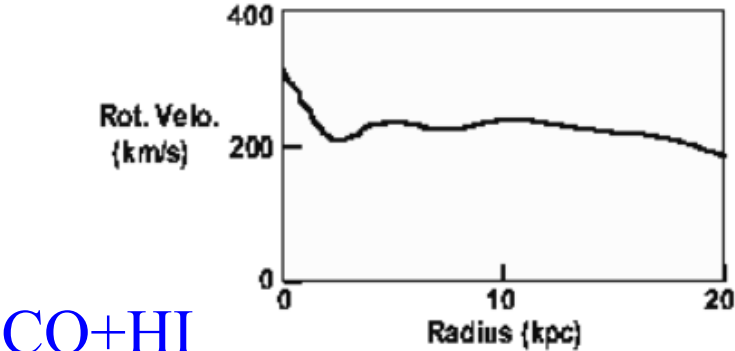
# Gaz atomique, moléculaire, ionisé



**Traceurs complémentaires, CO, H $\alpha$  au centre**  
Haute résolution, HI déficient  
HI dans les parties externes, V<sub>plat</sub>

**Optique:** H $\alpha$ , NII, raies émission gaz ionisé  
**Radio:** HI-21cm, CO: 2.6, 1.3 mm

| Traceur          | résolution angulaire | résolution spectrale         |
|------------------|----------------------|------------------------------|
| HI               | 7" ... 30"           | 2 ... 10 km s <sup>-1</sup>  |
| CO               | 1.5" ... 8"          | 2 ... 10 km s <sup>-1</sup>  |
| H $\alpha$ , ... | 0.5" ... 1.5"        | 10 ... 30 km s <sup>-1</sup> |



CO+HI

*Sofue & Rubin 2001*

# Observations de HI 21cm



Westerbork  
Pays-Bas



VLA  
USA

**Aujourd'hui**  
 **$z < 0.1$**

27 antennes

**MeerKAT, précurseur SKA**  
**Afrique du Sud**

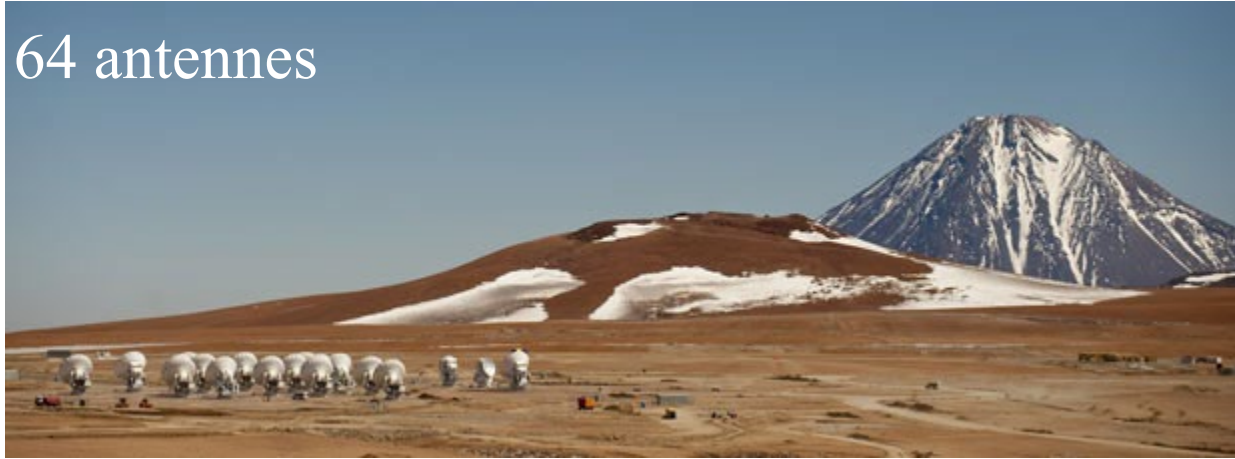


SKA1  $z=1$   
SKA2  $z=2$

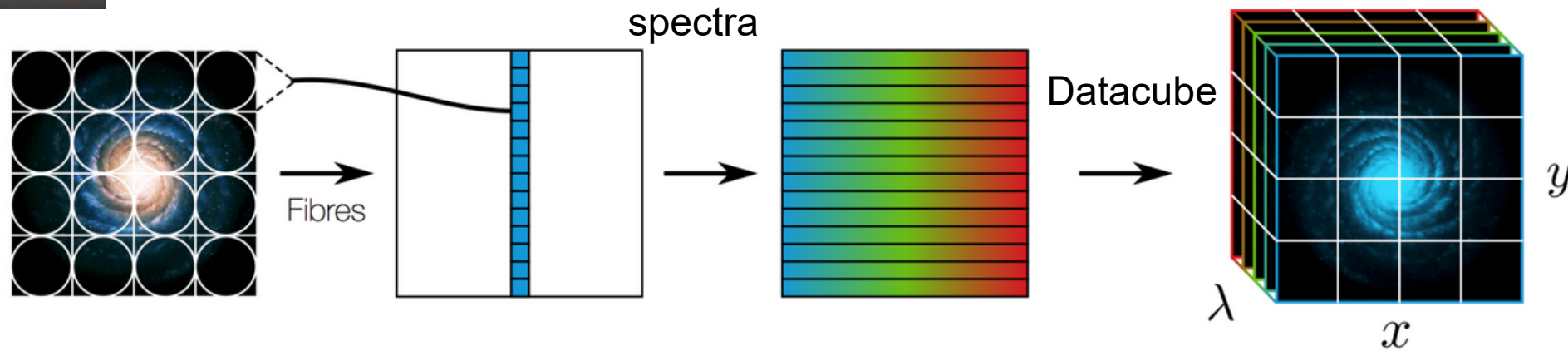
200 antennes

# VLT Paranal, ALMA, désert d'Atacama

64 antennes



$H\alpha$ , MUSE



# Plus de 1000 courbes de rotation

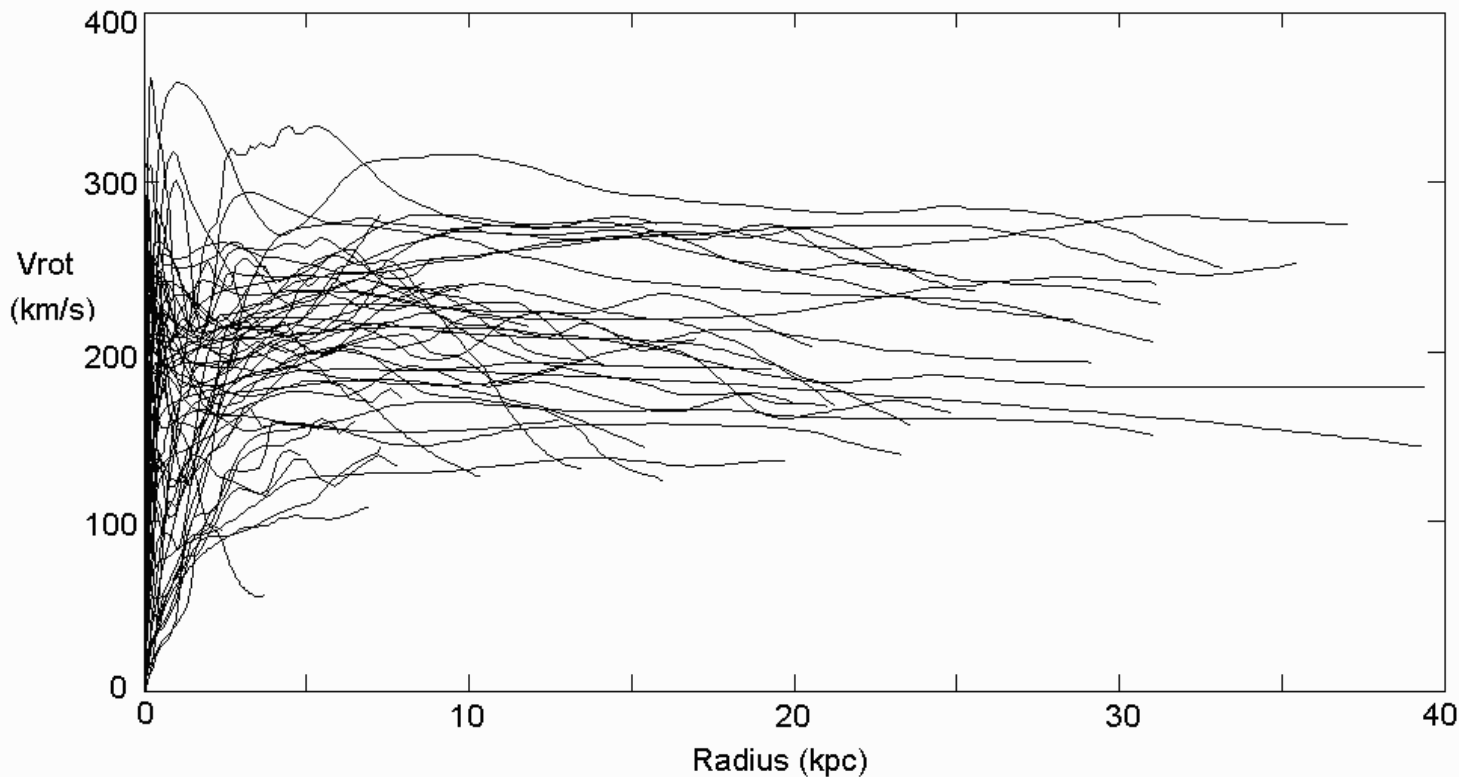
HI à 21cm (*Sofue & Rubin 2001*)

Les courbes sont asymptotiquement plates  $V \propto \text{cste}$

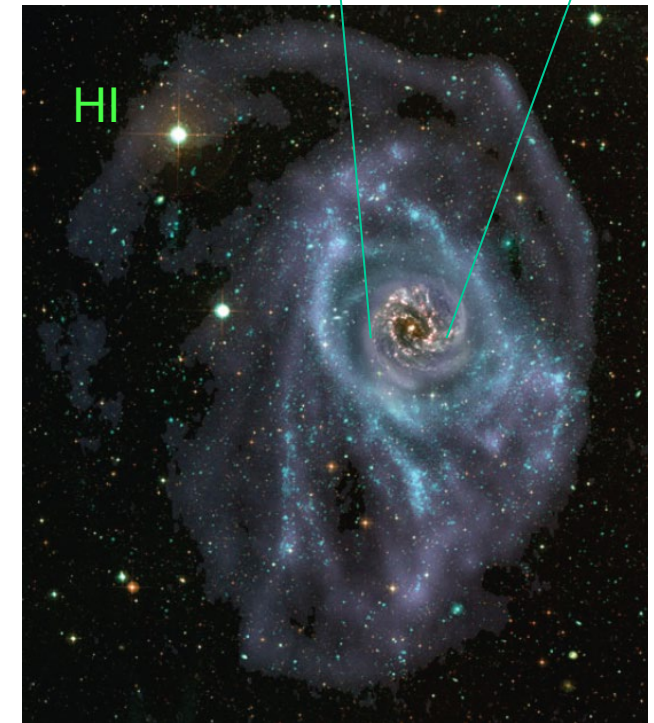
$$M/R \propto V^2$$

$$M \propto R$$

$$\rho \propto 1/R^2$$



M83: optique



M83: une galaxie  
semblable à la Voie Lactée

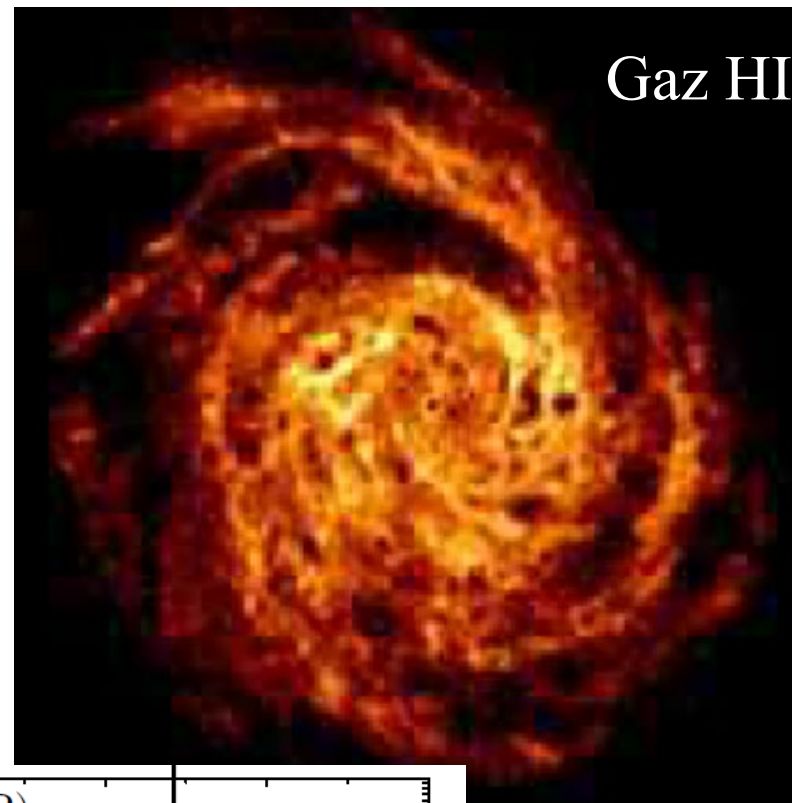
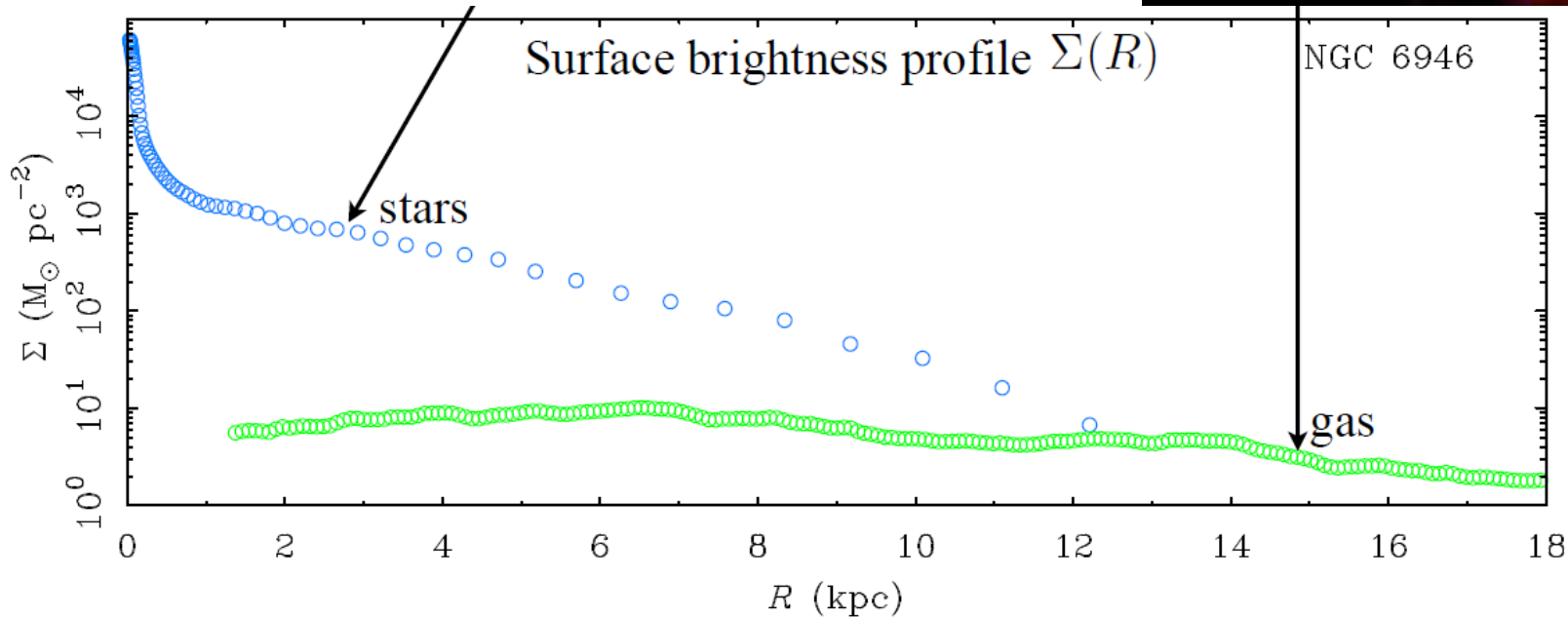
# THINGS

The HI Nearby  
Galaxy Survey



# NGC 6946: Modélisation

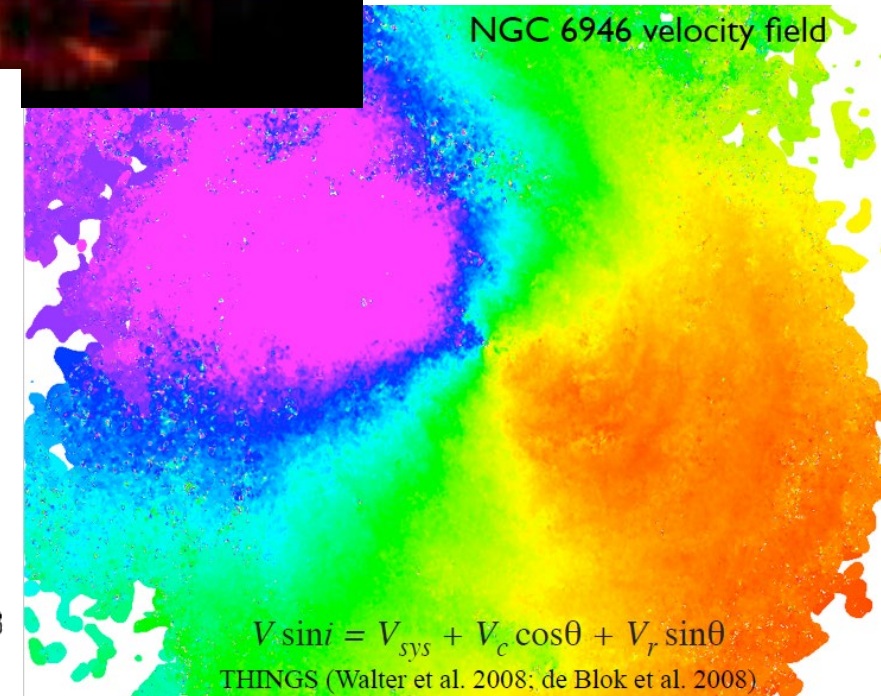
Masse des étoiles: Optique, Infrarouge



Gaz HI

Estimation du  
Rapport M/L  
Des étoiles

Champ de  
vitesse du gaz



# Modèle de rotation pour NGC6946

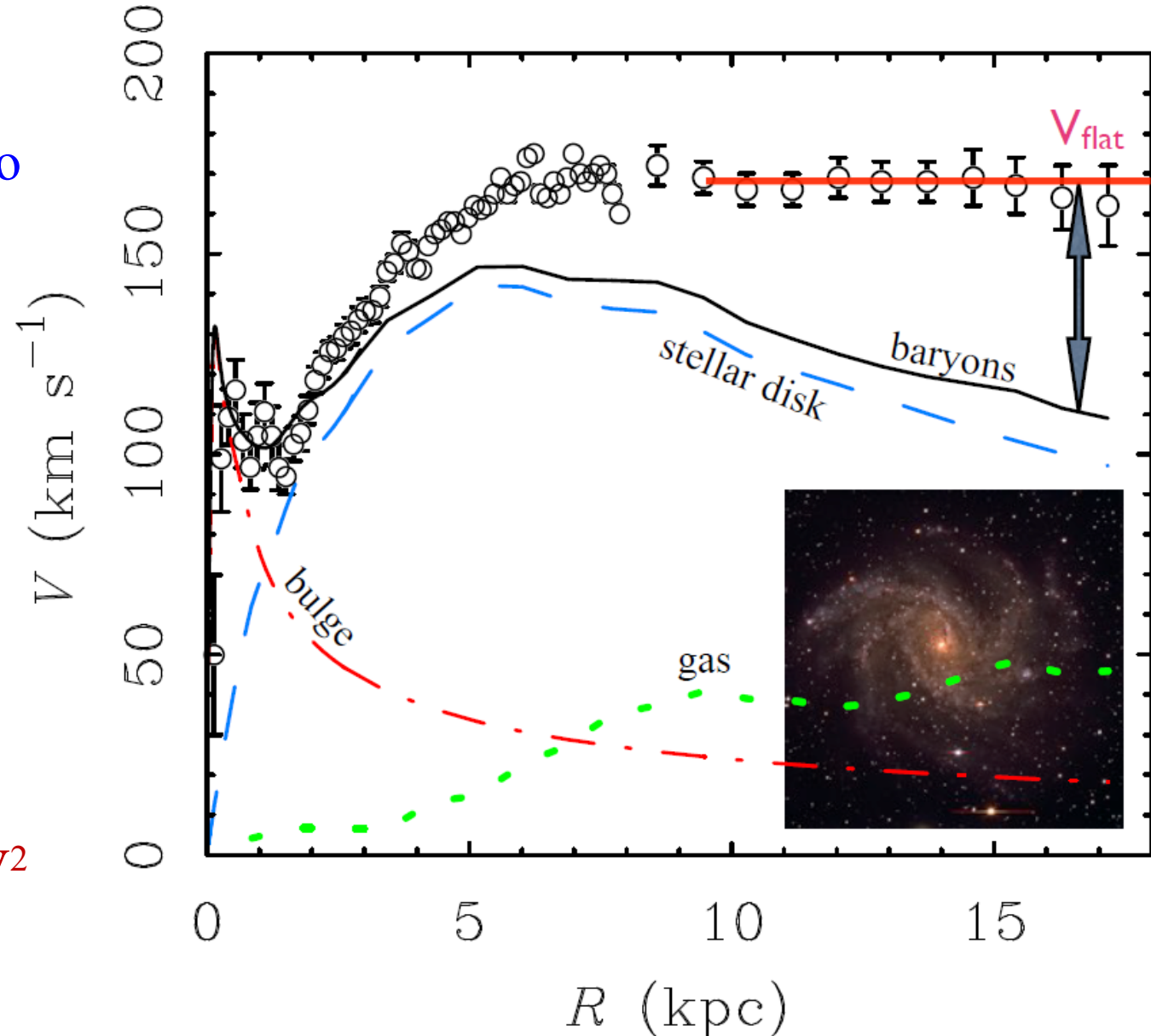
Contribution de chaque composant,  
bulbe, disque stellaire, disque de gaz, halo  
Equation de Poisson

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

Avec densité  $\rho(R,z) = \Sigma(R) v(z)$   
Disque mince  $h_z \sim h_r/10$ , puis  
Obtention de la vitesse circulaire

$$\frac{V^2}{R} = -\frac{\partial \Phi}{\partial R}$$

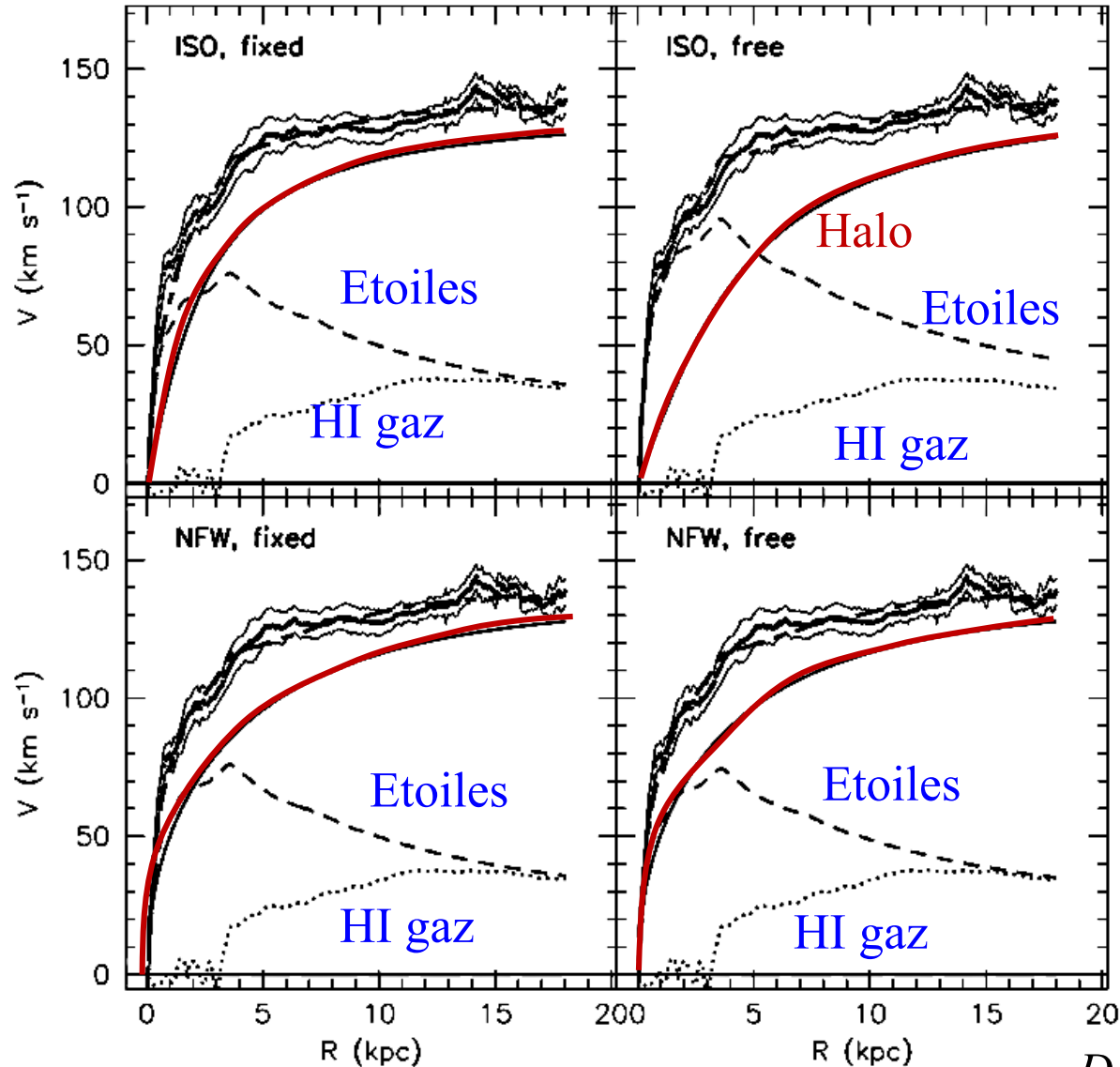
Les divers composantes se somment en  $V^2$   
Attention aux vitesses non-circulaires!



