



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

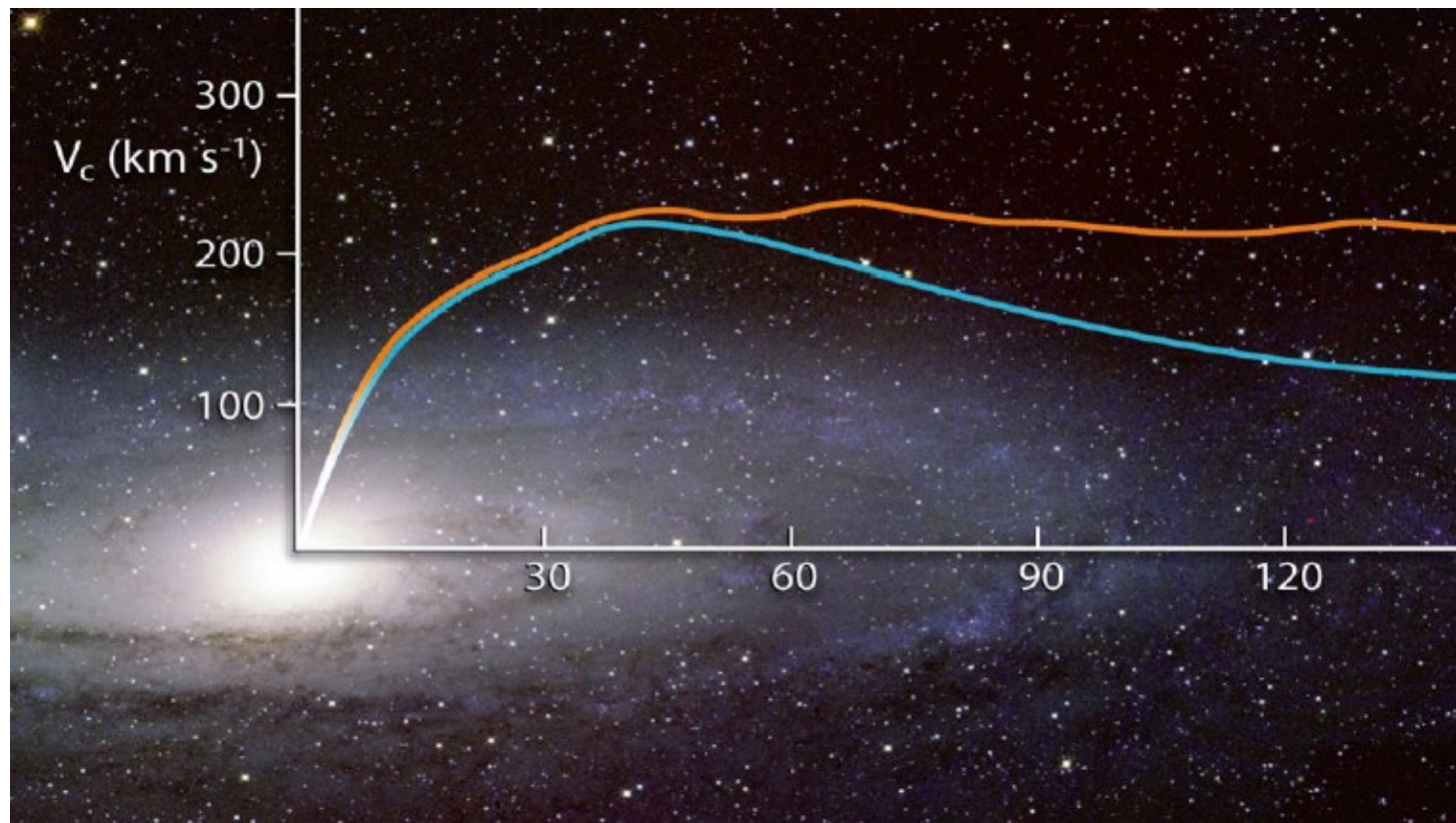
La matière noire à l'échelle des galaxies

Françoise Combes



Observatoire
de Paris

| PSL 



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

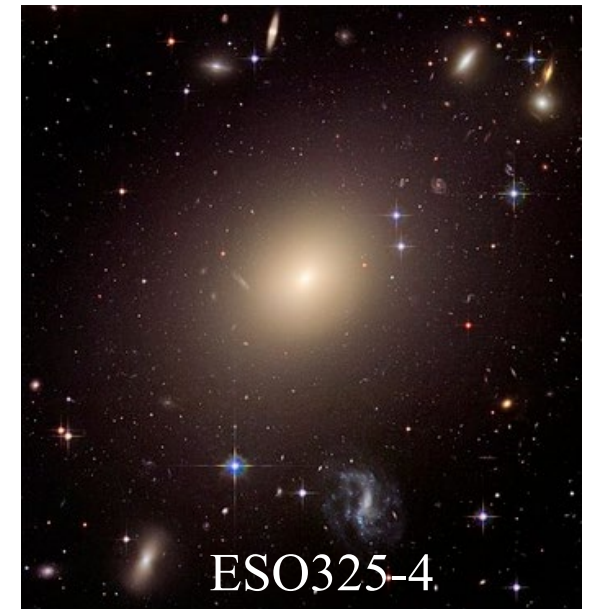
- La dynamique des galaxies elliptiques

- Relations d'échelle

- Evolution avec le redshift



M51



ESO325-4

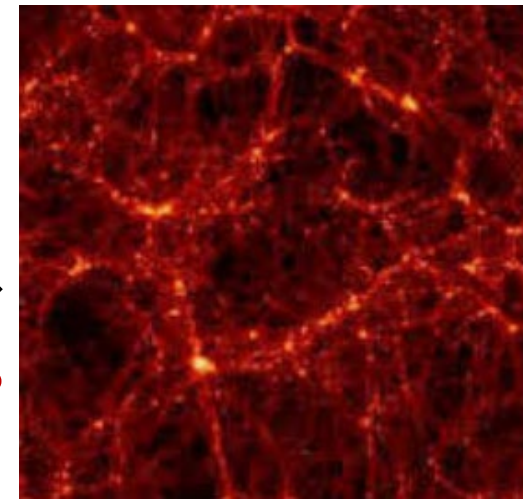
La matière noire domine les galaxies

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

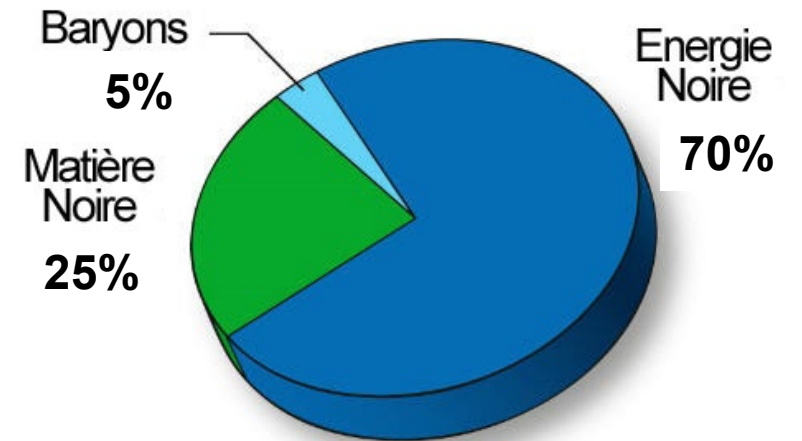
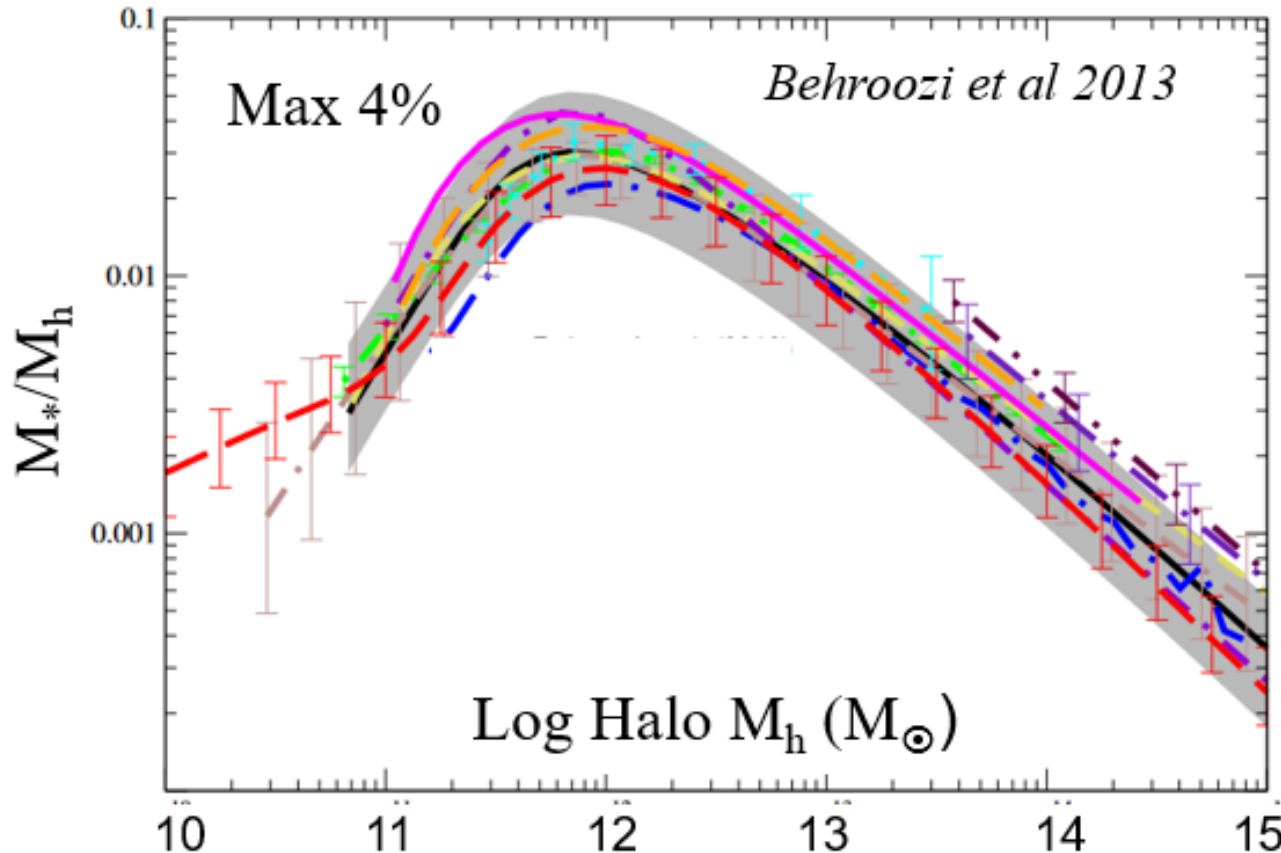
$$M_{\text{tot}}/M_b = 6$$



80%



Les baryons sont dans la toile cosmique



Satellite Planck, 2013

Bref historique de matière noire dans les galaxies



Poincaré, 1906

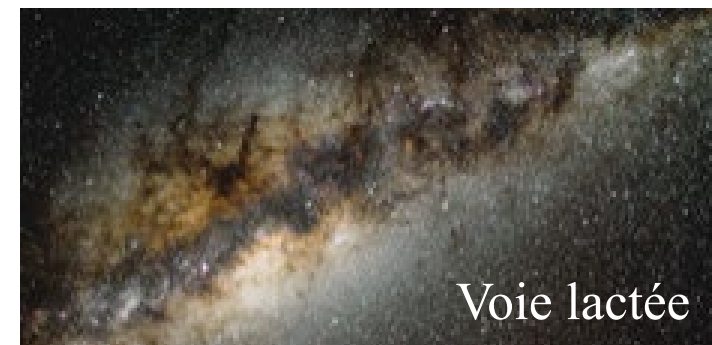
Il y a des étoiles que nous voyons, parce qu'elles brillent.
Mais n'y aurait-il pas des **étoiles obscures** qui circulent dans l'espace?
.....**matière noire**.

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

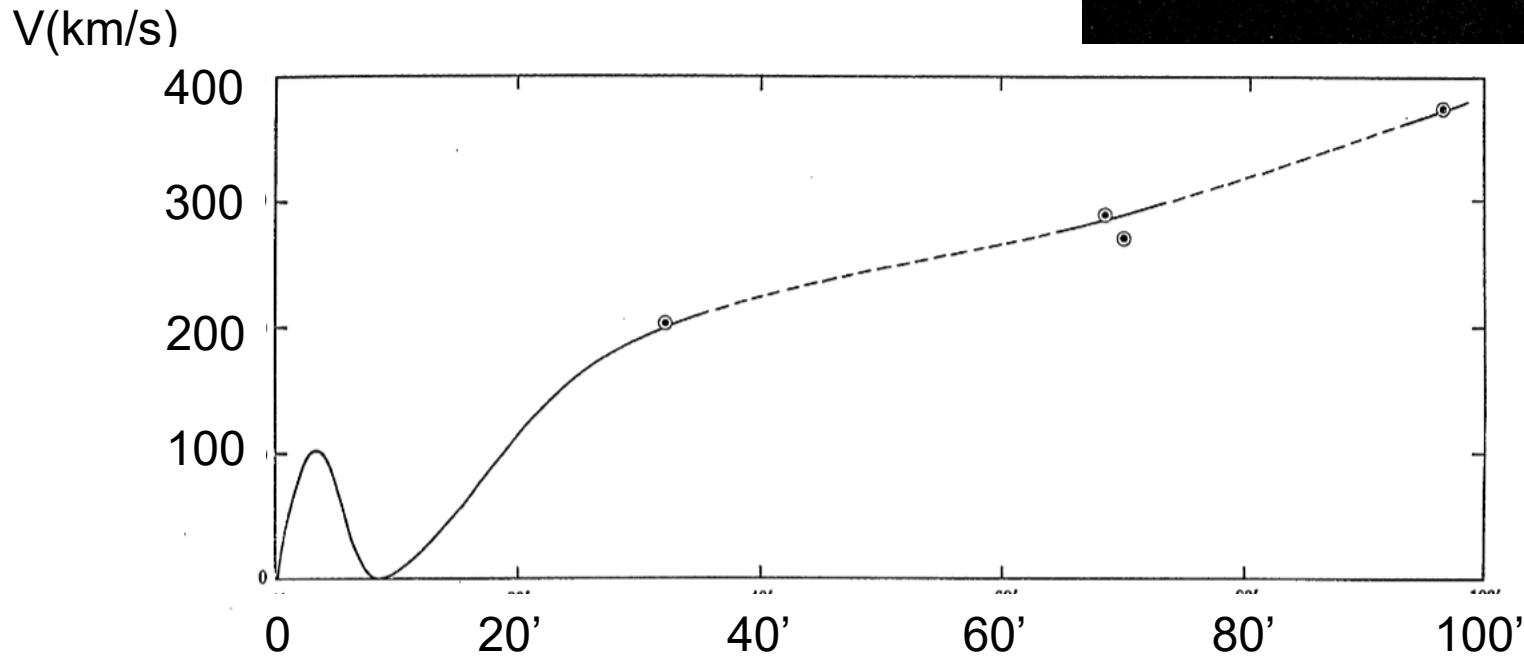
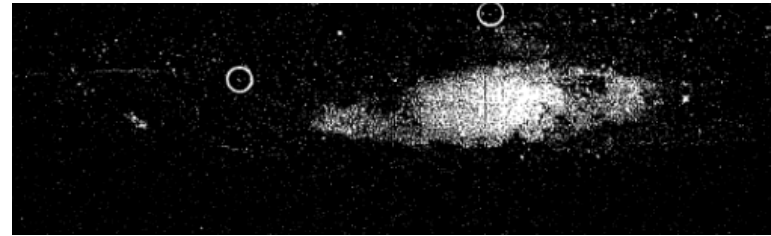
Première courbe de rotation de M31

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



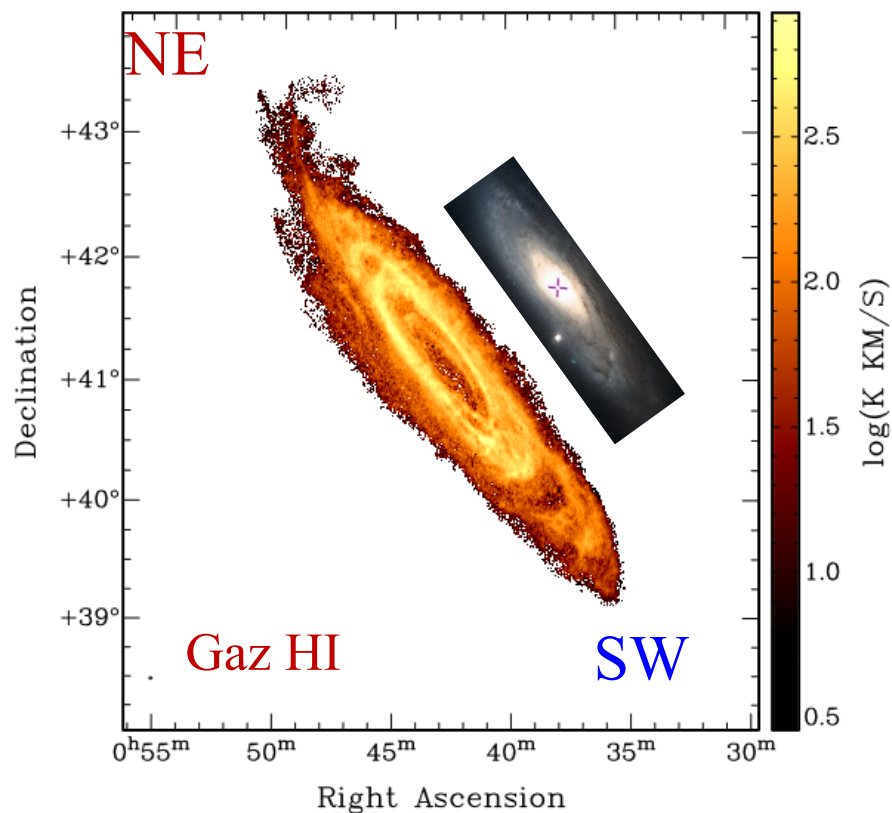
Raies en absorption
des étoiles, H, K
 $H\delta$
Nébuleuses en émission
[OII], [OIII]

M31=Andromède, aujourd'hui

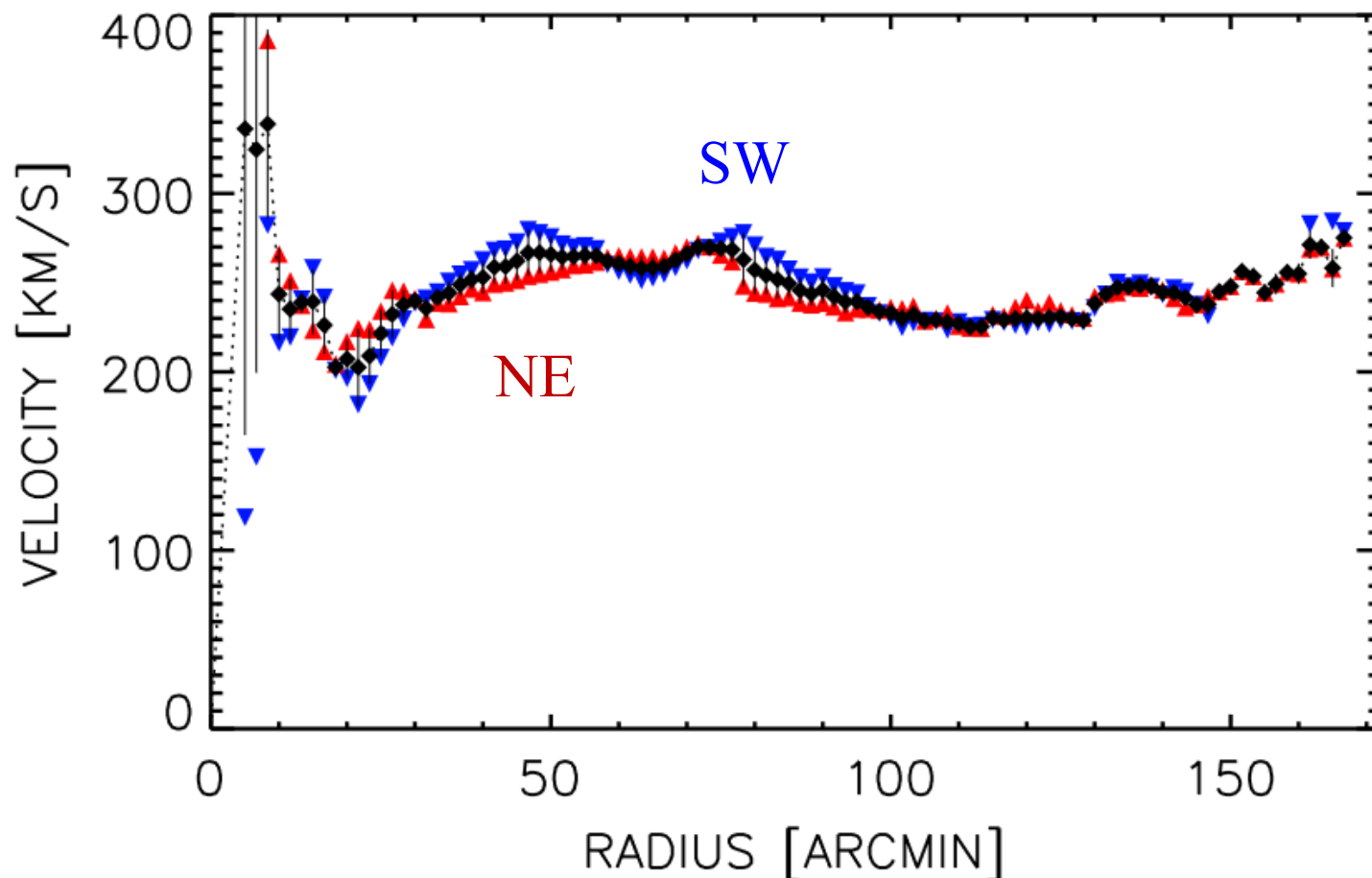
Plus de connaissance de la distribution de masse (infrarouge),

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

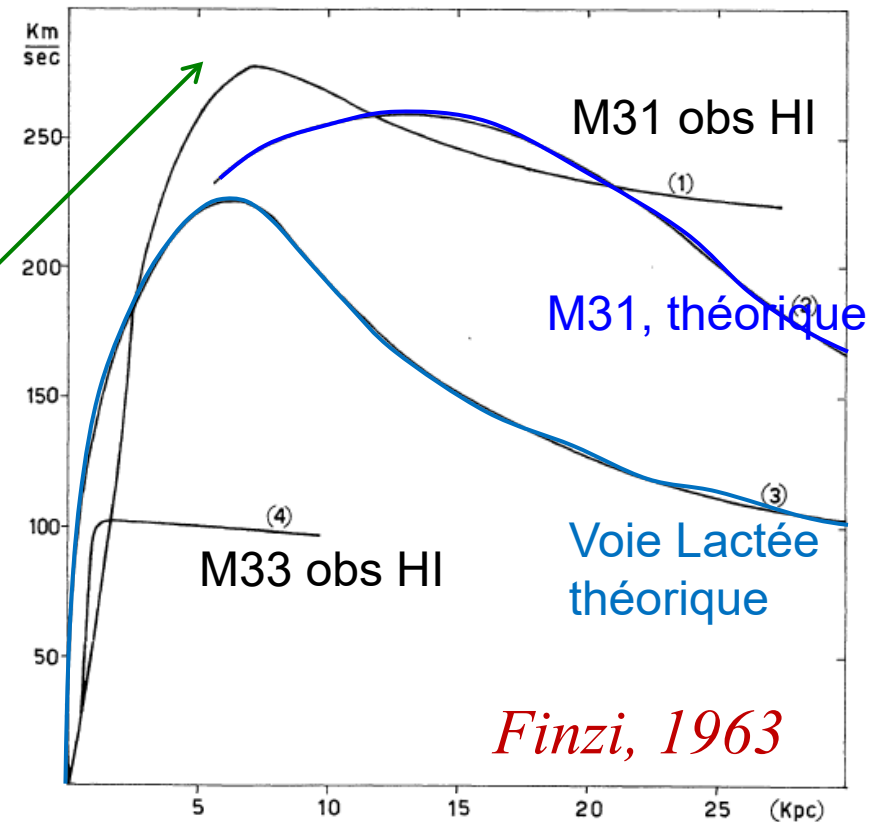
Courbes de rotation **optiques**: Margaret & Geoffrey Burbidge: 10-20 courbes de rotation étoiles et gaz ionisé (H α et [NII] 0.6 μ m)

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)

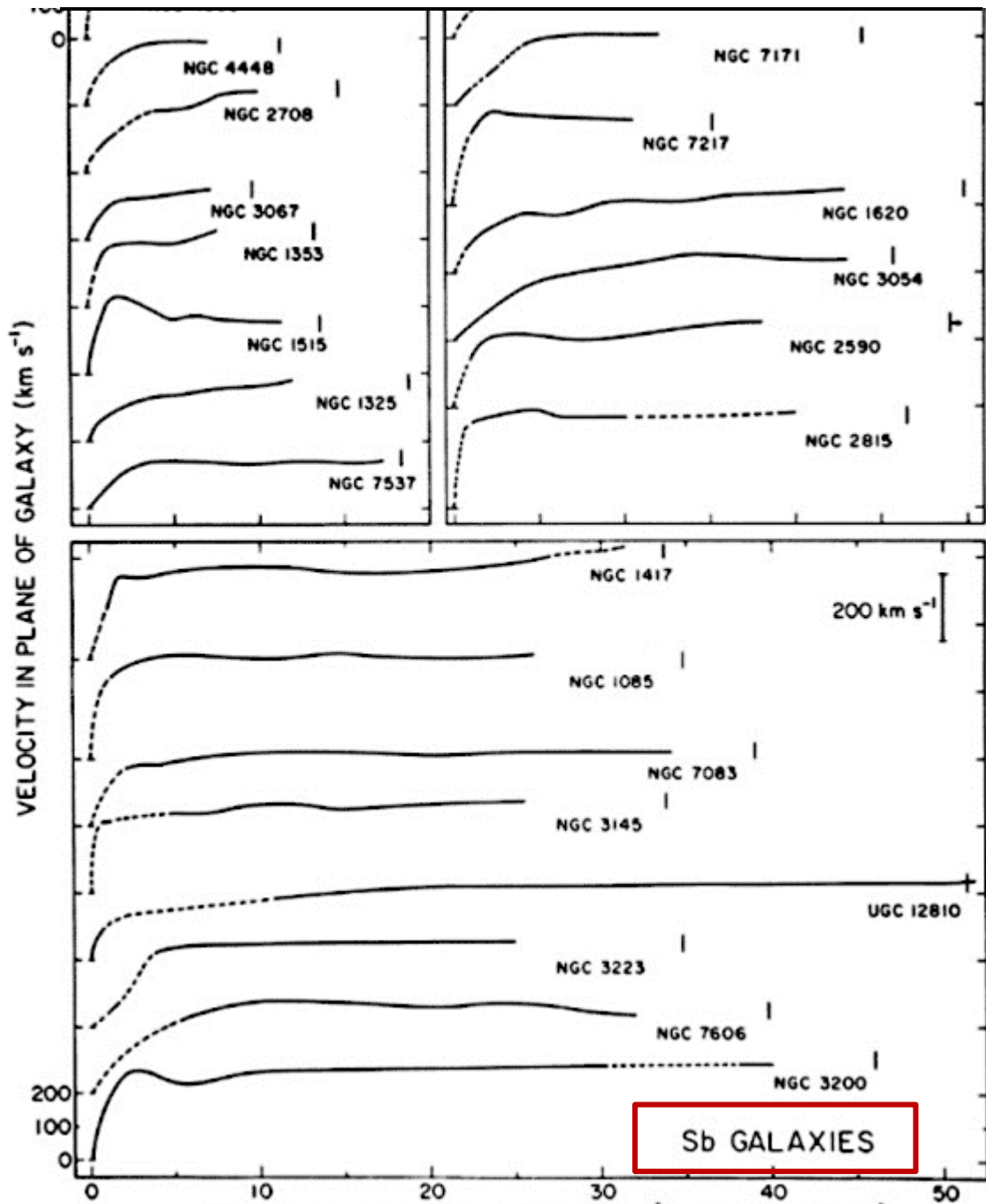
→ **Courbe plate pour M33 (M./L=10-13)**

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 mag^2

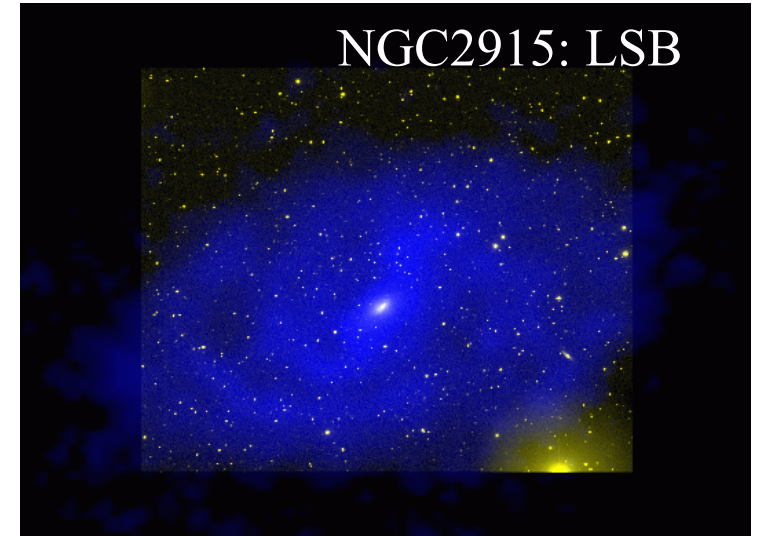
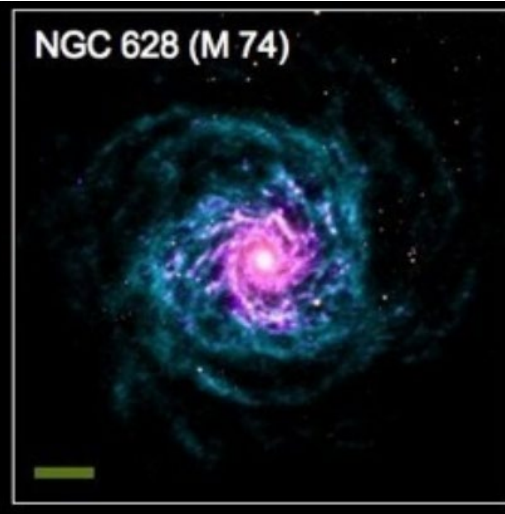
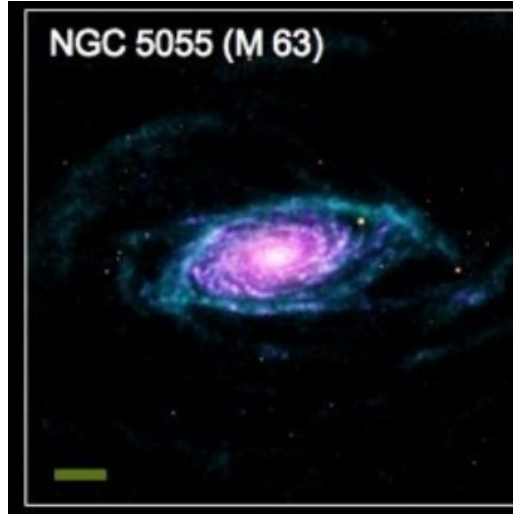
M/L varie selon les types
et les populations stellaires