# Dégénérescence: Halo -disque

NGC 2403

Max disk



Possible de choisir le disque maximum,  
et le halo de matière noire minimum

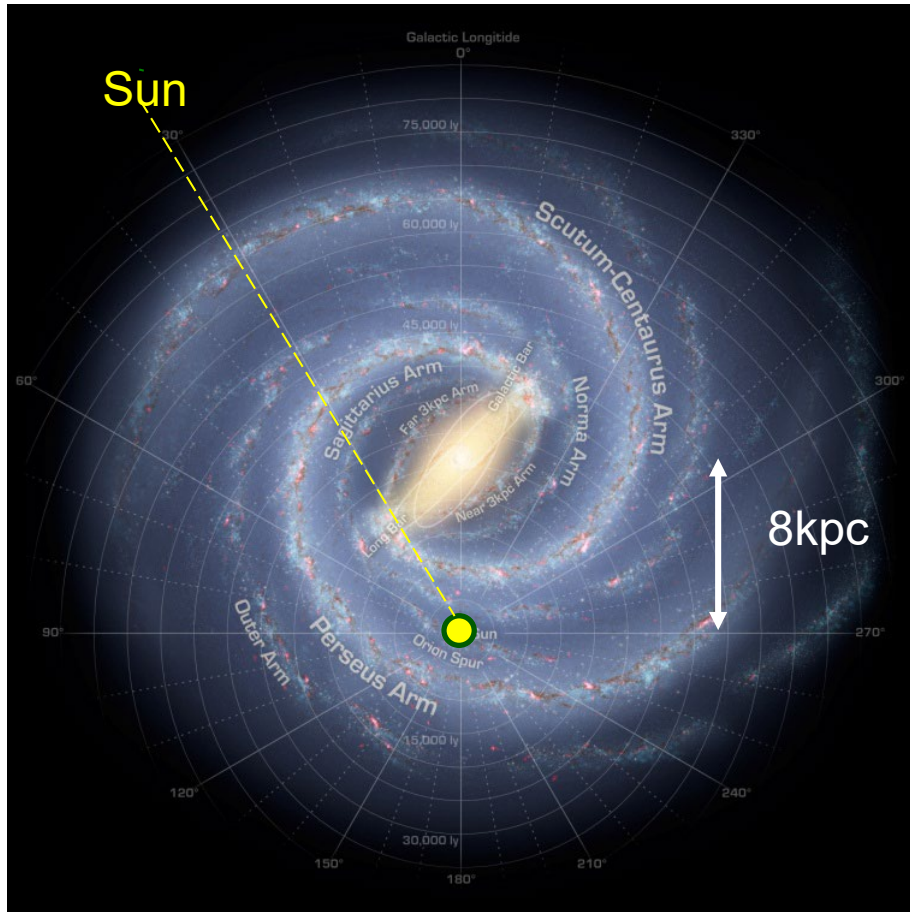
Cela dépend de la résolution spatiale au  
centre

→ Importance de  $H\alpha$ , CO

Surtout pour les cuspides (NFW),  
cœurs (ISO)

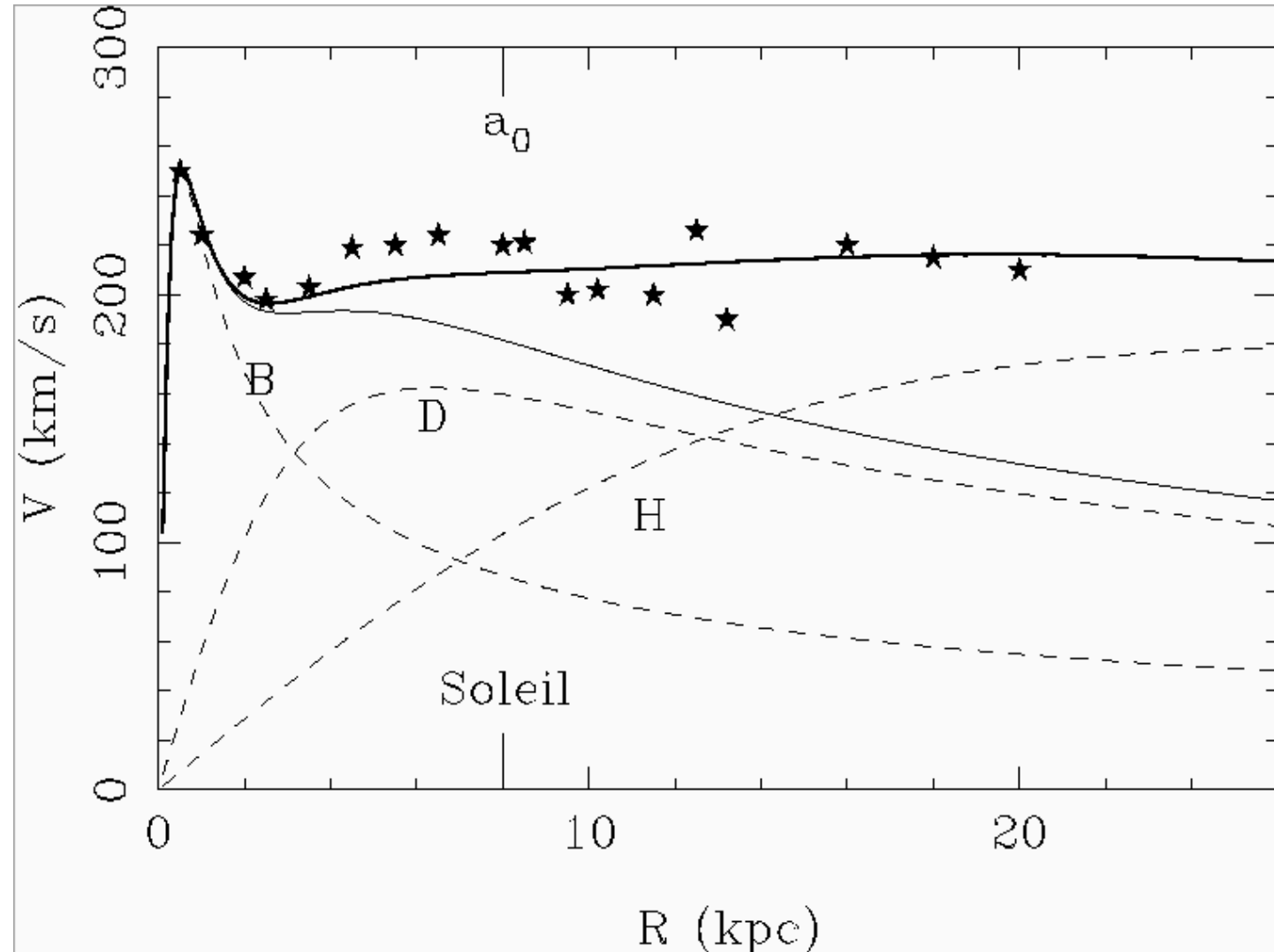
Les galaxies naines donnent plus  
clairement la taille des coeurs

# La Voie Lactée: déprojection difficile

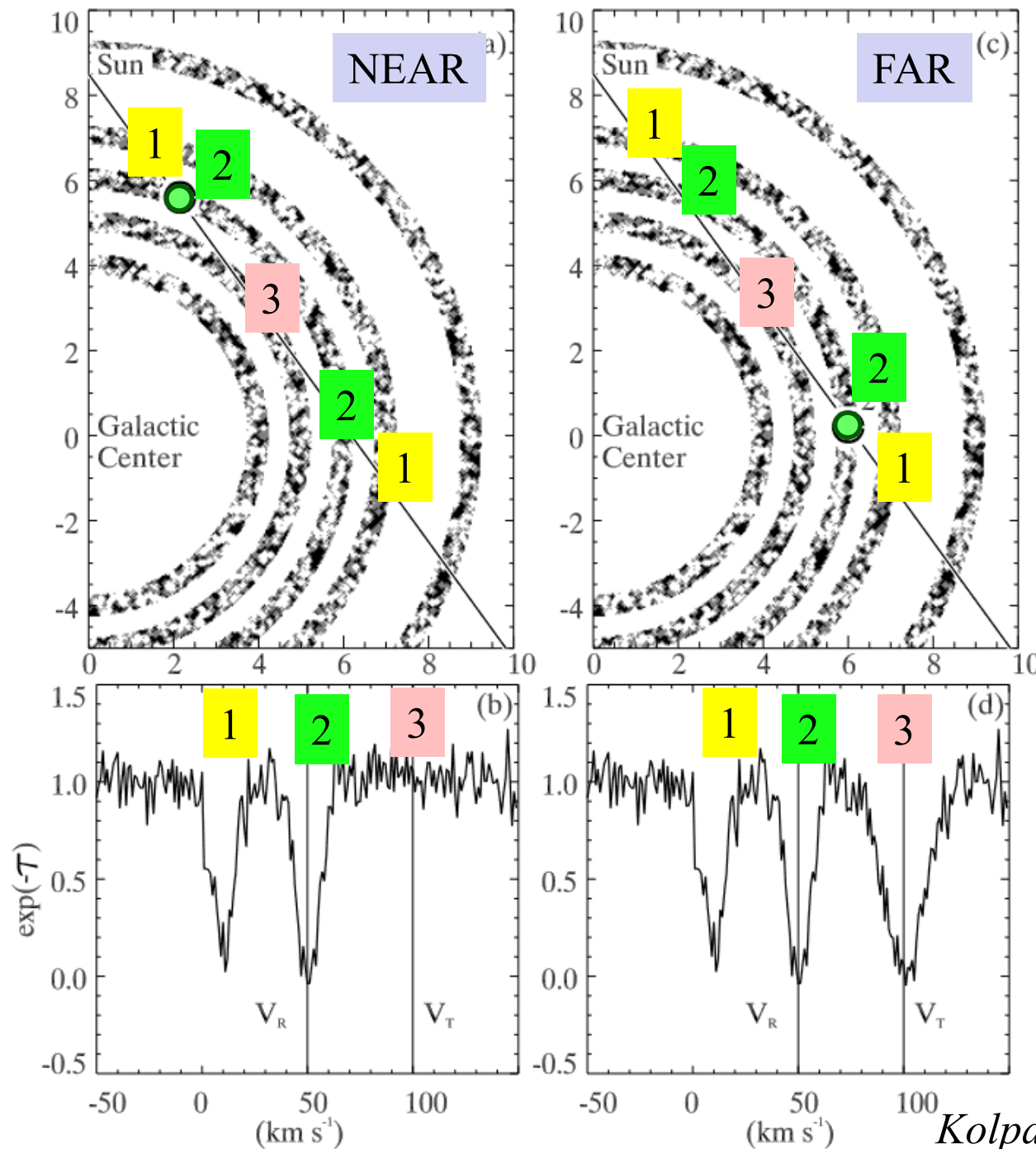


Les distances sont mal connues  
Dépendent des vitesses  
**Ambiguïté entre proche et lointain**  
pour une même vitesse

Nous ne voyons que la tranche



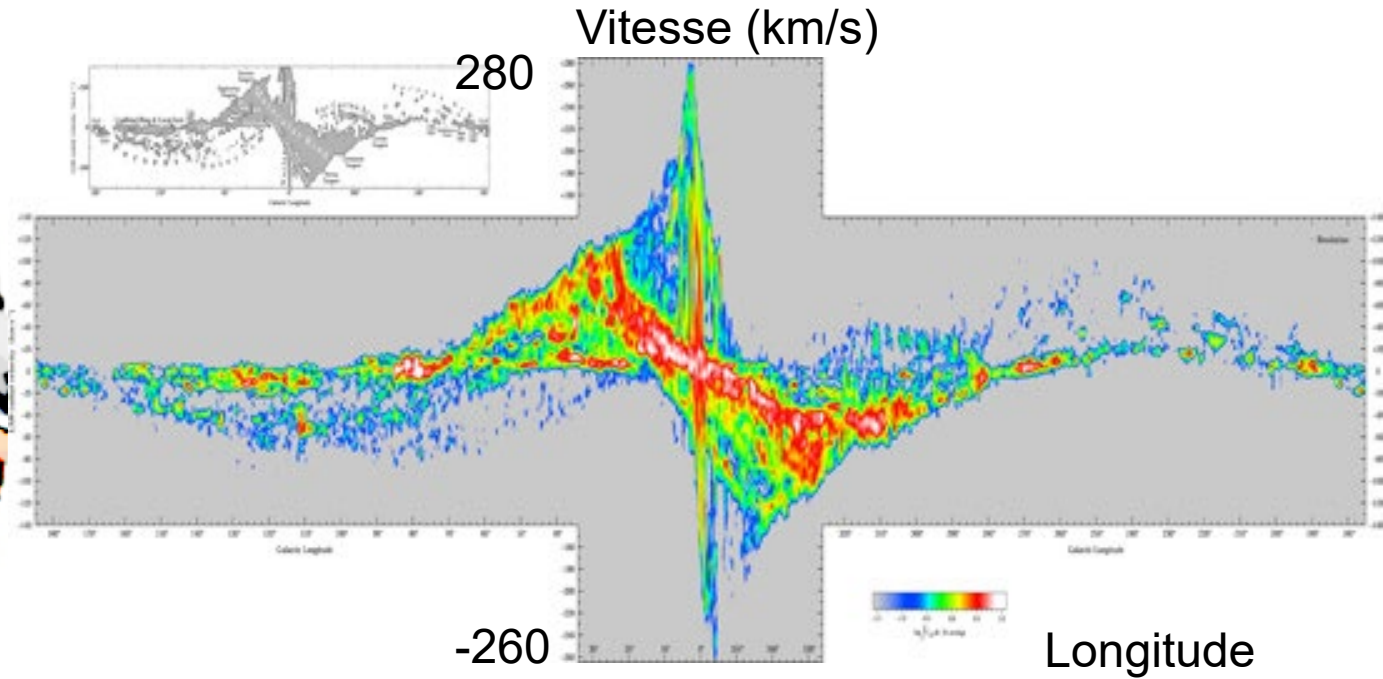
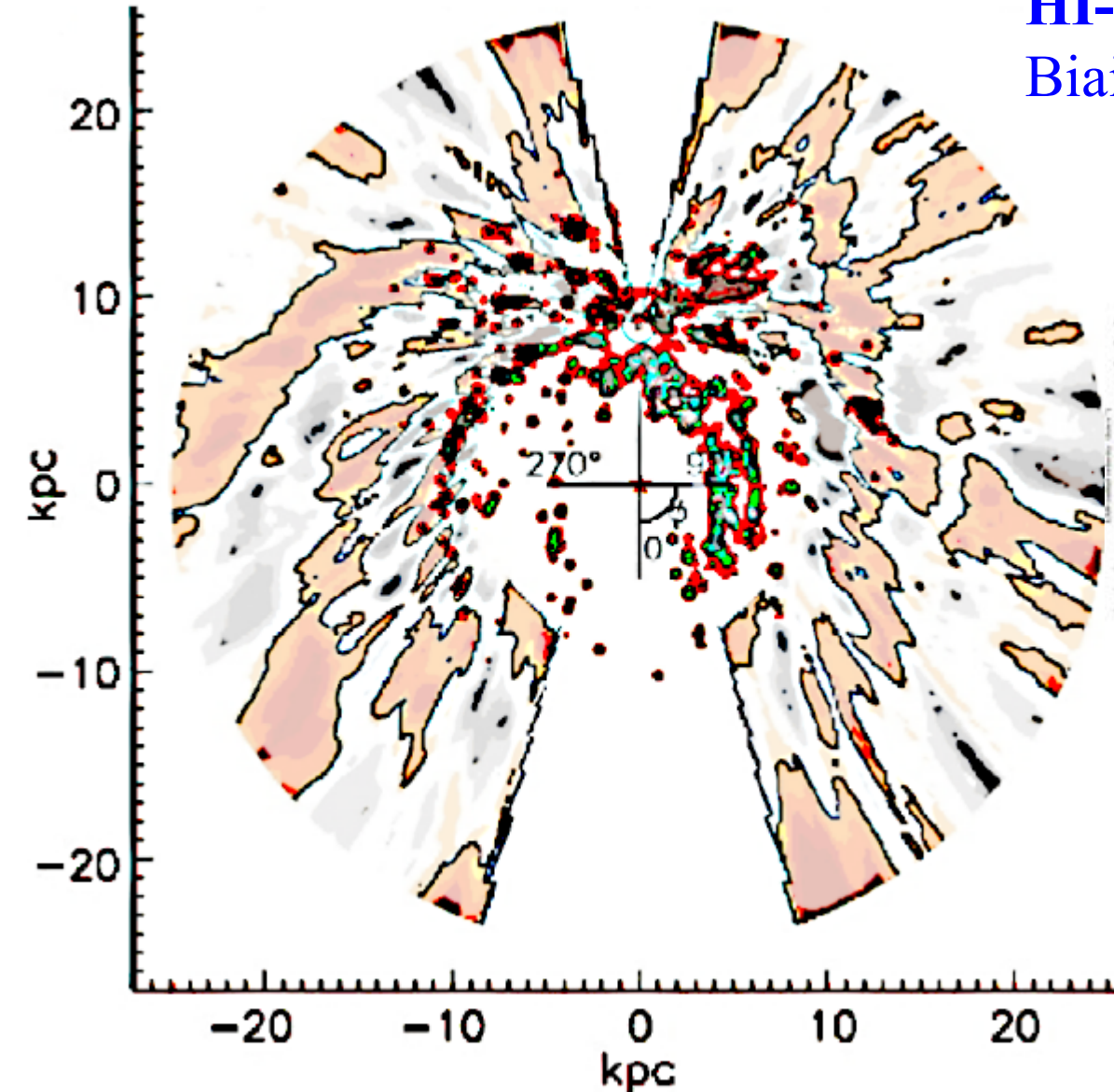
# Ambiguïté des distances



- 1 et 2 ont la même vitesse radiale alors qu'en 3 est la vitesse tangentielle, maximum capable de donner  $V(R)$
- Cette ambiguïté réside seulement à l'intérieur du cercle solaire
- Elle peut parfois être résolue, avec une association étoiles-nuages de gaz, les étoiles donnant la distance

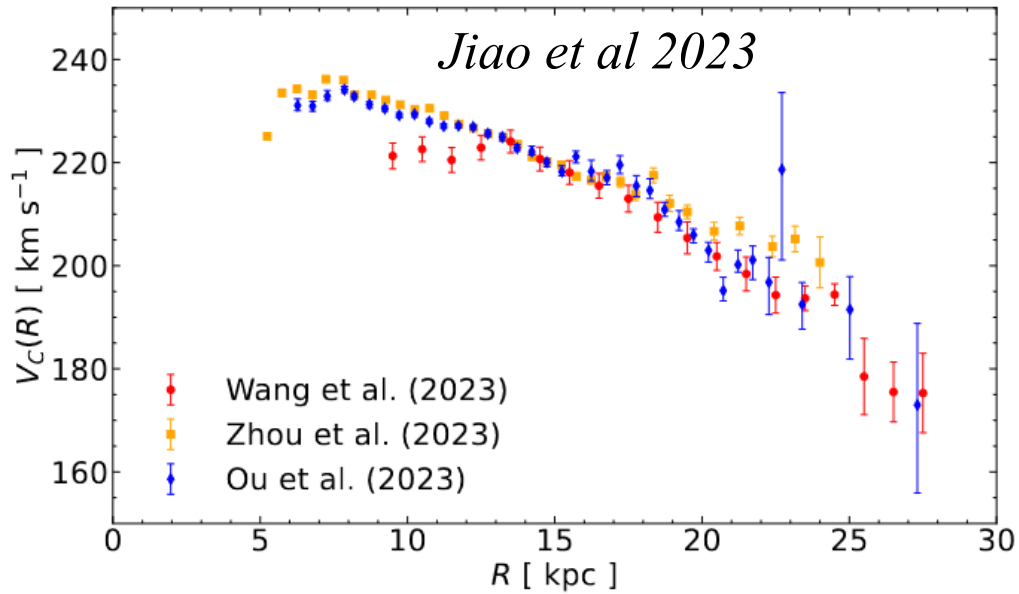
# Déprojection du gas HI, H<sub>2</sub>

HI-21cm Déprojection suspecte  
Biais de vitesses



CO traceur de H<sub>2</sub>  
Vitesses non-circulaires au  
centre ➔ barre

# Nouvelles déterminations: GAIA

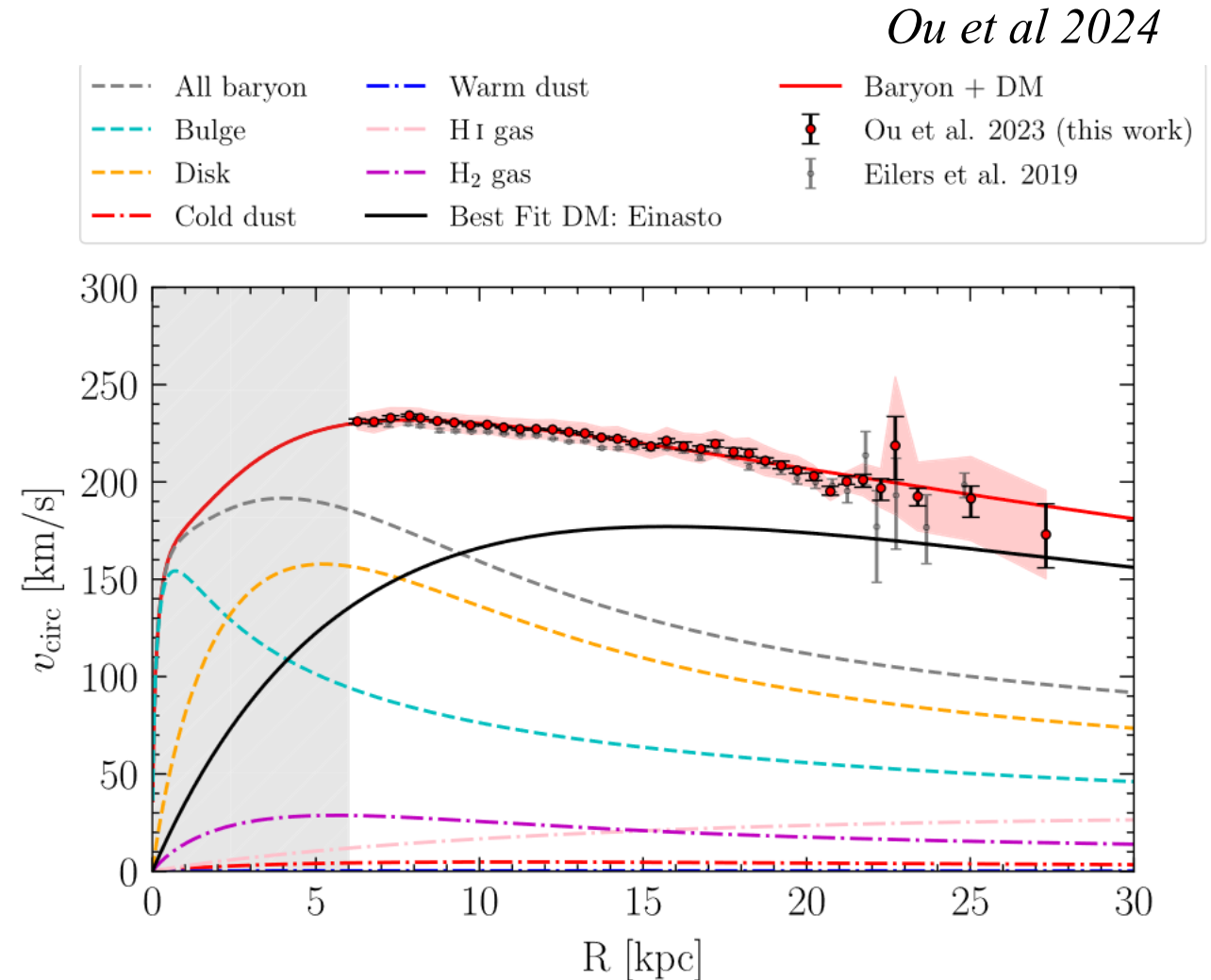


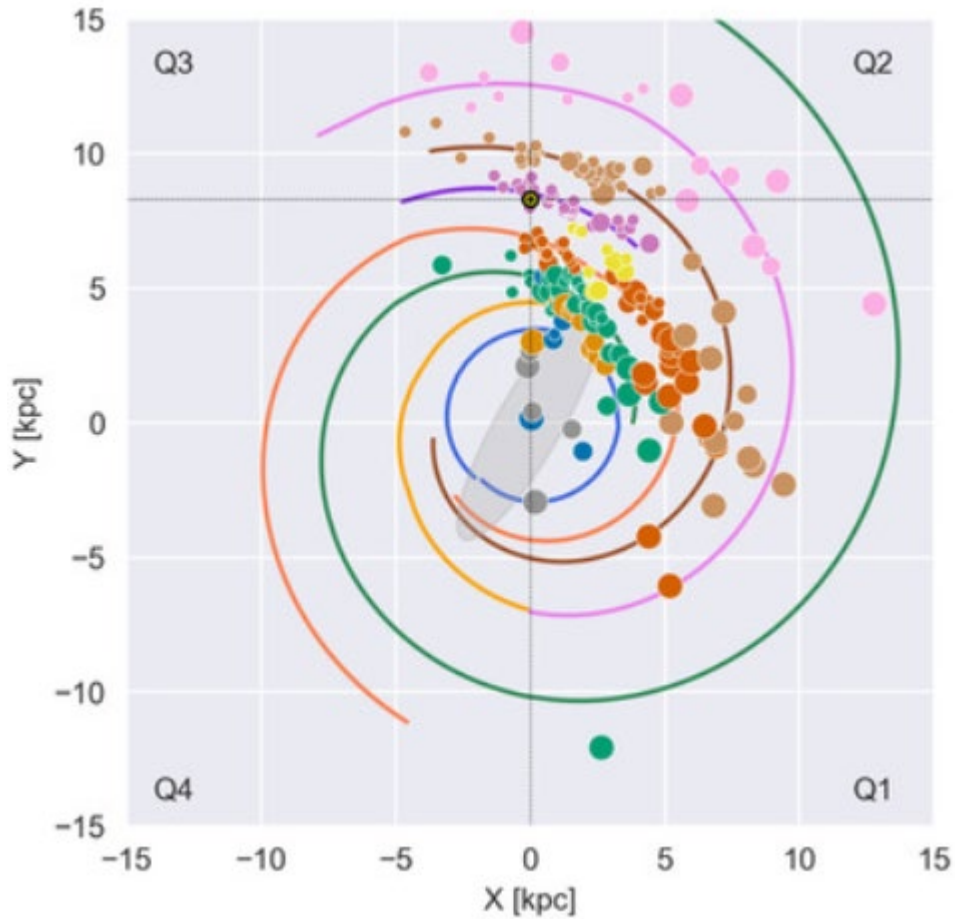
Important de déterminer la distribution de **matière noire** dans la Voie lactée

→ Détection indirecte  $\gamma$  (au centre)

→ Détection directe: densité au voisinage du Soleil

- GAIA et GRAVITY Astrométrie, vitesses propres
- Meilleures déterminations de  $R_0$ ,  $V_0$



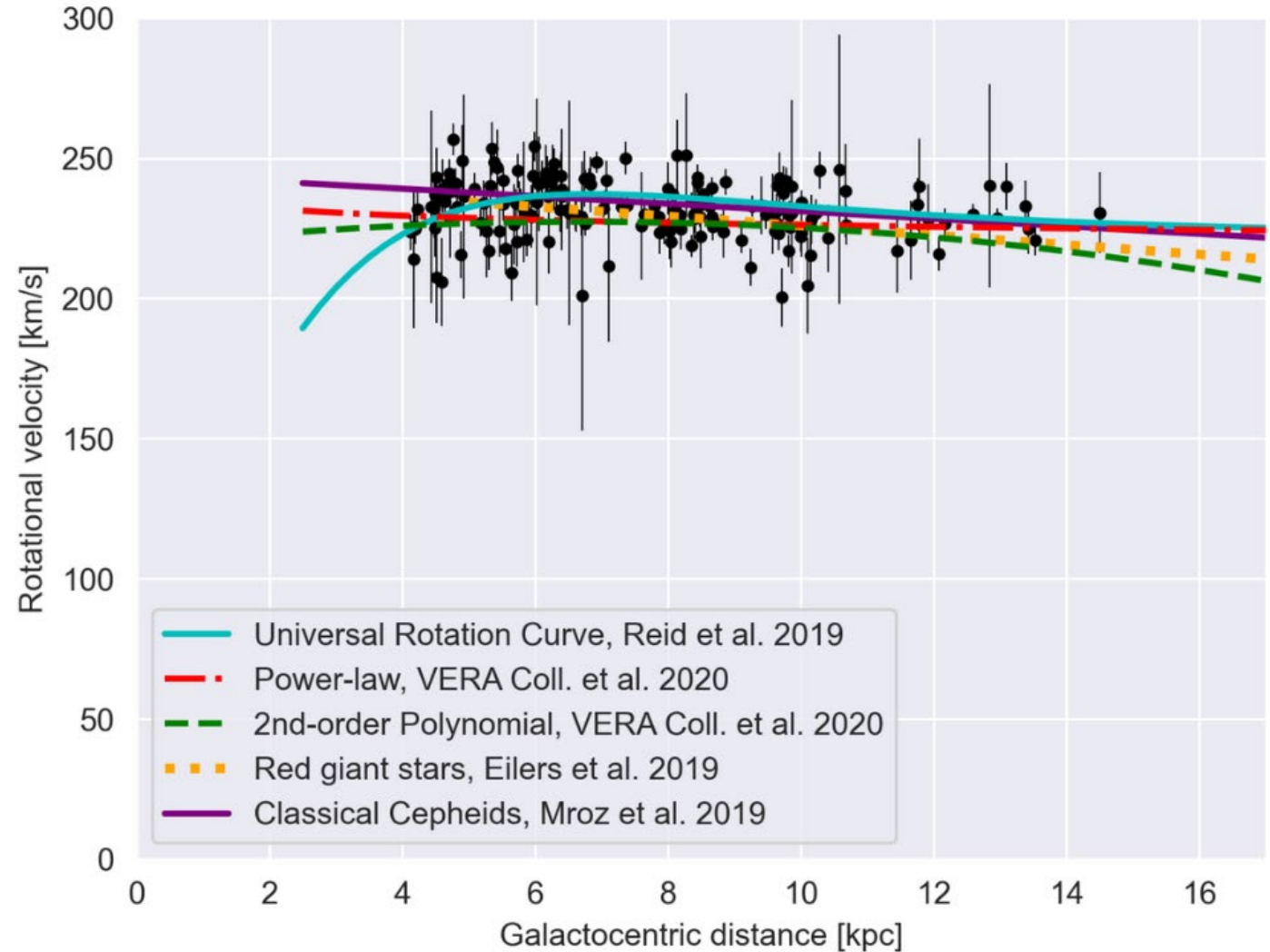


GAIA ne peut pas voir les étoiles  $> 2$  kpc  
du Soleil dans le plan  
Radio: traverse la poussière

## MASERS et VLBI

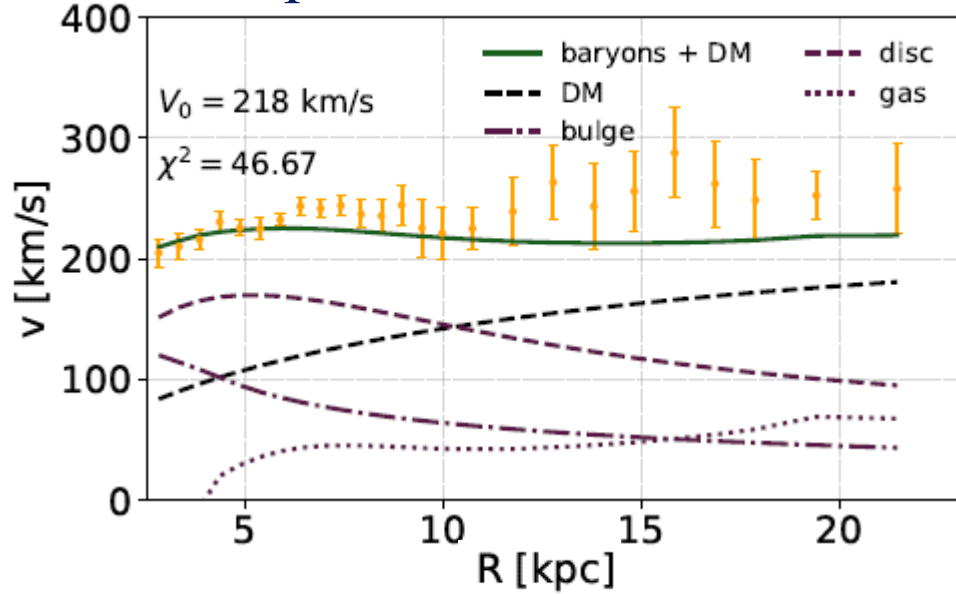
Masers OH, CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>O, SiO Radio-cm

Régions de formation d'étoiles, ou étoiles évoluées (SiO)

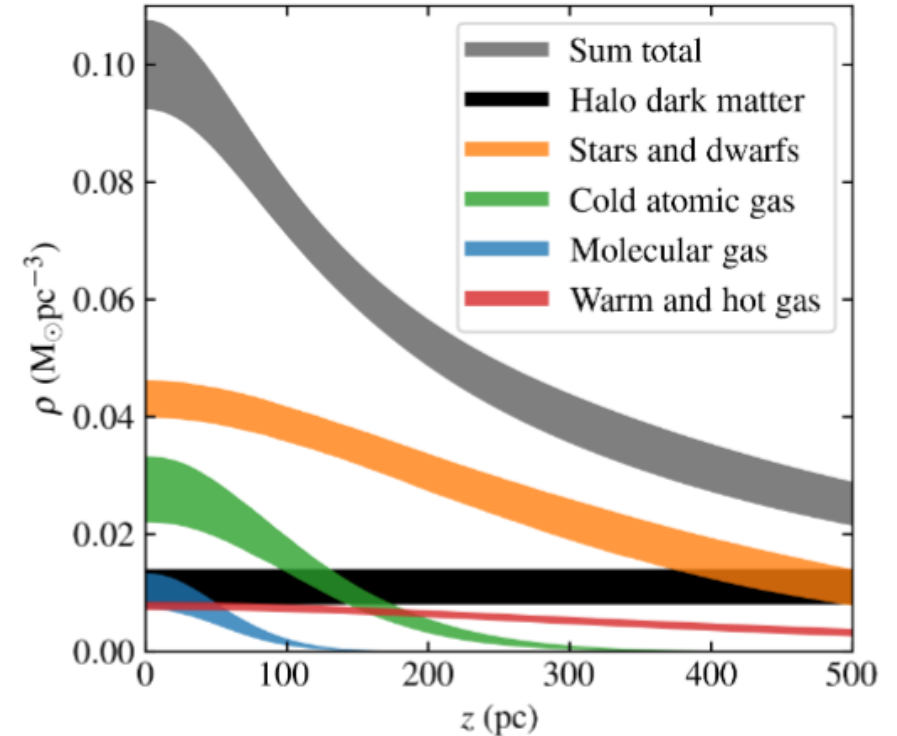


# Autres traceurs, jusqu'à $R_{\text{vir}} \sim 200\text{kpc}$

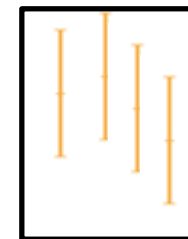
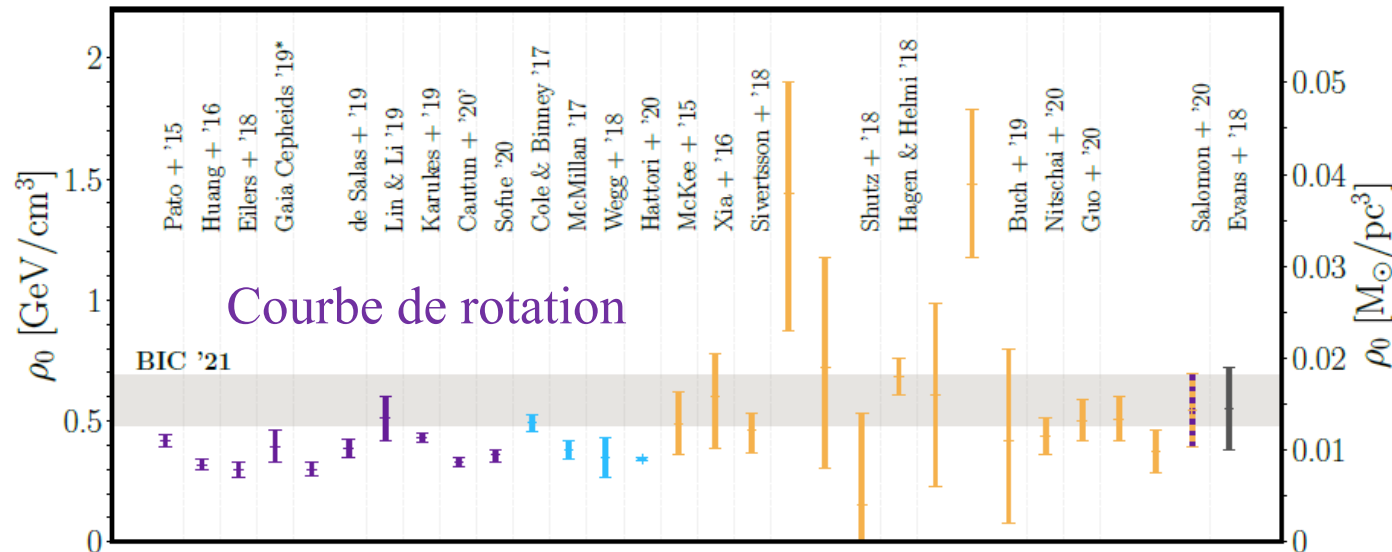
- Gaz HI, puis étoiles du halo, amas globulaires, etc..



*Benito et al 2021*



*Widmark et al 2021*

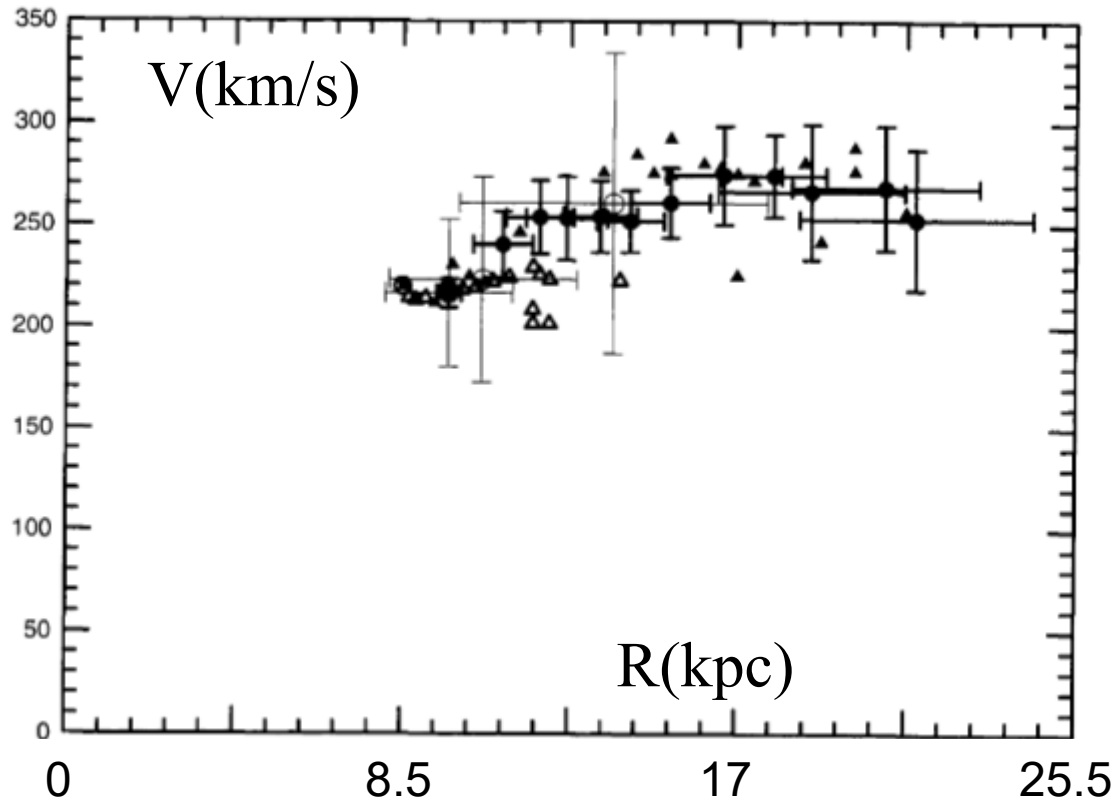


Dynamique des étoiles  
Au voisinage du soleil

BIC'21 = *Benito et al 2021*

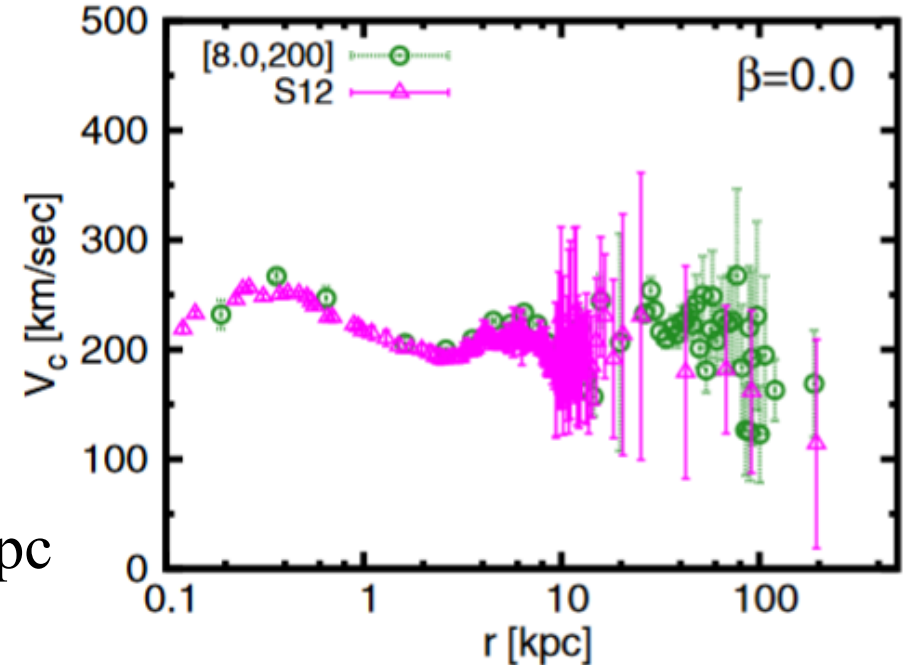
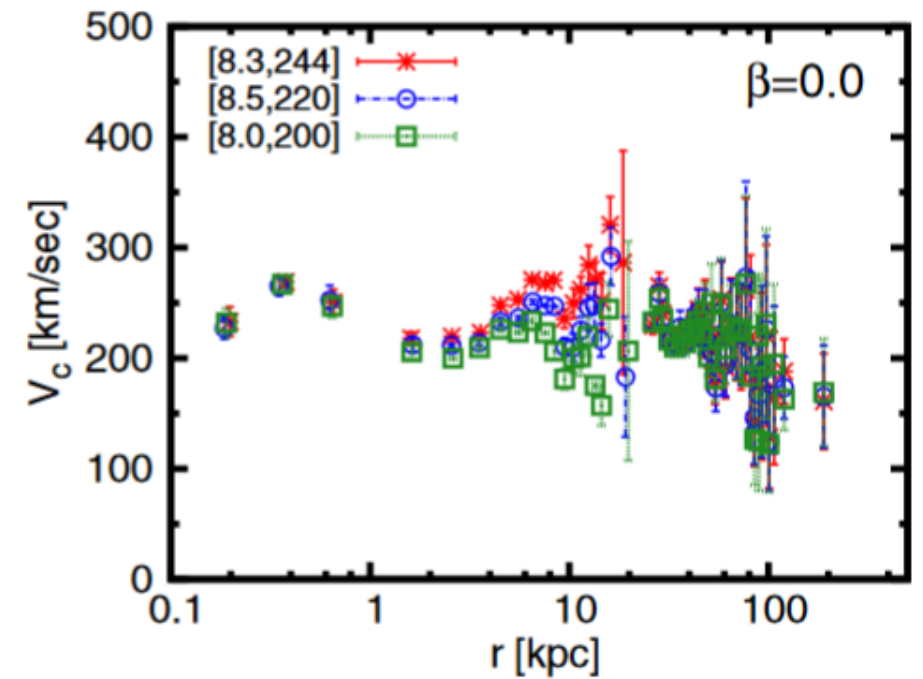
# Jusqu'à 200kpc

- Gaz HI *Honma & Sofue 1997*



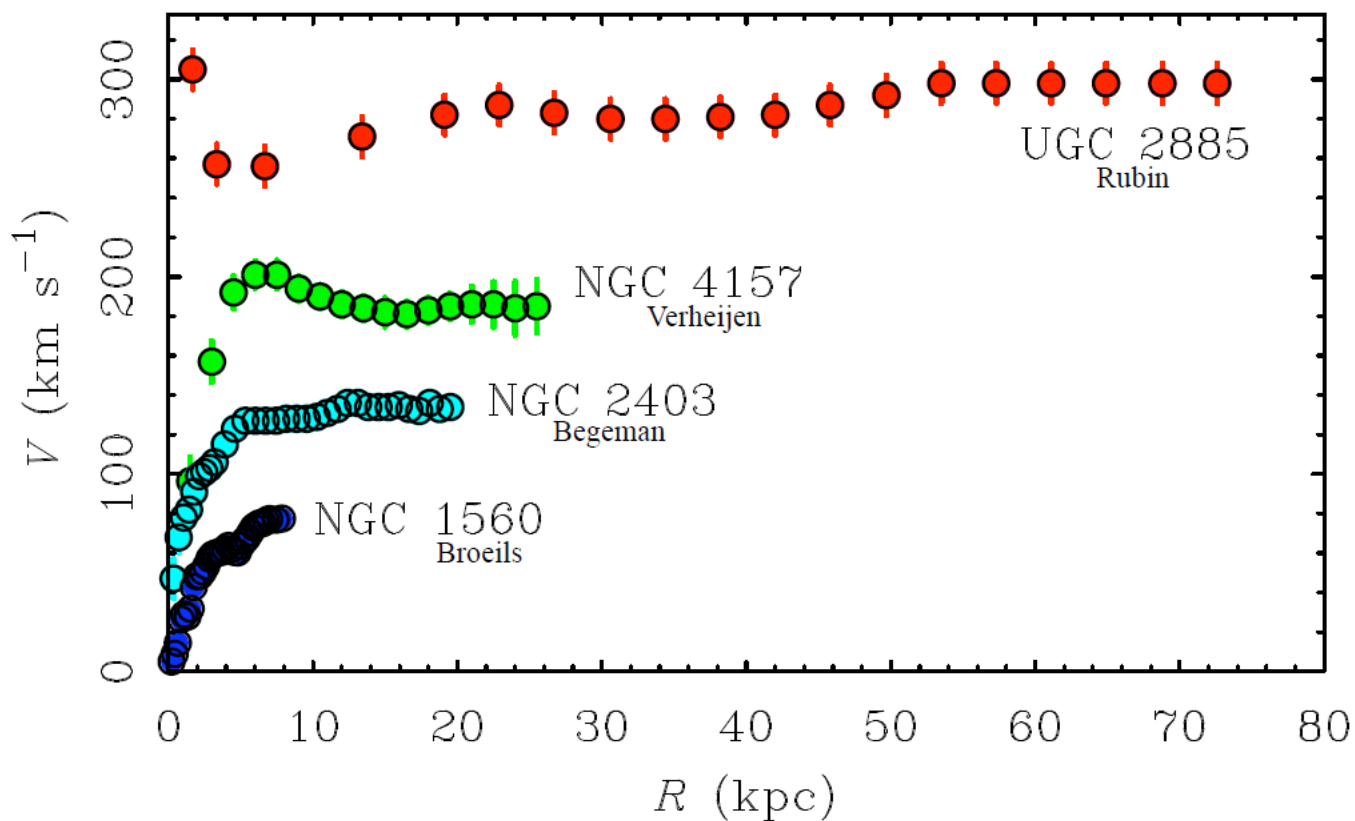
Etoiles BHB, Amas globulaires  
Courbe descend à partir de 60kpc

*Bhattacharjee et al 2014*



# Courbe Universelle

- Comment normaliser les milliers de courbes?  
Corrélation avec la luminosité totale



UGC 2885



NGC 4157



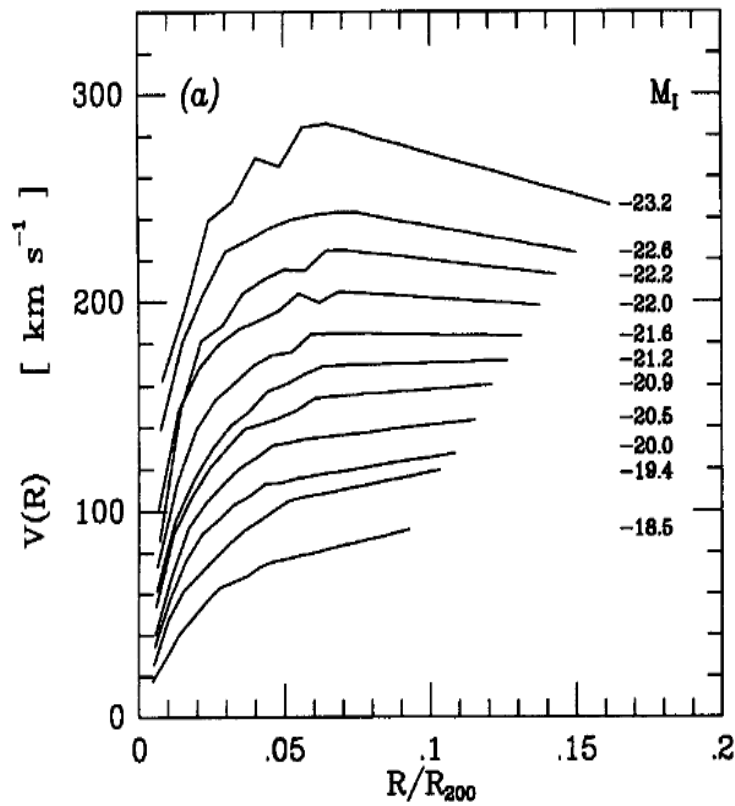
NGC 2403



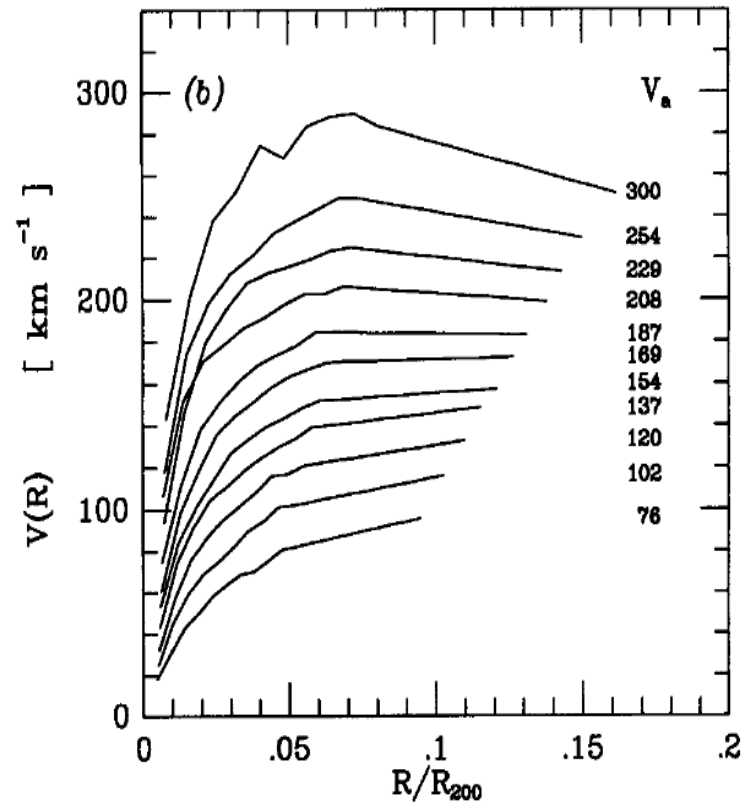
NGC 1560

Naine Irr





Variations avec la  
Luminosité



Variations avec la  
Vitesse max

**La forme des courbes de vitesses  
normalisées dépendent de la masse**

## Normalisation

Les rayons sont en unités de  $R_{200}$ ,  
le rayon englobant une surdensité  
moyenne de 200, qui représente la  
longueur d'échelle caractéristique  
de la distribution de matière noire