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

Rubin et al 1978

Hydrogène atomique (HI) très étendu

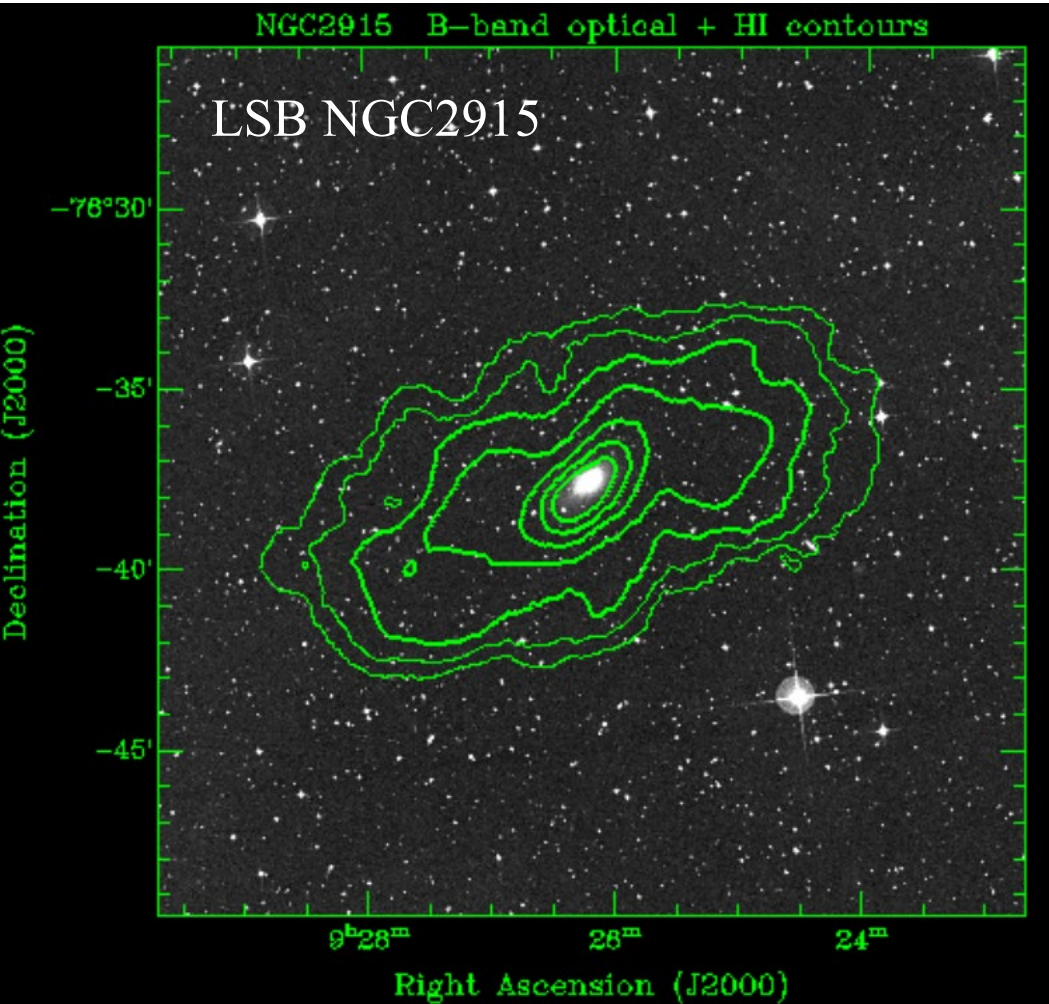
Rose: optique
Bleu : HI



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

LSB= Low Surface Brightness



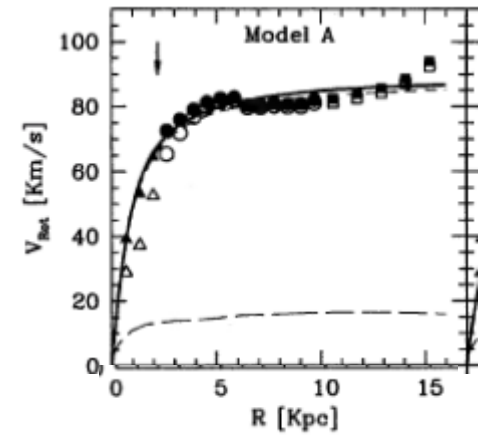


Champ de vitesses
Diagramme de l'araignée

NGC 2915, LSB

M/L ~ 80

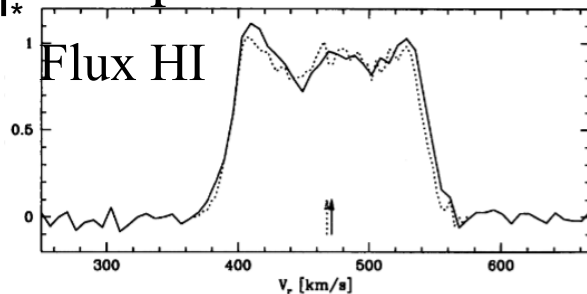
La matière noire domine partout



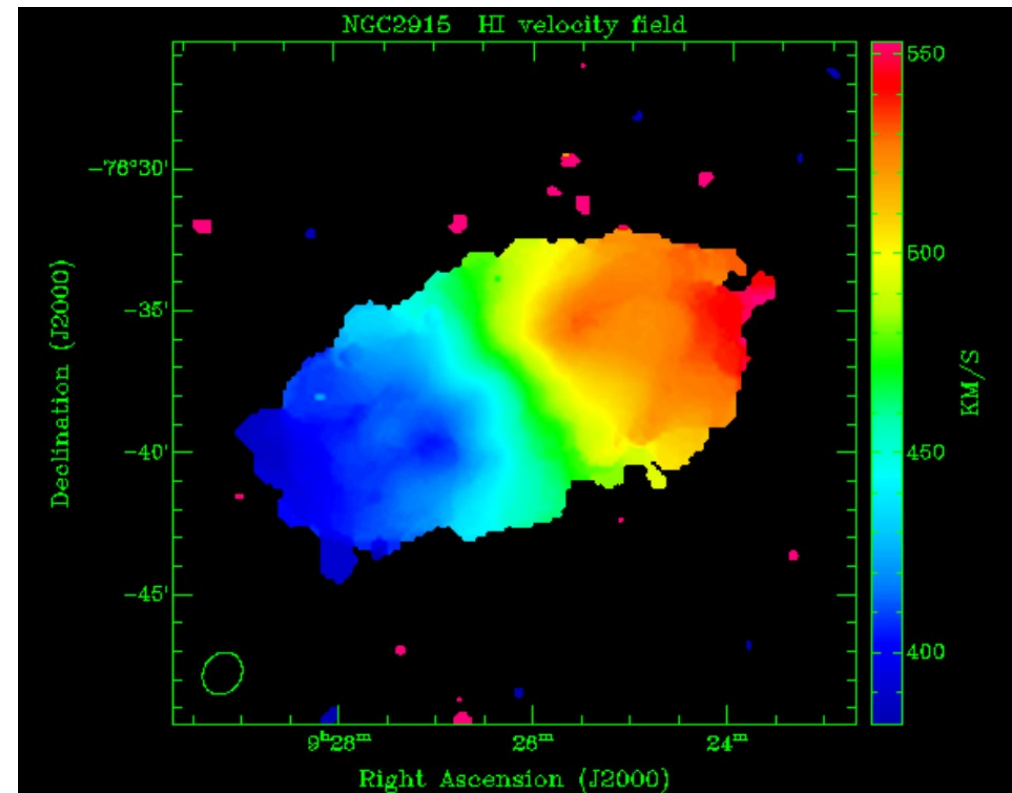
$M(HI) = 1.3 \cdot 10^9 M_{\odot} \gg M_*$

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

Spectre total



Meurer et al 1996, Bureau et al 1999



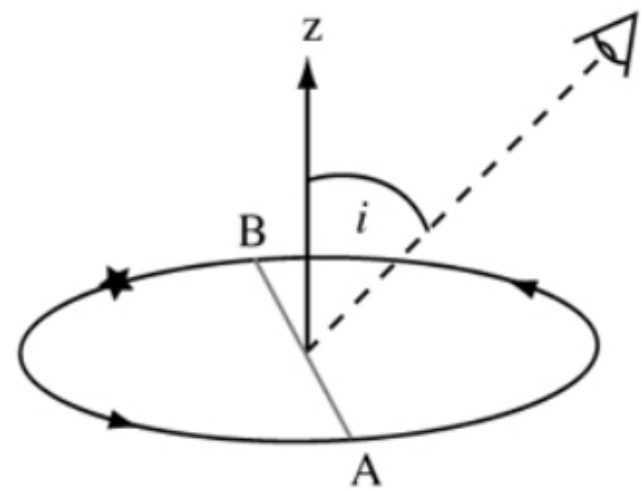
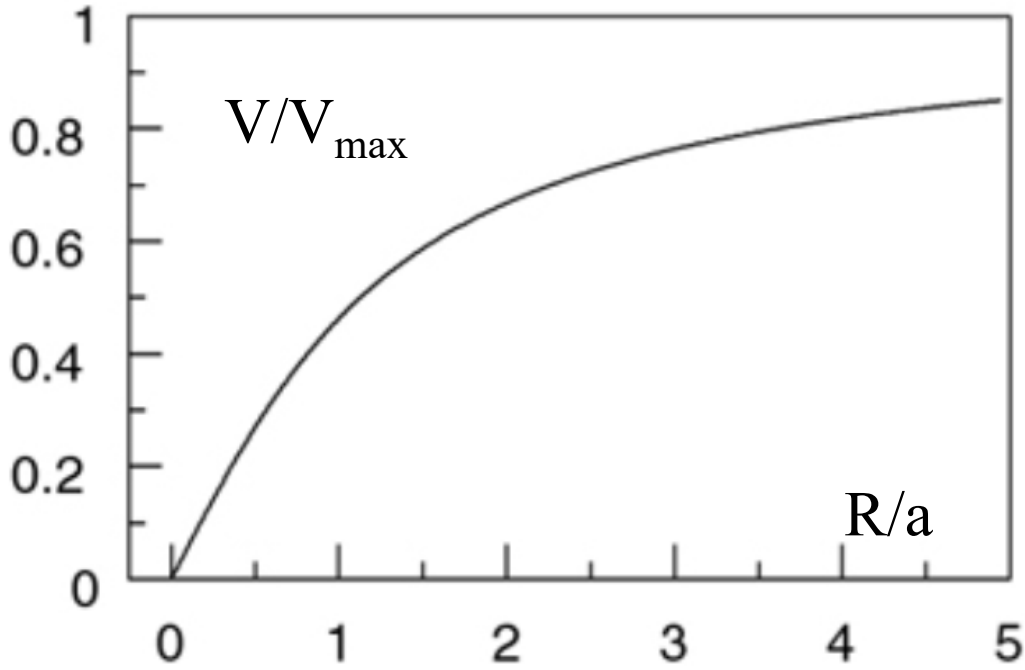
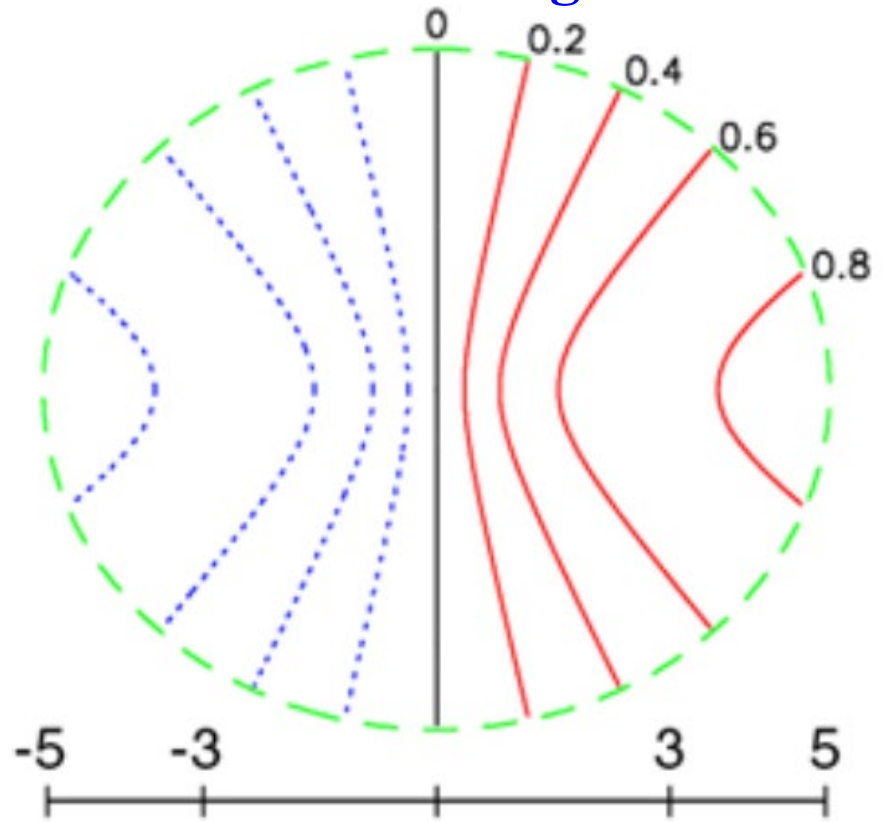
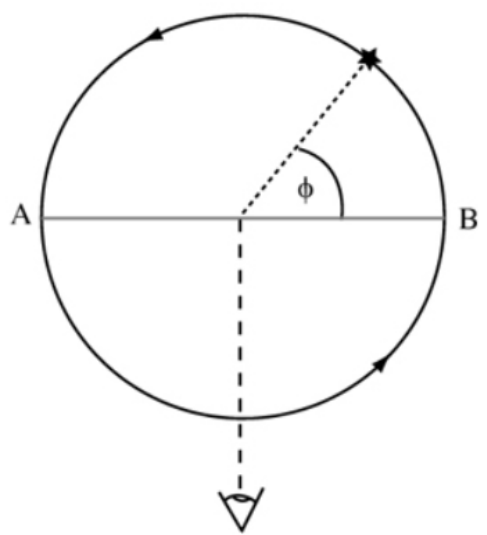


Diagramme de l'araignée



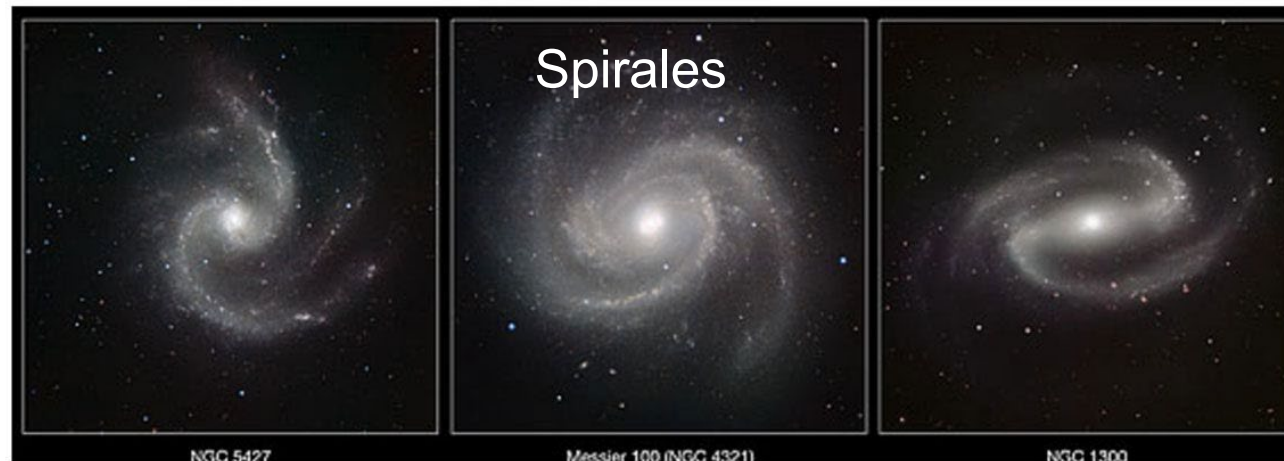
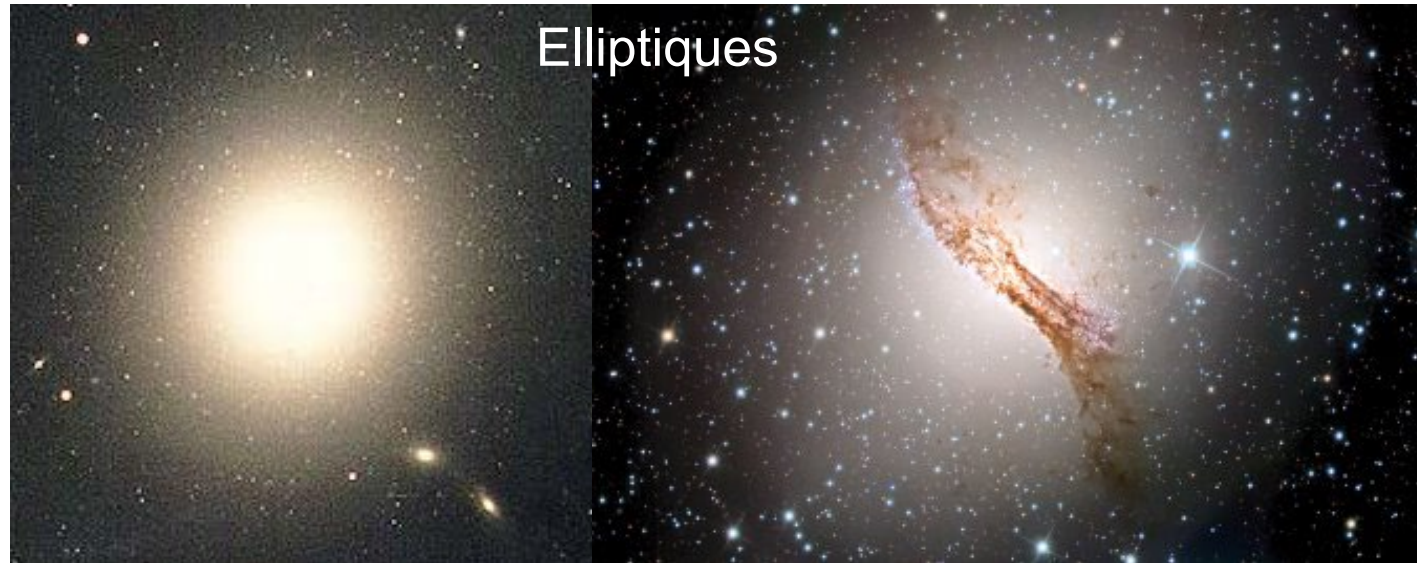
$$V_{\text{obs}} = V_{\text{sys}} + V_{\text{rot}} \sin i \cos \phi + V_{\text{r}} \sin i \sin \phi$$

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

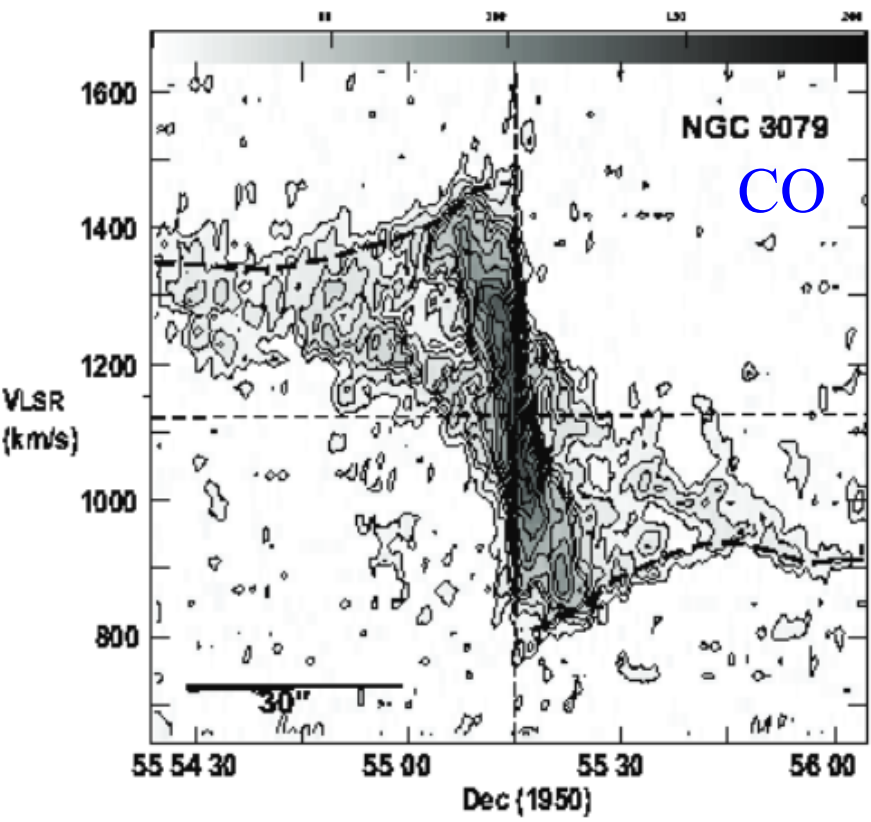


Gaz atomique, moléculaire, ionisé

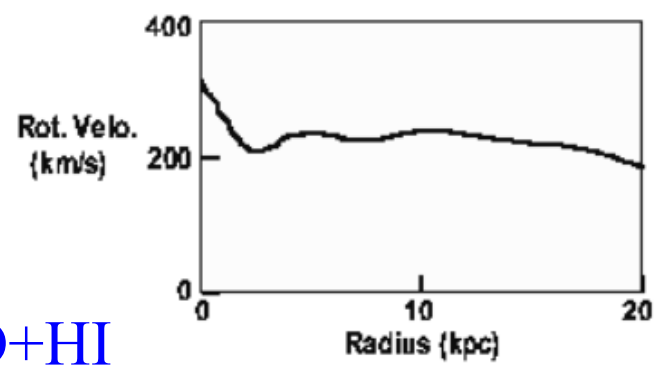
N3079

Traceurs complémentaires, CO, H α au centre
 Haute résolution, HI déficient
 HI dans les parties externes, V_{plat}

Optique: H α , 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 ⁻¹
CO	1.5" ... 8"	2 ... 10 km s ⁻¹
H α , ...	0.5" ... 1.5"	10 ... 30 km s ⁻¹



CO+HI

Sofue & Rubin 2001

Observations de HI 21cm



Westerbork
Pays-Bas

MeerKAT, précurseur SKA Afrique du Sud



Aujourd'hui
 $z < 0.1$

27 antennes

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

200 antennes

VLA
USA



VLT Paranal, ALMA, désert d'Atacama

64 antennes



Ondes millimétriques
Gaz moléculaire

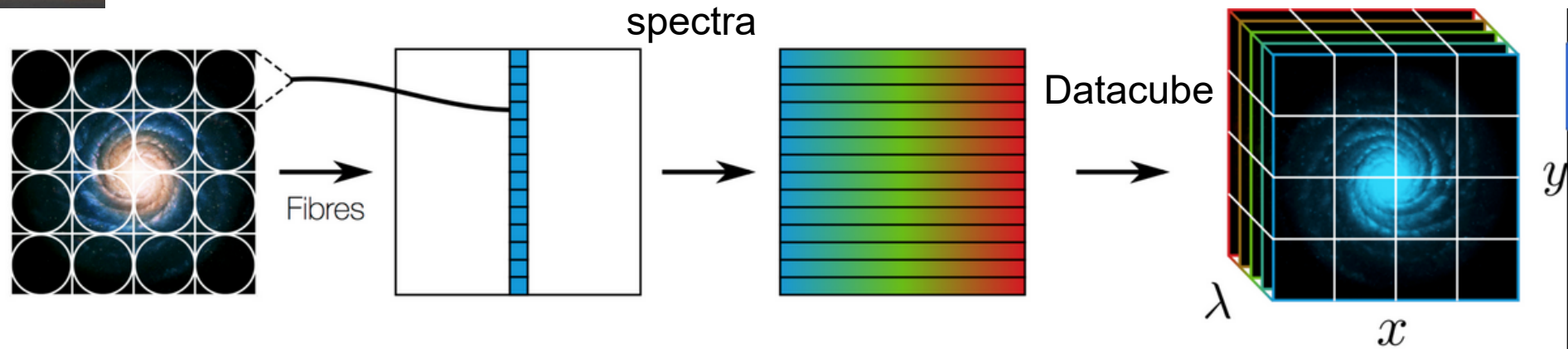
ALMA

© picture-alliance/dpa



VLT

H α , MUSE



spectra

Fibres

Datacube

λ

x

y

Plus de 1000 courbes de rotation

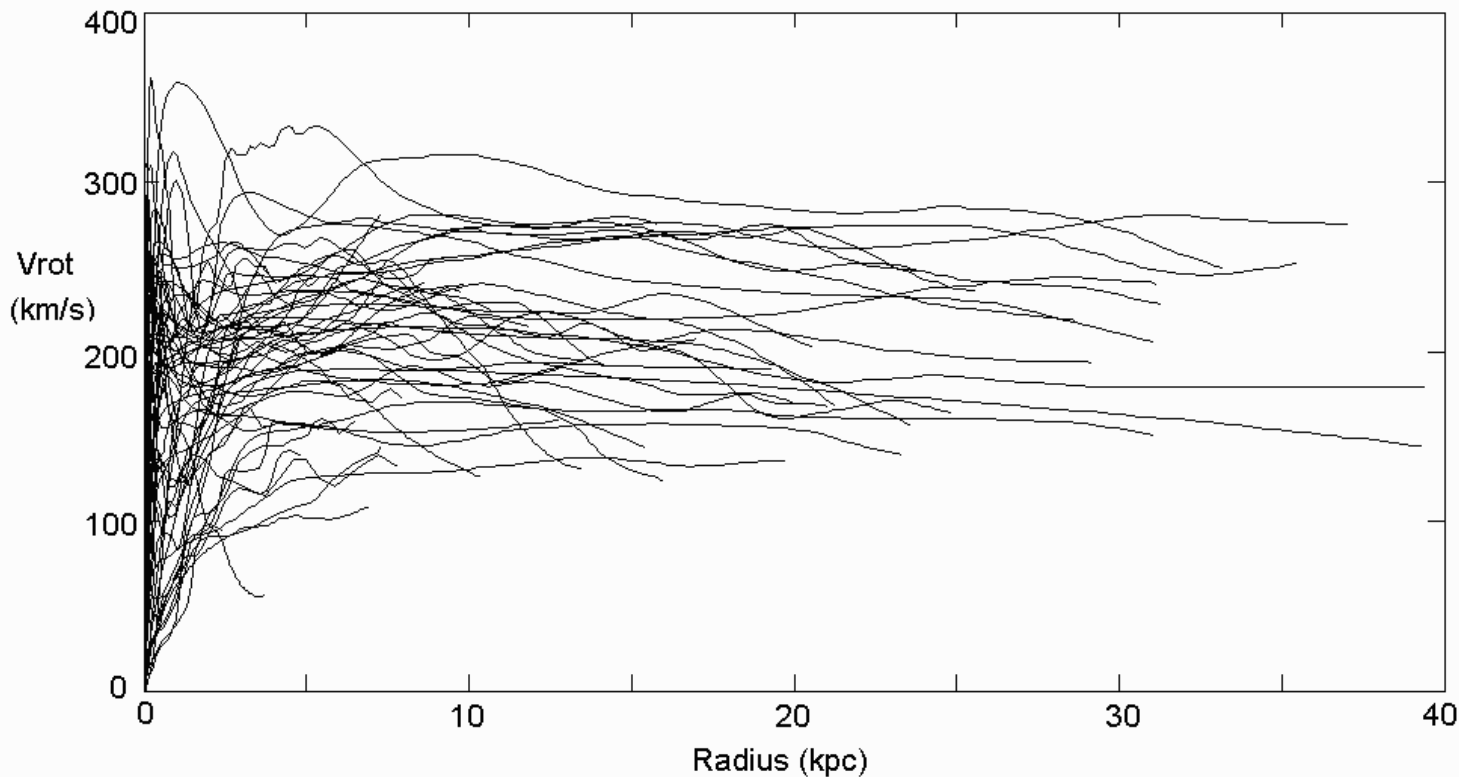
HI à 21cm (*Sofue & Rubin 2001*)

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

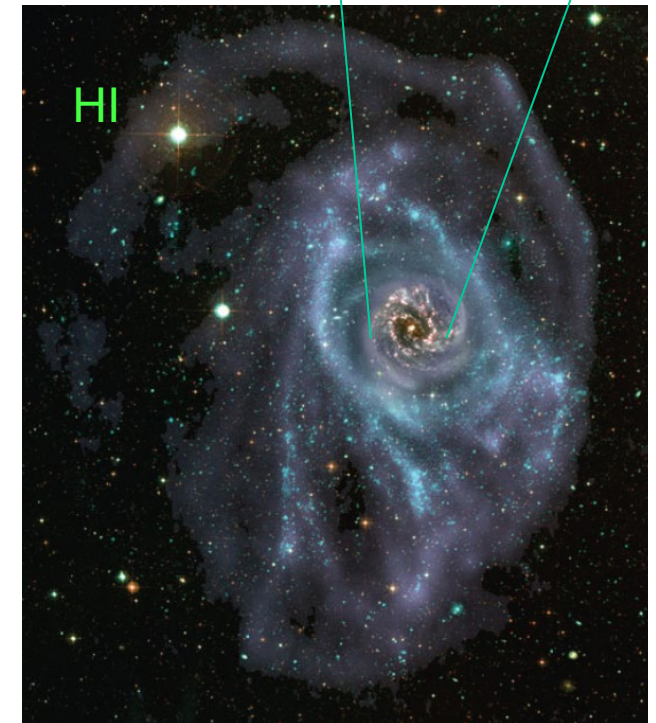
$$M/R \propto V^2$$

$$M \propto R$$

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



M83: optique



M83: une galaxie semblable à la Voie Lactée

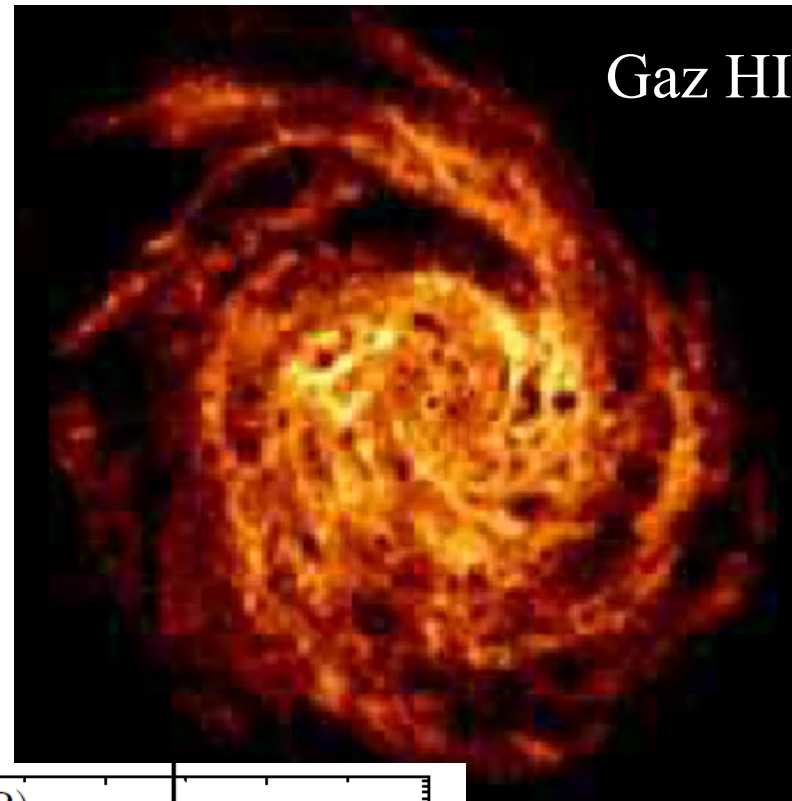
THINGS

The HI Nearby
Galaxy Survey



NGC 6946: Modélisation

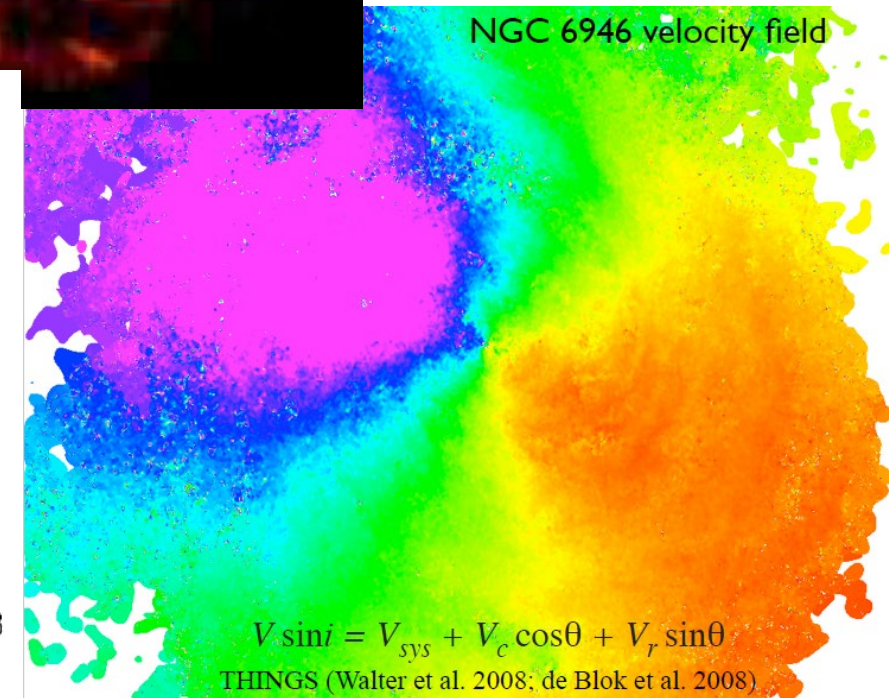
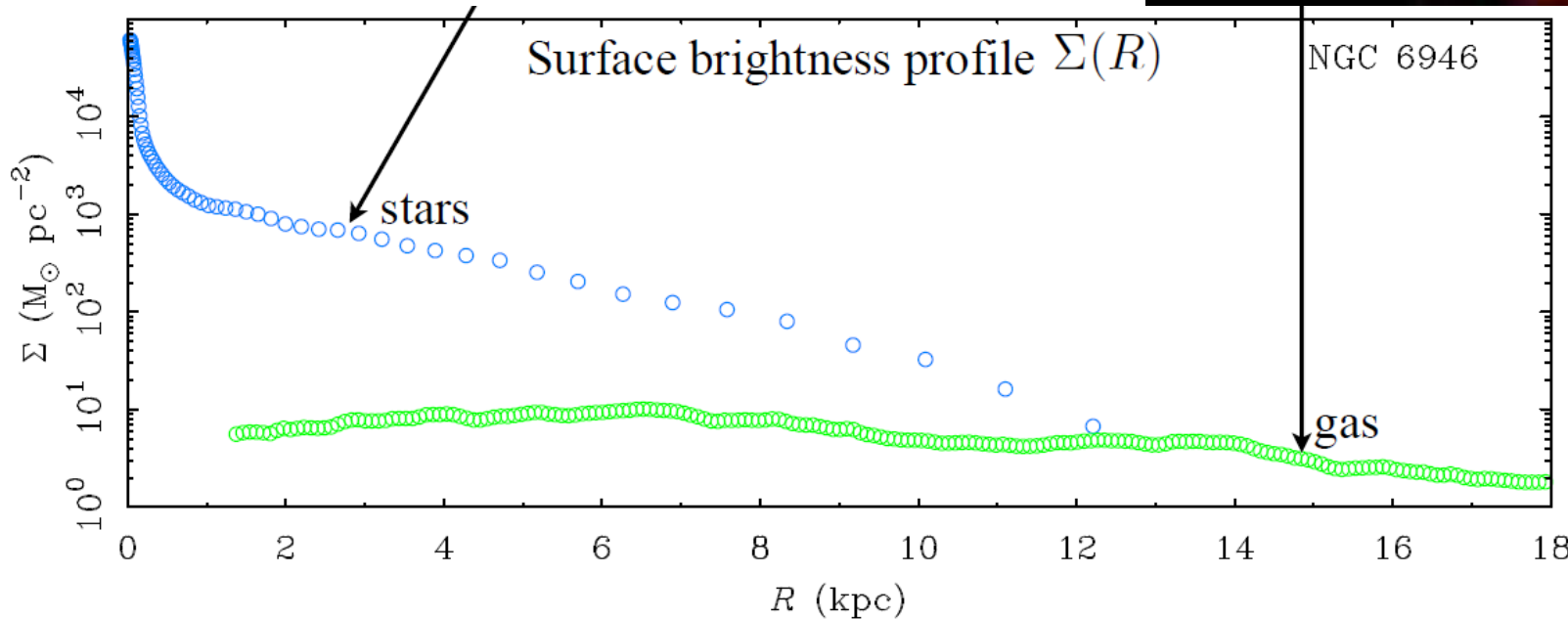
Masse des étoiles: Optique, Infrarouge



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 $\rho(R,z) = \Sigma(R) v(z)$

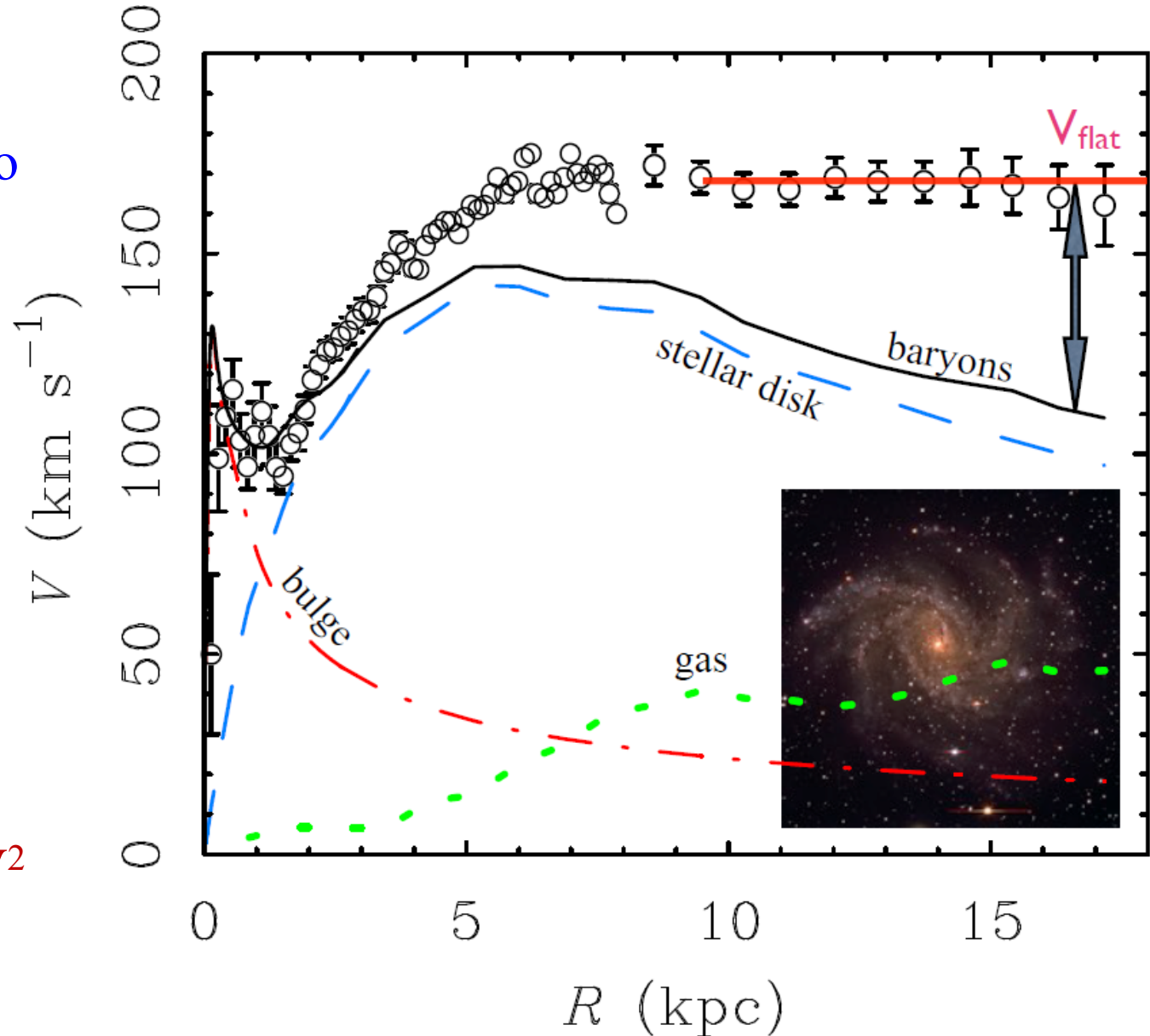
Disque mince $h_z \sim h_r/10$, puis

Obtention de la vitesse circulaire

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

Les divers composantes se somment en V^2

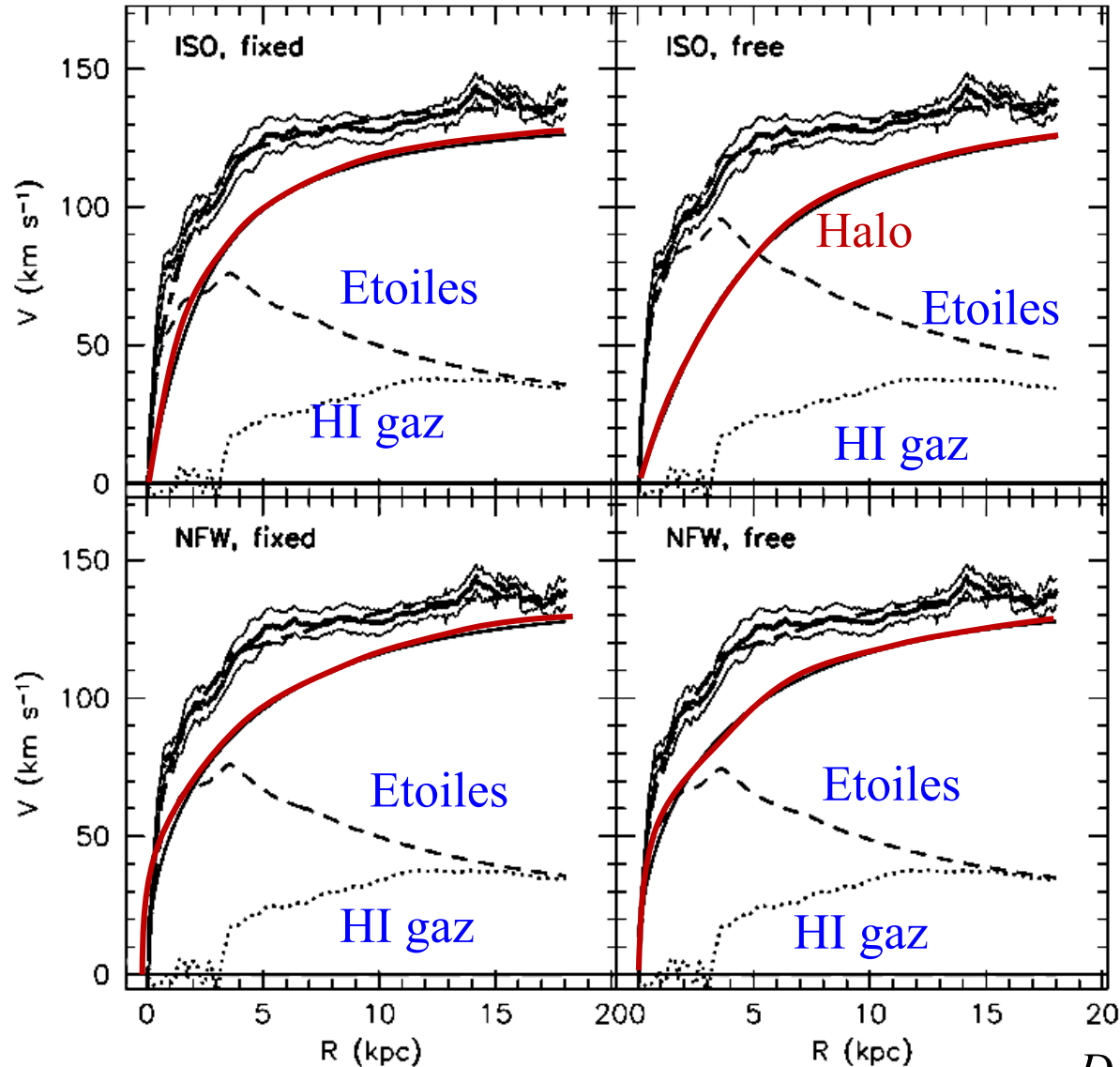
Attention aux vitesses non-circulaires!



Dégénérescence: Halo -disque

NGC 2403

Max disk



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

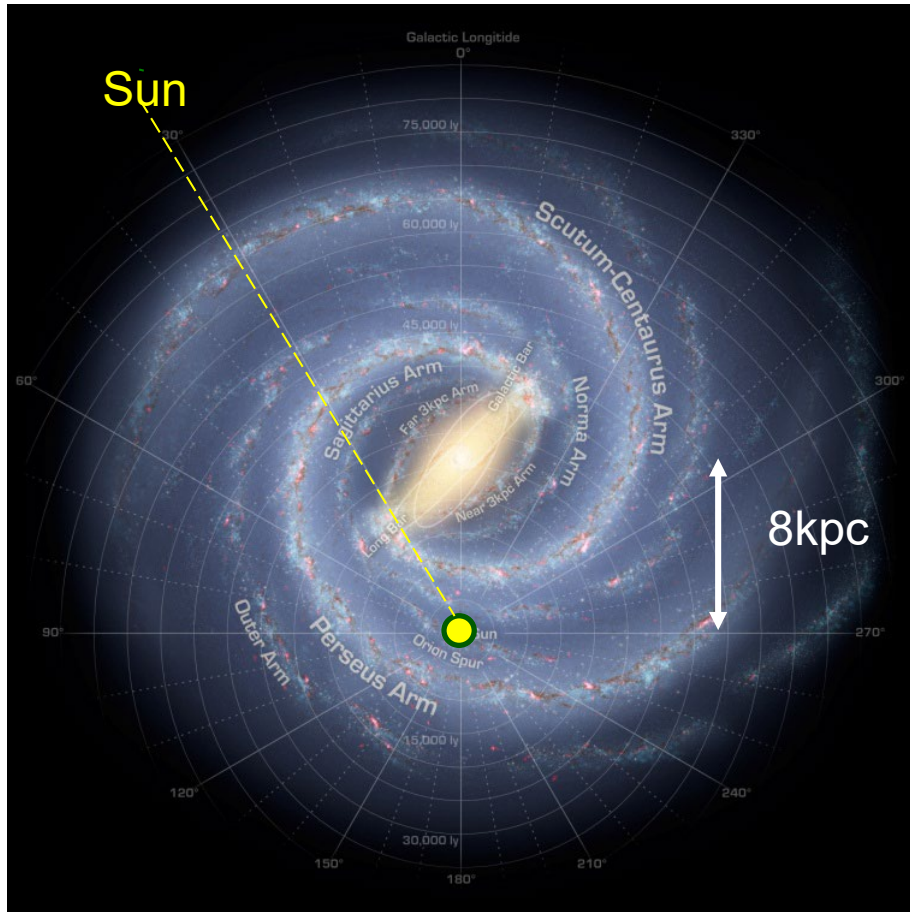
Cela dépend de la résolution spatiale au
centre

→ Importance de $H\alpha$, CO

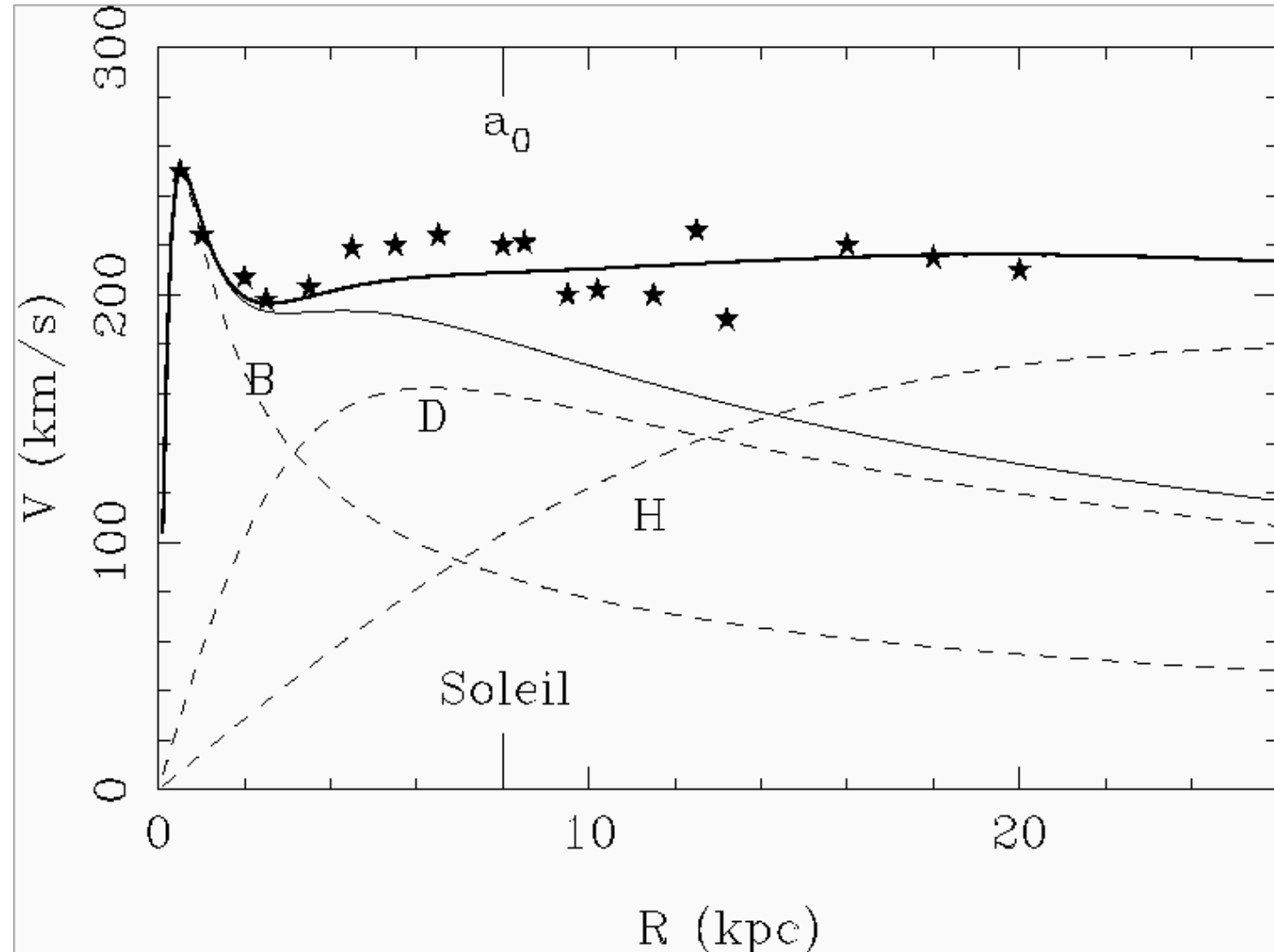
Surtout pour les cuspidés (NFW),
cœurs (ISO)

Les galaxies naines donnent plus
clairement la taille des coeurs

La Voie Lactée: déprojection difficile

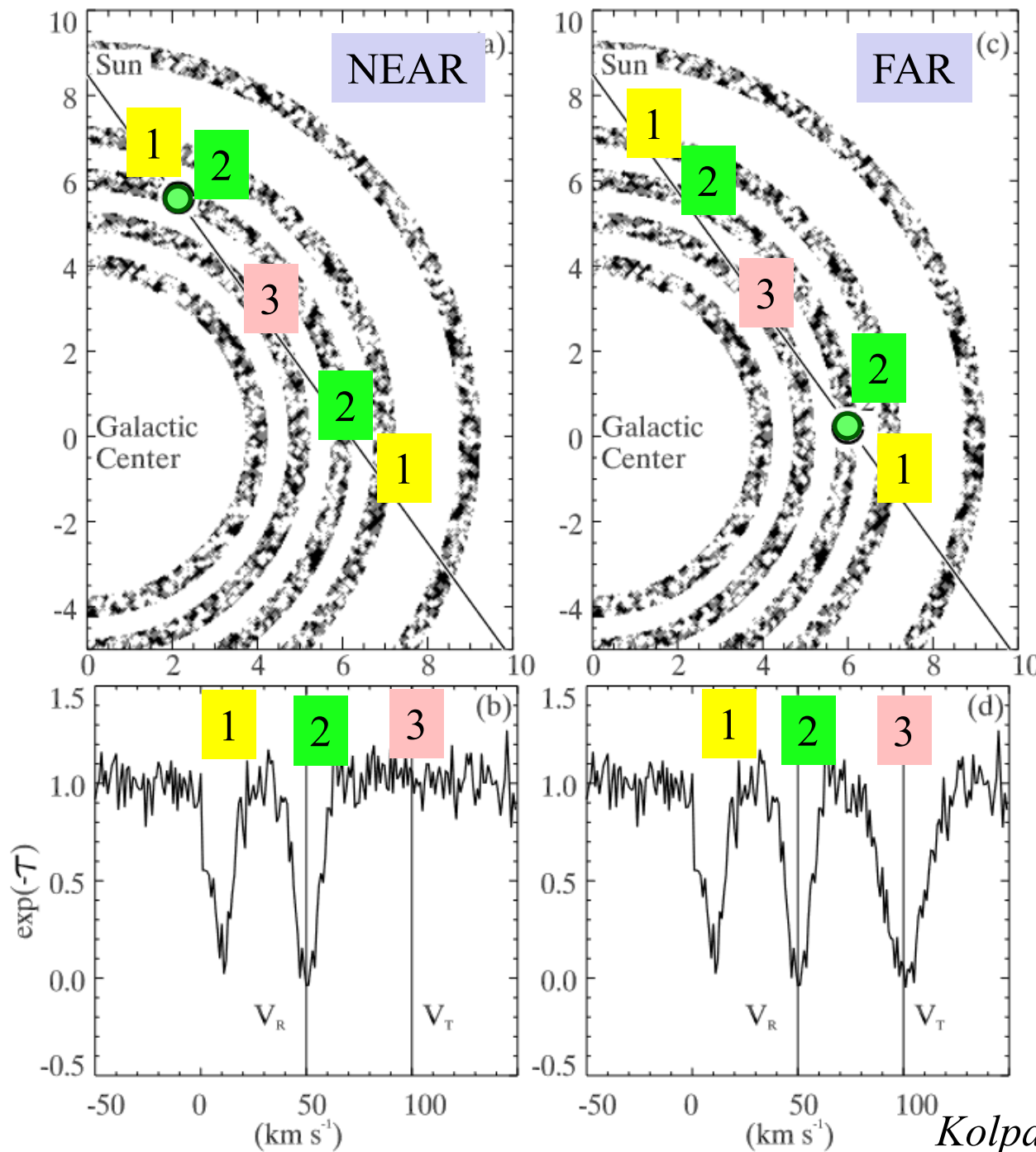


Nous ne voyons que la tranche



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

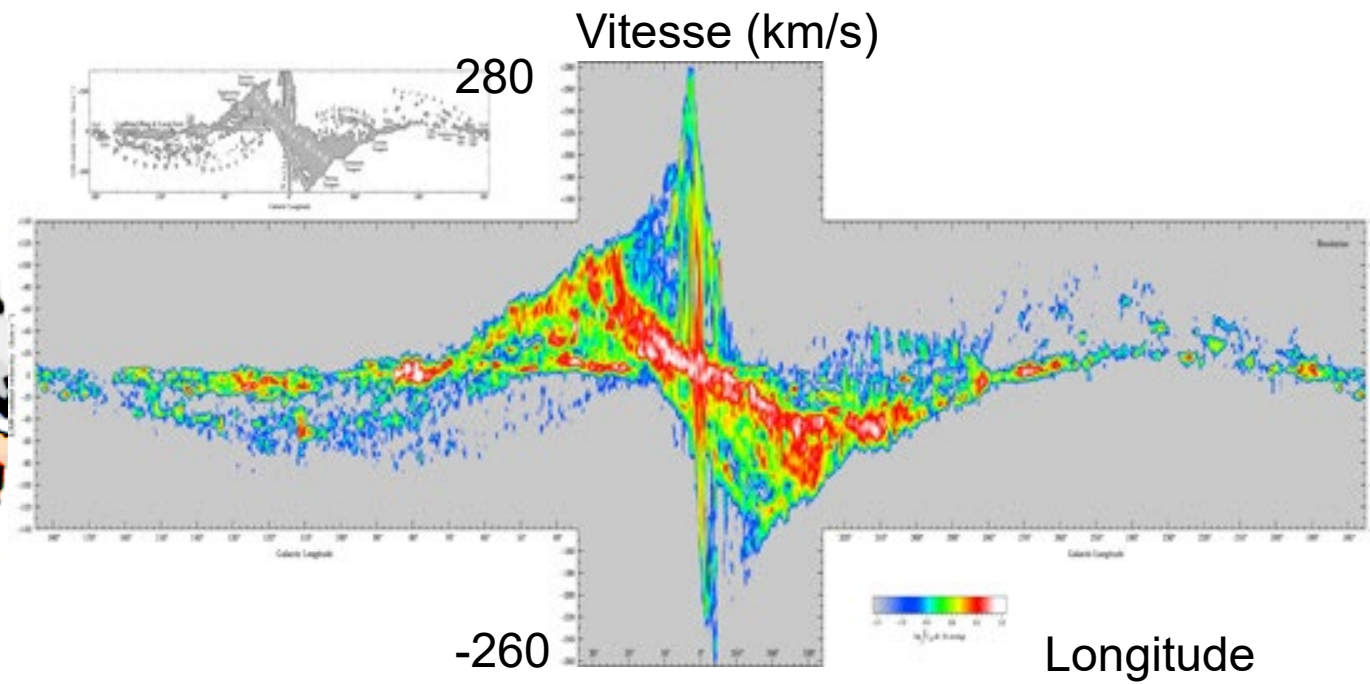
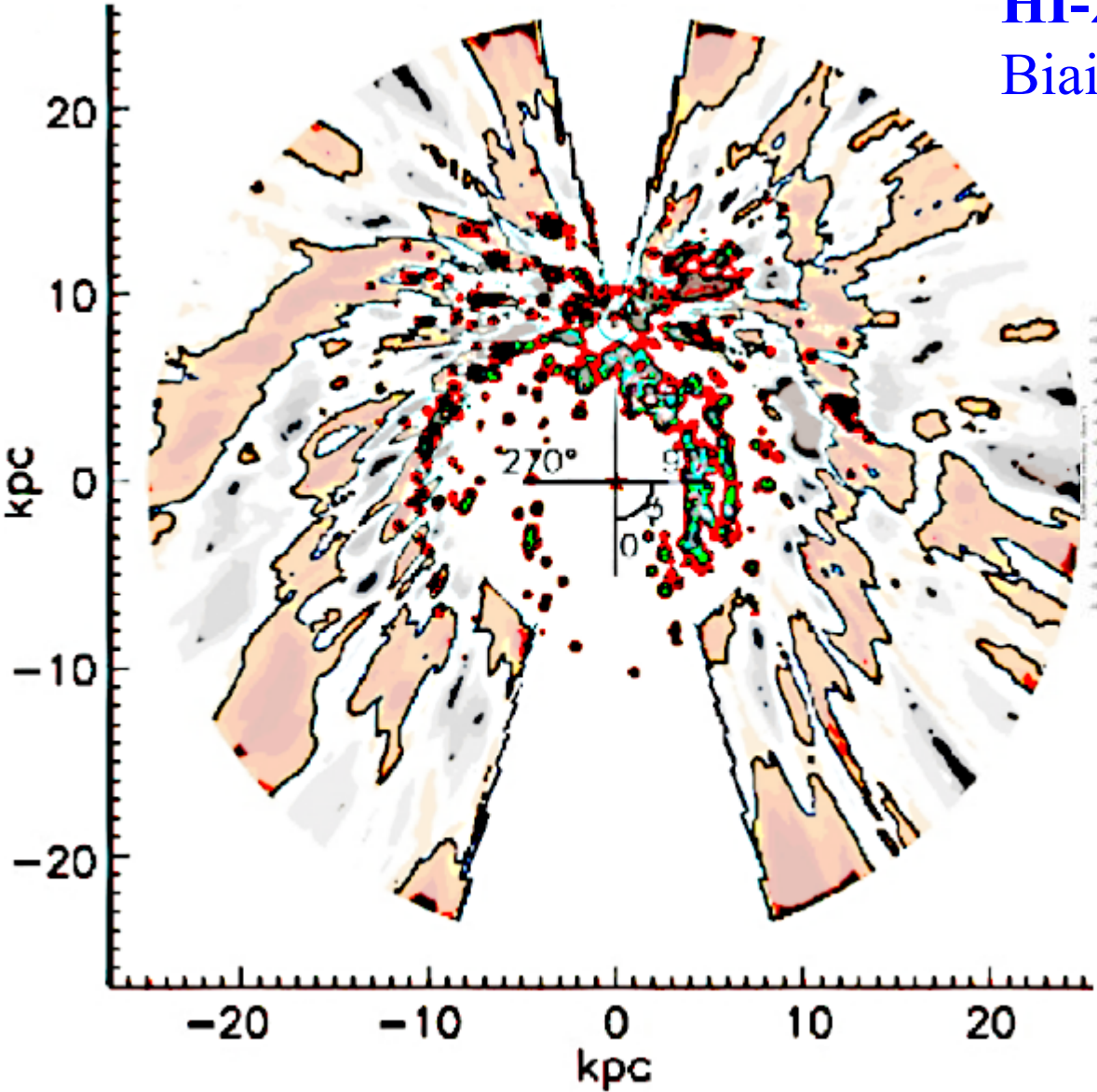
Ambiguïté des distances