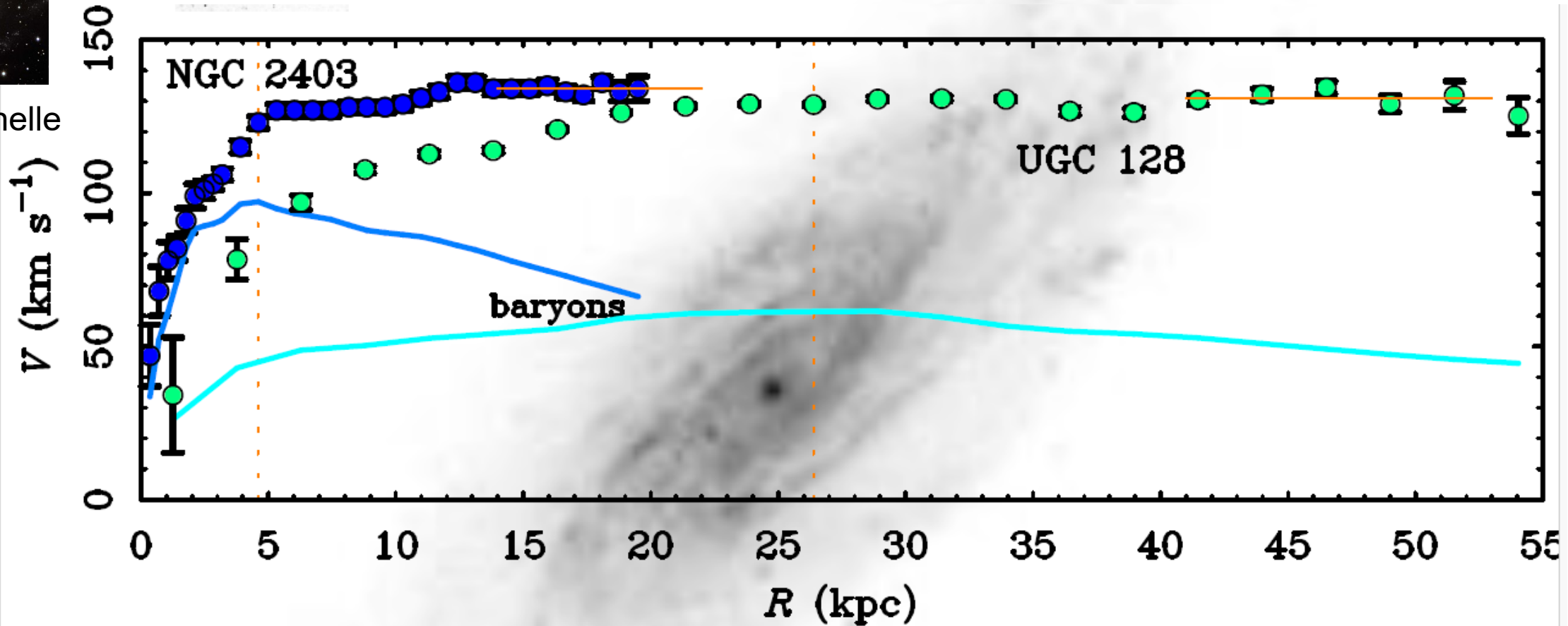
*Persic et al 1996*

# Deux galaxies extrêmes en brillance de surface



A la même échelle

NGC2403  
HSB  
Haute  
Brillance



Deux galaxies de même luminosité,  
Et même Vitesse  $V_f$ , mais  $R_d$  et  $\Sigma_b$  différents  
 $M_b$  identique mais pas  $M_{DM}$

UGC 128  
LSB  
Faible brillance  
de surface

# Normalisation à $R_d$ disque exponentiel

Plusieurs façons de faire

--disque maximum

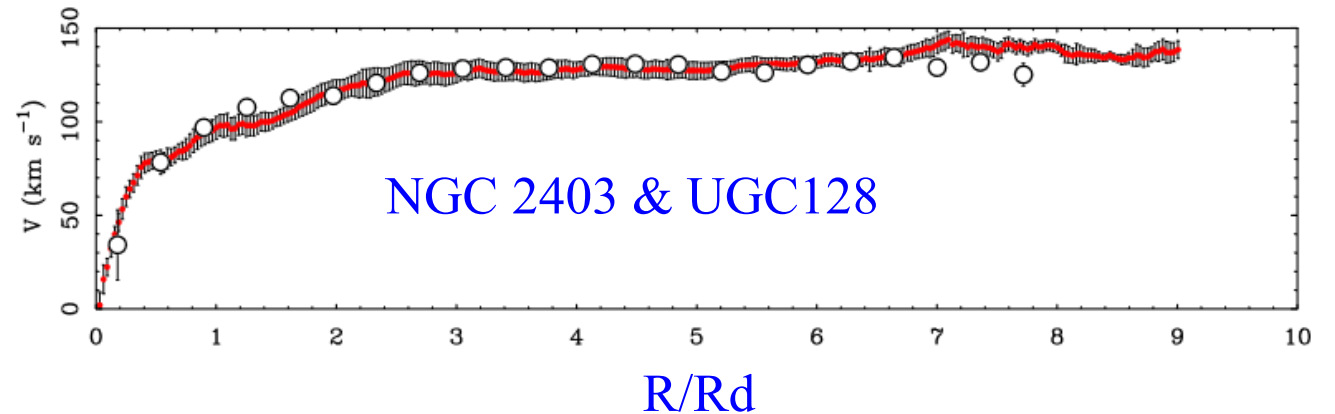
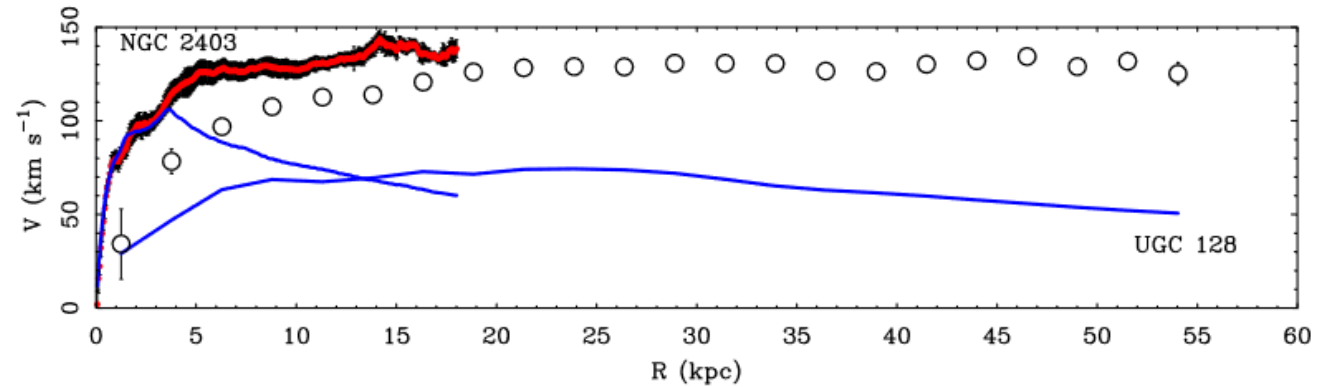
-- même halo noir

-- normalisation au disque optique

$R/R_d$

Même  $V_f$ , et même forme

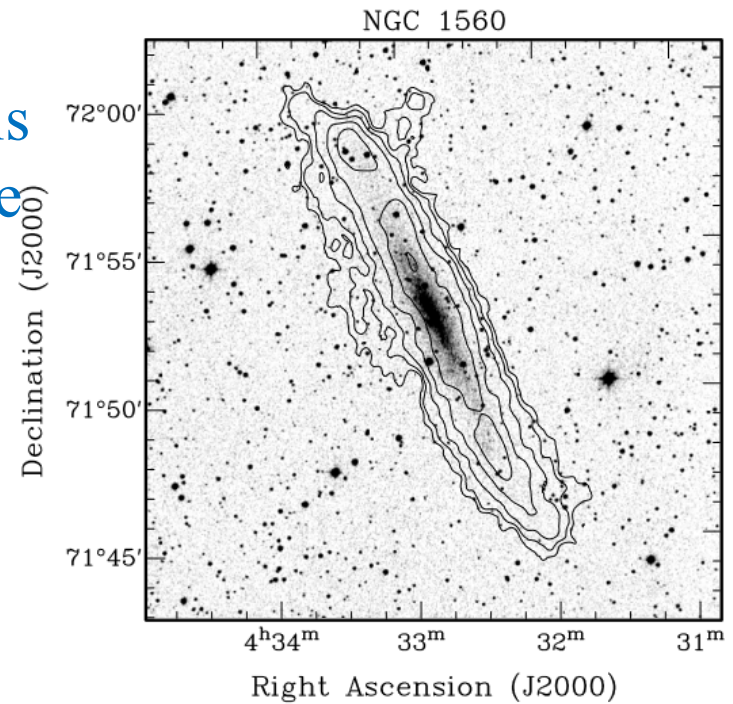
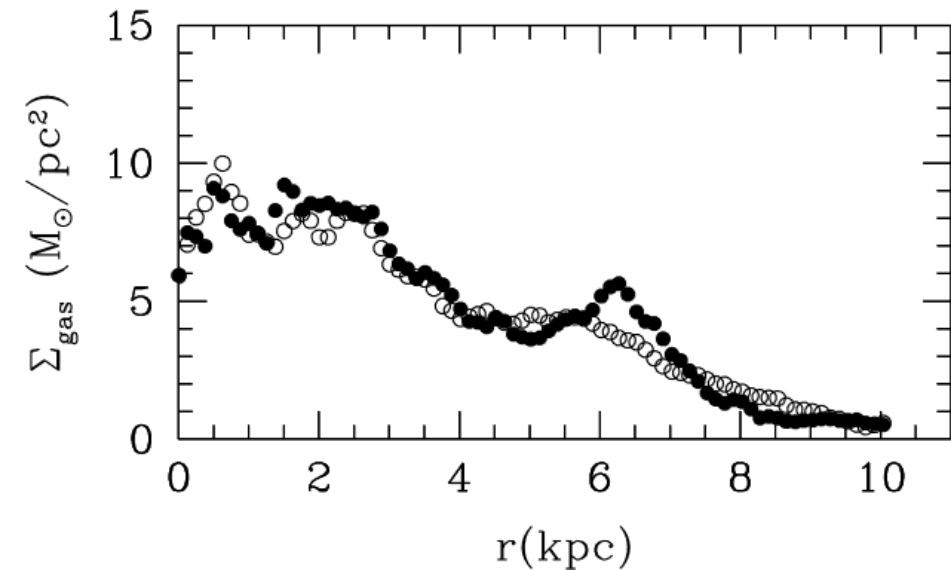
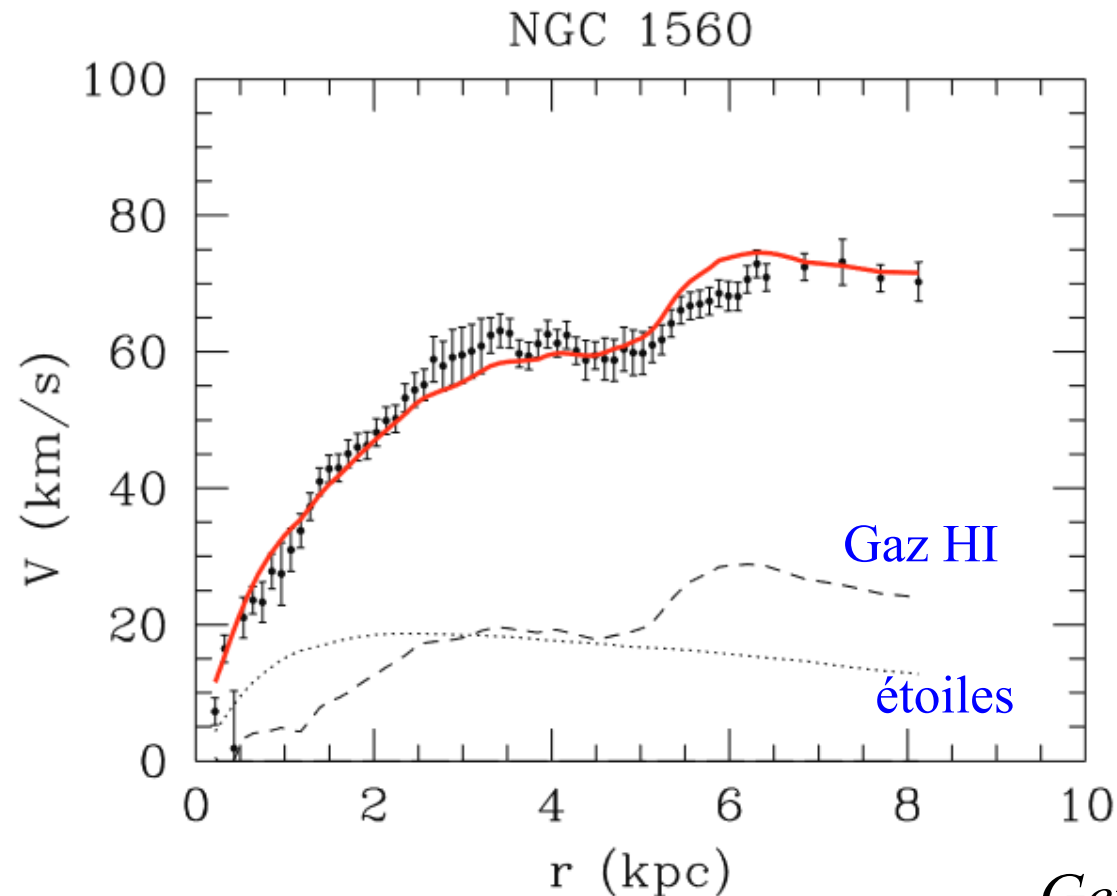
→ Halo noir beaucoup plus massif  
pour LSB ( $R_d \times 3$ )



# Couplage MN-baryons: Galaxies naines

Les ondulations des courbes de rotation suivent les baryons: une fois mis à l'échelle (**M/L cst**), on retrouve la courbe de rotation observée  
Pourtant la matière noire domine le potentiel

→ Gravité modifiée?



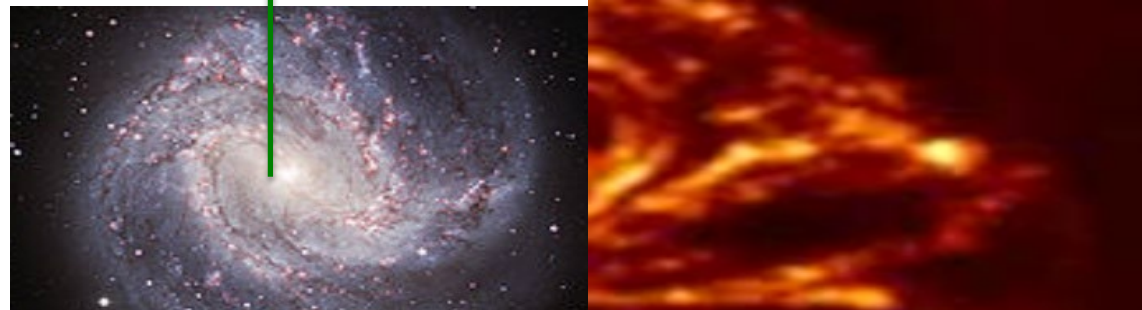
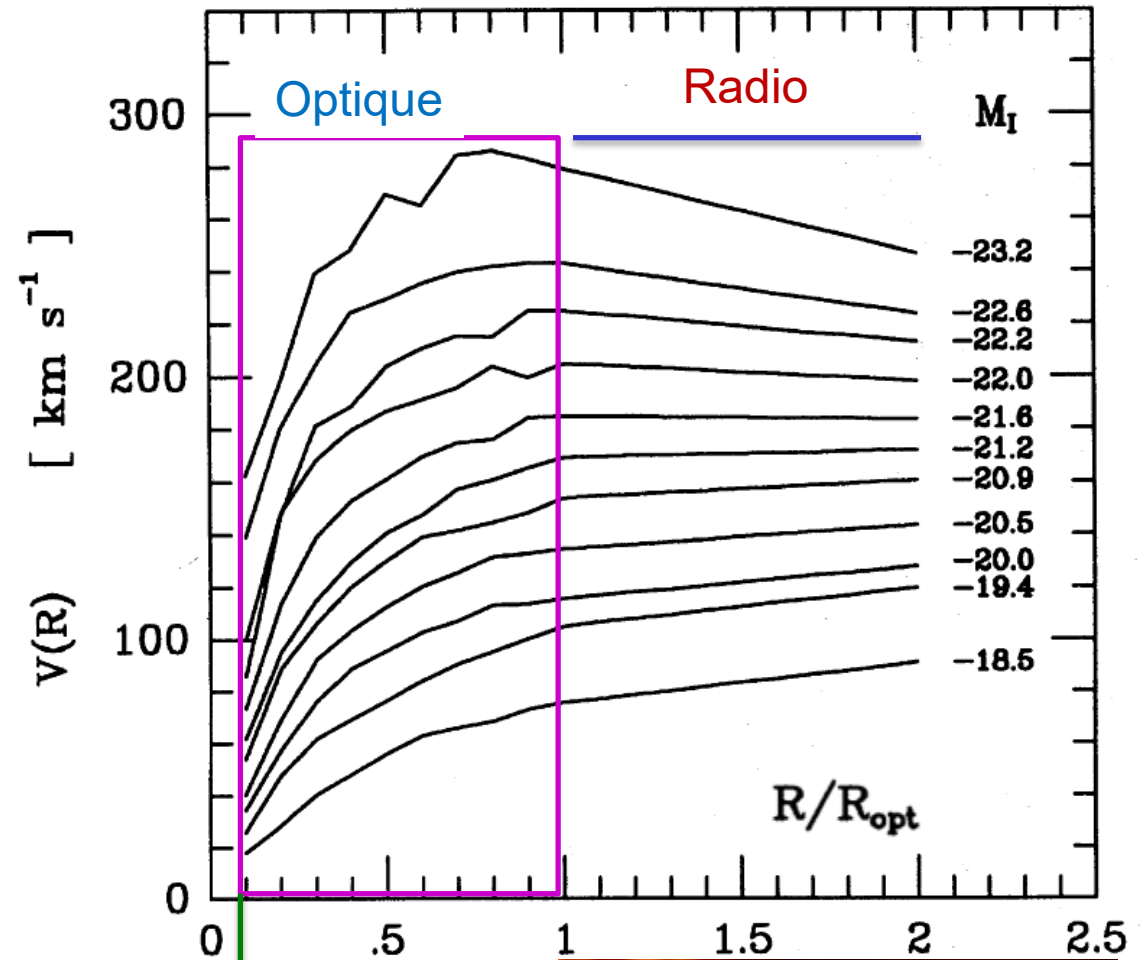
*Gentile et al 2010*

# Courbe de rotation universelle

La masse totale du halo noir  
est mal connue

La masse croît comme  $R$   
Ou s'arrêter?

L'universalité est obtenue  
si ce sont les baryons  
qui déterminent la  
distribution de masse totale



# Rotation et types de galaxies

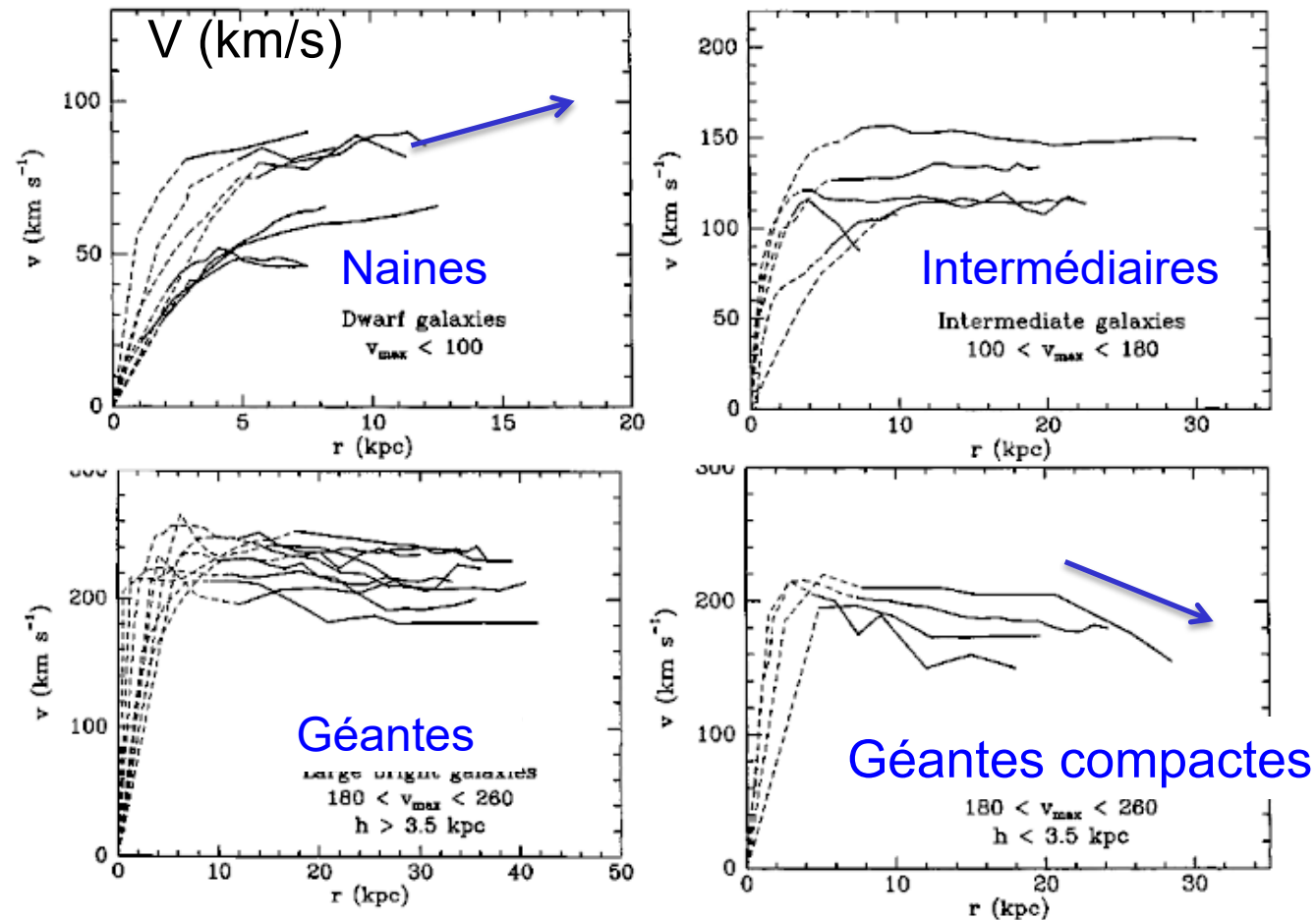
Les courbes de rotation ne sont pas toutes plates  
Fin de la conspiration?

DDO154, naine

Andromède

N2403

N2683



# Rotation et Galaxies Elliptiques

Historiquement, elliptiques aplaties  
par rotation, comme pour les spirales

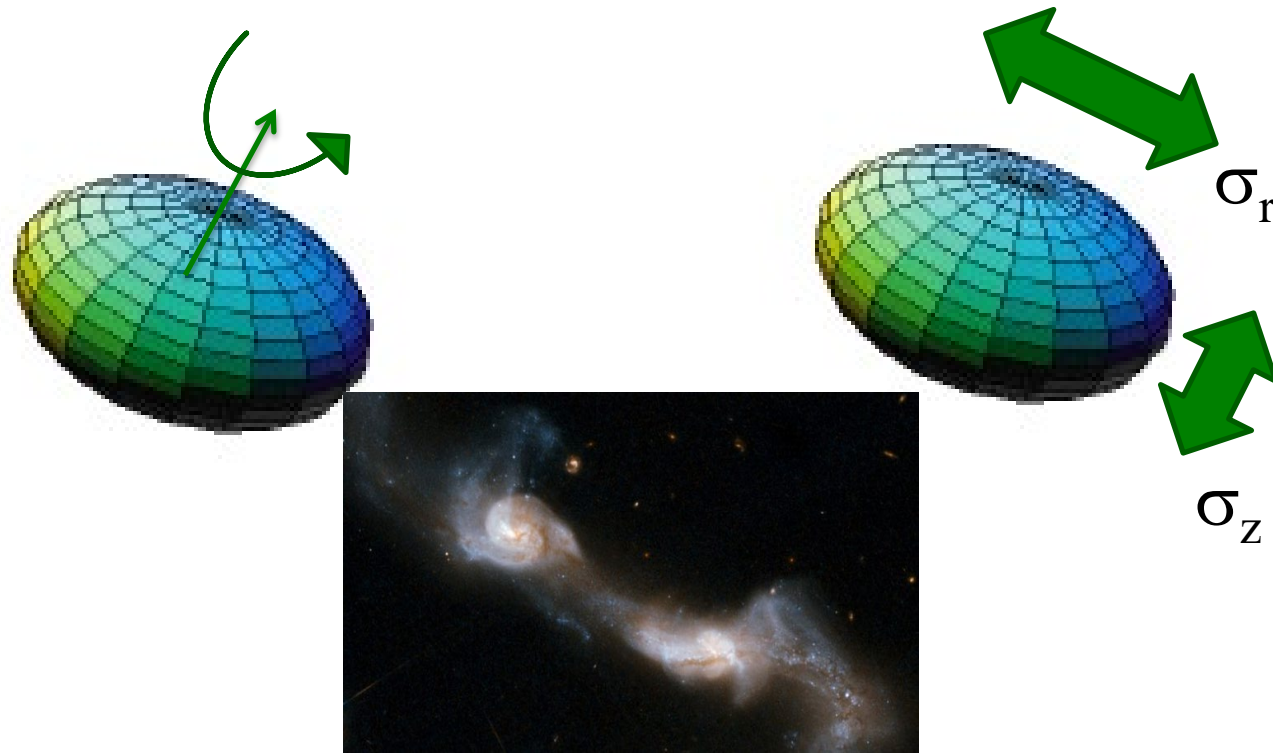
En 1978, on comprend que ce n'est pas le cas  
(Illingworth et al 1978)

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

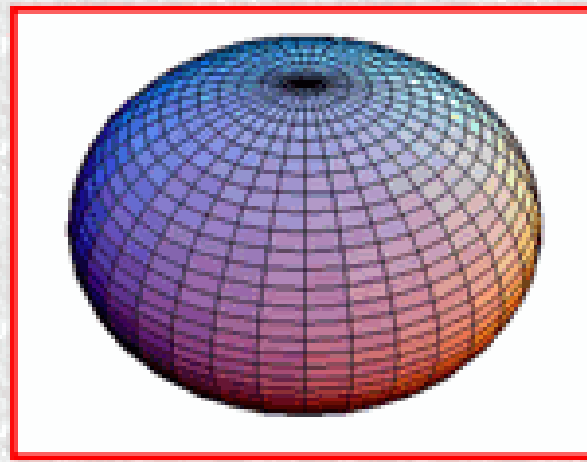
Sphéroïdes de révolution  
→ 2 axes égaux