- 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, H₂

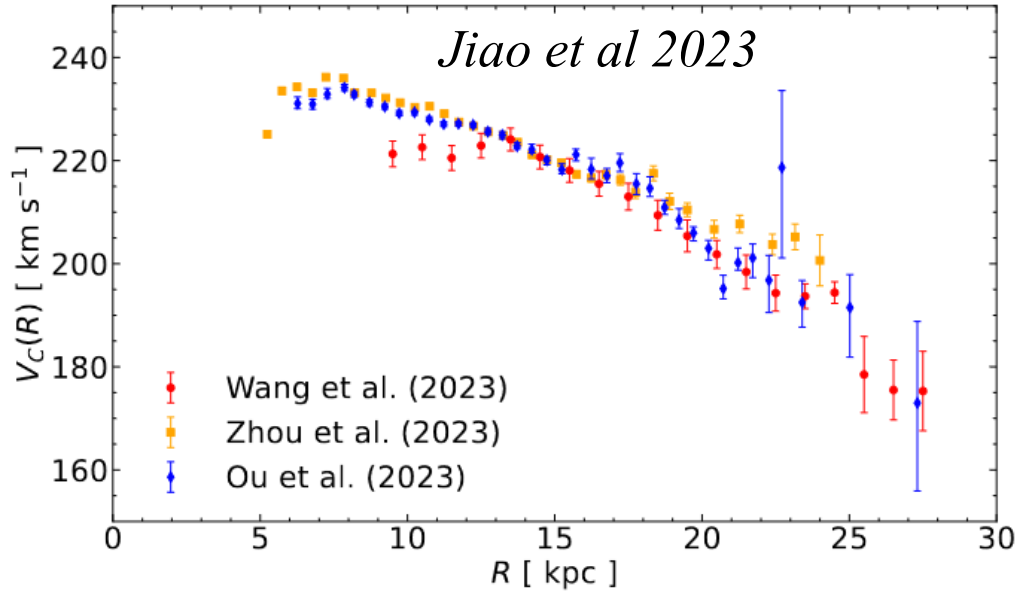
HI-21cm Déprojection suspecte
Biais de vitesses



CO traceur de H₂
Vitesses non-circulaires au
centre → barre

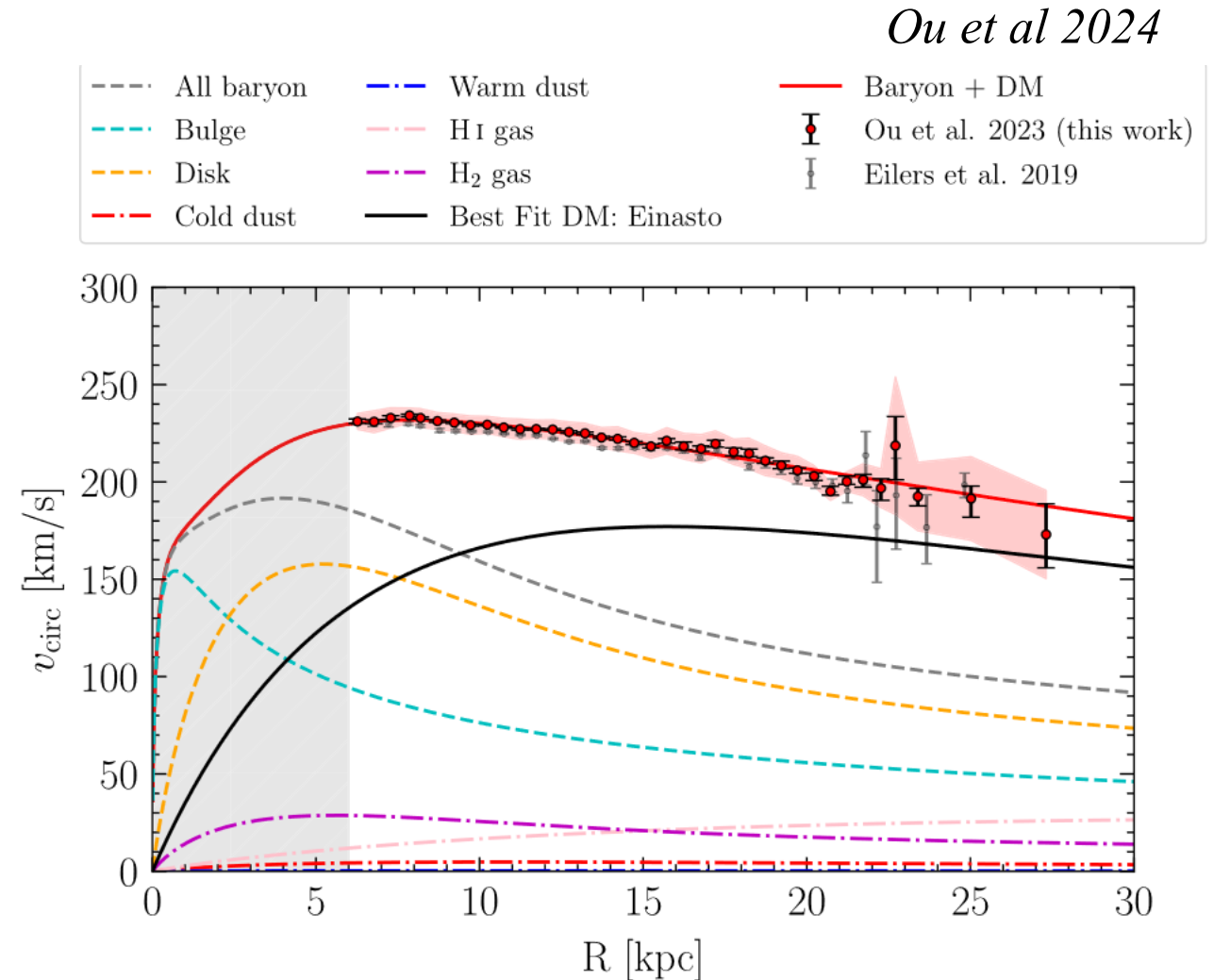
Nouvelles déterminations: GAIA

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



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

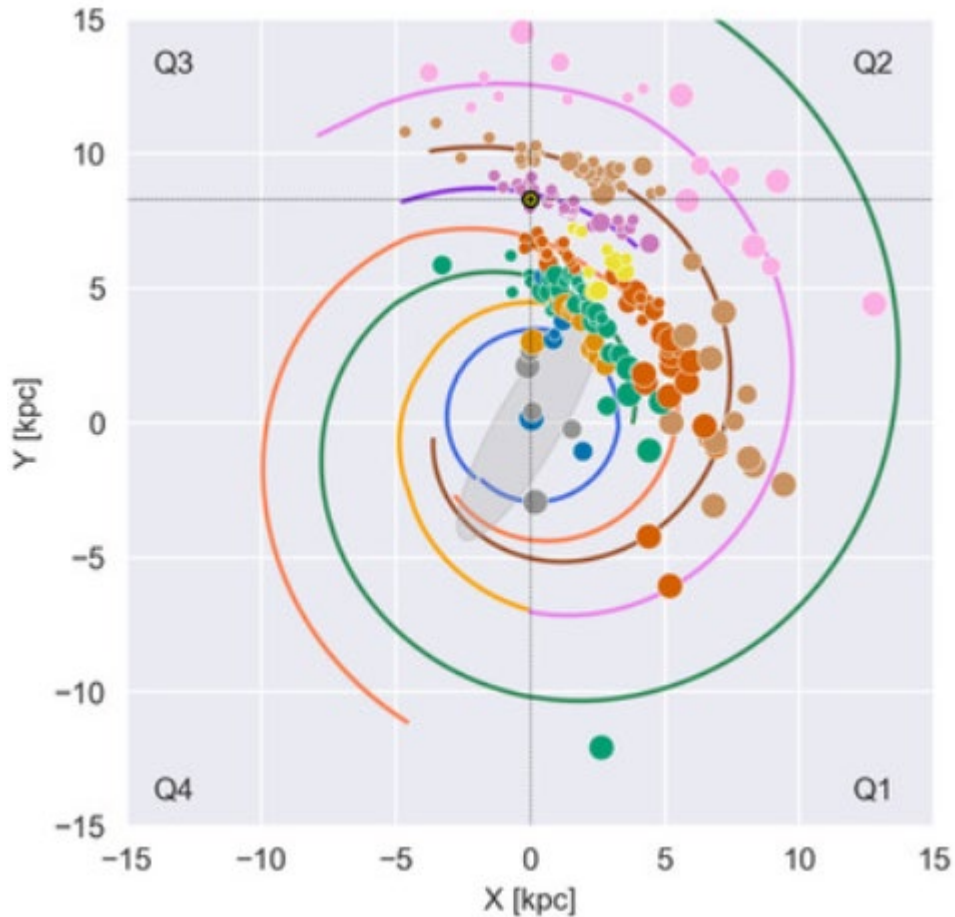
- Détection indirecte γ (au centre)
- Détection directe: densité au voisinage du Soleil



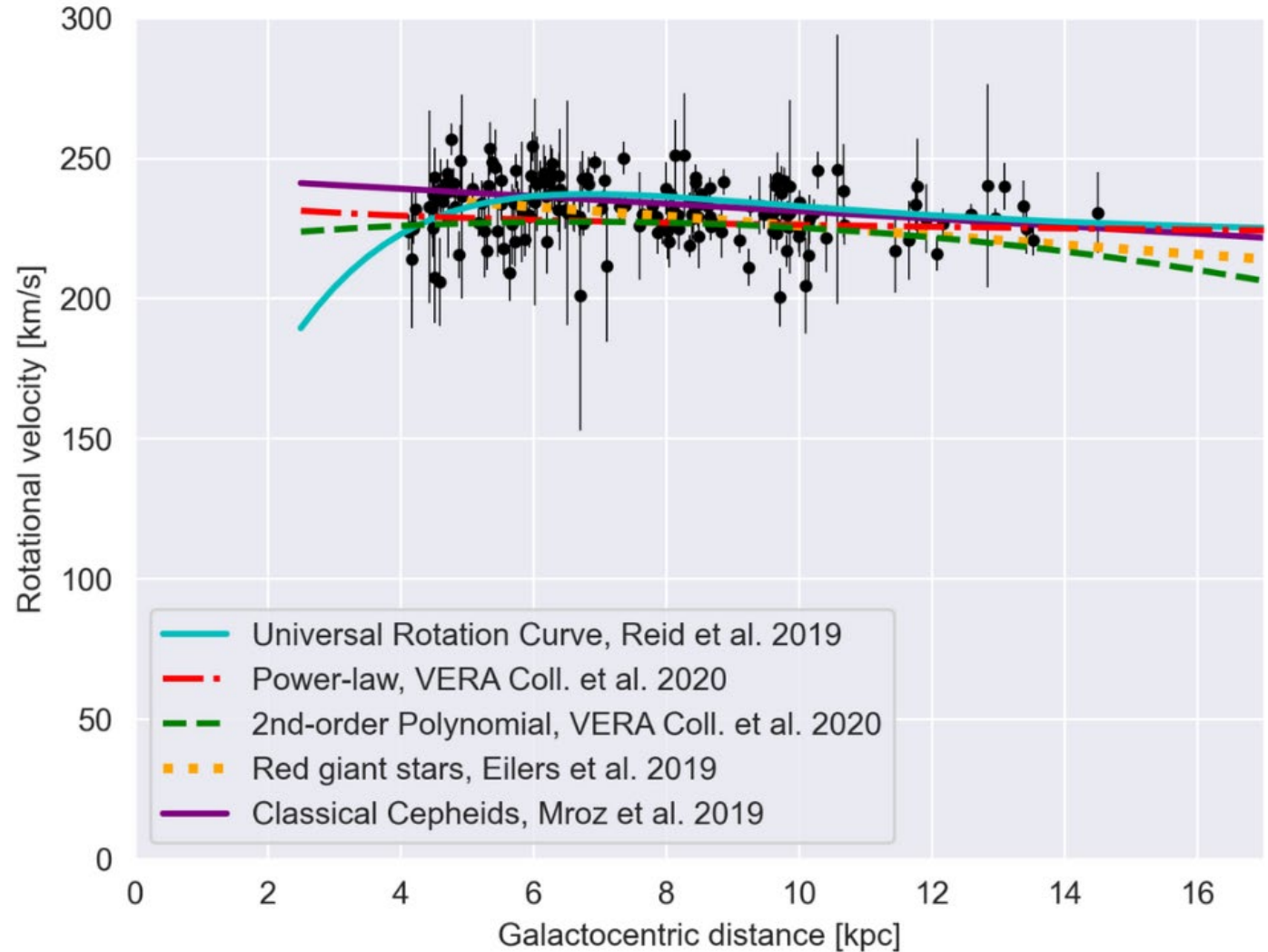
MASERS et VLBI

Masers OH, CH₃OH, H₂O, SiO Radio-cm

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

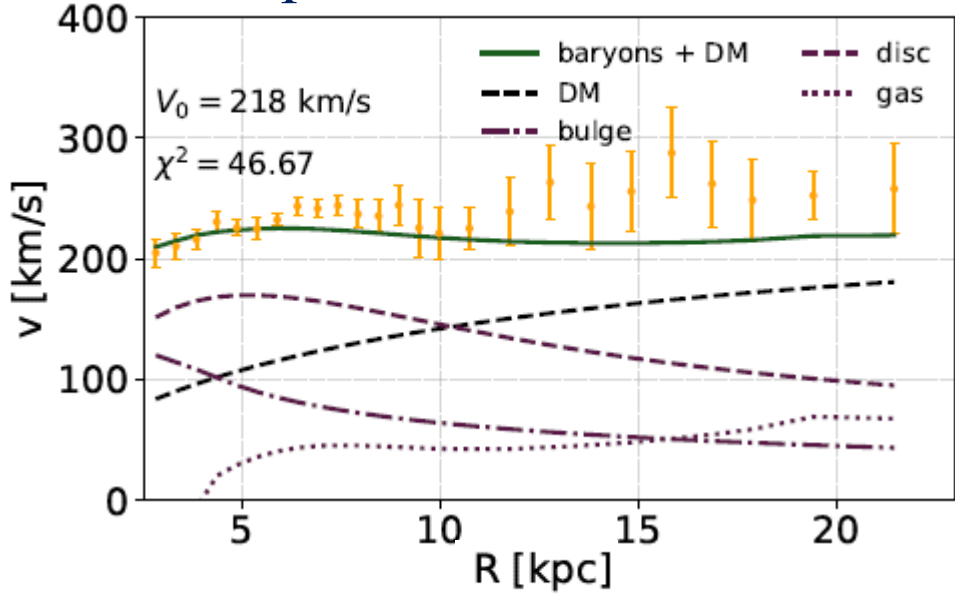


GAIA ne peut pas voir les étoiles > 2 kpc
du Soleil dans le plan
Radio: traverse la poussière

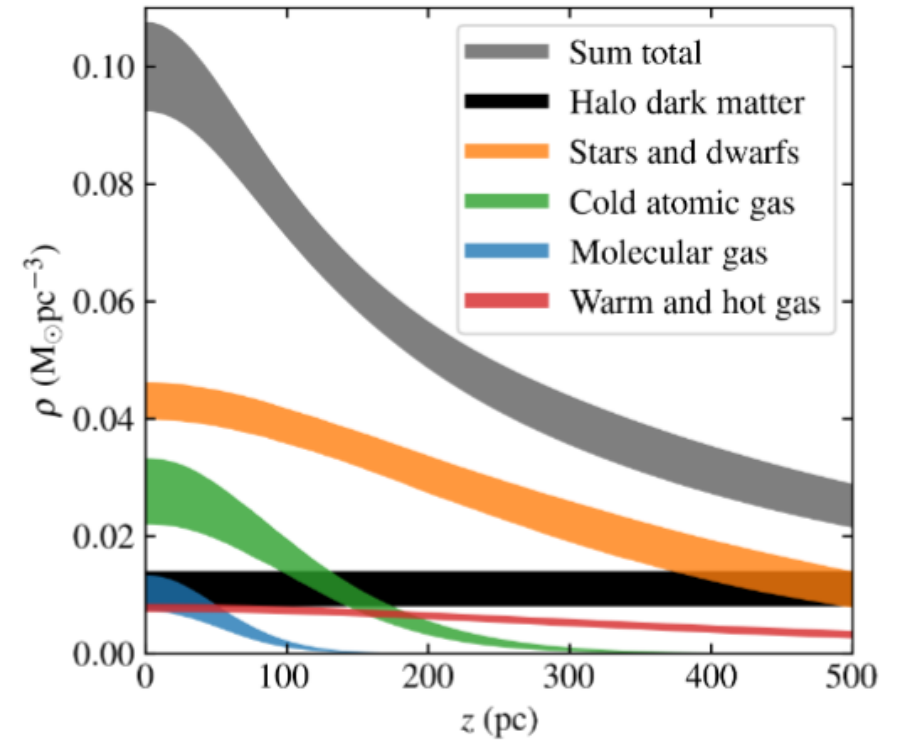


Autres traceurs, jusqu'à $R_{\text{vir}} \sim 200\text{kpc}$

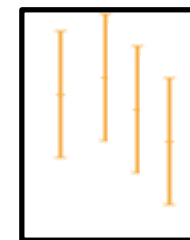
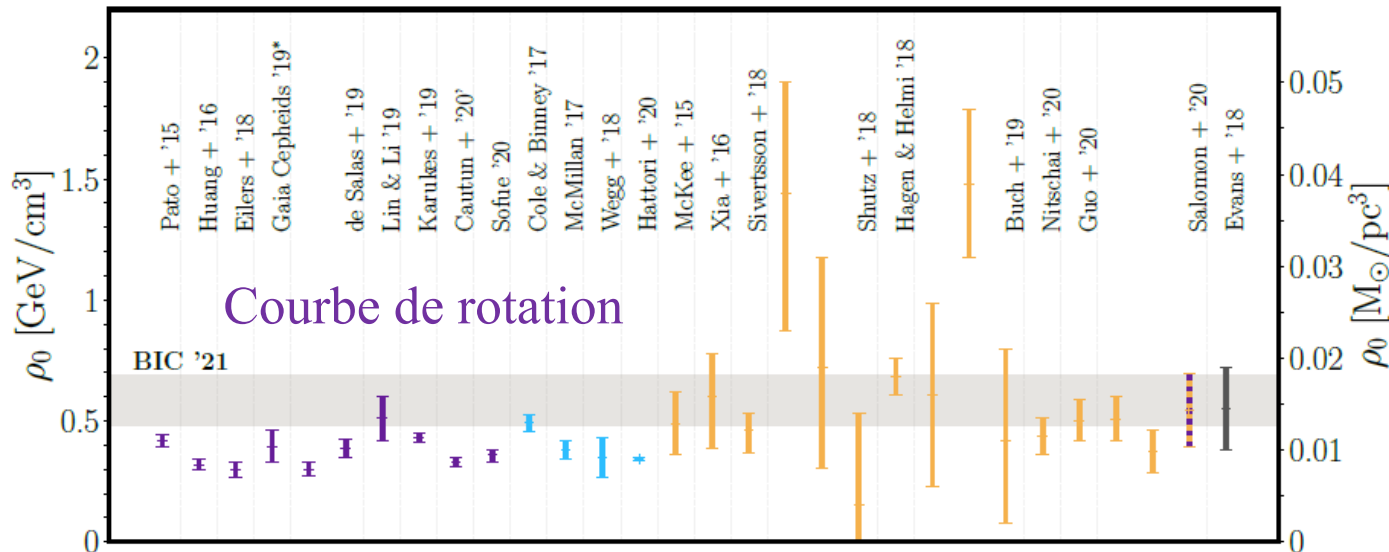
- Gaz HI, puis étoiles du halo, amas globulaires, etc..



Benito et al 2021



Widmark et al 2021

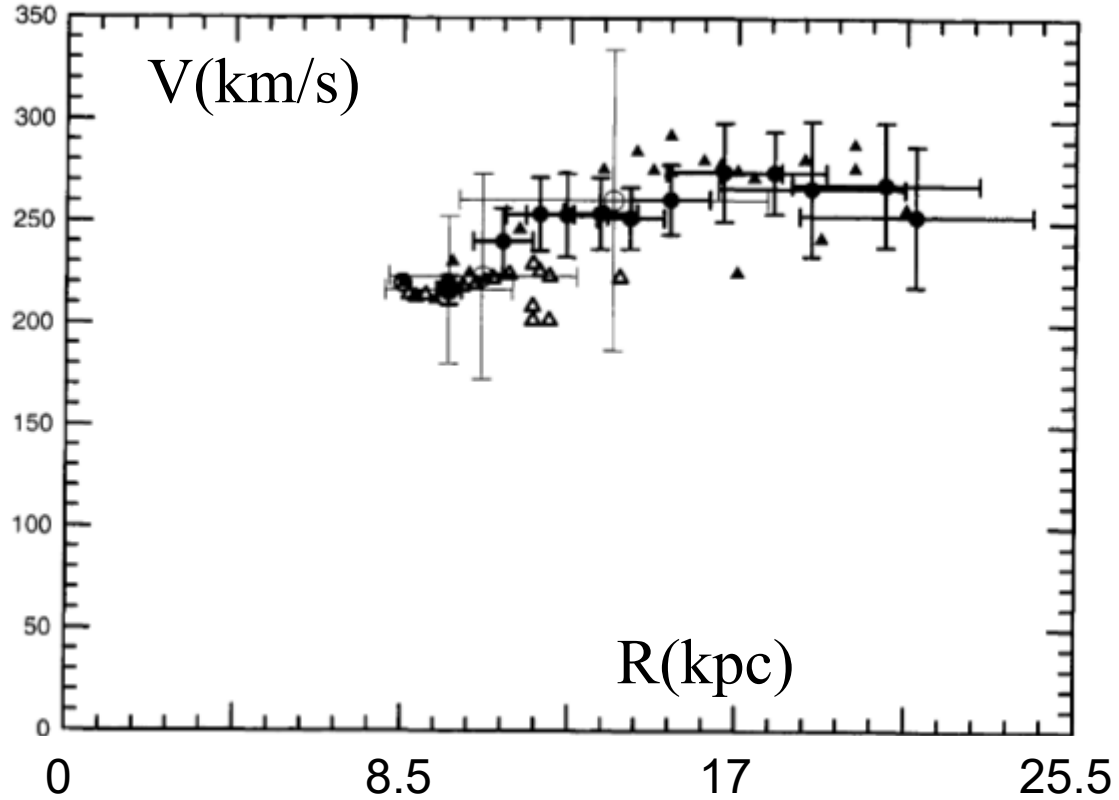


Dynamique des étoiles
Au voisinage du soleil

BIC'21 = *Benito et al 2021*

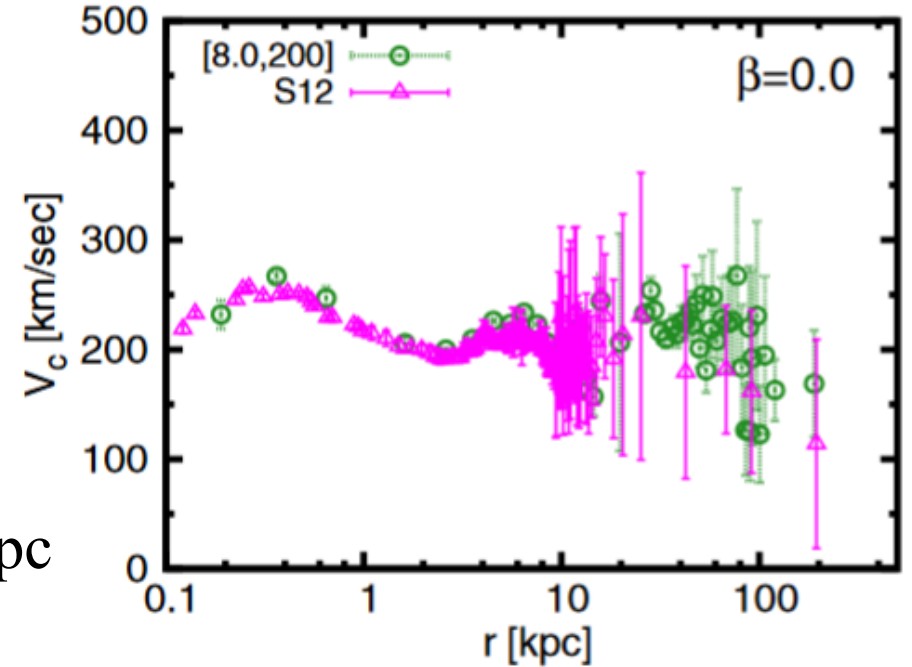
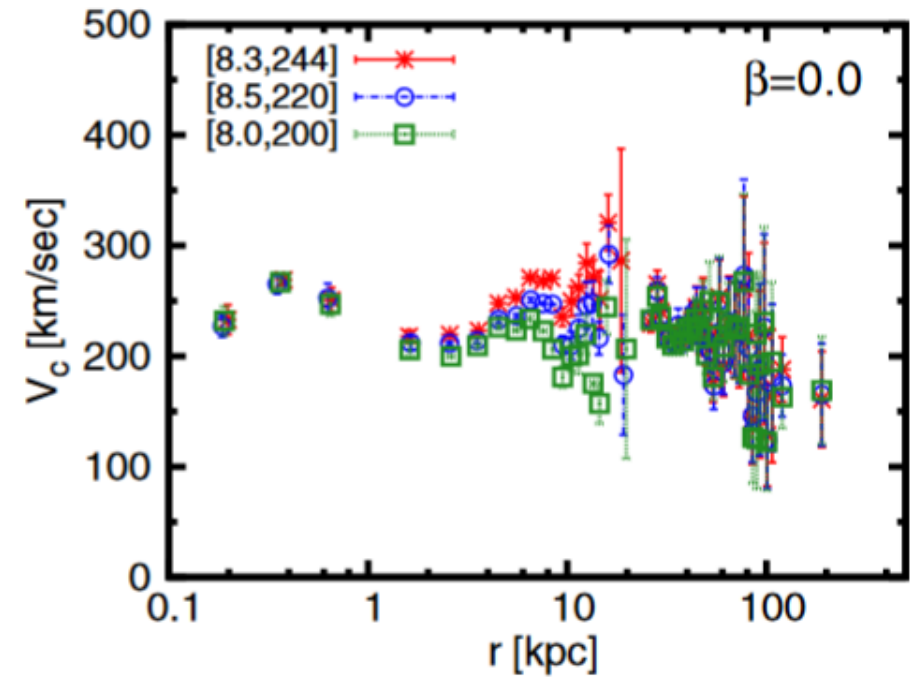
Jusqu'à 200kpc

- Gaz HI *Honma & Sofue 1997*



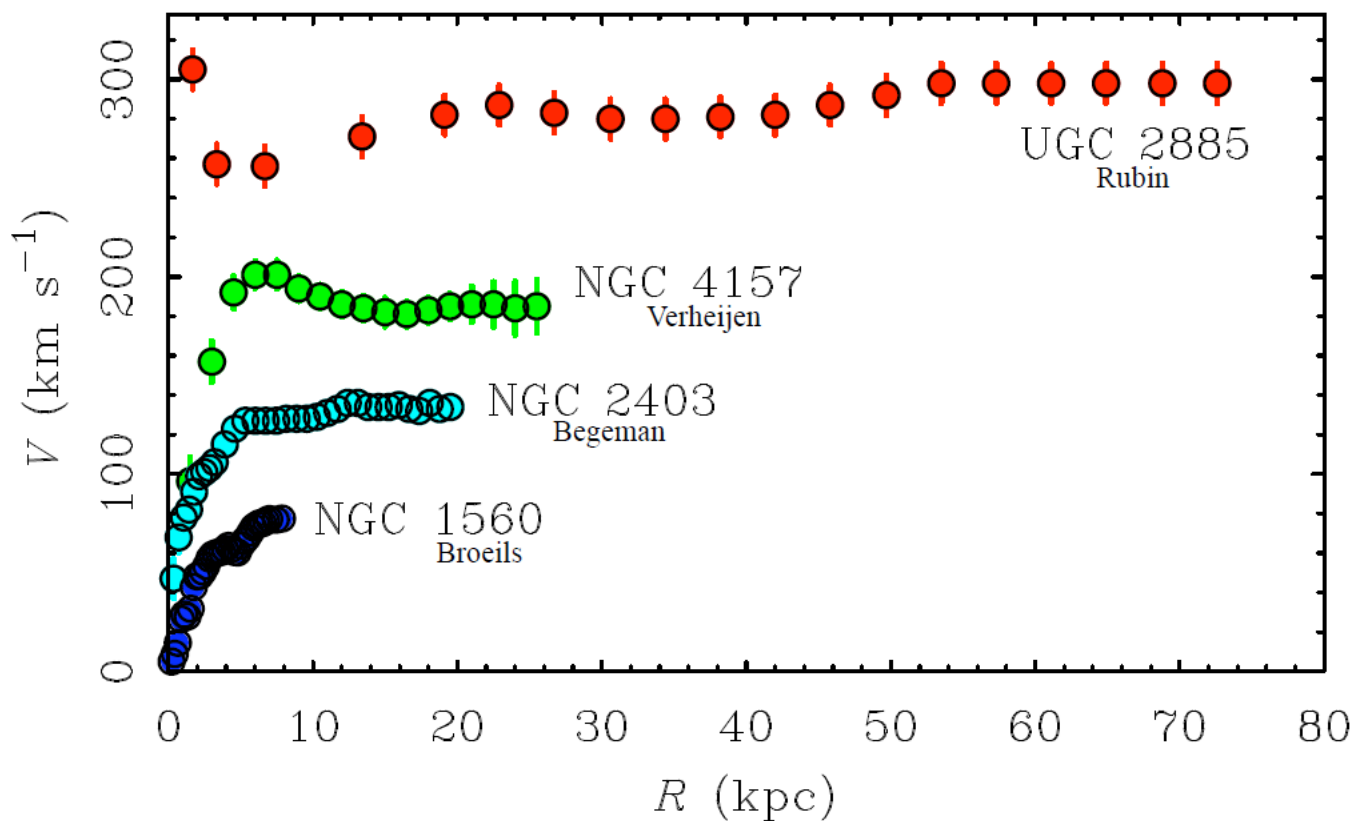
Etoiles BHB, Amas globulaires
Courbe descend à partir de 60kpc