Les grands axes égaux=  
**Oblat**, disque, galette

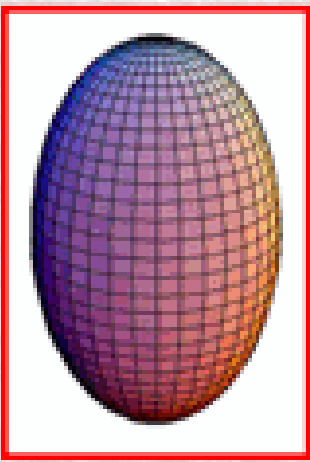
Les petits axes égaux=  
**Prolat**, cigare, ballon de rugby



Oblate

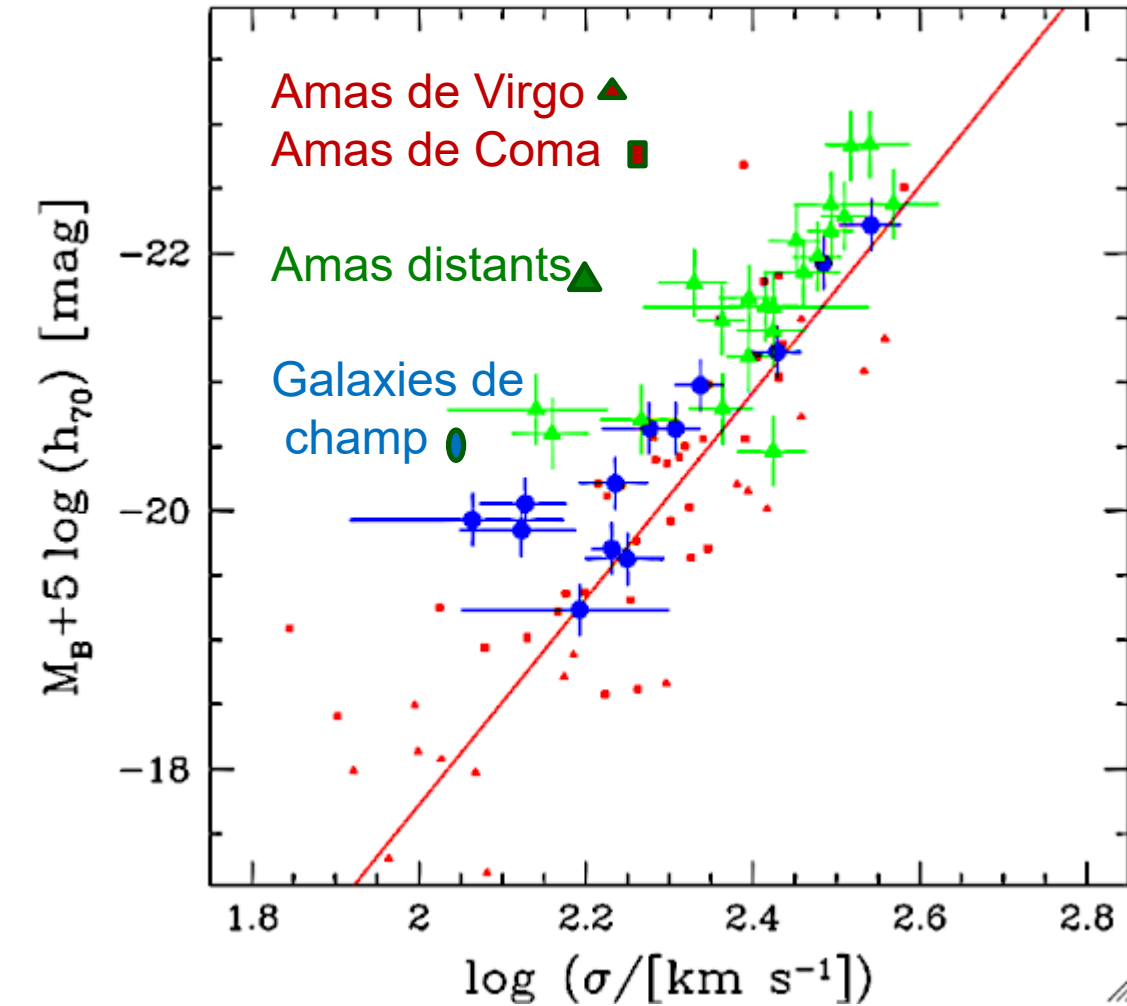


Prolate

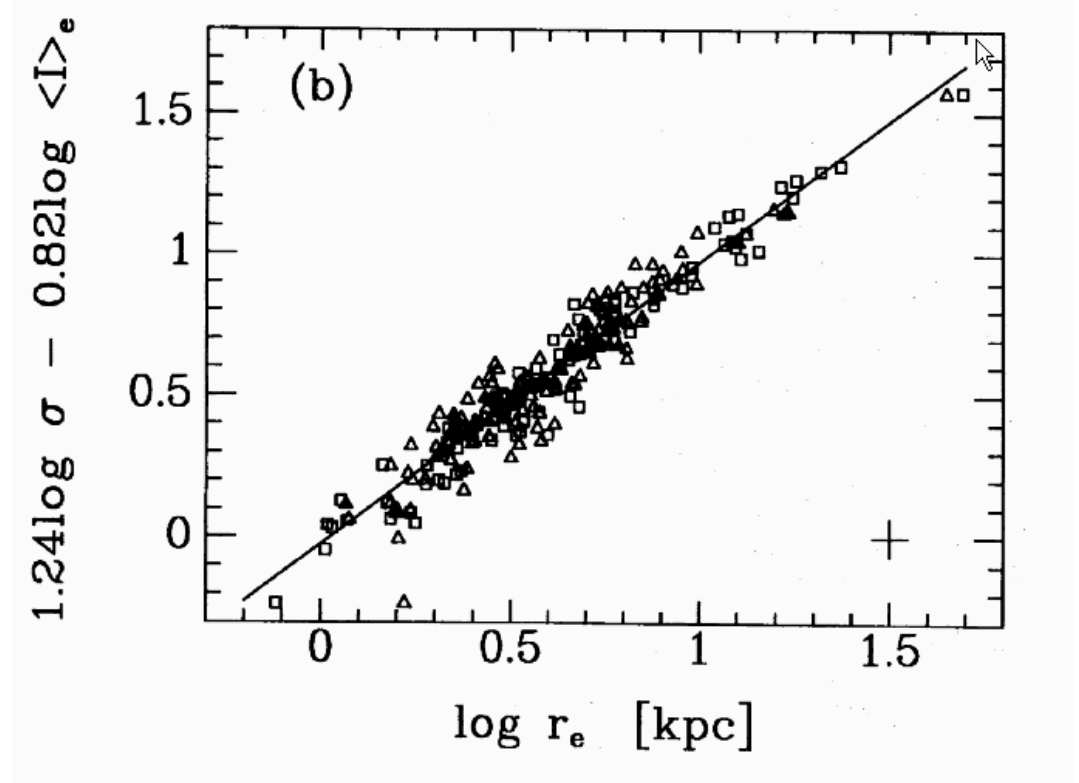


# Relation Faber-Jackson et Plan fondamental

Similaire à loi de Tully-Fisher

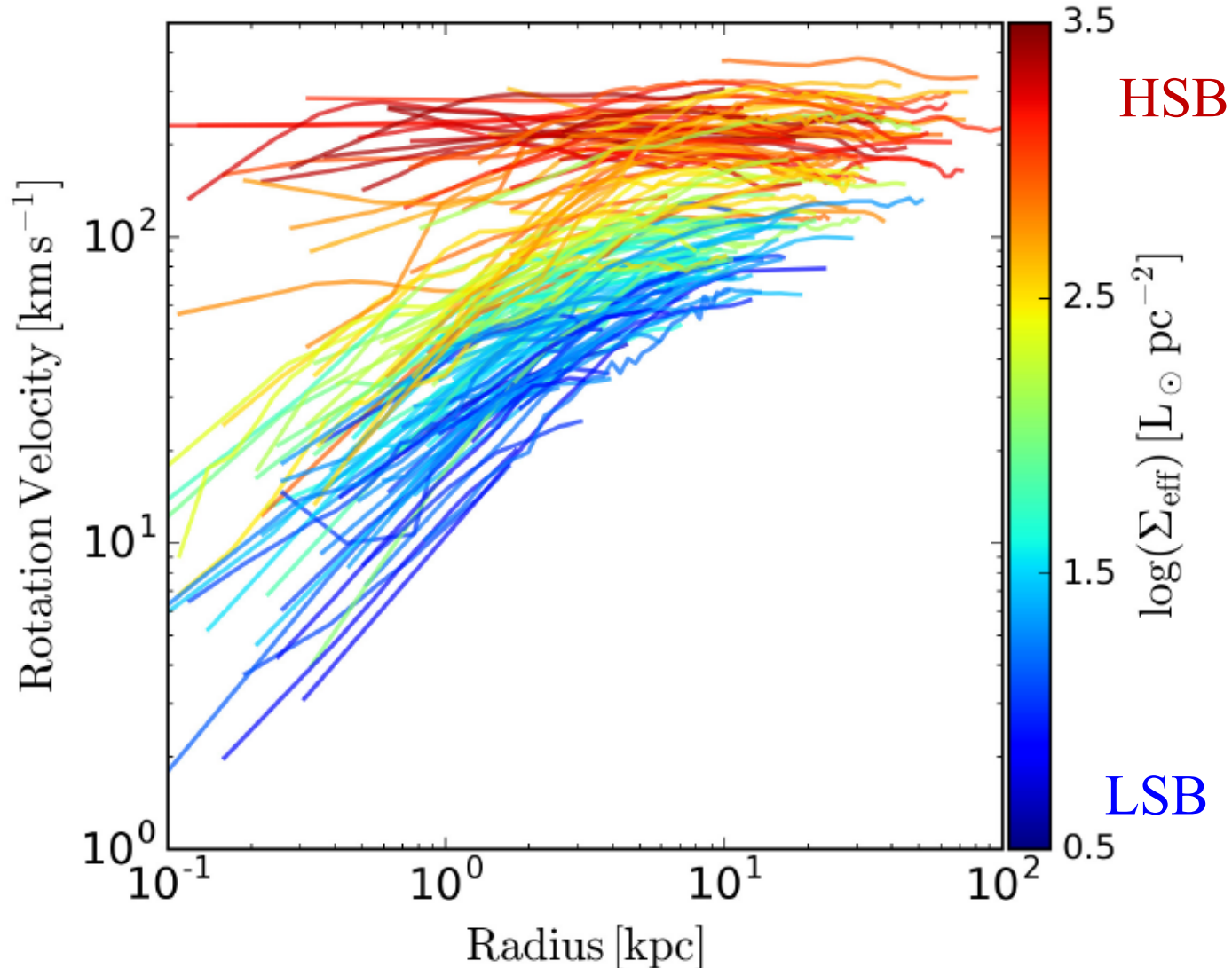


*Ziegler et al 2005*



*Djorgovski et al 1987*

# Lois d'échelle: densité de surface $\Sigma_{\text{eff}}$



La luminosité détermine la courbe de rotation

$$V(R/R_d, L/R_d^2)$$

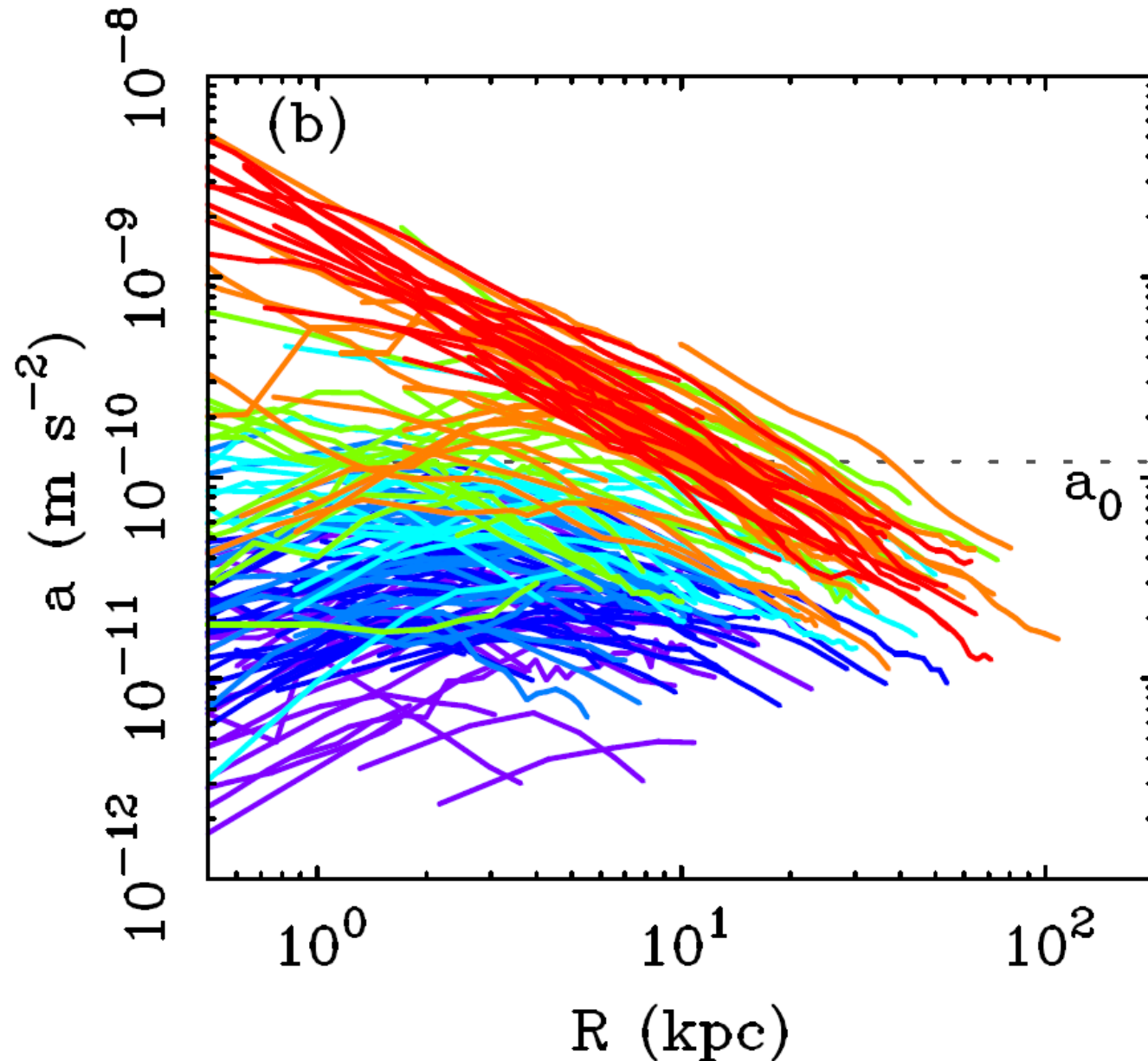
**Mais aussi la densité de surface  $\Sigma_b$  à  $R_{\text{eff}}$**

Rayon  $R_{\text{eff}}$ , de demi-Luminosité

$$\Sigma_{\text{eff}} = 0.5 L(3.6\mu) / (\pi R_{\text{eff}})^2$$

**→ Les baryons sont la clef**

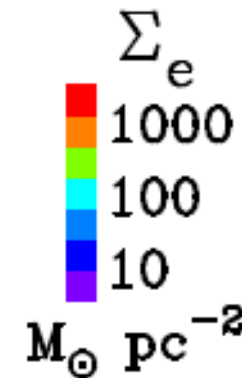
# Accélérations $a = V^2/R$



Accélération versus rayon

Accélération critique  $a_0$   
 $a_0 = 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$

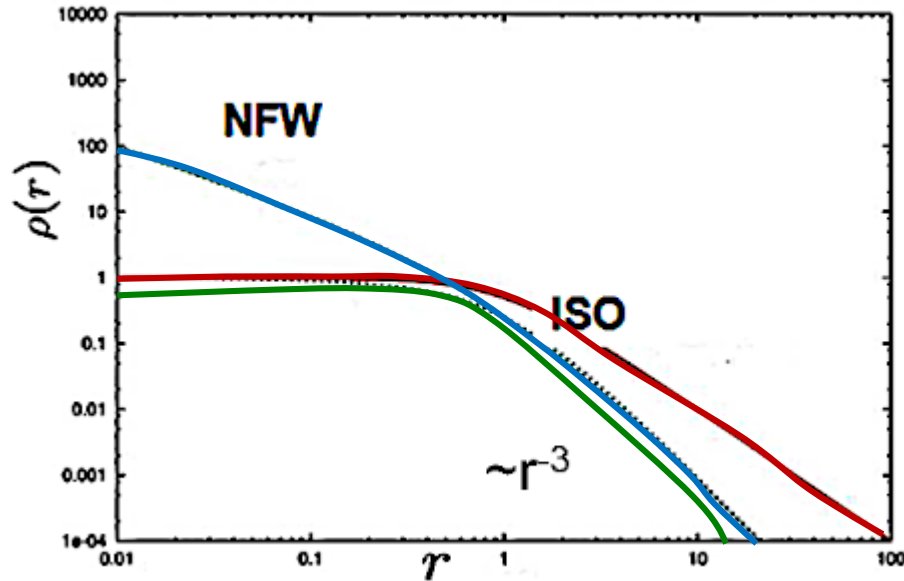
Dépend de la densité de surface  
des baryons  $\Sigma_{\text{eff}}$   
Au rayon  $R_{\text{eff}}$  de demi-luminosité



→ Gravité modifiée?

# Modélisation des halos noirs

- Contribution des étoiles, disque exponentiel (proche infrarouge)
- Contribution du gaz, HI (en  $1/R$ ), CO (exponentiel)
- Contribution de la matière noire



NFW

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_0)(1 + (r/r_0)^2)}$$

Profil prédit par simulations numériques  
Navarro, Frenk & White (1997), NFW

Isotherme

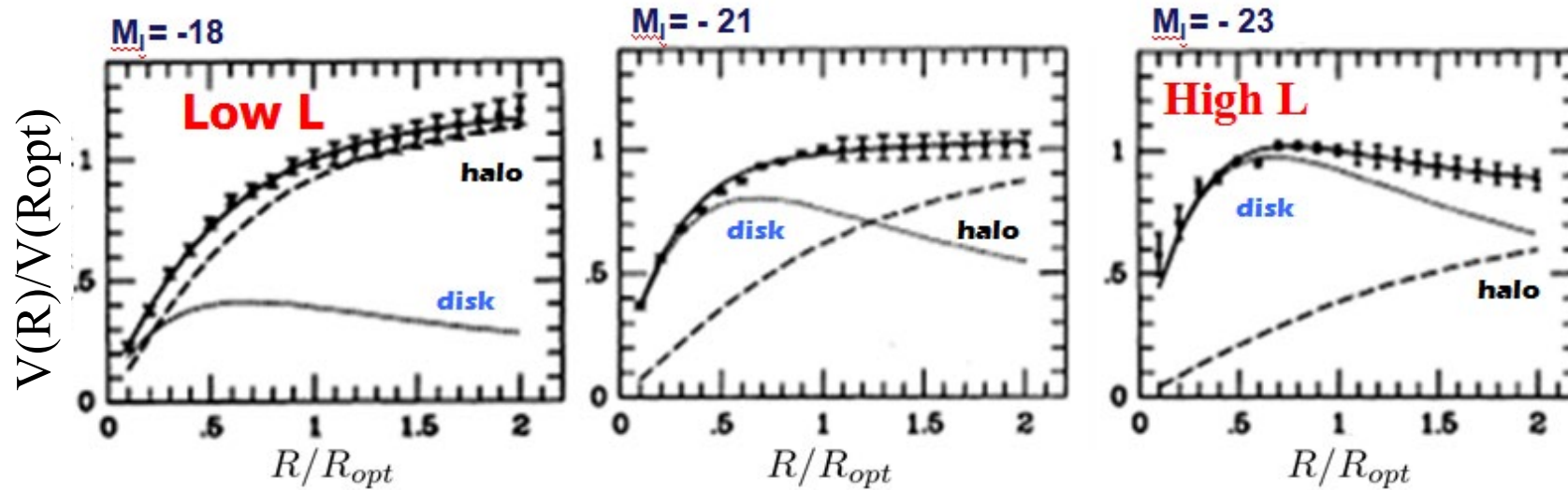
$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + (r/r_0)^2}$$

Burkert

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(1 + r/r_0)(1 + (r/r_0)^2)}$$

$$V^2(\text{obs}) = V^2(\text{étoiles}) + V^2(\text{gaz}) + V^2(\text{halo})$$

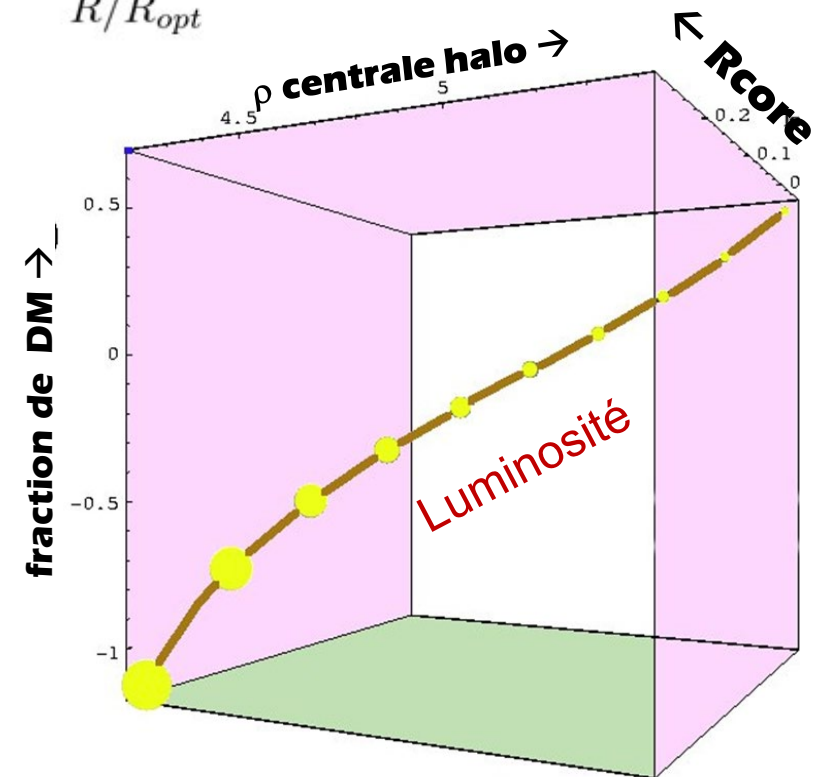
# Résultats des modèles



La forme des courbes est déterminée par la luminosité

Les petites galaxies ont plus de matière noire en proportion, avec une densité plus grande  $\rho_0 \propto 1/r_0$

- *Persic et al 96, Salucci et al 2007*

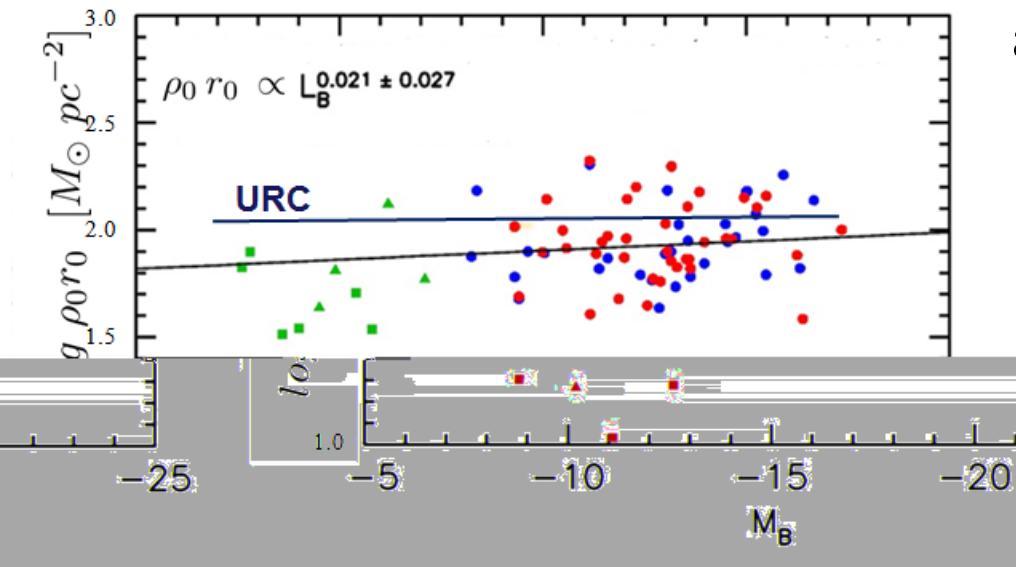


# La densité de surface au centre $\rho_0 r_0$ est constante pour le halo des spirales

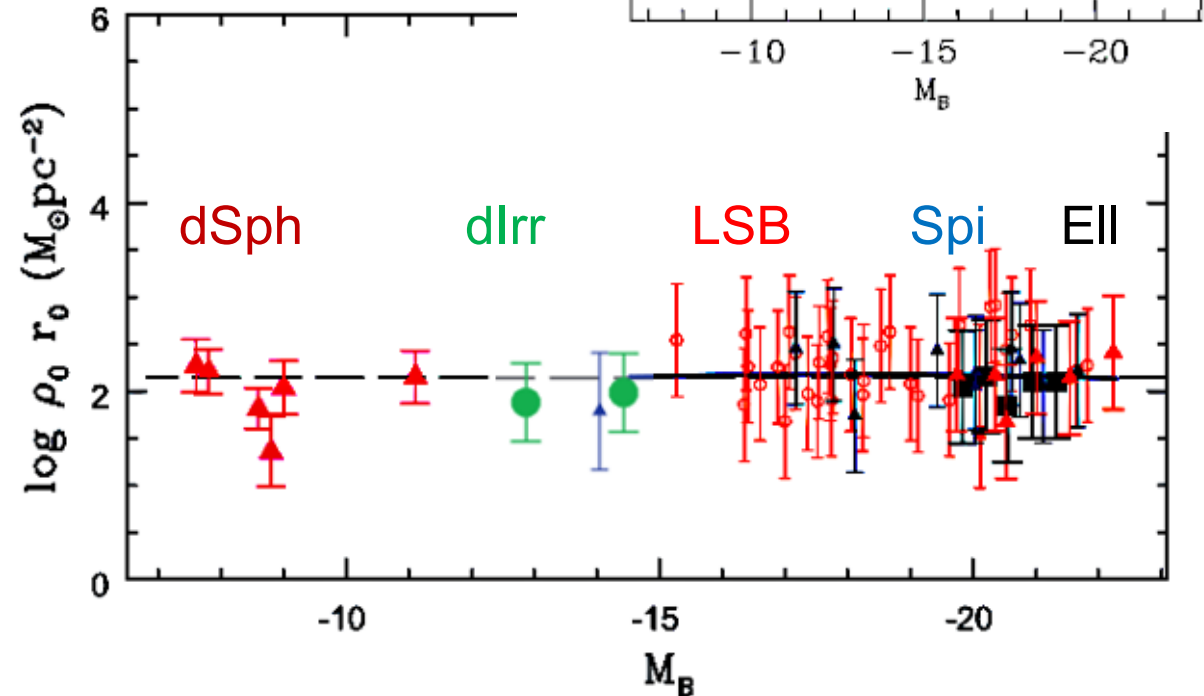
Sur 15 magnitudes, soit 6 ordres de grandeur en luminosité

$$\Sigma_0 = \rho_0 r_0 = 150 \text{ M}_\odot/\text{pc}^2 \quad \text{équivalent à } a_0$$

Le contraire de  $\Sigma^*$  qui croît avec  $M_*$



$$a = GM/r^2$$

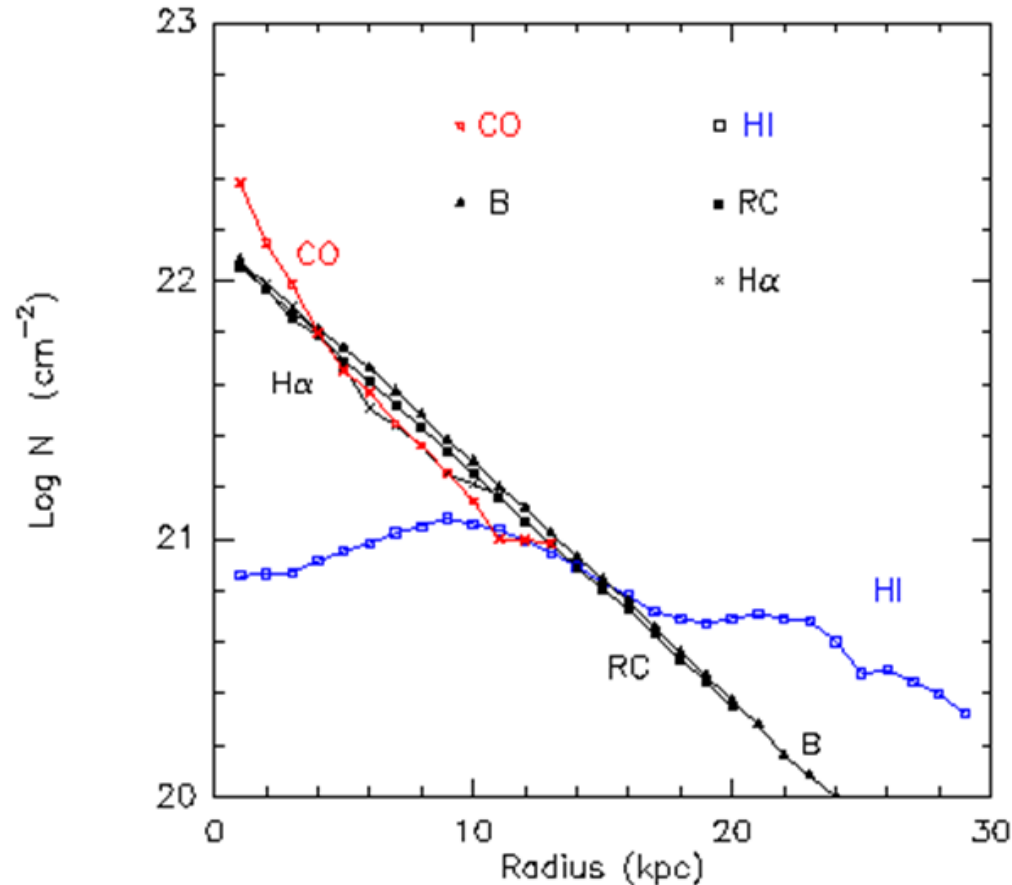


*Kormendy & Freeman (2004)*

*Donato et al (2009)*

# Distribution radiale des divers composants

La plupart des composants ont une distribution exponentielle: étoiles, SNe, rayons cosmiques  
→ Sauf le gaz HI



Le gaz moléculaire  $\text{H}_2$  ne rayonne pas

La molécule la plus abondante CO sert de traceur

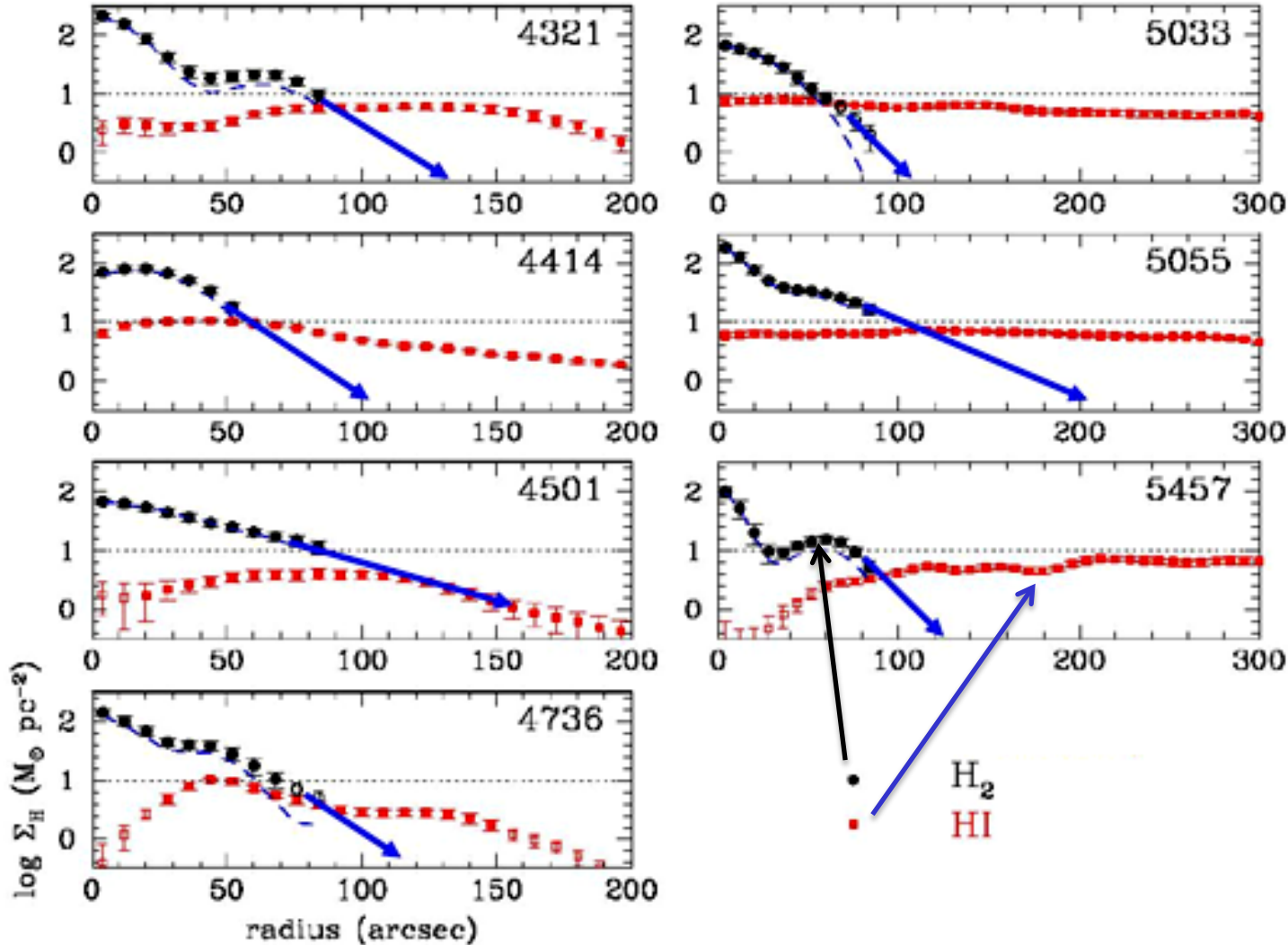
**Sa distribution radiale est exponentielle, comme les étoiles**

Le gaz atomique présente une dépression centrale

**Distribution plus plate ou  $1/R$**

# Distribution du gaz: HI, H<sub>2</sub>

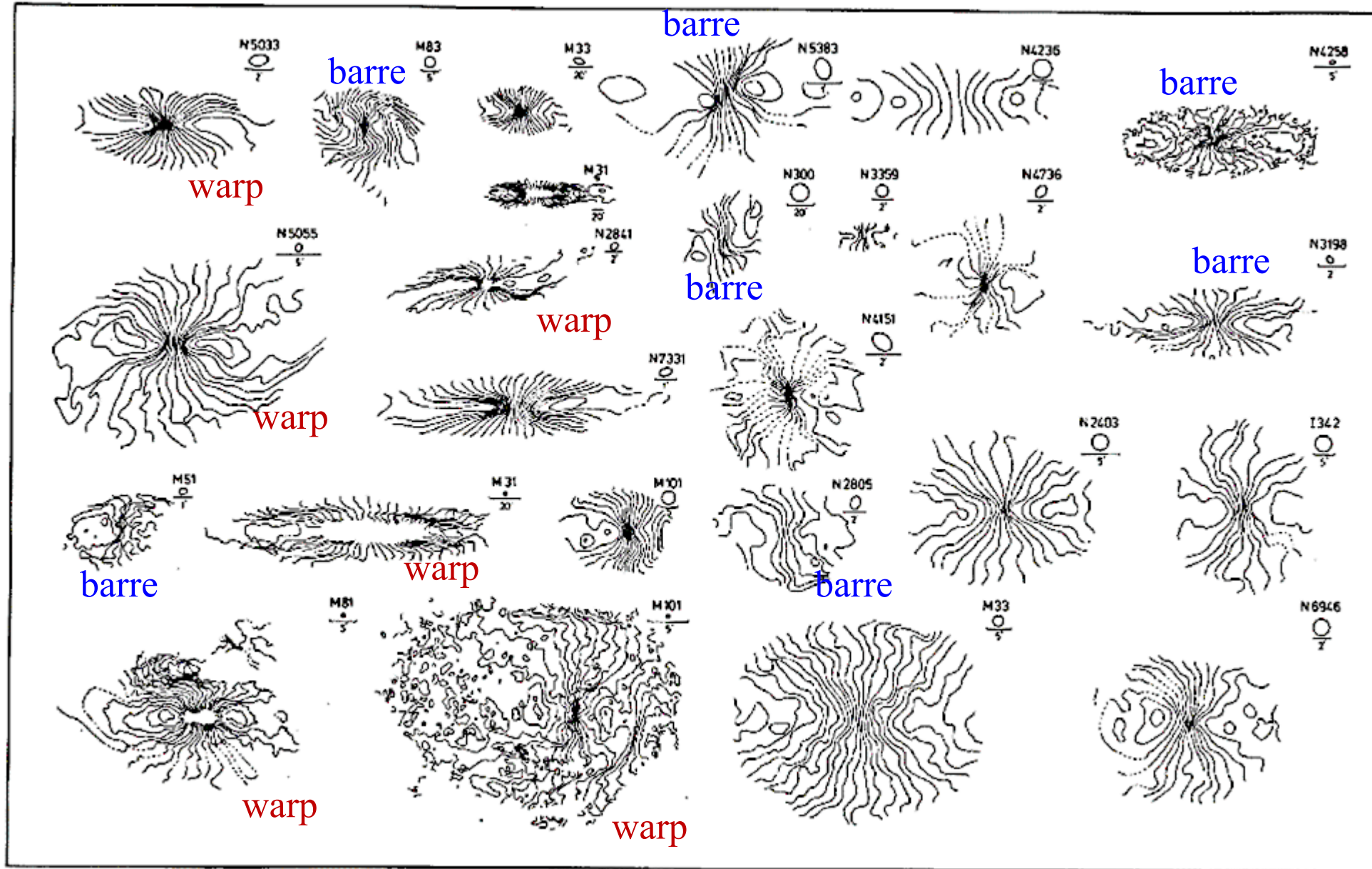
H<sub>2</sub> exponentiel, comme les étoiles



- Le gaz HI possède une distribution comparable à celle de la matière noire
- Presque plate, ou en  $1/R$

→ Contribution du gaz dense à la courbe de rotation?

# Galerie de champs de vitesse HI-21cm

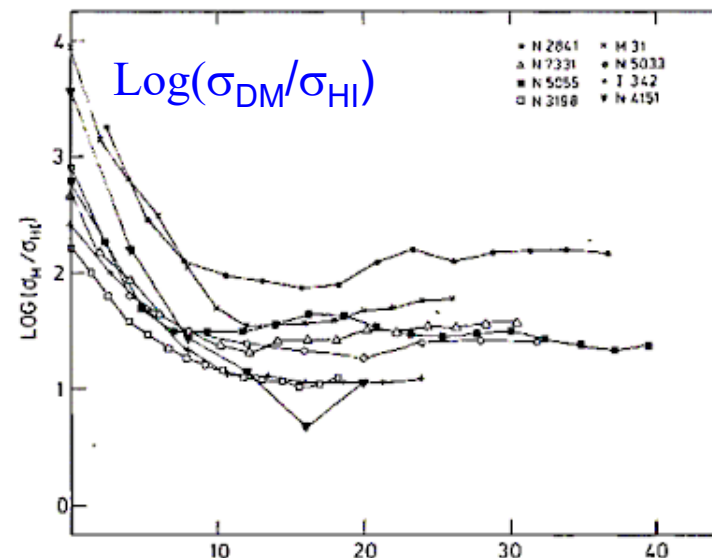
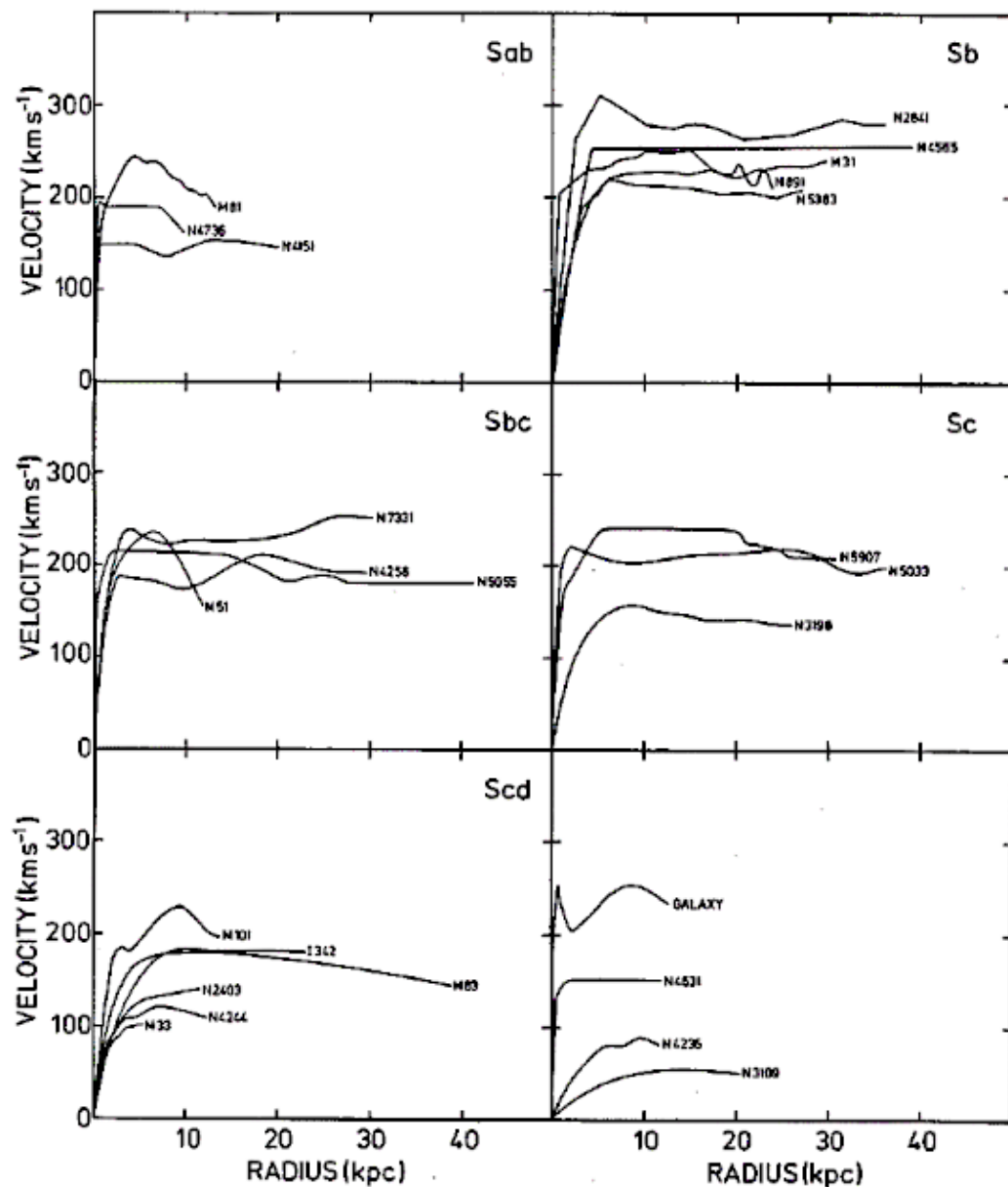


Perturbation au centre = barre

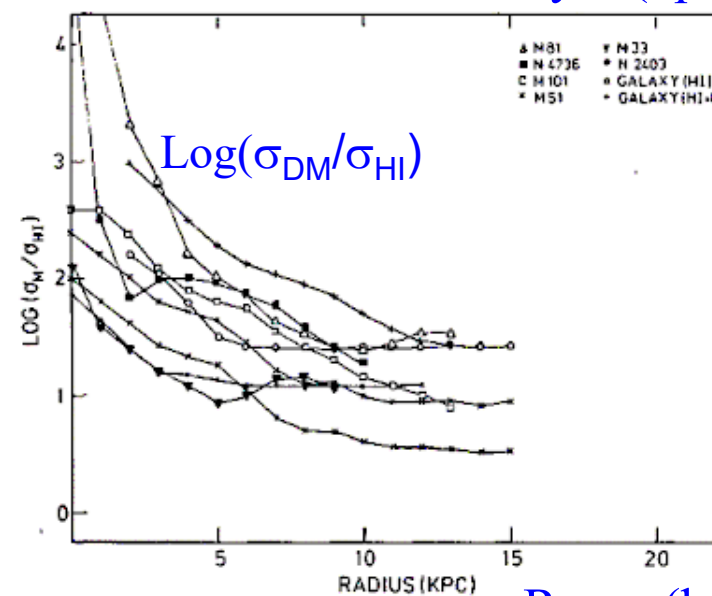
Perturbation externe = warp

# Comparaison HI-matière noire

Densités de surface  $\sigma$



Rapport  $\sigma_{\text{DM}}/\sigma_{\text{HI}}$   
tend vers 10-30

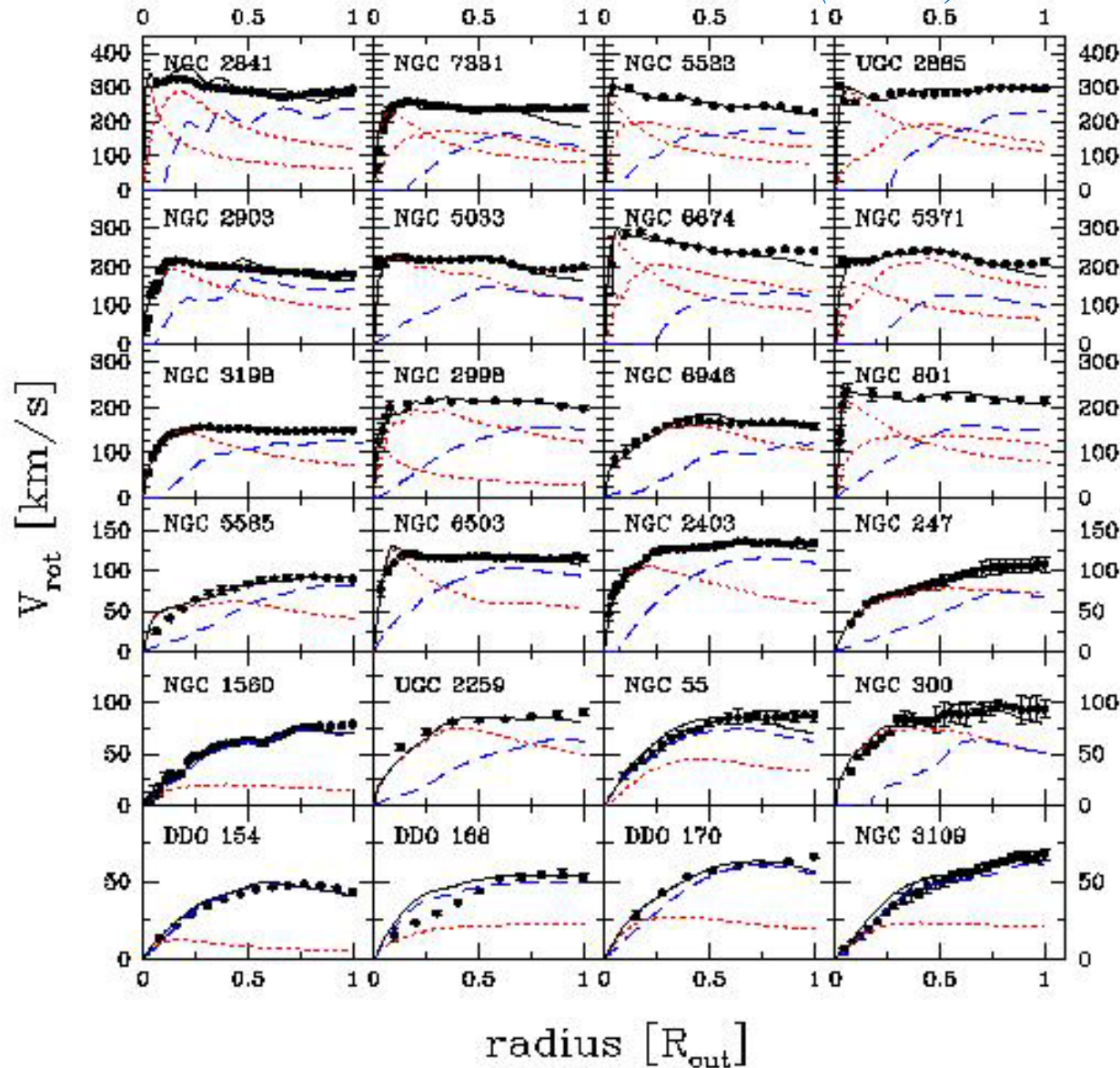


Les deux  
composants  
seraient-ils liés?