Bhattacharjee et al 2014



Courbe Universelle

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



UGC 2885



NGC 4157

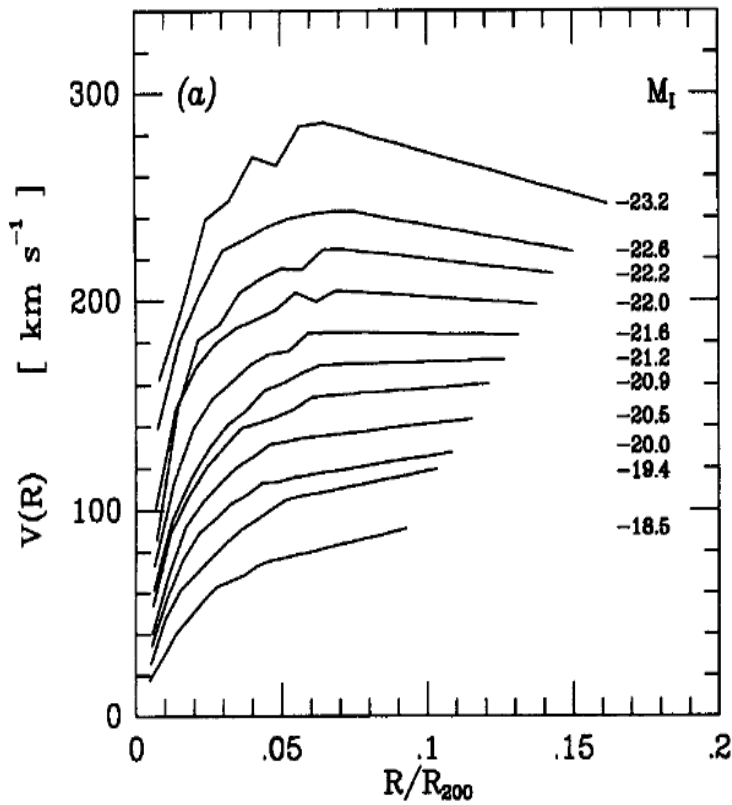


NGC 2403

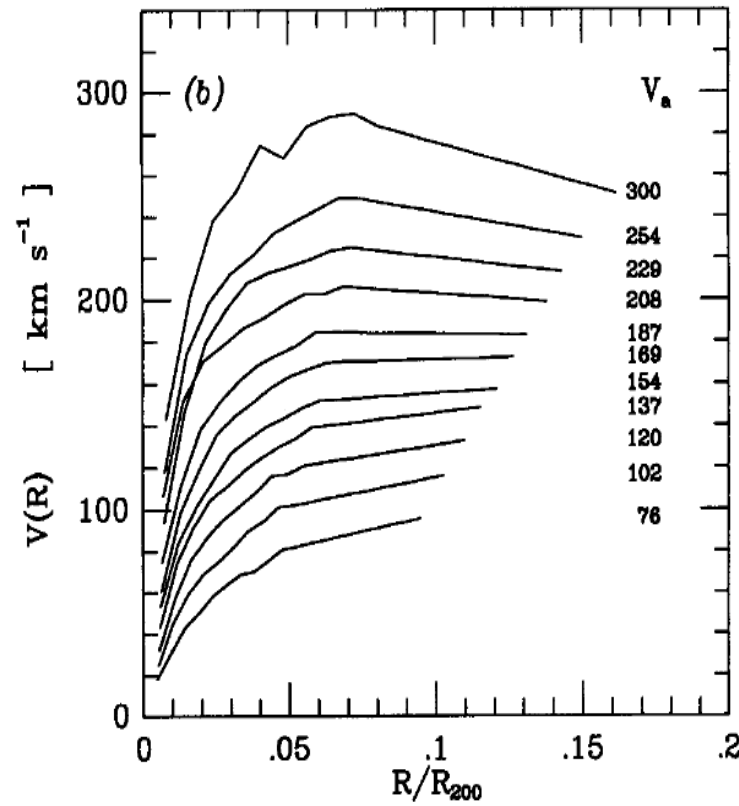


NGC 1560

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

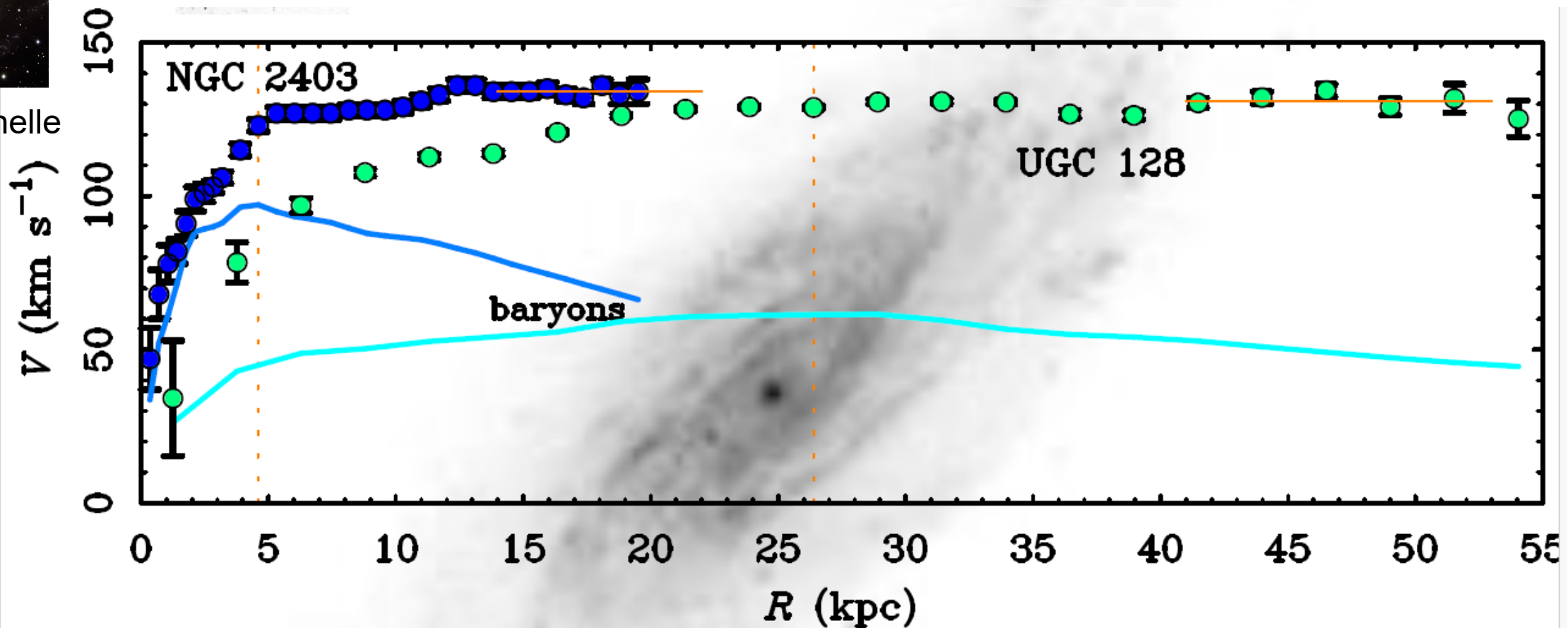
Persic et al 1996

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 Σ_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

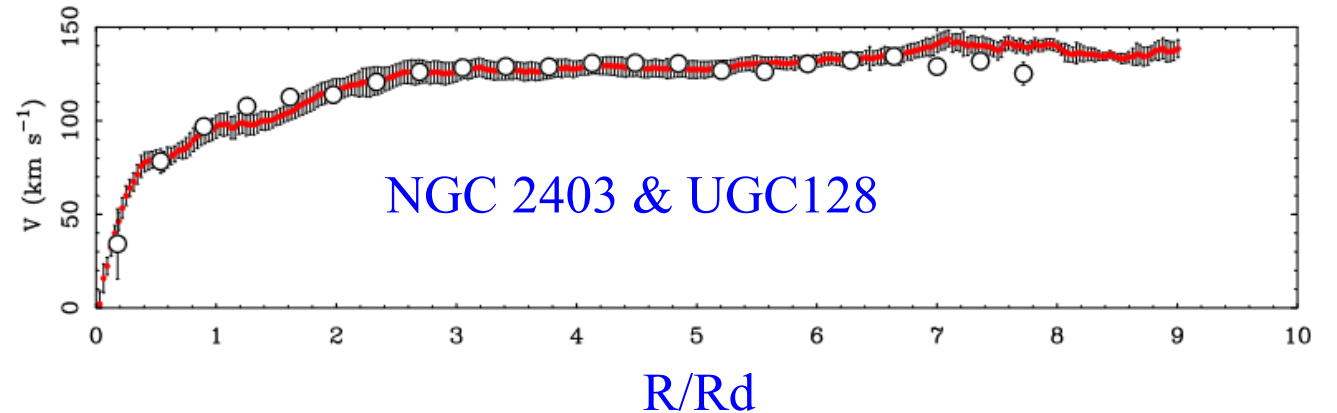
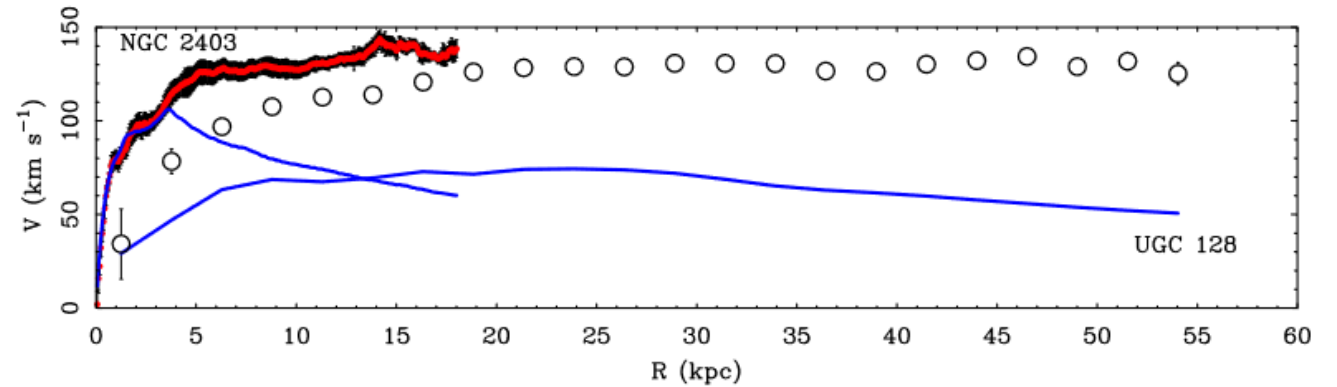
-- même halo noir

-- normalisation au disque optique

R/R_d

Même V_f , et même forme

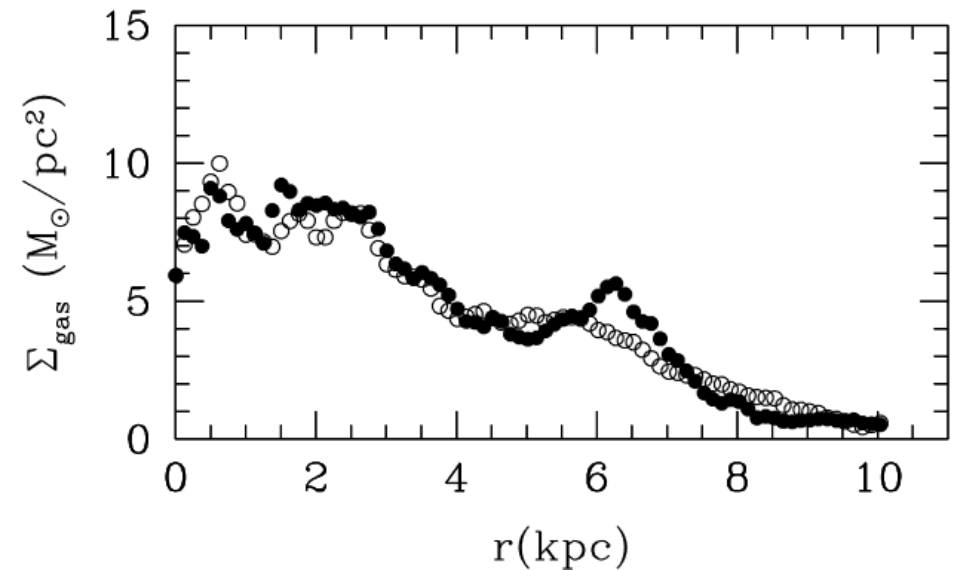
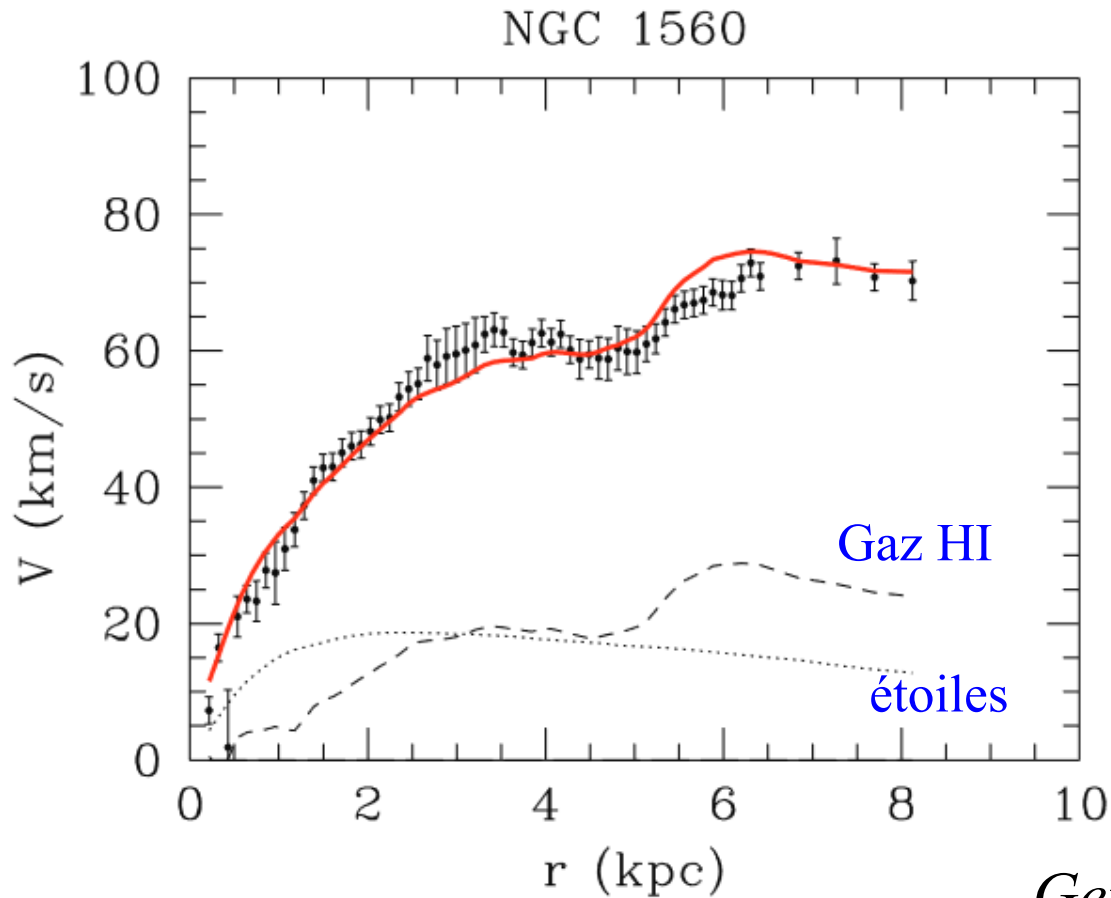
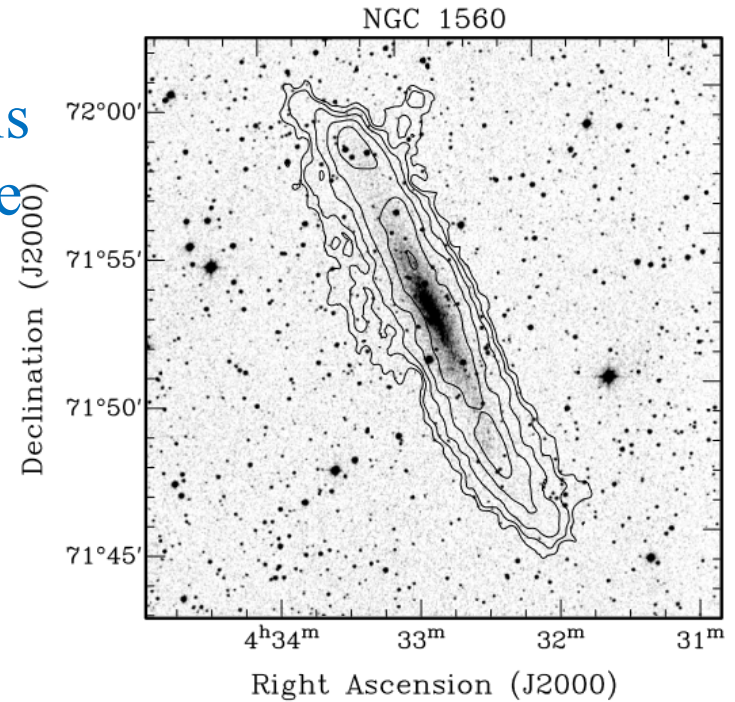
→ Halo noir beaucoup plus massif pour LSB ($R_d \times 3$)



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?

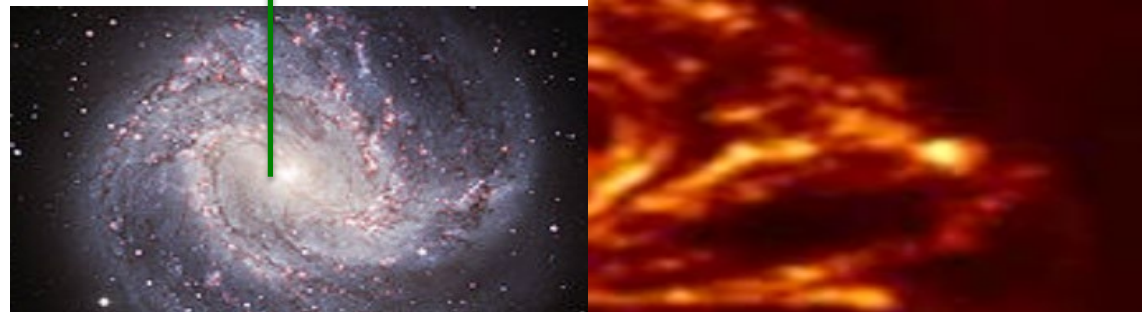
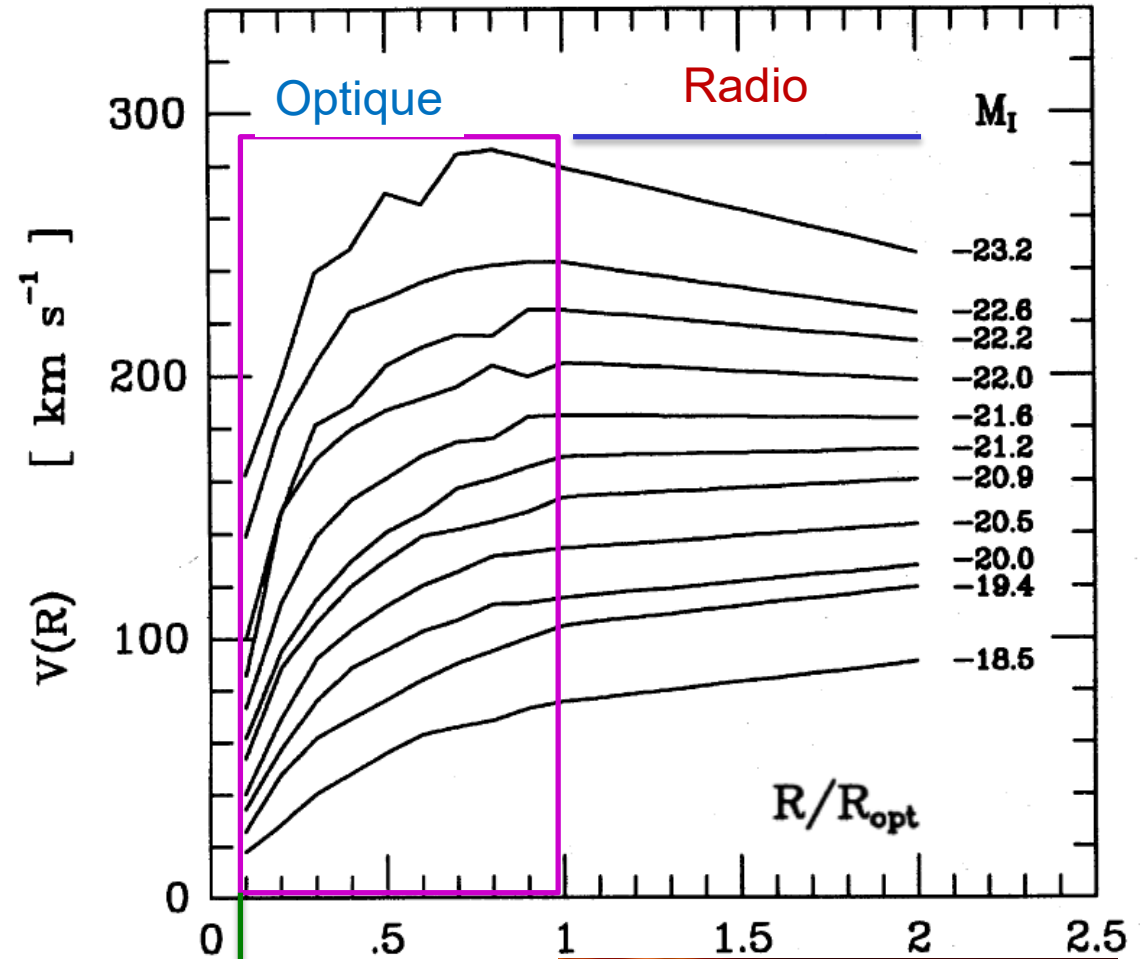


Gentile et al 2010

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**



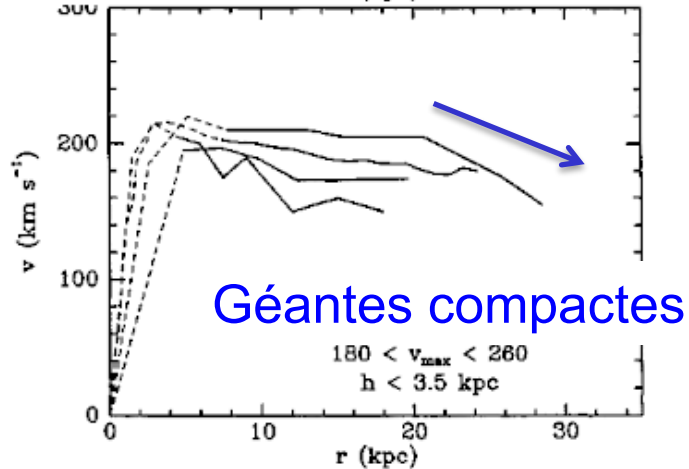
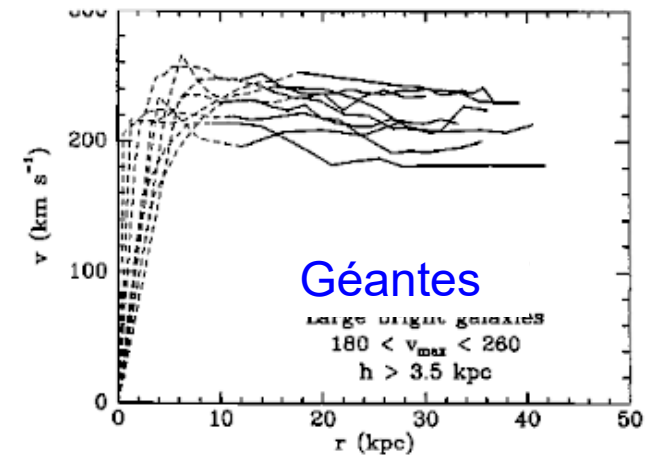
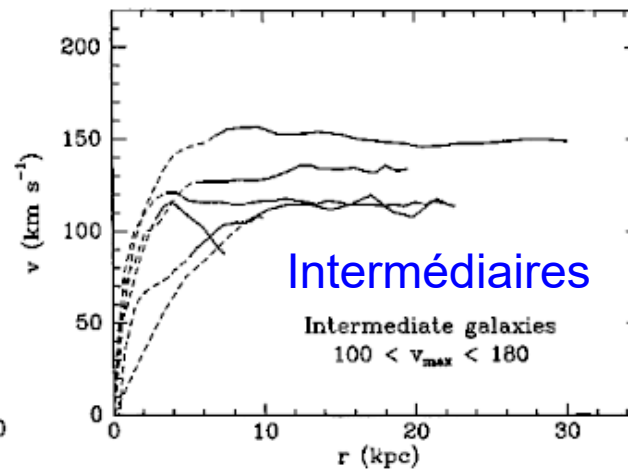
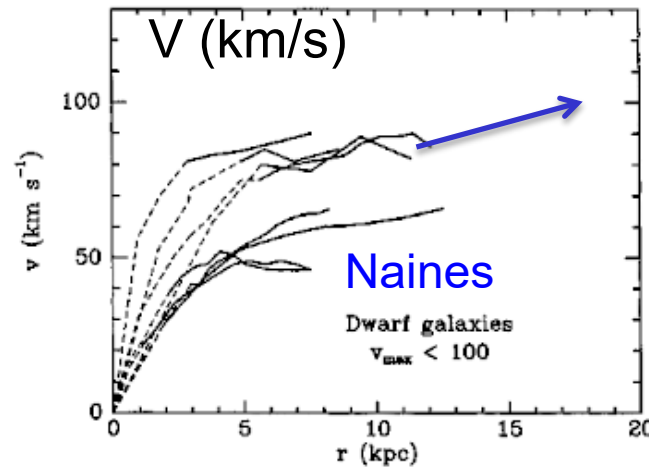
Rotation et types de galaxies

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

DDO154, naine



Andromède



Rotation et Galaxies Elliptiques

Historiquement, elliptiques aplaties par rotation, comme pour les spirales

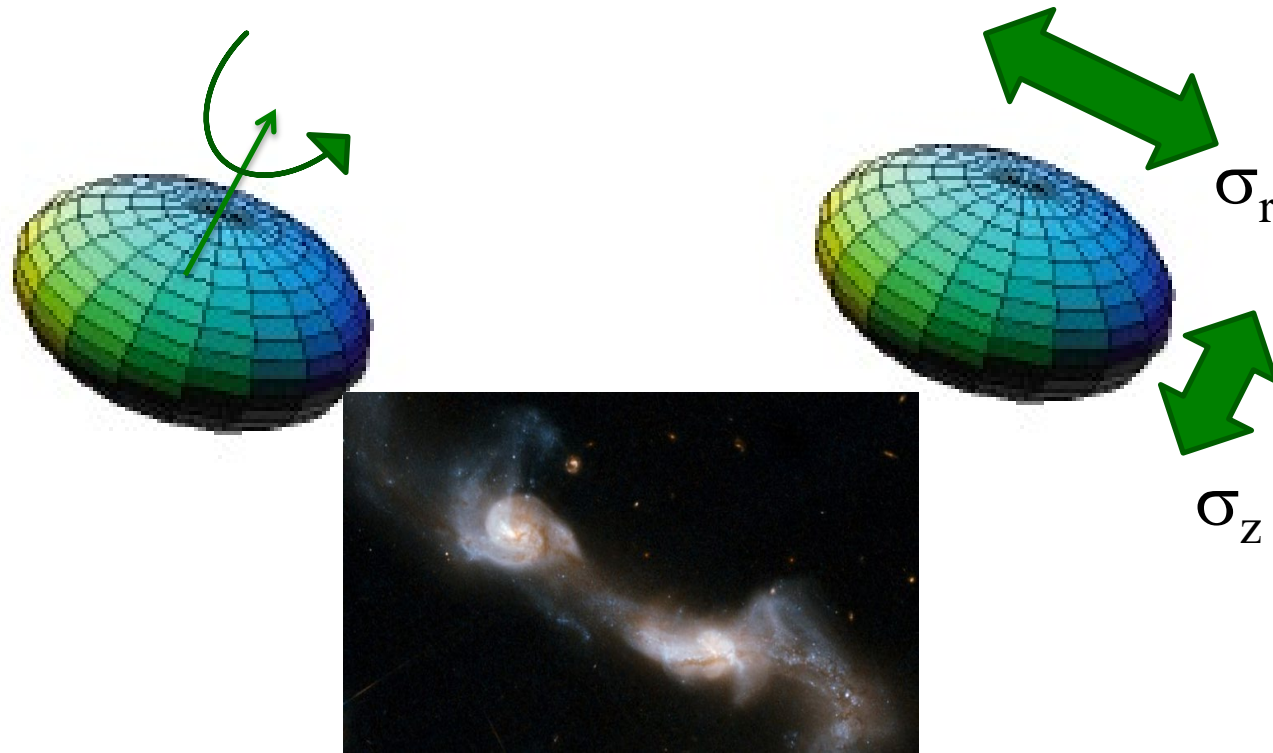
En 1978, on comprend que ce n'est pas le cas
(Illingworth et al 1978)

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

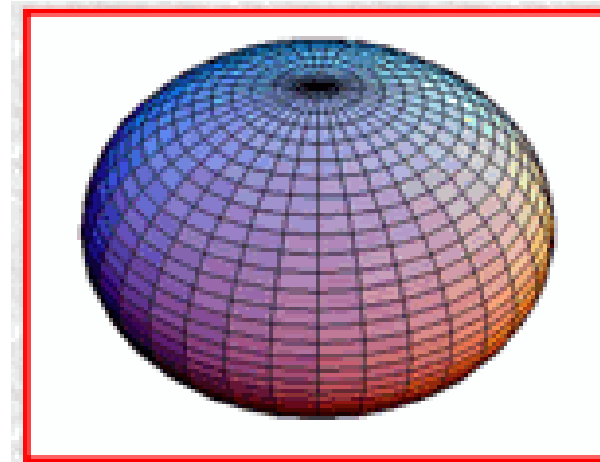
Sphéroïdes de révolution
→ 2 axes égaux

Les grands axes égaux =
Oblat, disque, galette

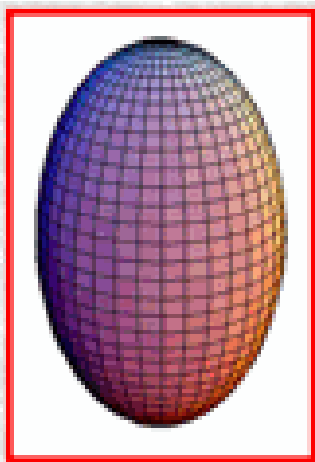
Les petits axes égaux =
Prolat, cigare, ballon de rugby



Oblate

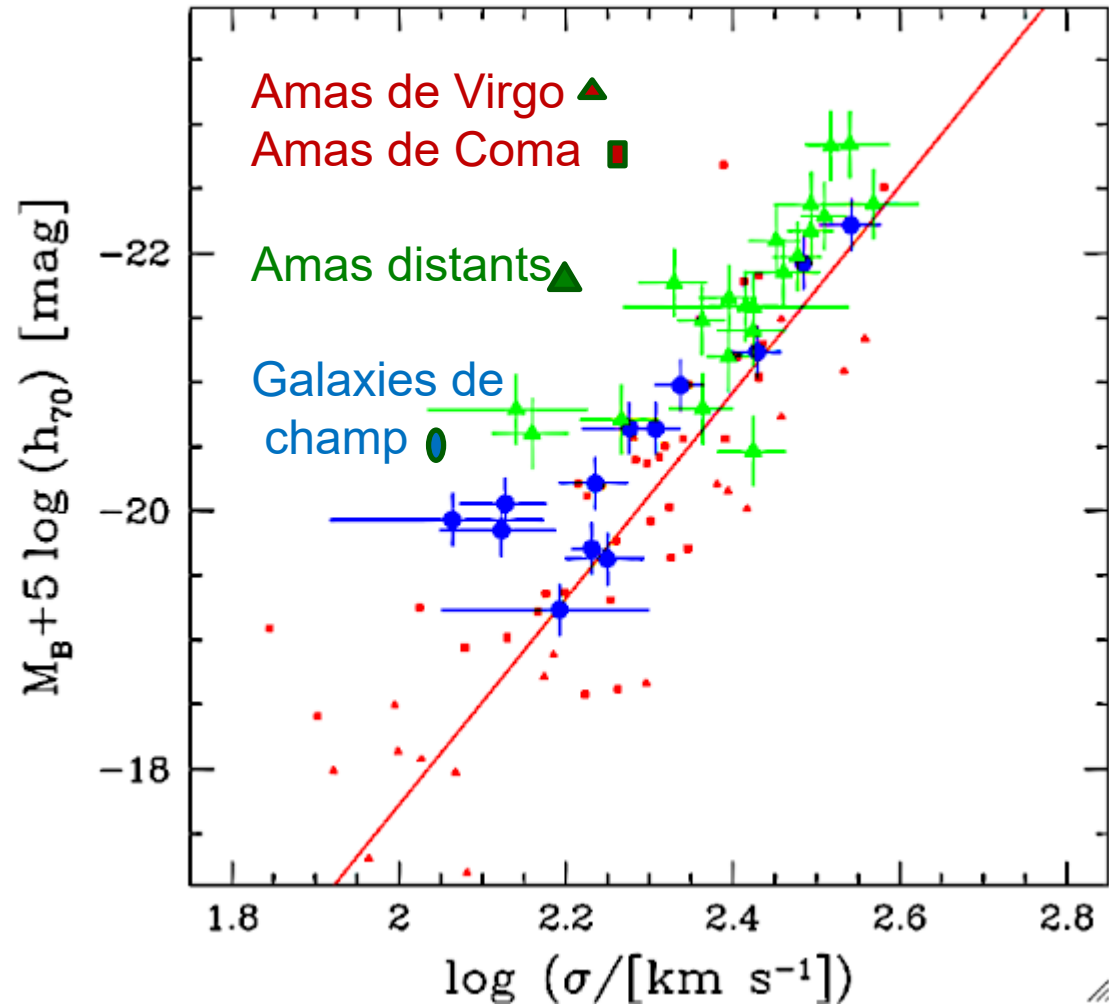


Prolate

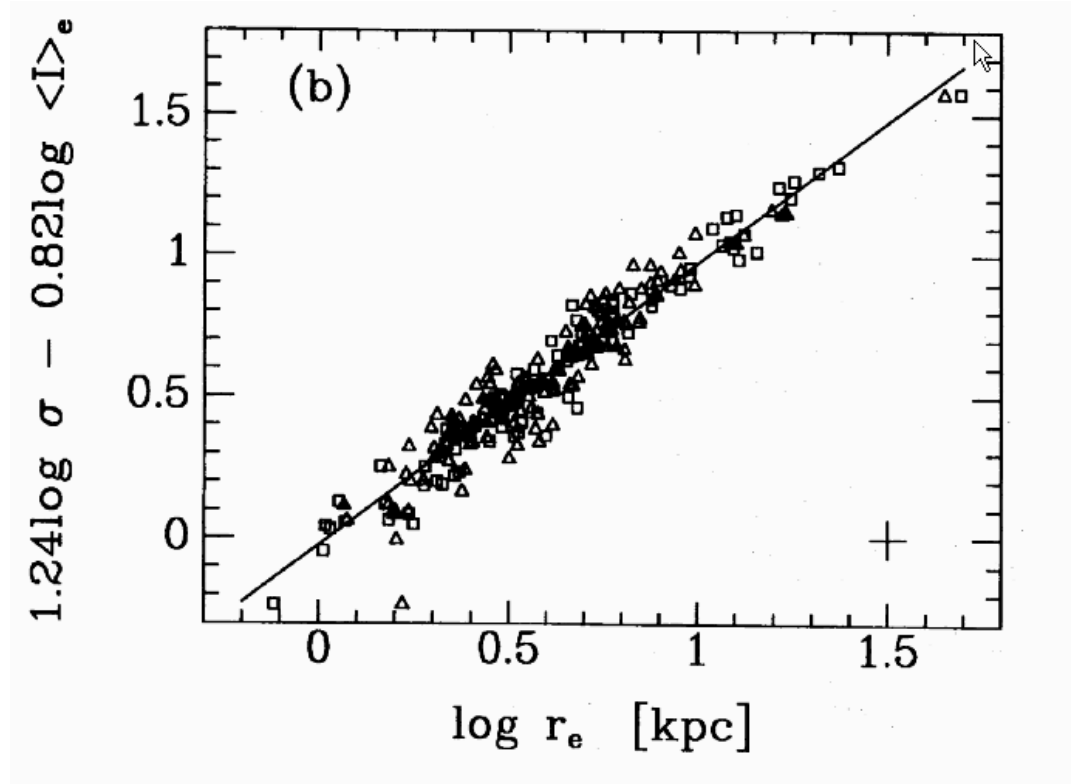


Relation Faber-Jackson et Plan fondamental

Similaire à loi de Tully-Fisher

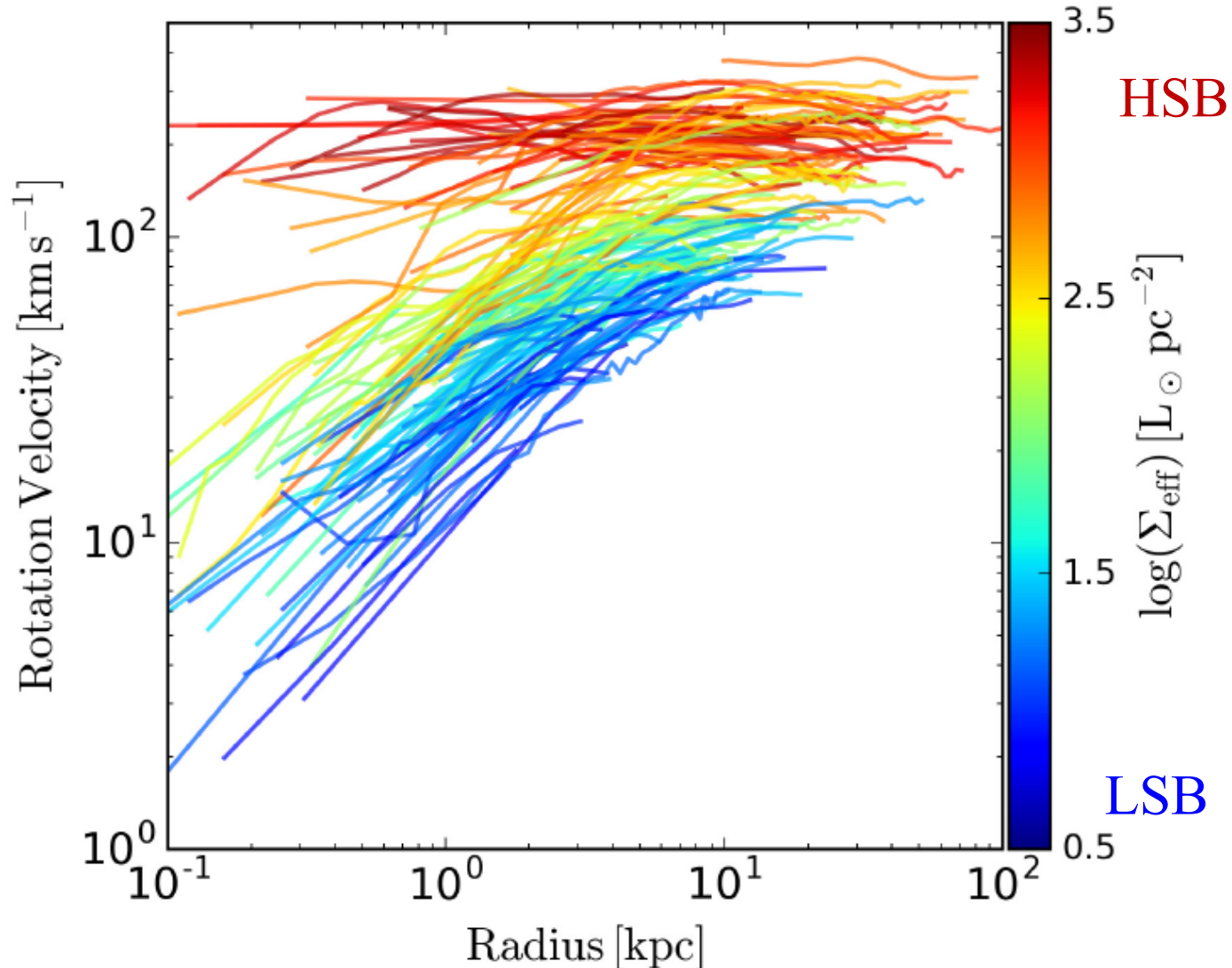


Ziegler et al 2005



Djorgovski et al 1987

Lois d'échelle: densité de surface Σ_{eff}



La luminosité détermine la courbe de rotation

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

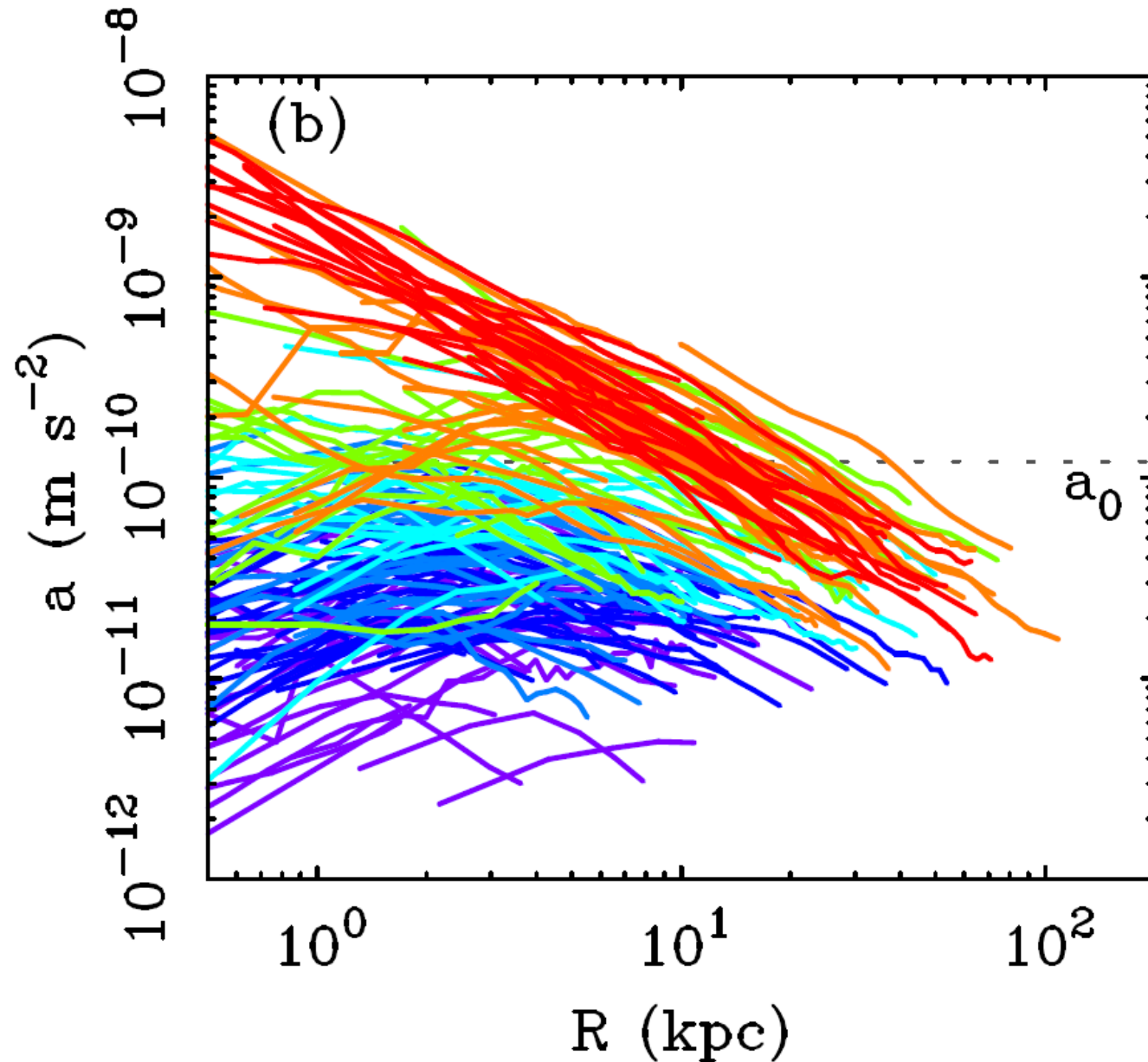
Mais aussi la densité de surface Σ_b à R_{eff}

Rayon R_{eff} , de demi-Luminosité

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

→ Les baryons sont la clef

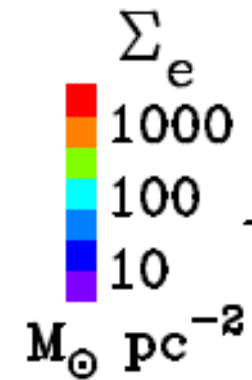
Accélérations $a = V^2/R$



Accélération versus rayon

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

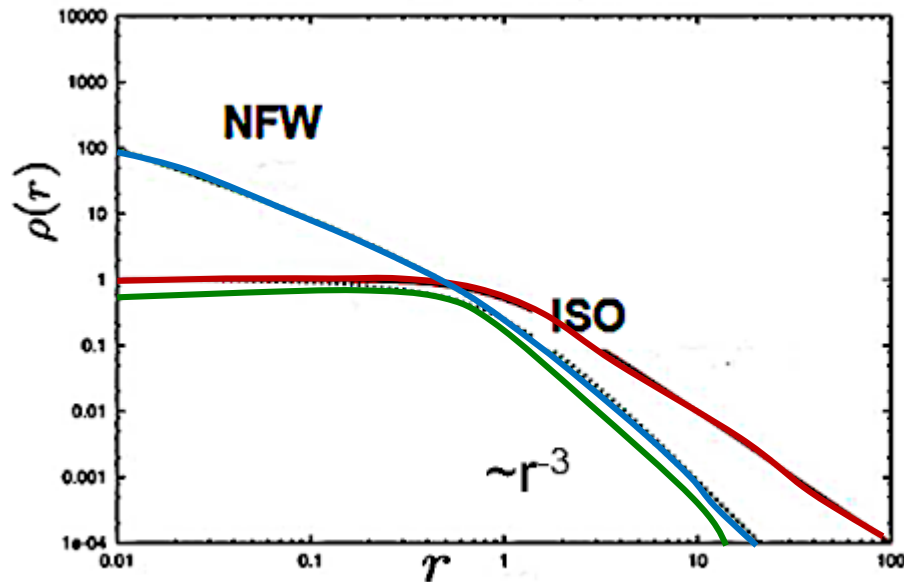
Dépend de la densité de surface
des baryons Σ_{eff}
Au rayon R_{eff} de demi-luminosité



→ 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

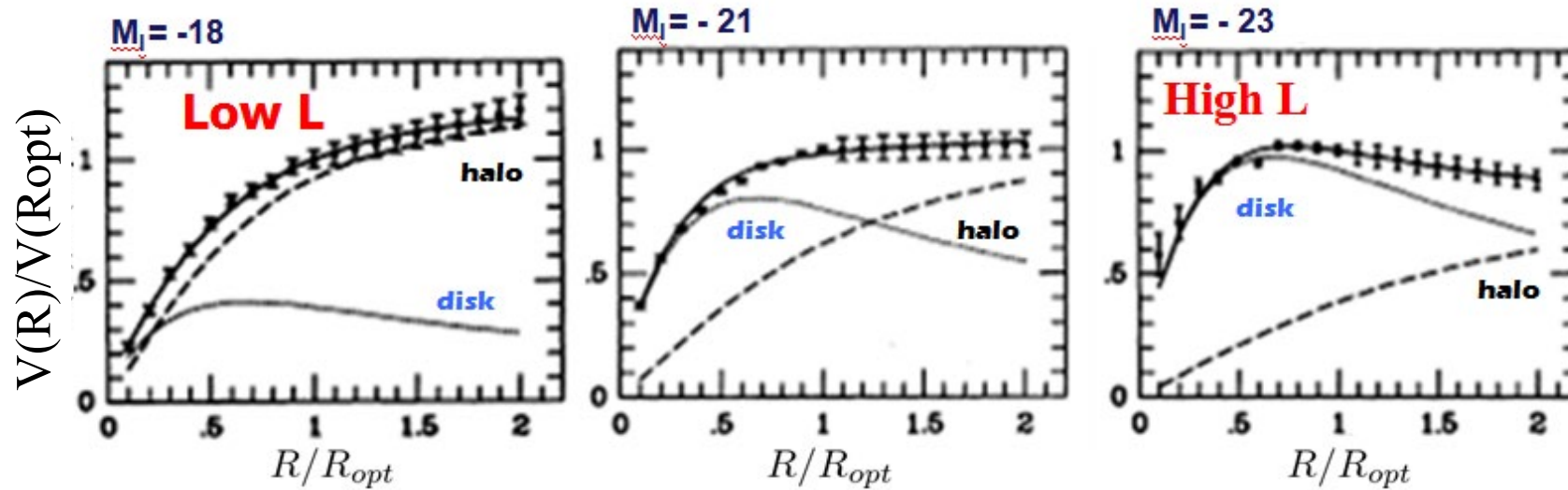
$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + (r/r_0)^2}$$

Burkert

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

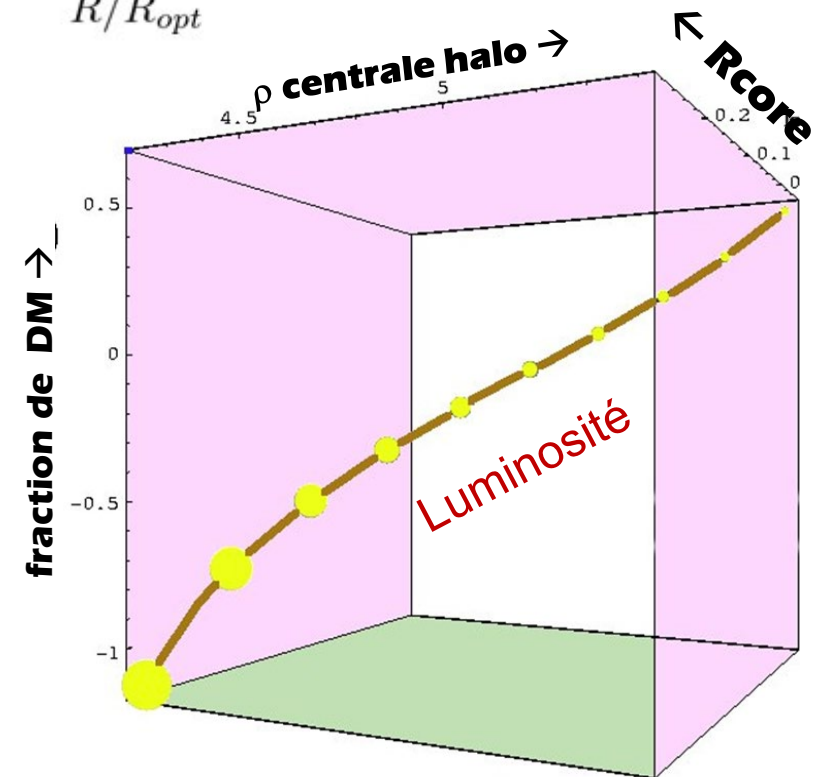
$$V^2 (\text{obs}) = V^2(\text{étoiles}) + V^2 (\text{gaz}) + V^2 (\text{halo})$$

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 $\rho_0 \propto 1/r_0$

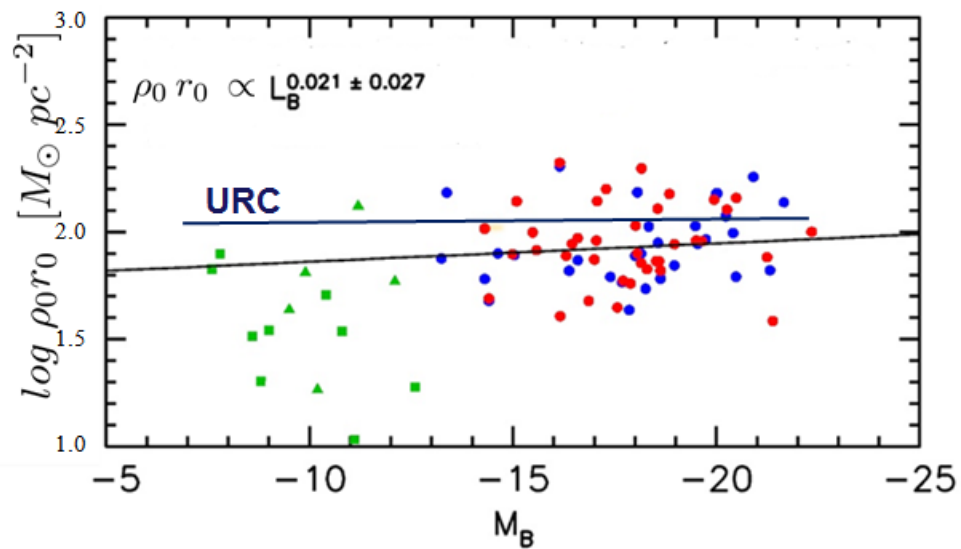


- *Persic et al 96, Salucci et al 2007*

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

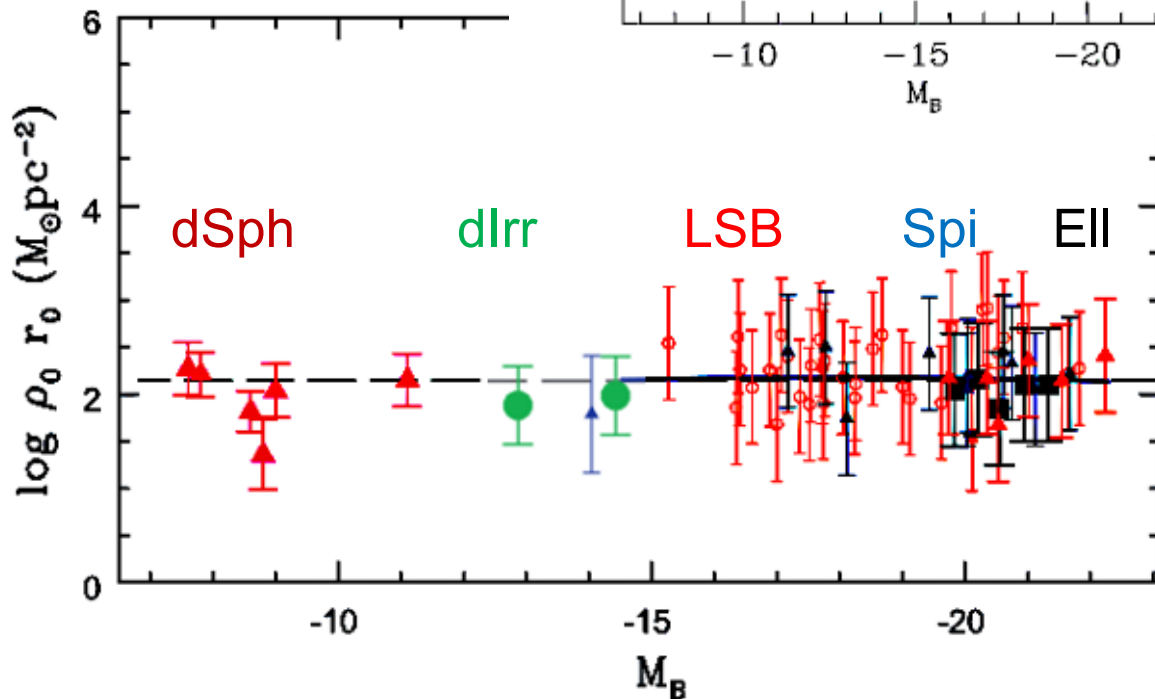
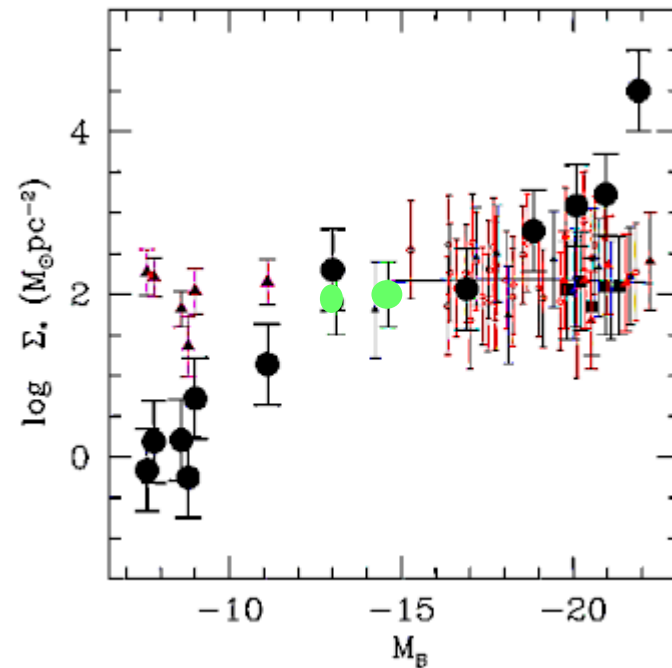
Sur 15 magnitudes, soit 6 ordres de grandeur en luminosité

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



$$a = GM/r^2$$

Le contraire de Σ_* qui croît avec M_*

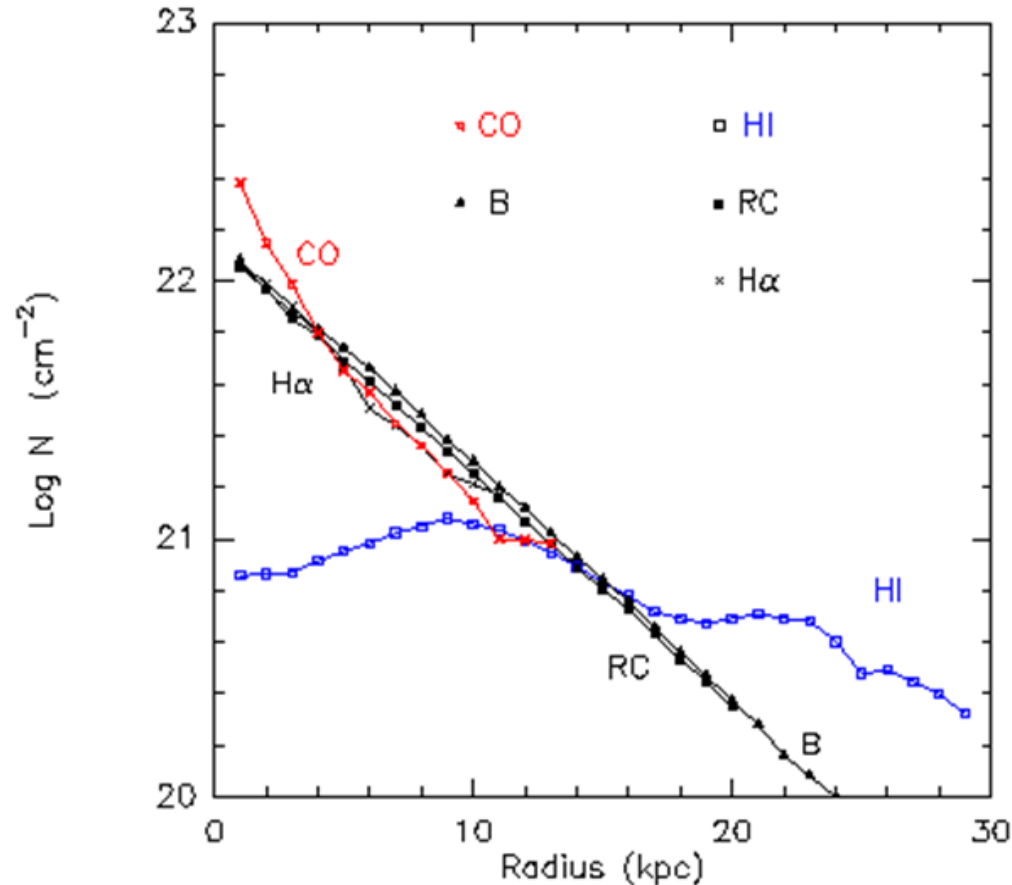


Kormendy & Freeman (2004)