*Bosma 1981*

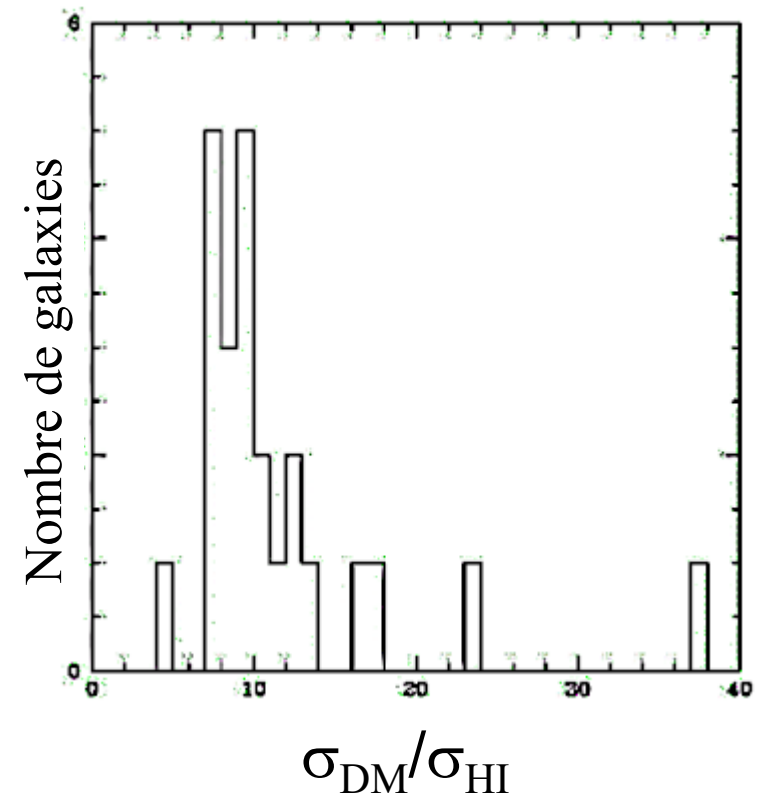
Rayon(kpc)

*Hoekstra et al (2001)*



Rapport des densités  
de surface  $\sigma_{\text{DM}}/\sigma_{\text{HI}}$

En moyenne  $\sigma_{\text{DM}}/\sigma_{\text{HI}} \sim 10$



La matière noire et le gaz atomique HI ont la même distribution

# Relation initiale de Tully-Fisher

Relation entre vitesse maximum  
et luminosité

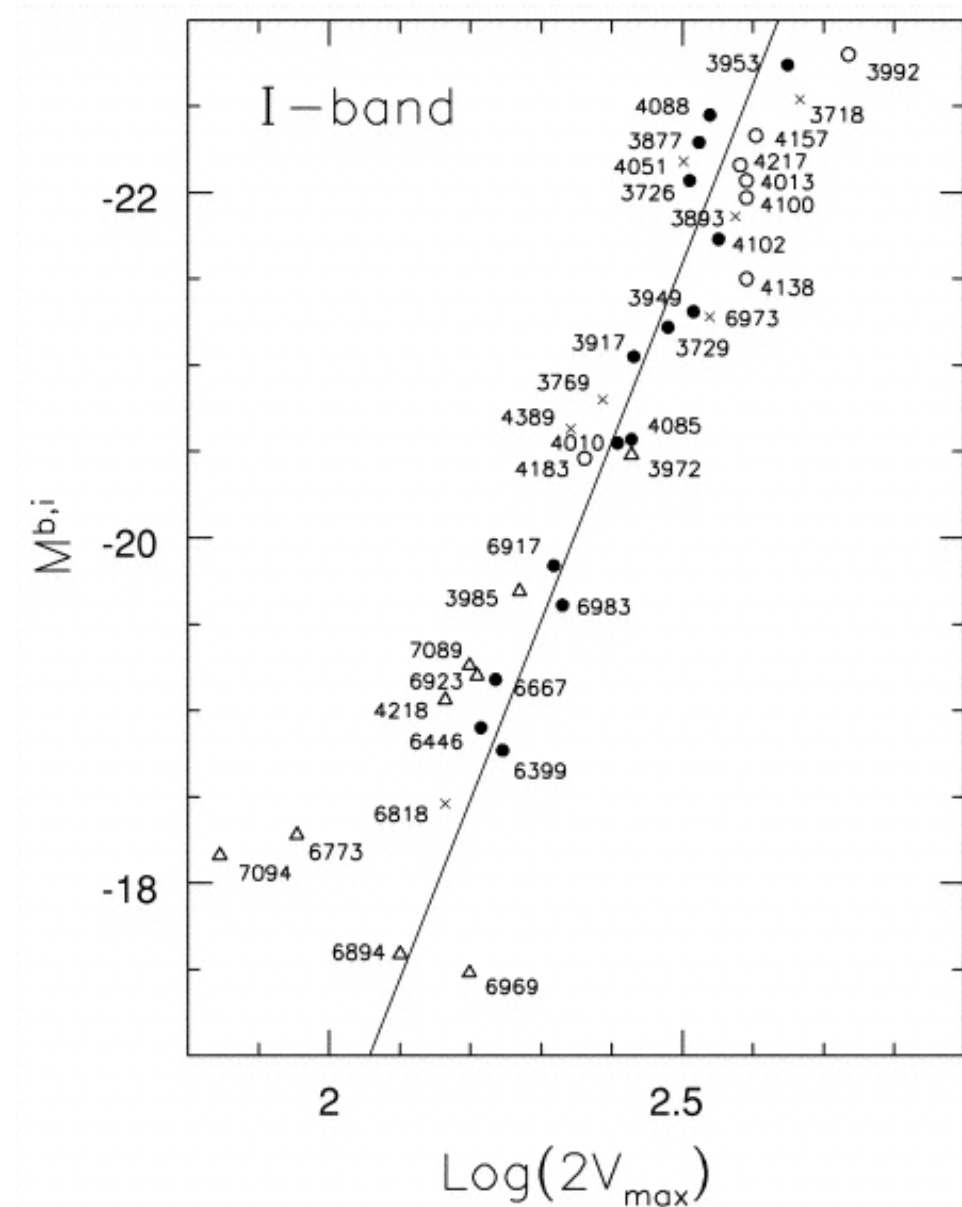
DV corrigé de l'inclinaison

Mieux en infrarouge I-band  
(pas d'extinction)

Corrélation avec  $V_{\text{flat}}$

Meilleure que  $V_{\text{max}}$

➔ Indicateur de distance



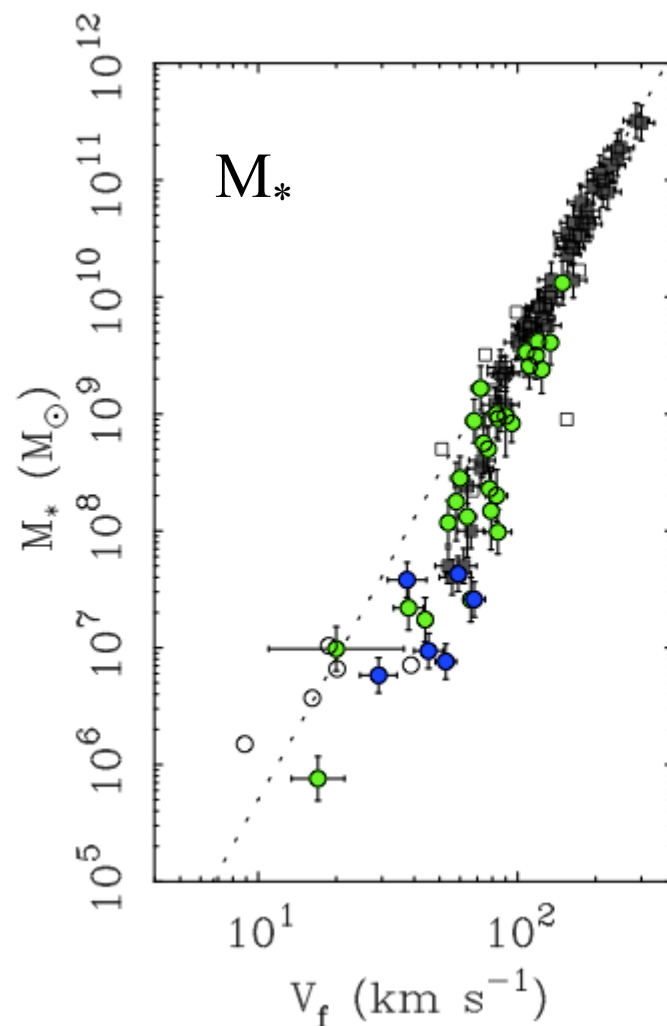
*Verheijen 2001*

La relation de Tully-Fisher  
pour les galaxies naines  
comprenant plus de gaz  
que d'étoiles

→ prendre en compte la  
masse du gaz

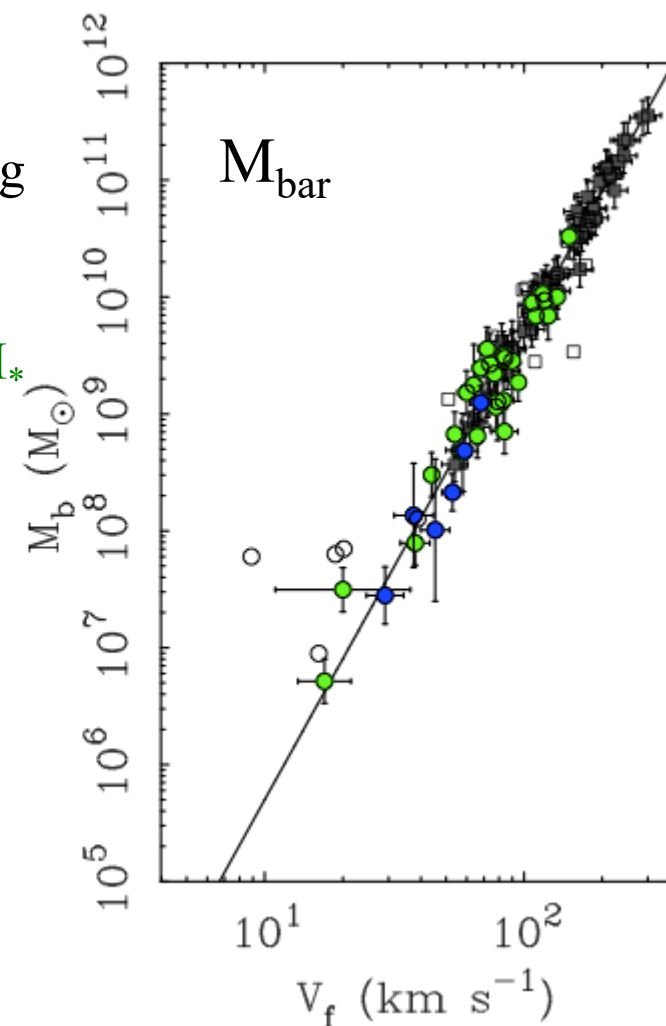
**Relation  $M_{\text{baryons}}$   
avec  $V$  Rotation**

$$M_b \sim V_c^4$$



$M_* > M_g$

$M_g > M_*$



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

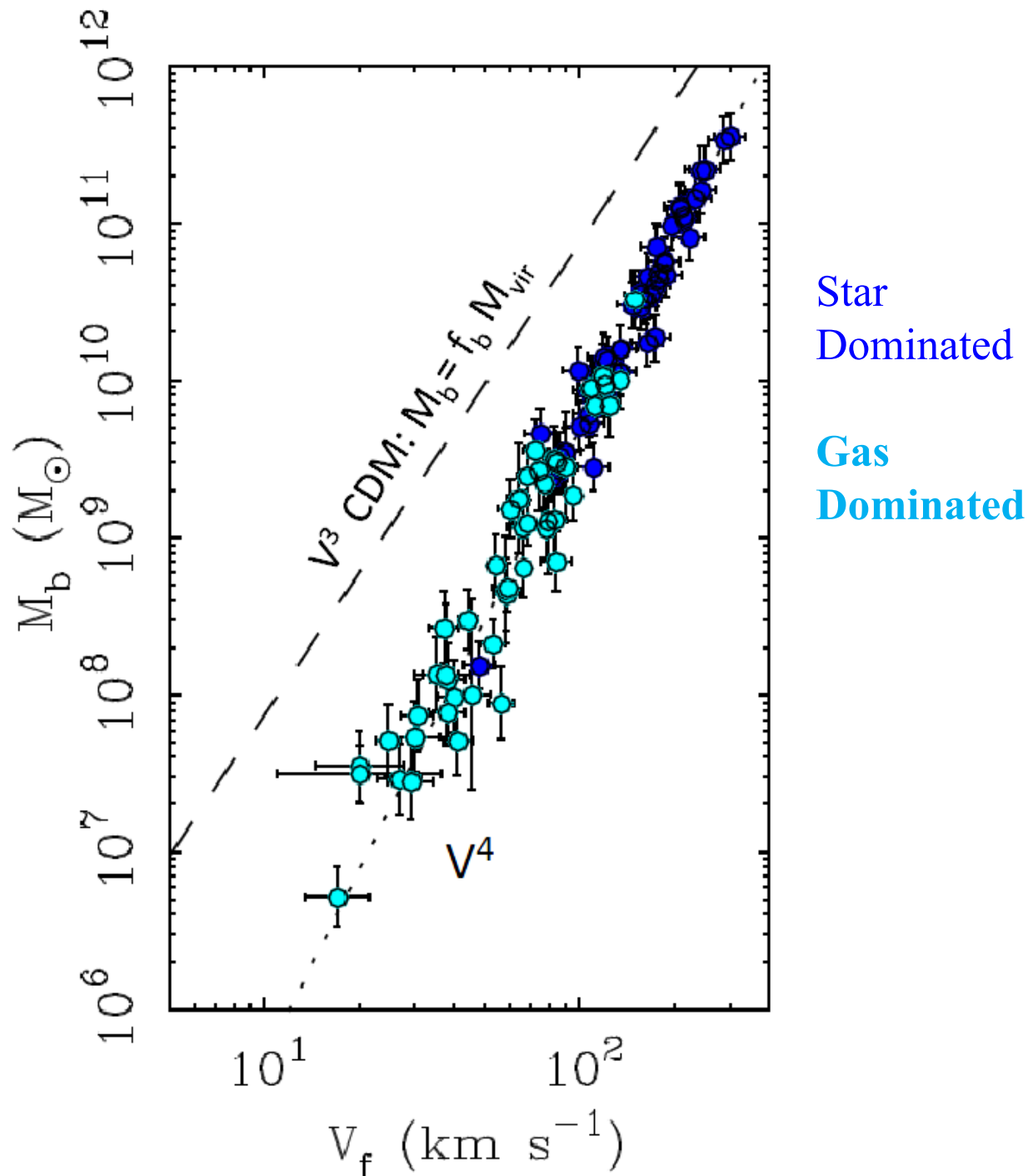
# Tully-Fisher baryonique

La prédiction du modèle  
Standard CDM a une pente 3  
 $M_b \sim V_c^3$

De plus, il y a trop de baryons  
dans les galaxies  
Surtout pour les faibles masses  
d'un facteur 10-100

$f_b$  fraction universelle  
de baryons = 17%

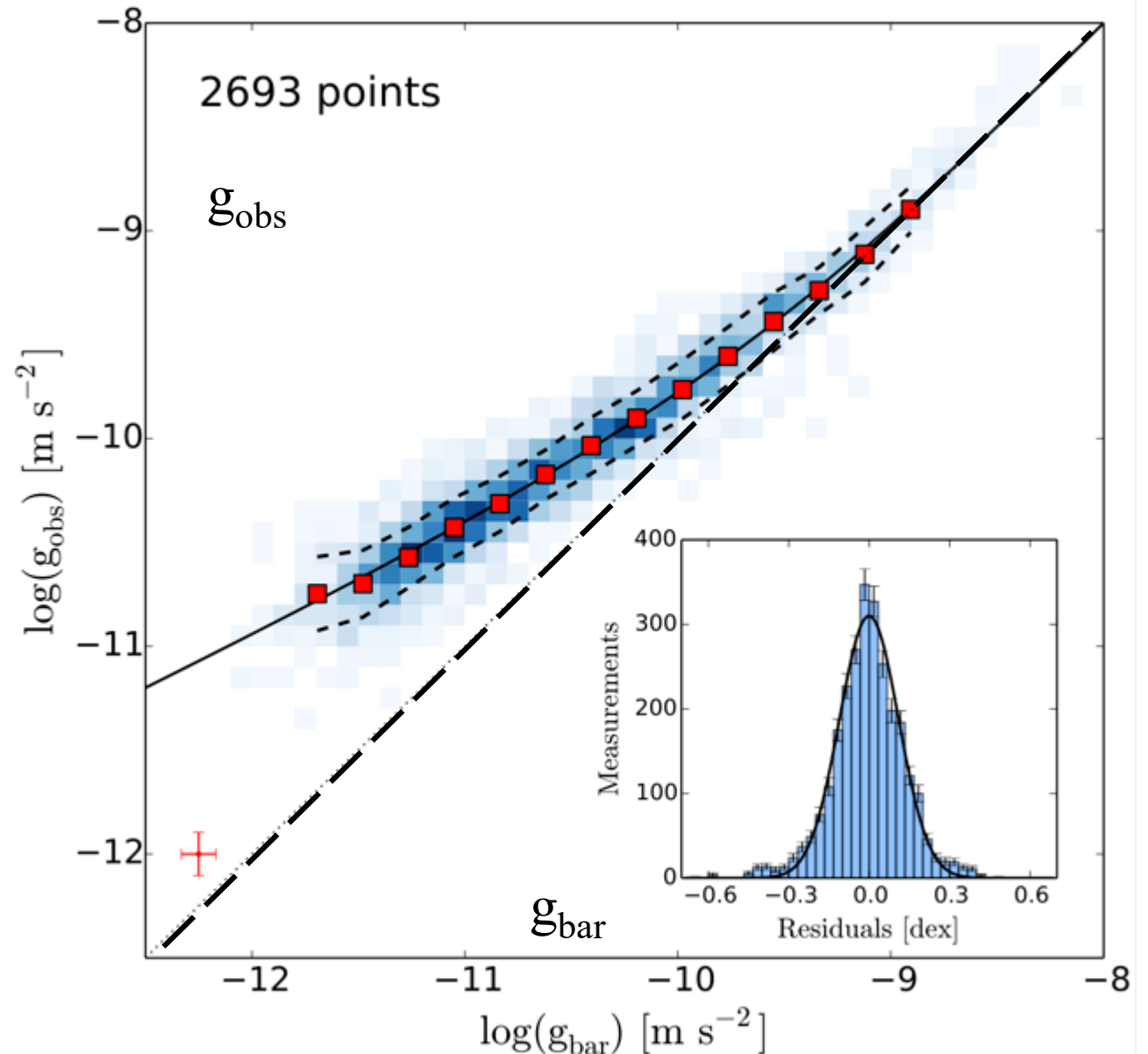
**CDM:** Cold Dark Matter



# Relation accélération radiale (RAR)

- L'accélération observée  $g_{\text{obs}}$  s'éloigne de plus en plus de l'accélération due aux baryons  $g_{\text{bar}}$

*Lelli et al 2017*

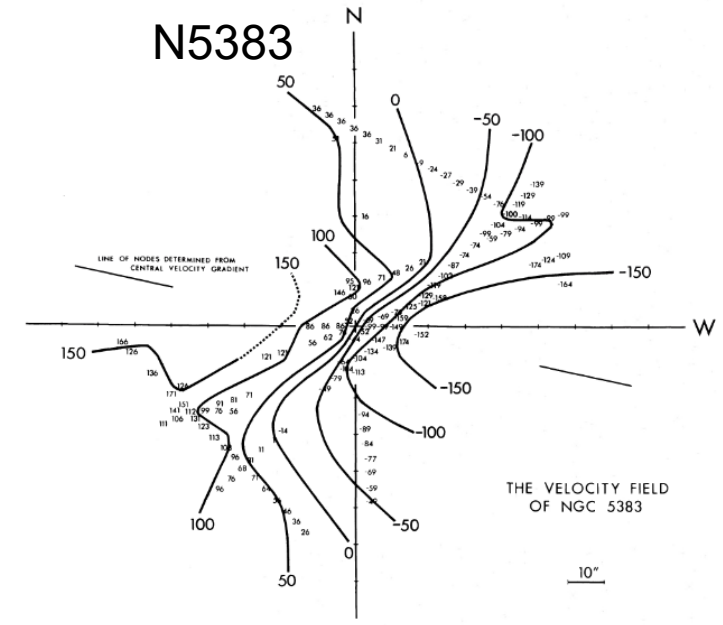


# Déformations du champ de vitesses

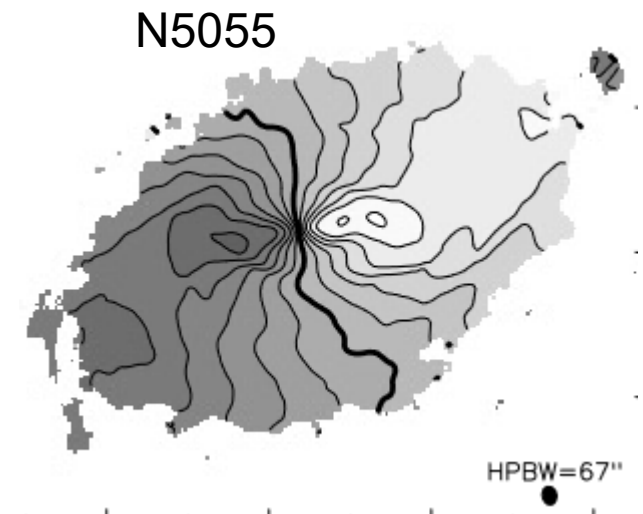
- Les vitesses non-circulaires empêchent de dériver la distribution de masse
- Perturbations internes: barre
- Perturbations externes: plan gauchi « warp », interactions, accrétion, changement de l'inclinaison
- Epaississement des plans: généralisation des galaxies vues par la tranche



- ➔ Problème pour les cuspides/cœur
- ➔ Problème pour la masse totale



*Peterson et al 1978*



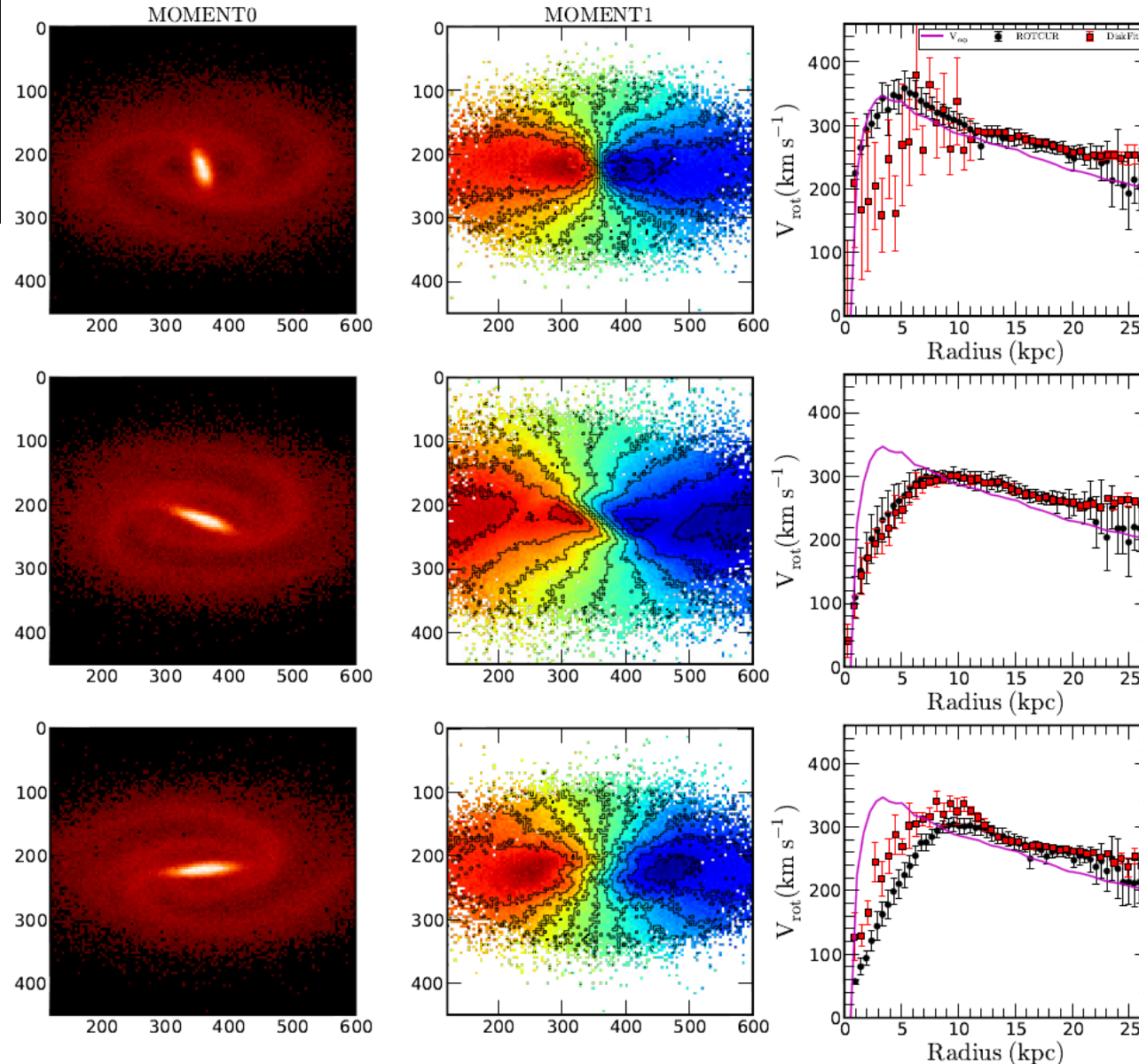
*Battaglia et al 2006*

# Courbes de rotation de galaxies barrées



*Kuzio de  
Naray et al 2012*

Impossible de  
corriger si la  
barre est // axe  
majeur ou mineur



gSa (halo ISO)  
Barre: perpendiculaire

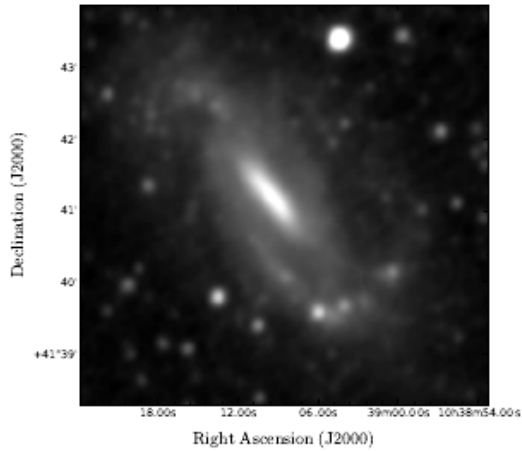
Barre: intermédiaire

Rotcur: points noirs  
Diskfit: rouges

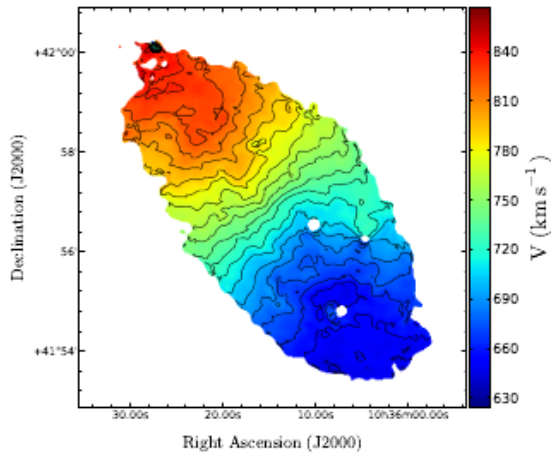
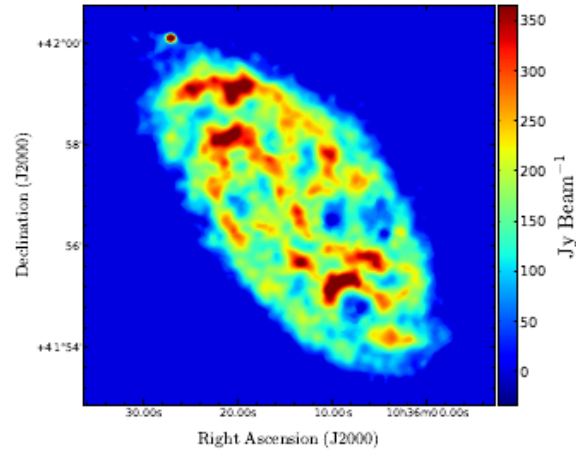
Barre: parallèle au  
grand axe