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



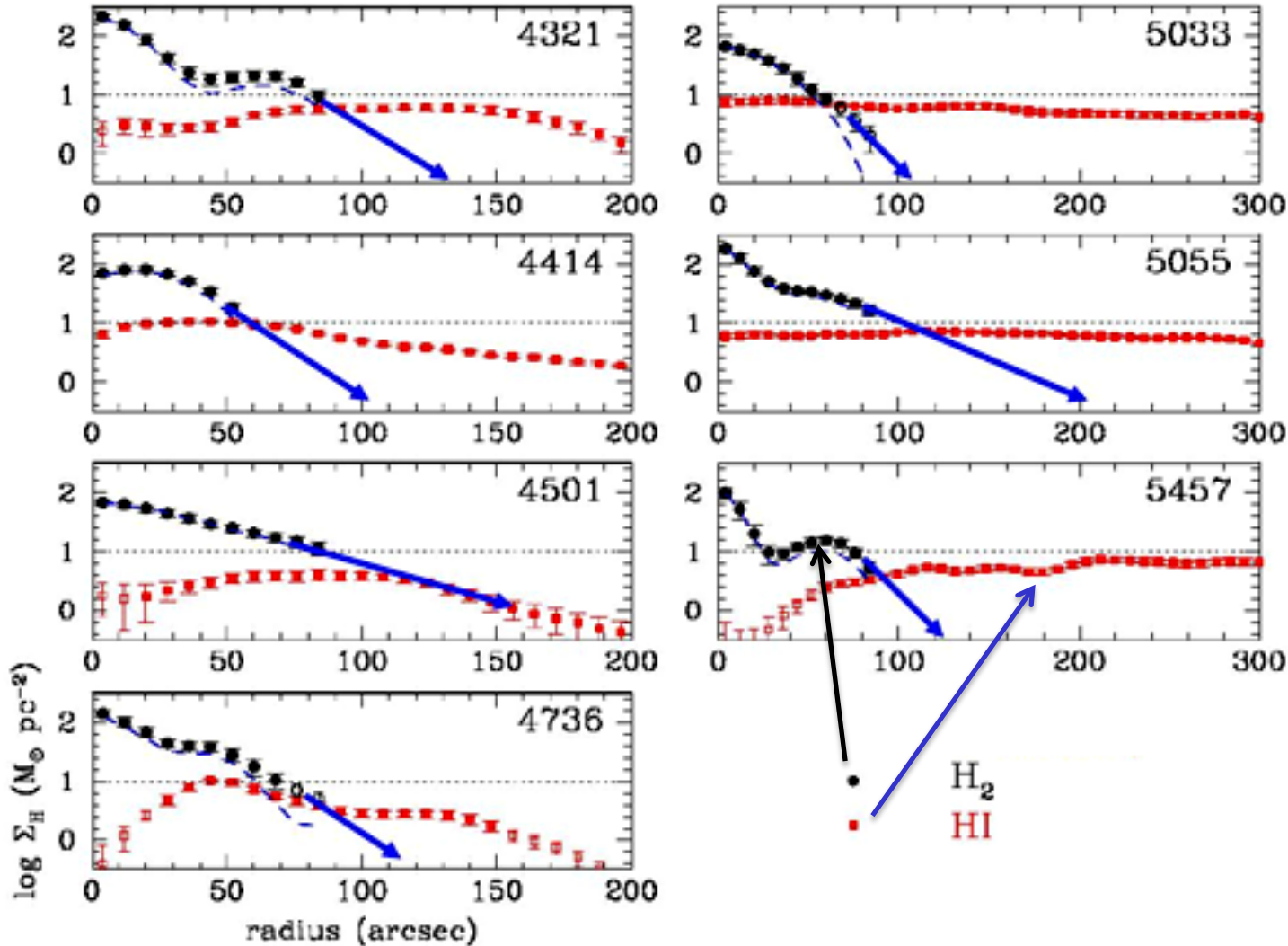
Le gaz moléculaire H₂ ne rayonne pas
La molécule la plus abondante CO sert de traceur

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, H₂

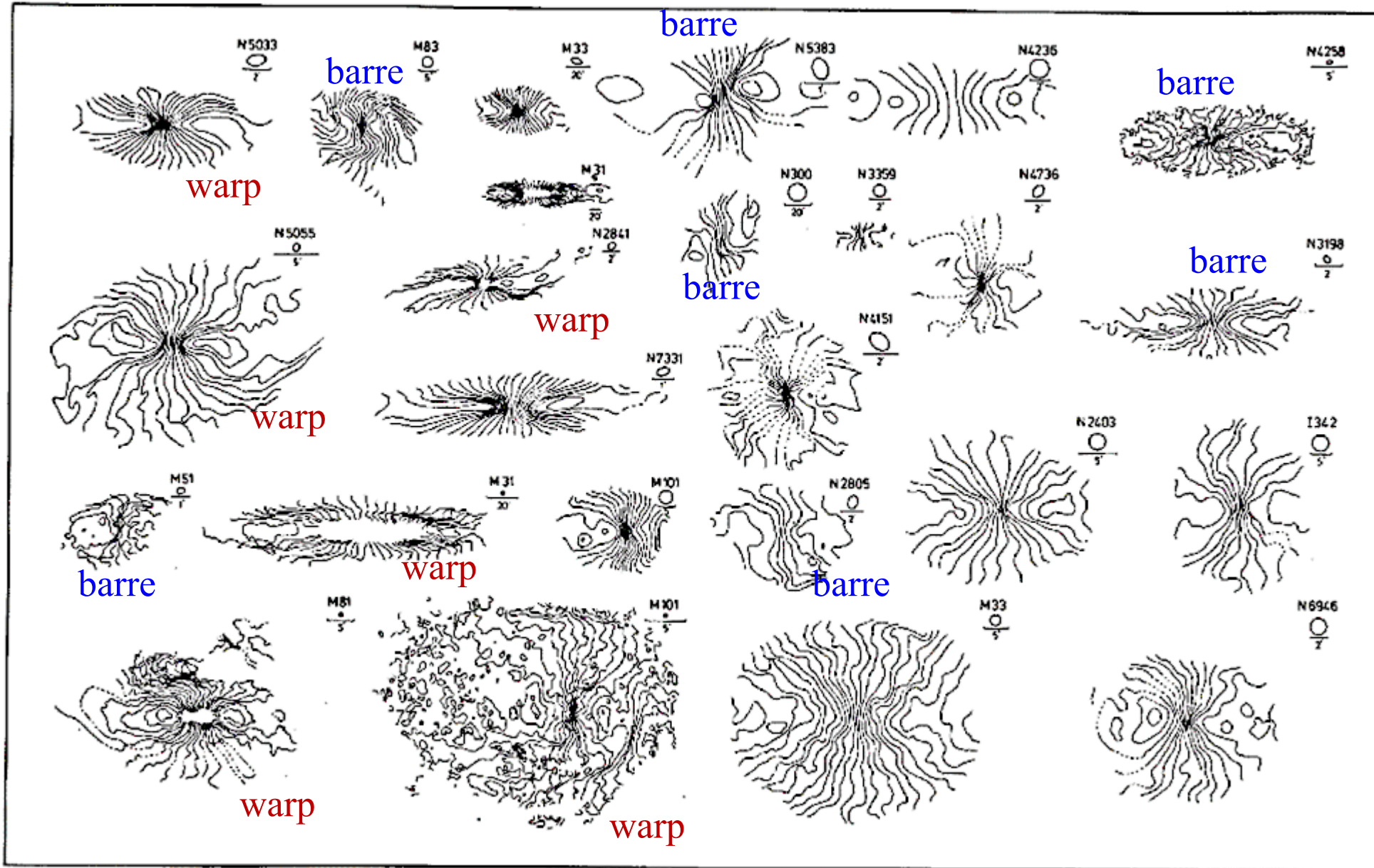
H₂ exponentiel, comme les étoiles



- 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

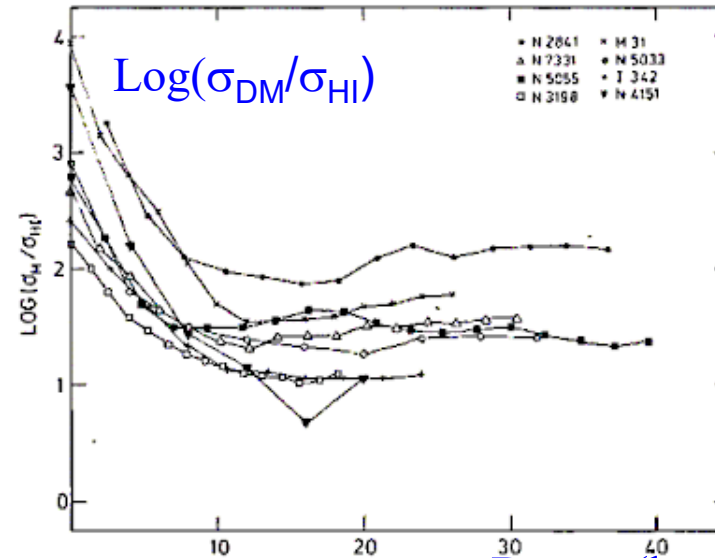
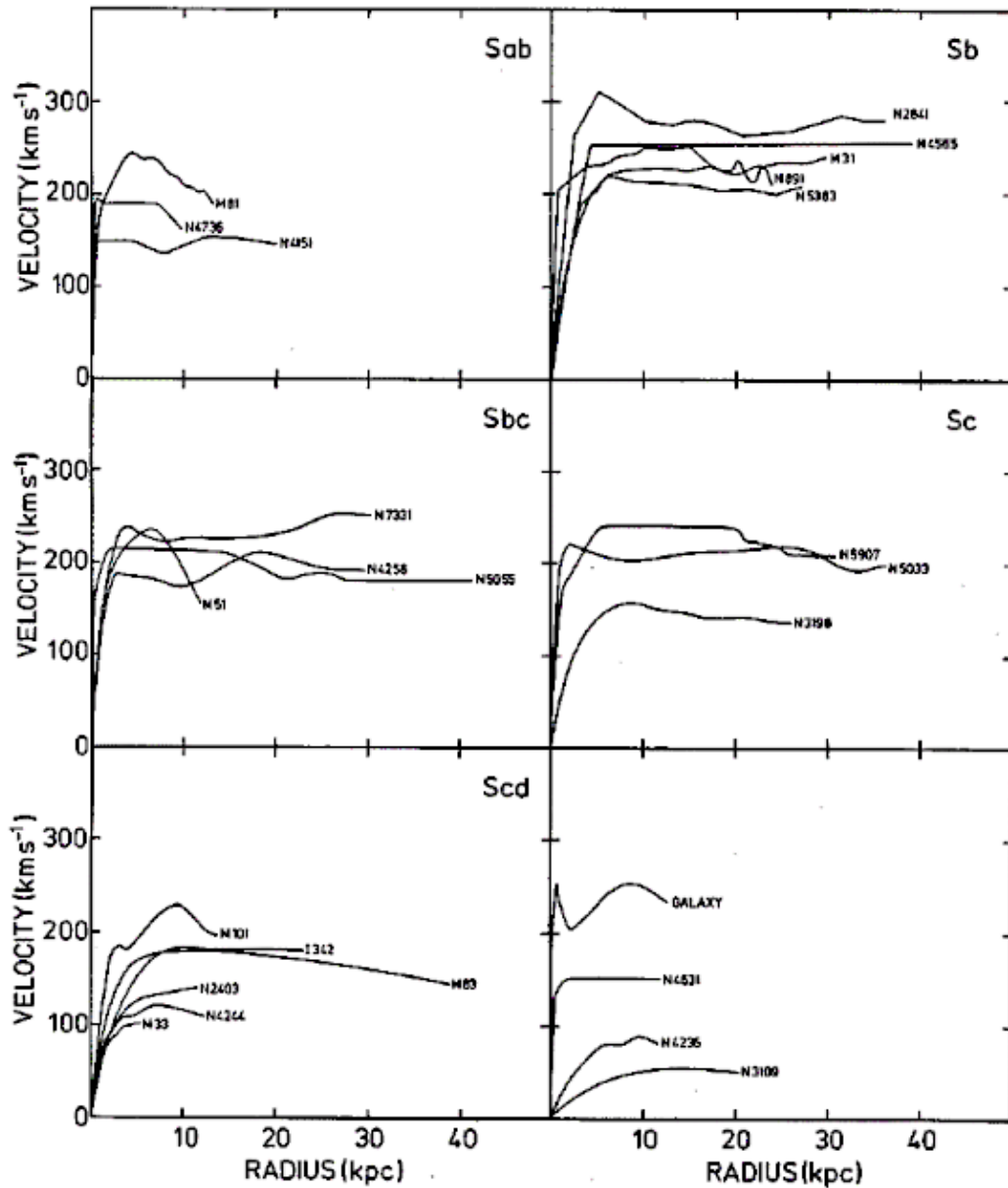


Perturbation au centre = barre

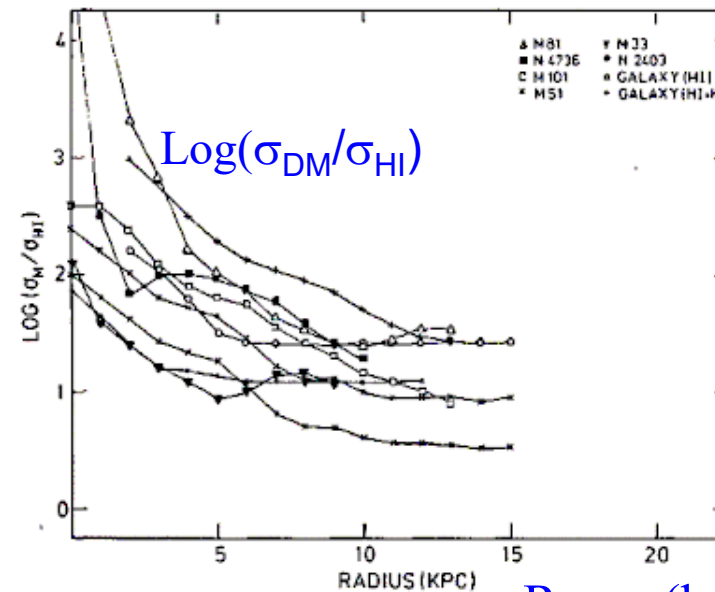
Perturbation externe = warp

Comparaison HI-matière noire

Densités de surface σ



Rapport σ_{DM}/σ_{HI}
tend vers 10-30

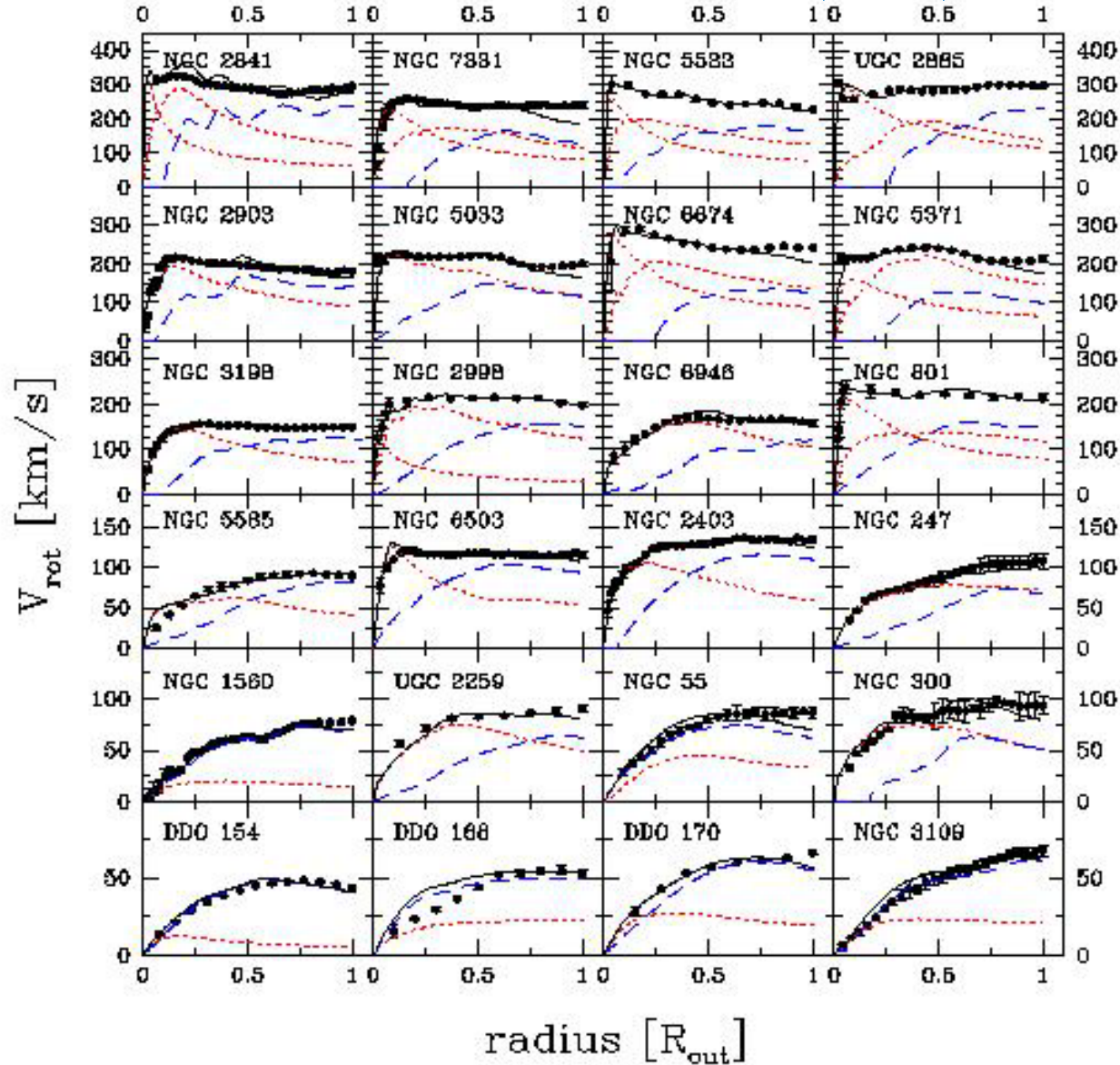


Rayon(kpc) Les deux
composants
seraient-ils liés?

Bosma 1981

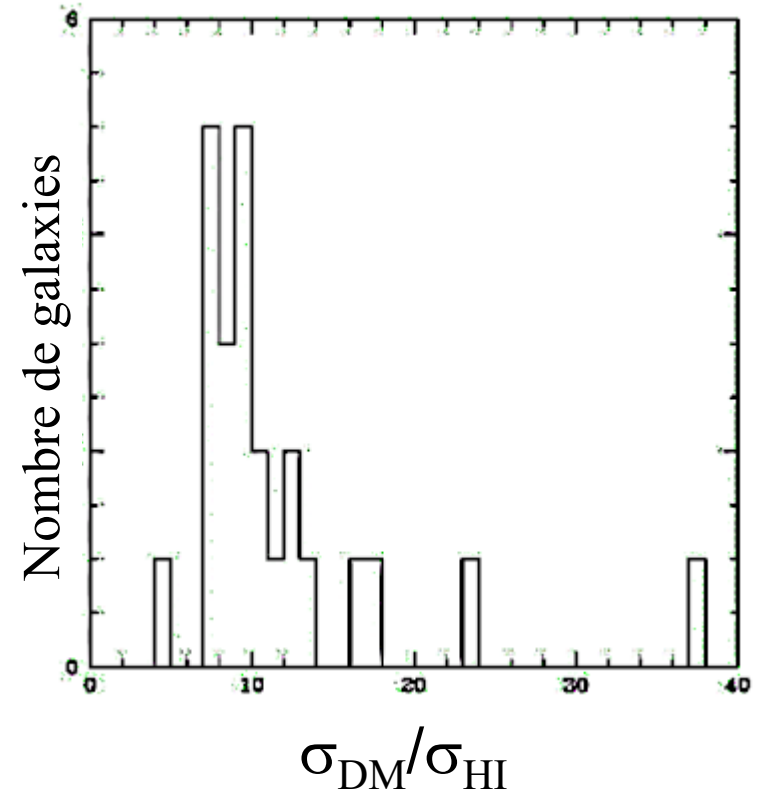
Rayon(kpc)

Hoekstra et al (2001)