# Calculs sur un cas concret: NGC 3319

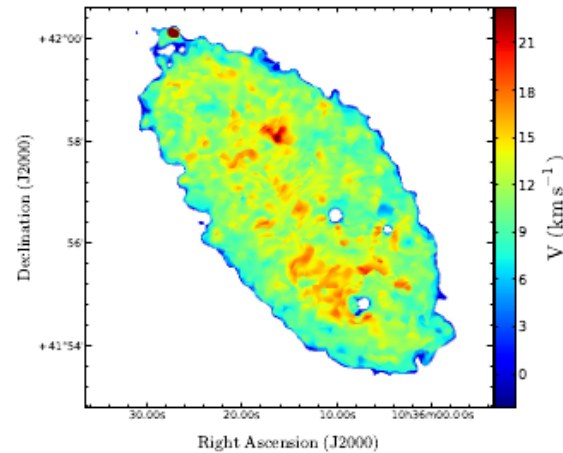
Wise 3.4 $\mu$ m



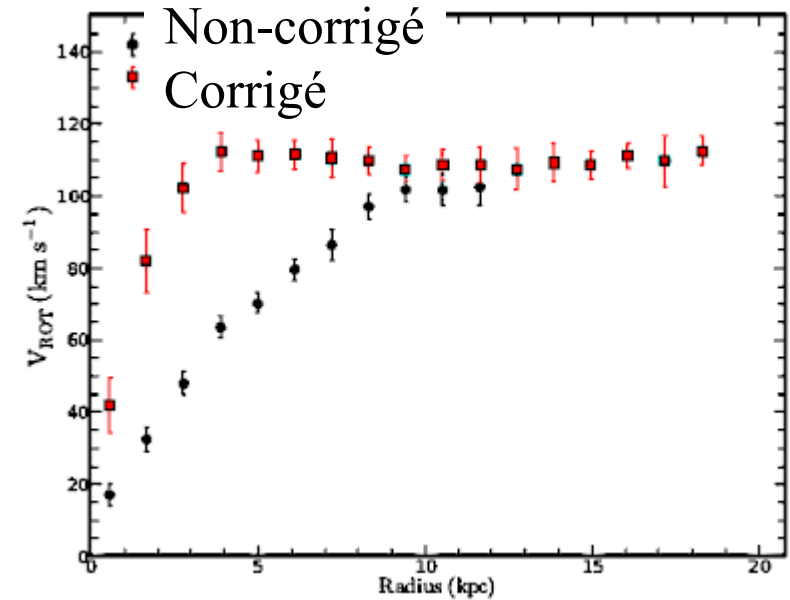
HI-21cm



Vitesse HI



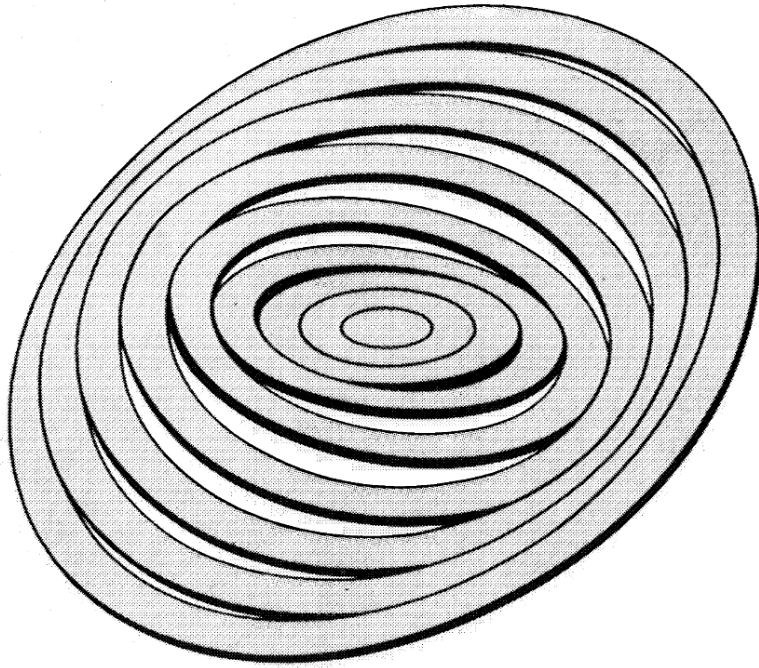
Dispersion HI



Les perturbations dues à la barre sont significatives

*Randriamampandry et al 2014*

# Warp: plans gauchis

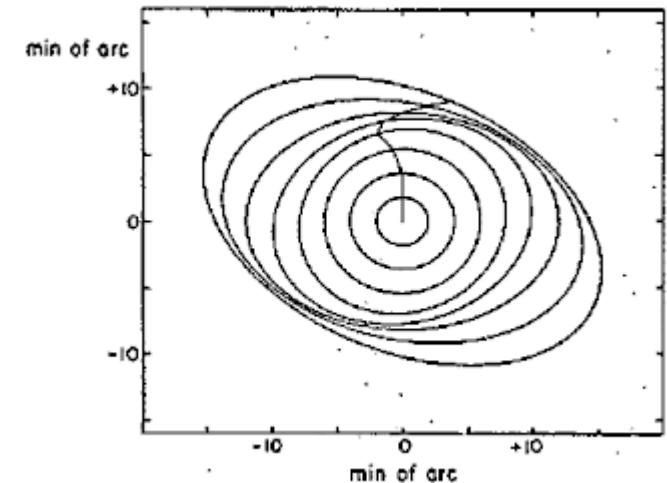
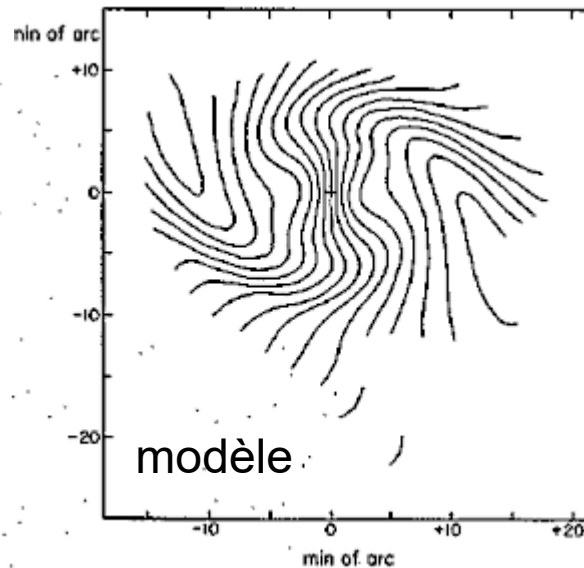
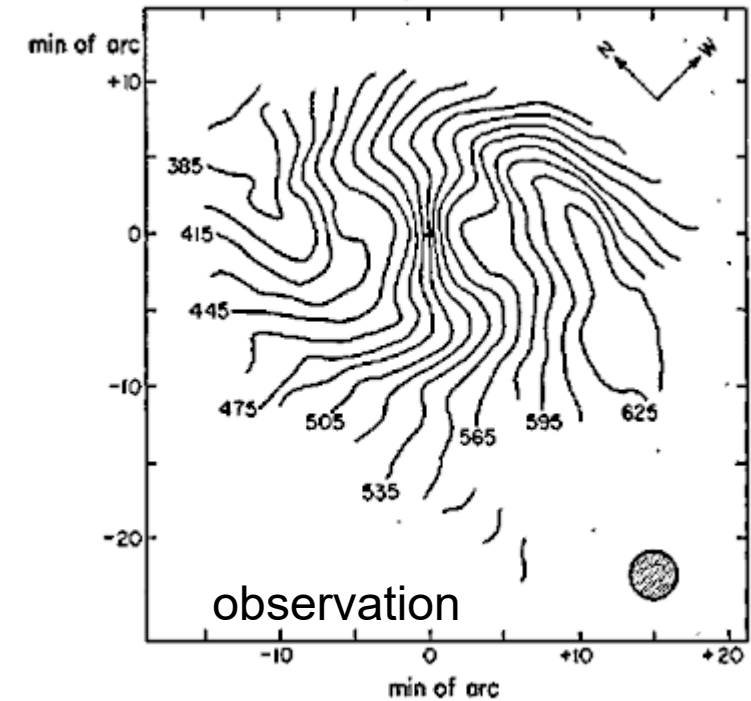


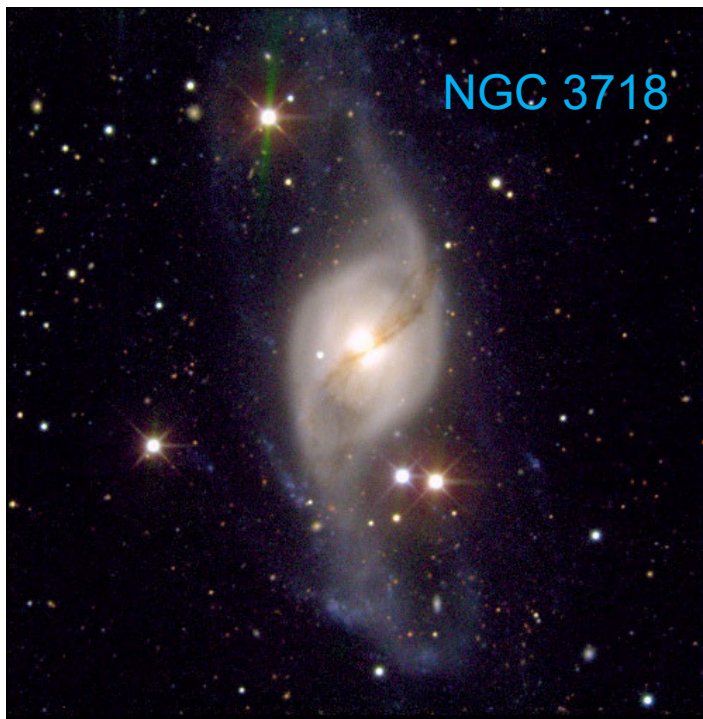
Approximation:  
A chaque rayon  
vitesse circulaire

Valable que pour de  
faibles perturbations

Modèle des anneaux  
Inclinés, PA,  $i$  variables

*Rogstad et al 1974*

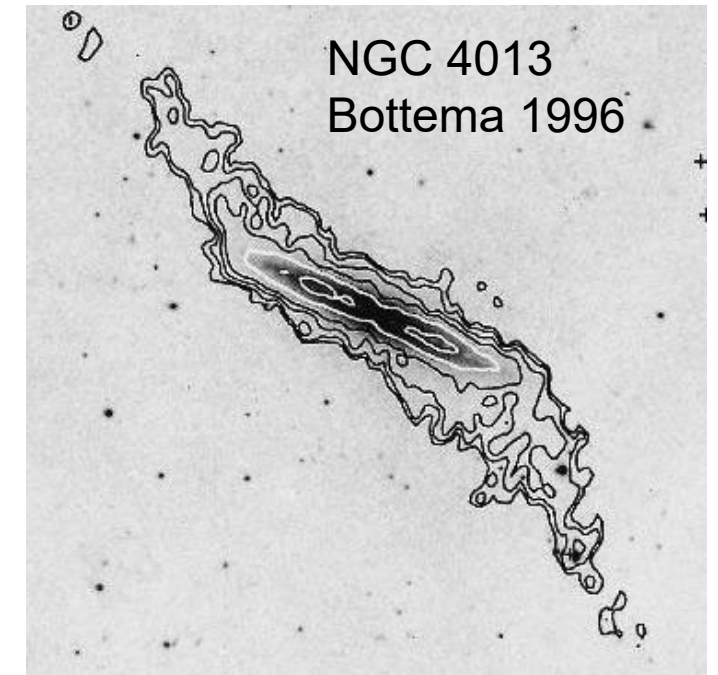
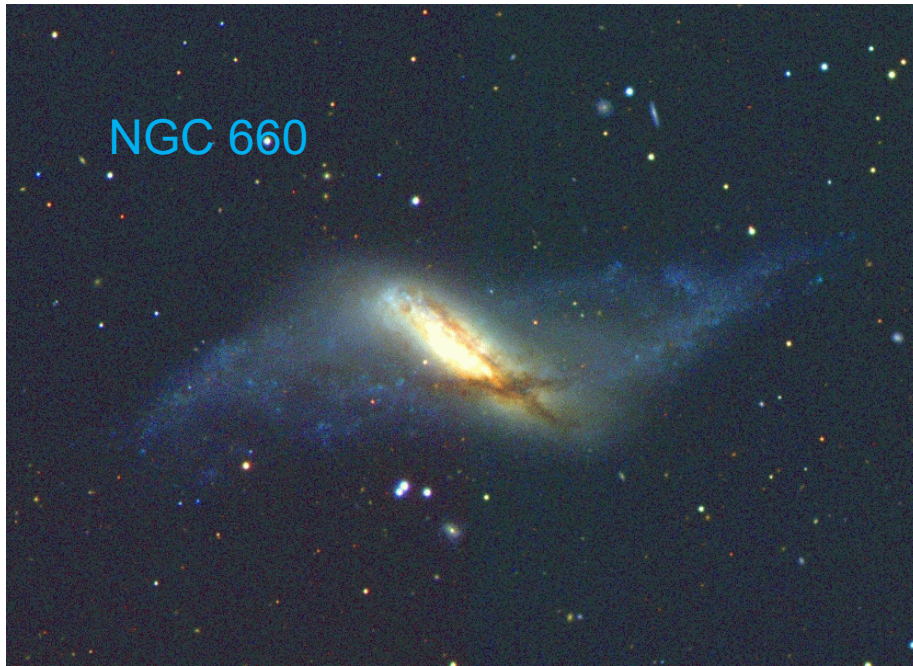




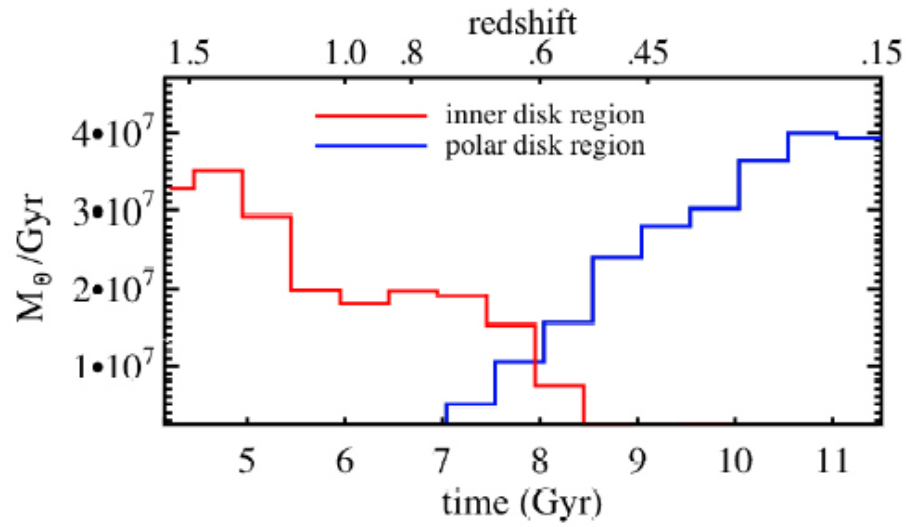
## Orbites inclinées, non circulaires

Calcul plus difficile, lorsque la déformation  
est importante

Les orbites sont hautement elliptiques, cela  
dépend de la forme à 3D du halo noir

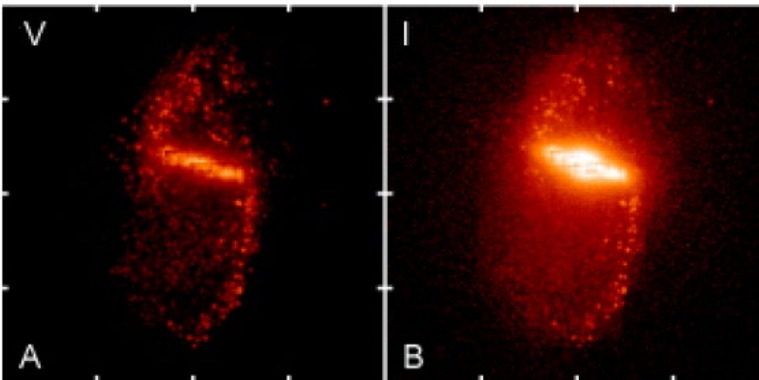


# Galaxies avec anneau polaire



→ Test de la forme à 3D des halos noirs,  $V_{\text{pol}} < V_{\text{eq}}$

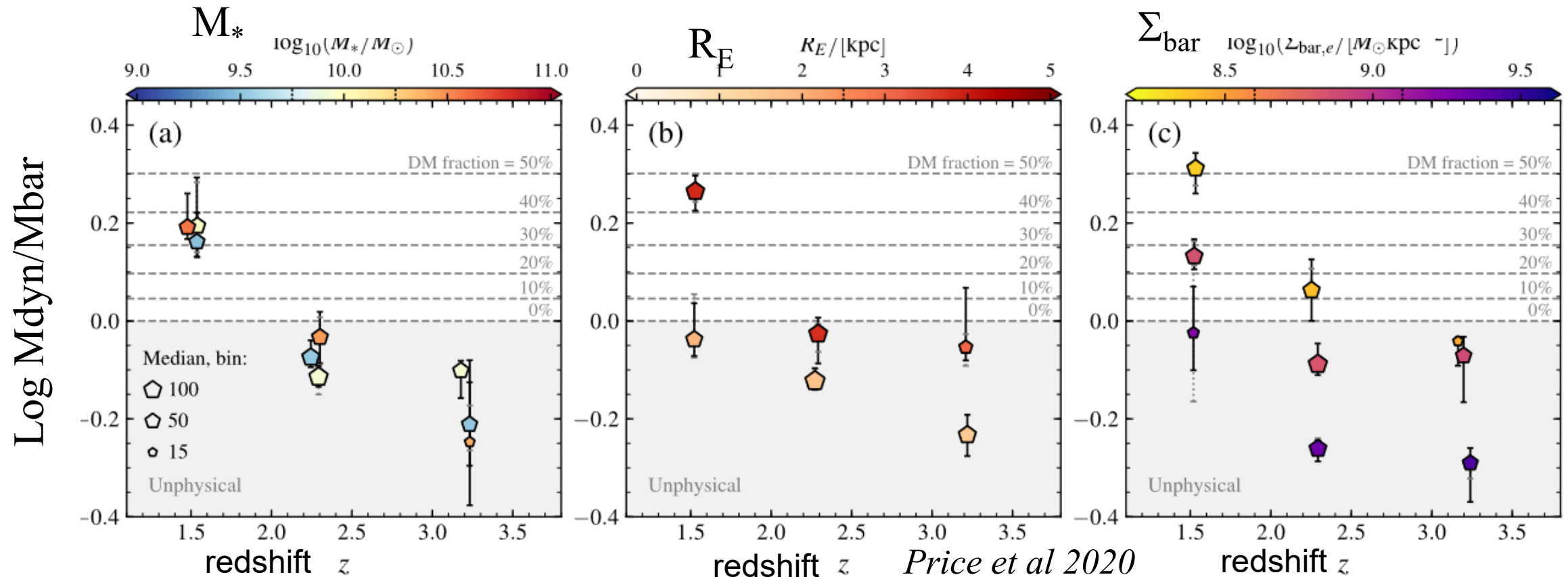
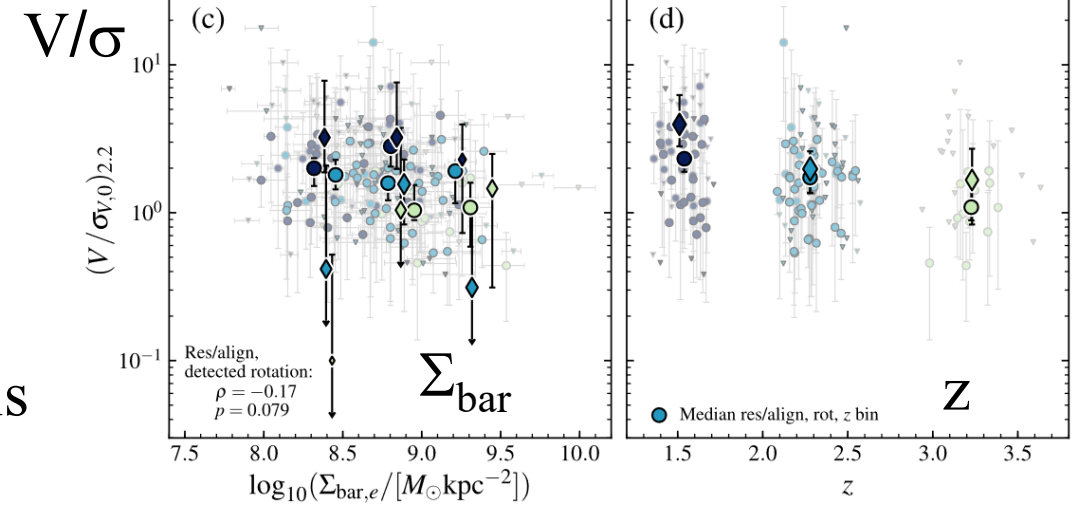
→ Modèle CDM: prédit  $V_{\text{pol}} < V_{\text{eq}}$   
Ou bien  $V_{\text{pol}} = V_{\text{eq}}$ , si accrétion



*Brook et al 2008*

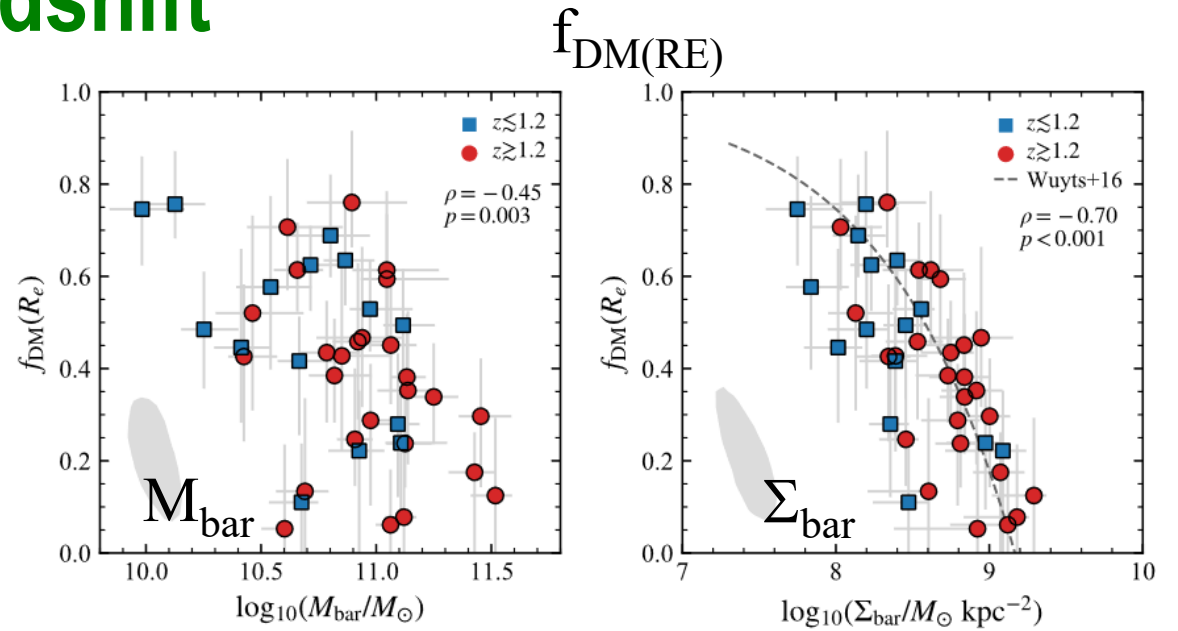
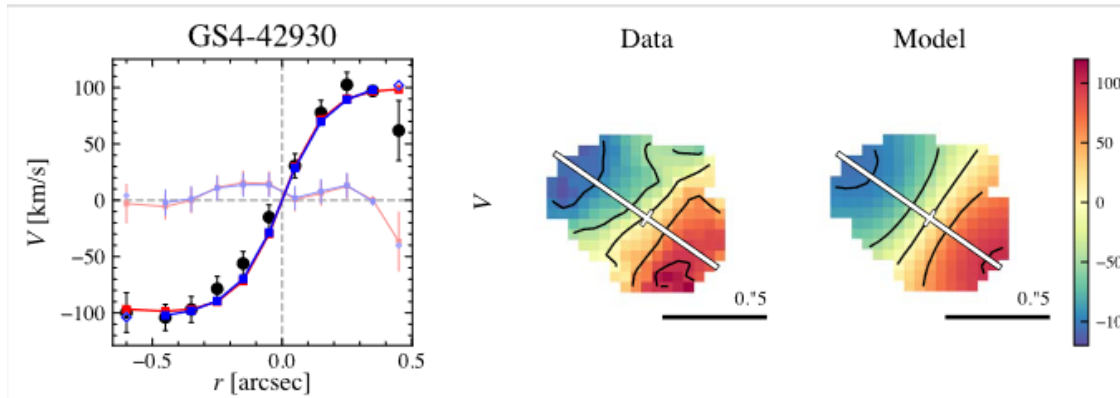
# Rapport $M_{\text{dyn}}/M_{\text{bar}}$ vs redshift

$V/\sigma$  diminue un peu avec  $\Sigma_{\text{bar}}$ ,  
Et aussi avec  $z$  : disques plus instables et plus épais

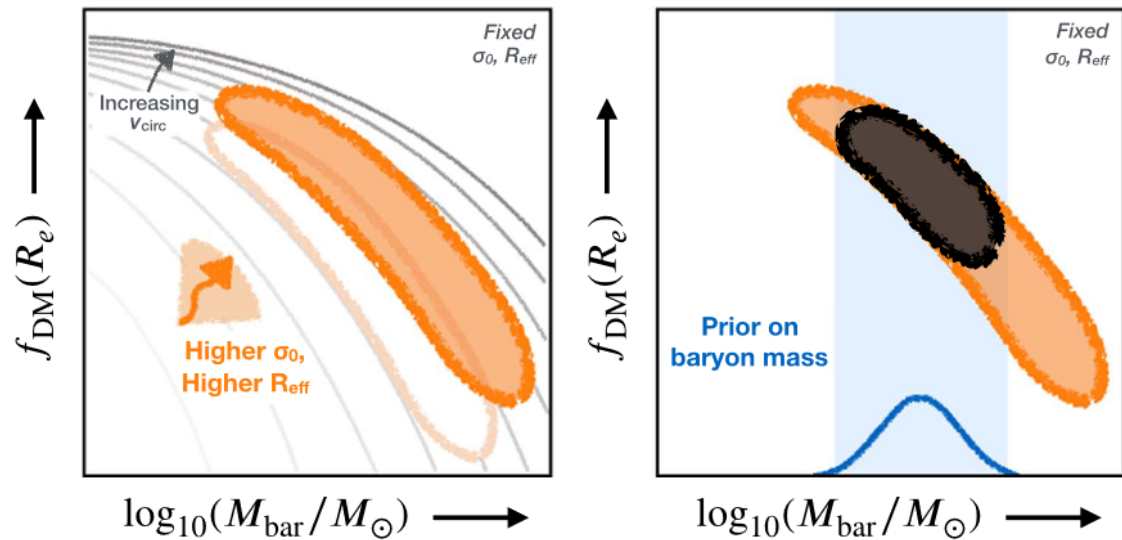


# Fraction de matière noire vs redshift

Courbes de rotation à  $z < 1.2$ ,  $z > 1.2$



Attention aux dégénérescences,  
Et aux biais de sélection!



# Conclusion: Matière noire et galaxies

Le meilleur traceur pour les parties externes est le gaz atomique

HI-21cm → masse totale

Parties internes: le gaz ionisé (H $\alpha$ , NII) plus de résolution spatiale

Le gaz moléculaire, traceur CO → cuspide-coeur

**Interprétation: bulbe, disque, halo noir**

- Les courbes de rotation dépendent surtout des baryons
- **courbe universelle  $V(r/r_d, L)$ , disque maximum**
- Tully-Fisher baryonique, Plan fondamental
- couplage MN-baryons,  $\sigma_{DM}/\sigma_{HI} = 10$
- **Déformations: barres, warps**
- Evolution en fonction de  $z$  ?