Rapport des densités
de surface σ_{DM}/σ_{HI}

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



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

Relation initiale de Tully-Fisher

Relation entre vitesse maximum
et luminosité

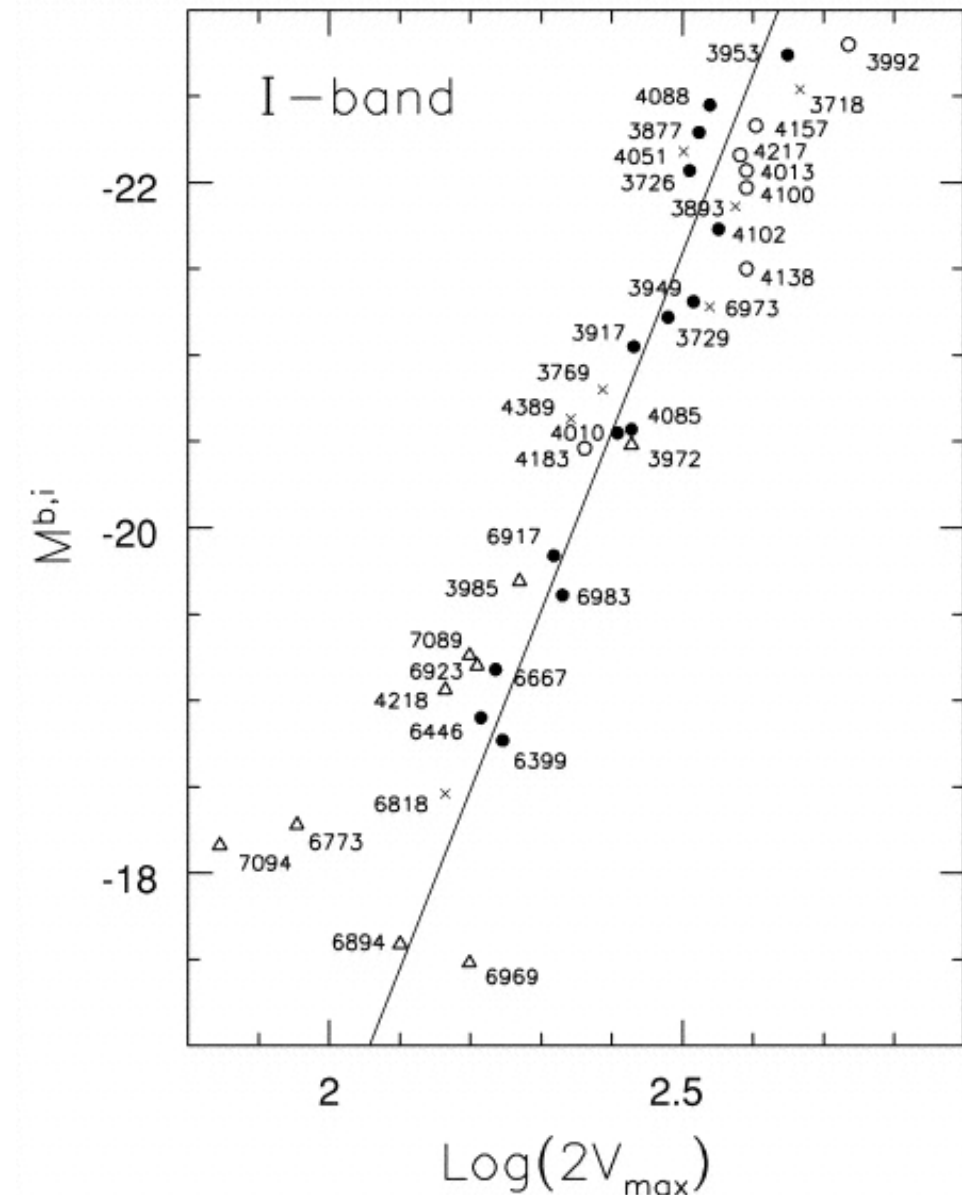
DV corrigé de l'inclinaison

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

Corrélation avec V_{flat}

Meilleure que V_{max}

→ Indicateur de distance



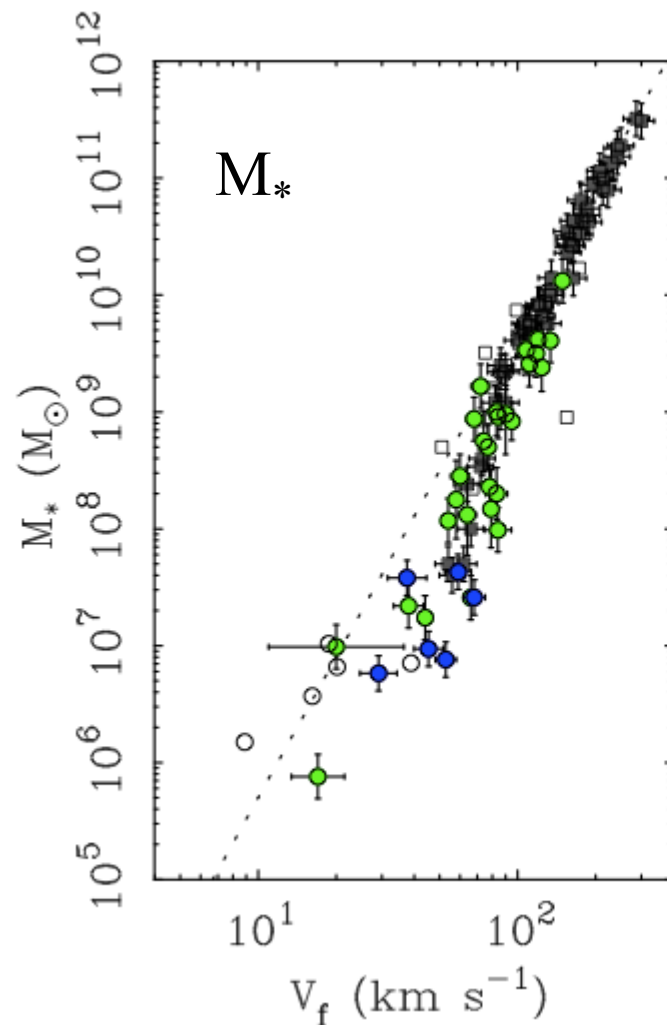
Verheijen 2001

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

→ prendre en compte la masse du gaz

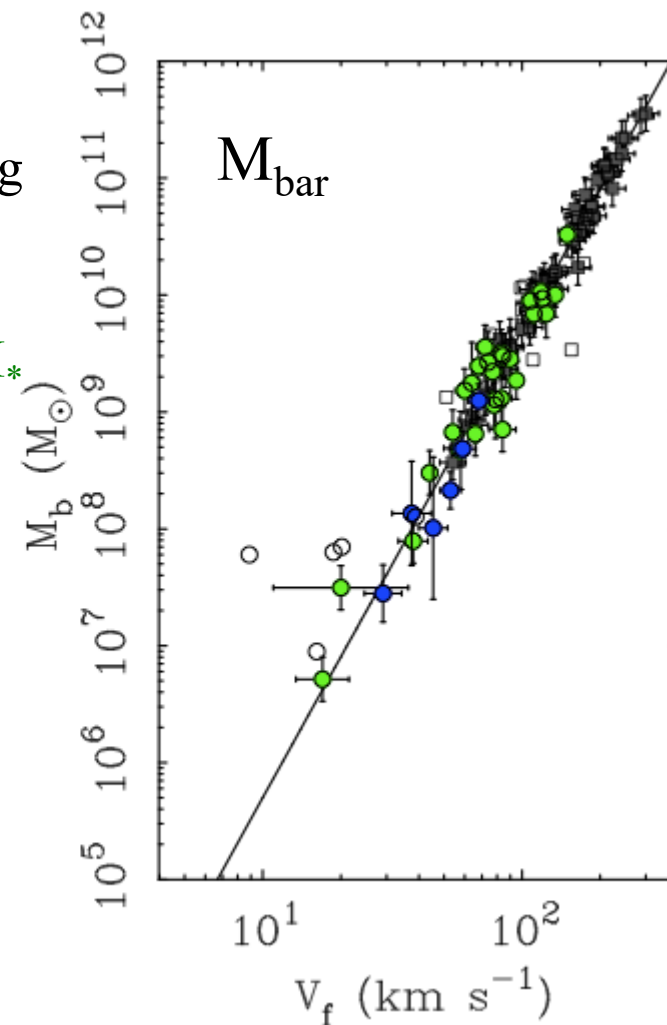
Relation M_{baryons} avec V Rotation

$$M_b \sim V_c^4$$



$M_* > M_g$

$M_g > M_*$



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

Tully-Fisher baryonique

La prédiction du modèle
Standard CDM a une pente 3

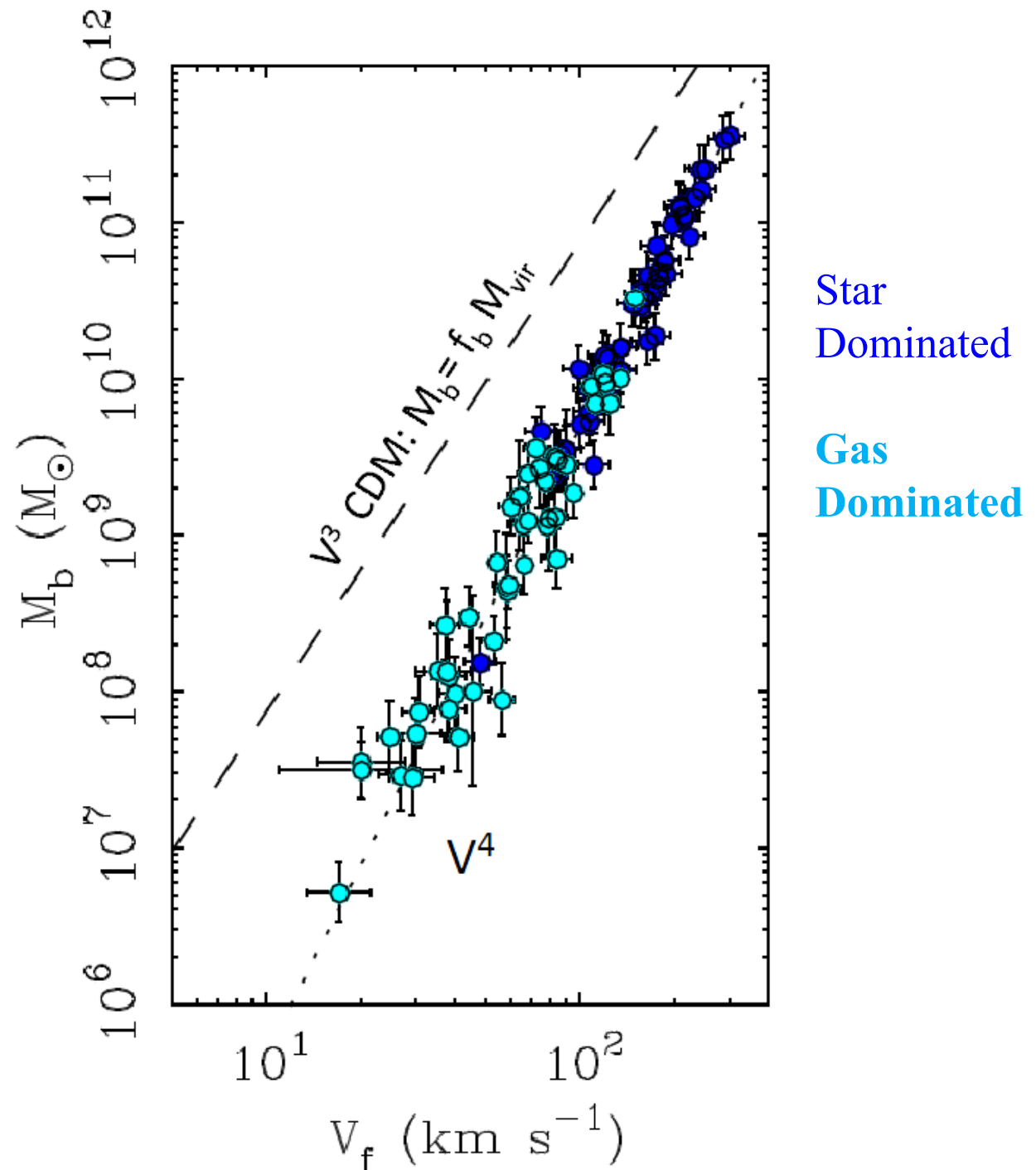
$$M_b \sim V_c^3$$

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%

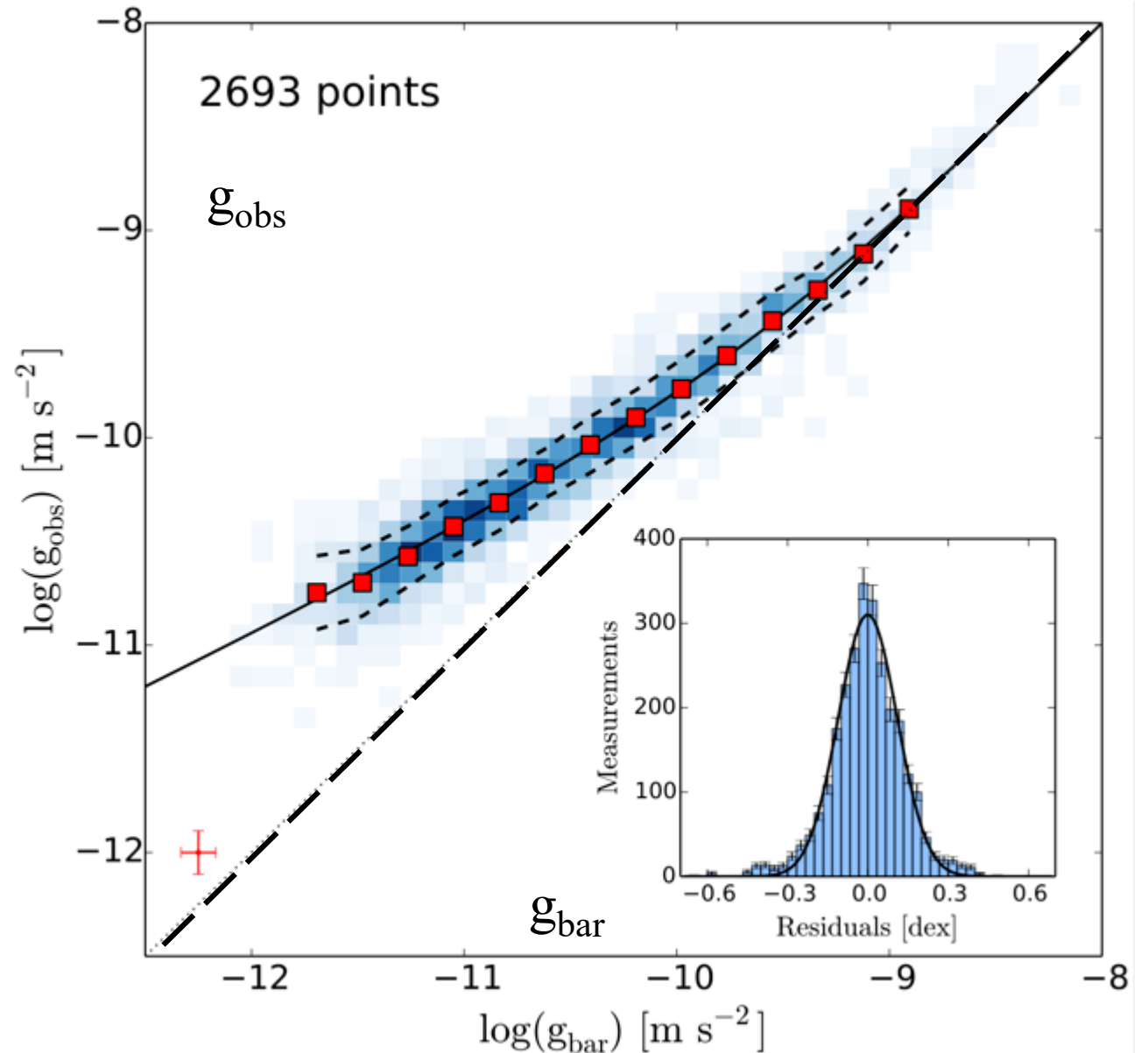
CDM: Cold Dark Matter

Famaey & McGaugh 2012



Relation accélération radiale (RAR)

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



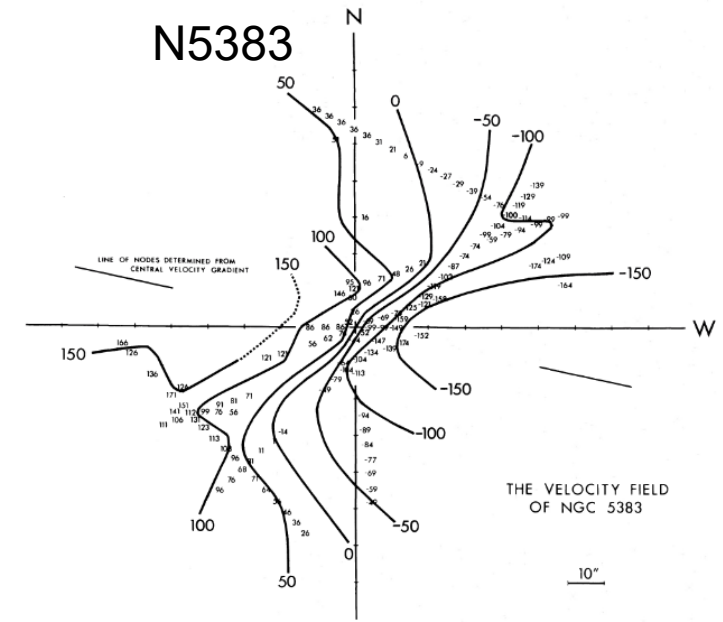
Lelli et al 2017

Déformations du champ de vitesses

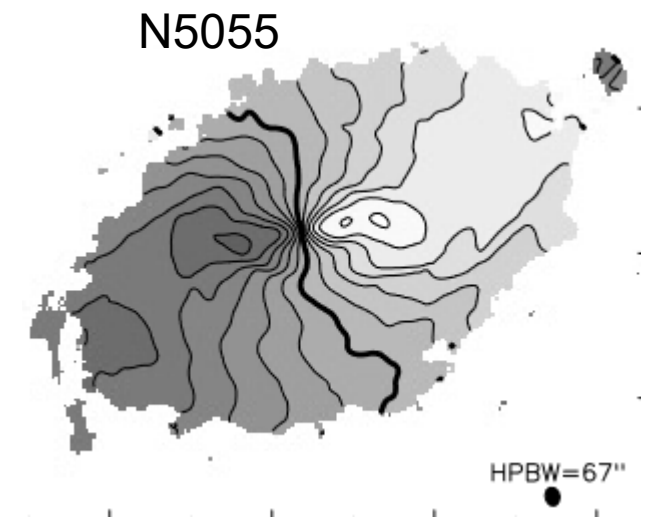
- Les vitesses non-circulaires empêchent de dériver la distribution de masse
- Perturbations internes: barre
- Perturbations externes: plan gauchi « warp », interactions, accréation, changement de l'inclinaison
- Epaississement des plans: généralisation des galaxies vues par la tranche



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



Peterson et al 1978



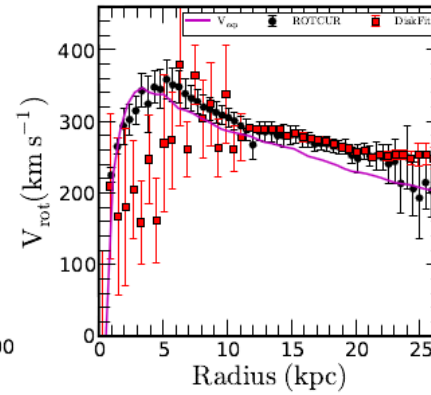
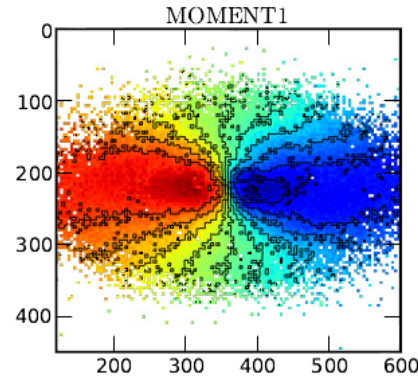
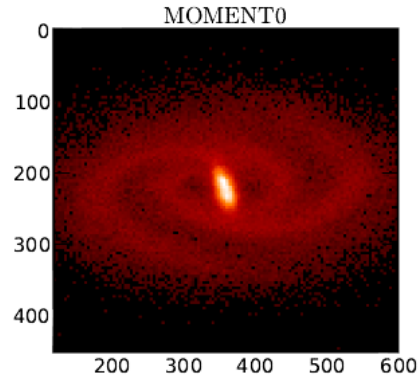
Battaglia et al 2006

Courbes de rotation de galaxies barrées

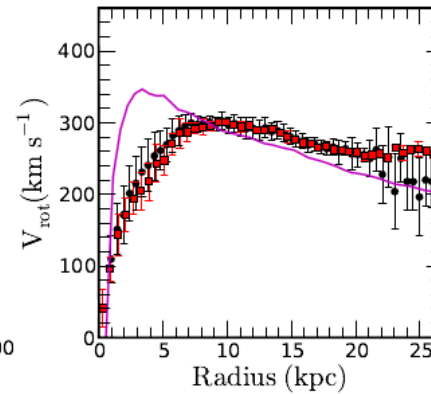
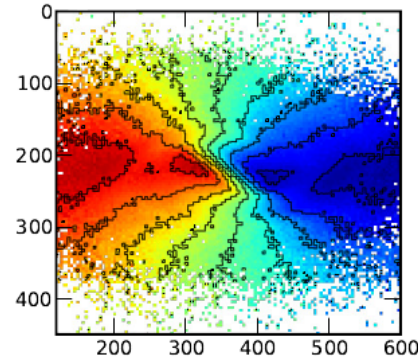
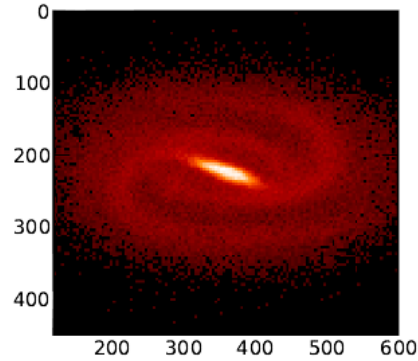


Kuzio de Naray et al 2012

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

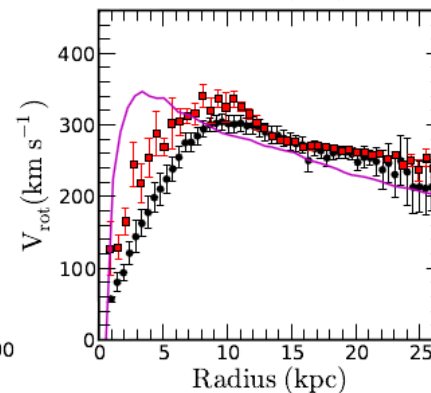
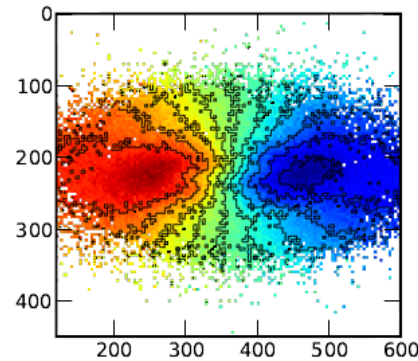
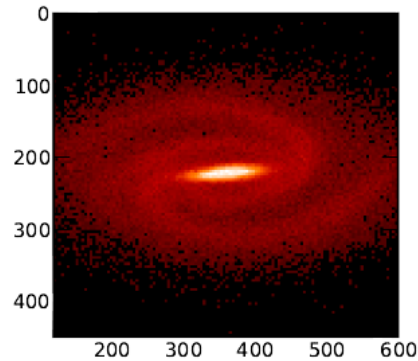


gSa (halo ISO)
Barre: perpendiculaire



Barre: intermédiaire

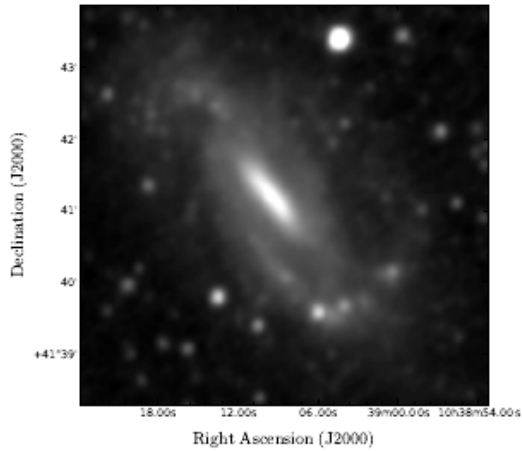
Rotcur: points noirs
Diskfit: rouges



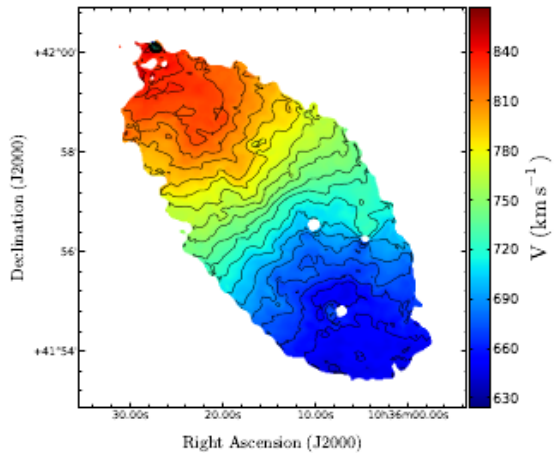
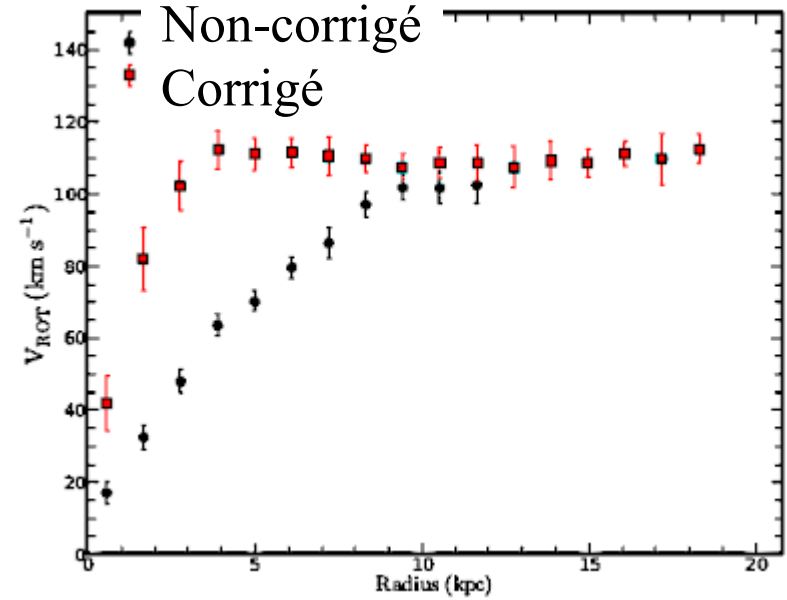
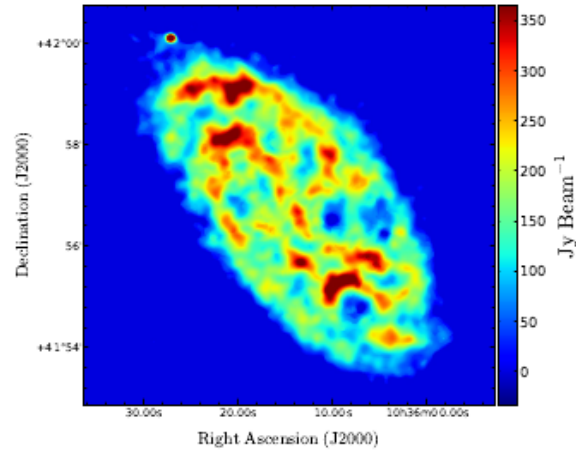
Barre: parallèle au grand axe

Calculs sur un cas concret: NGC 3319

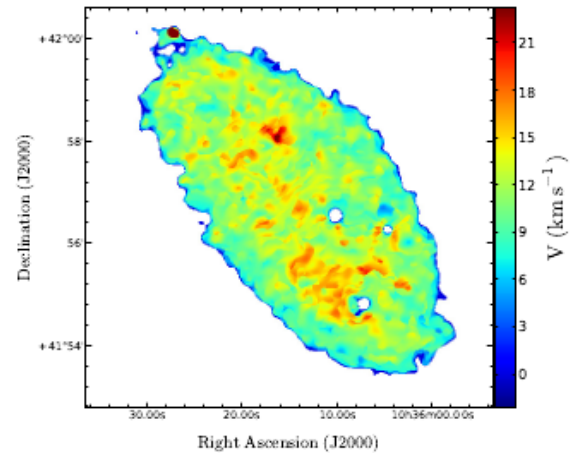
Wise 3.4 μm



HI-21cm



Vitesse HI

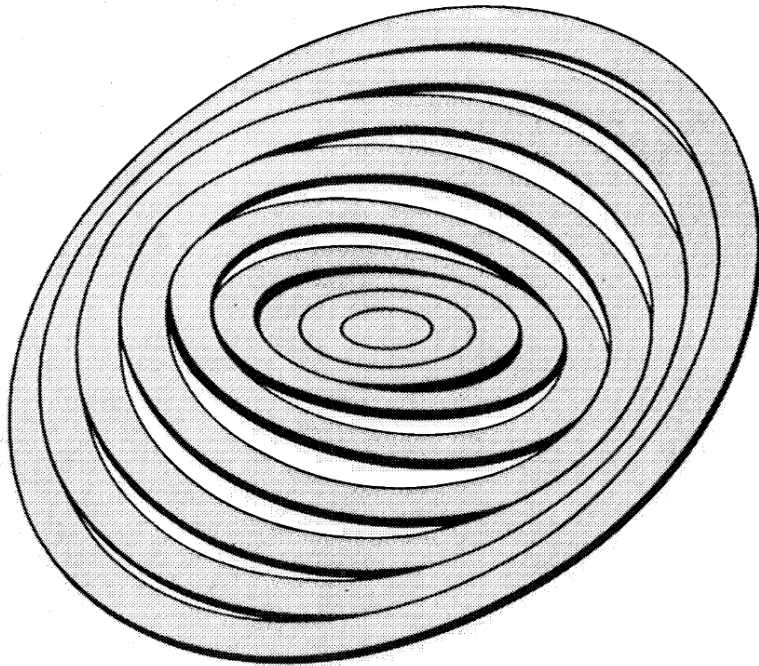


Dispersion HI

Les perturbations dues à la barre sont significatives

Randriamampandry et al 2014

Warp: plans gauchis

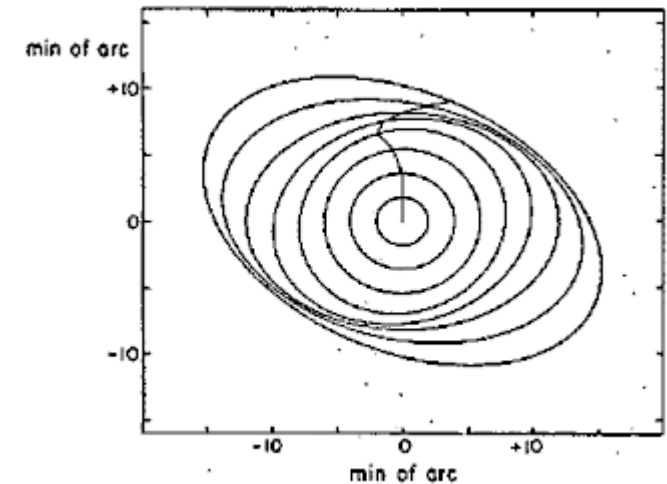
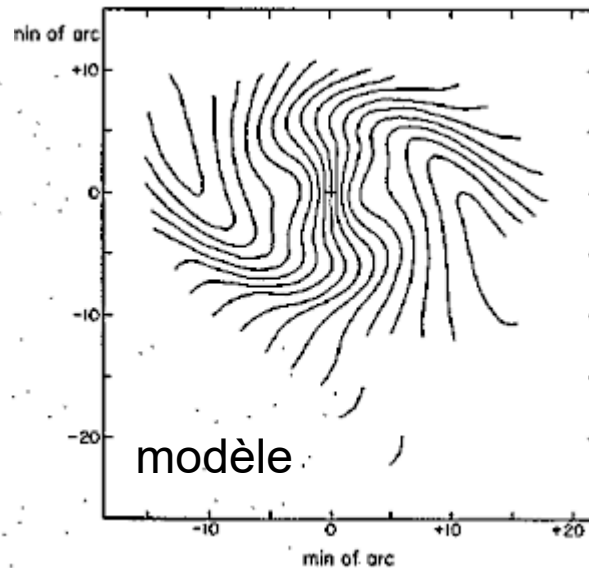
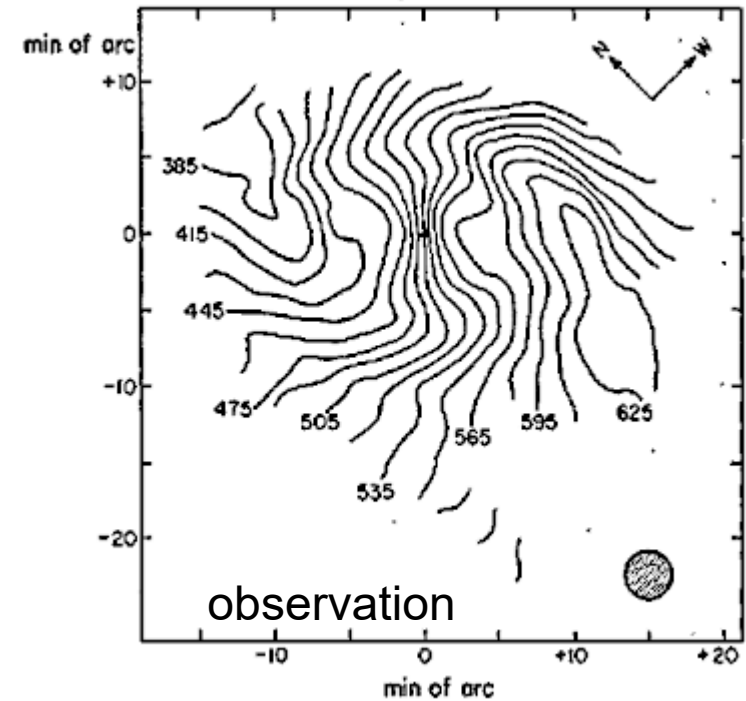


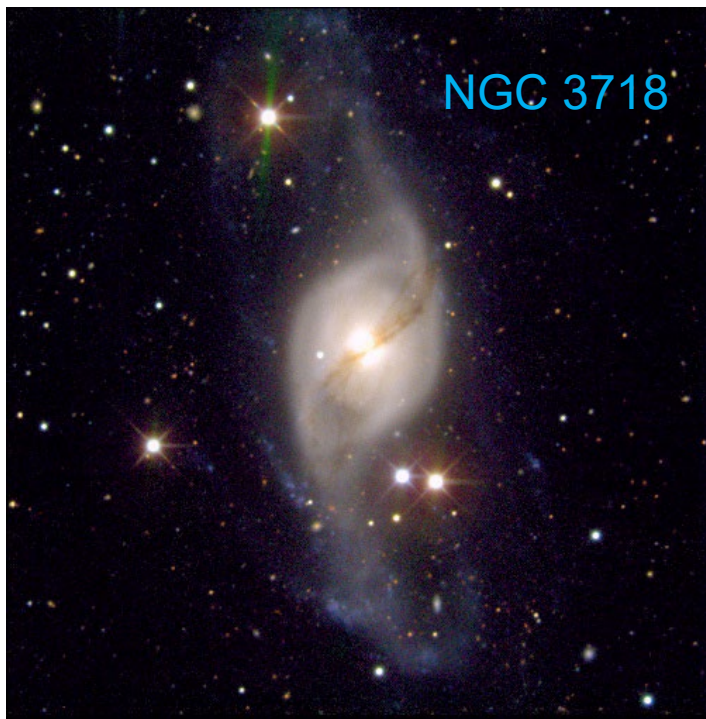
Approximation:
A chaque rayon
vitesse circulaire

Valable que pour de
faibles perturbations

Modèle des anneaux
Inclinés, PA, i variables

Rogstad et al 1974

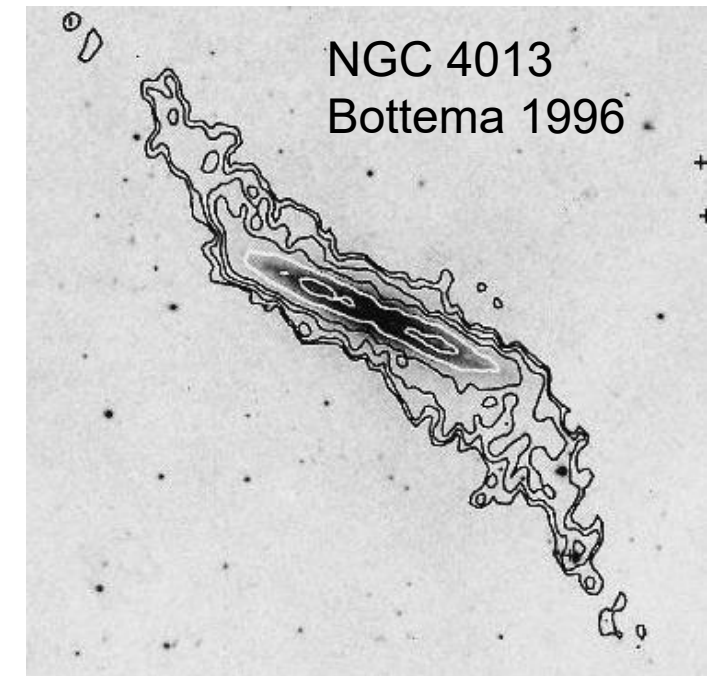
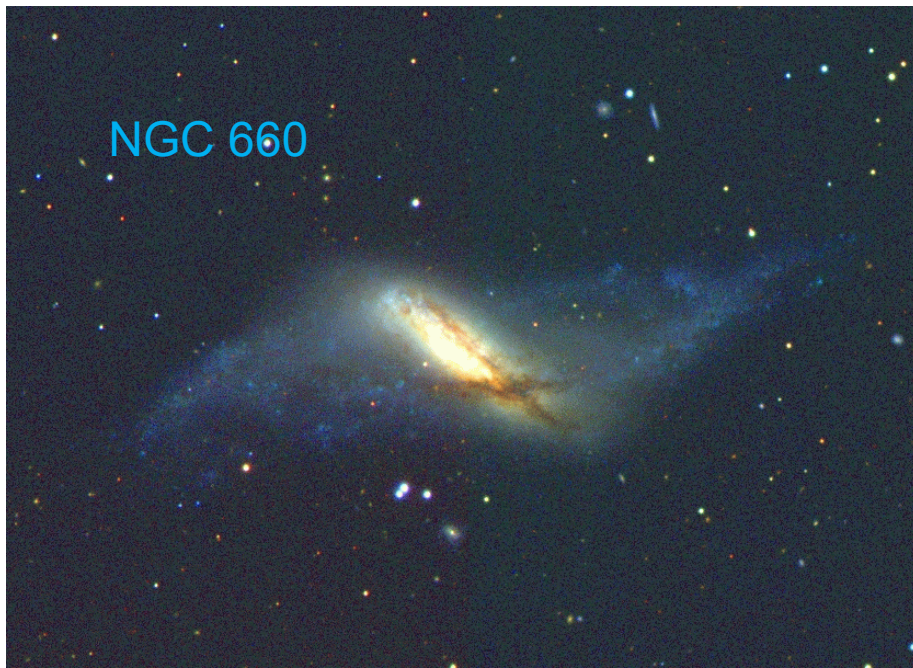




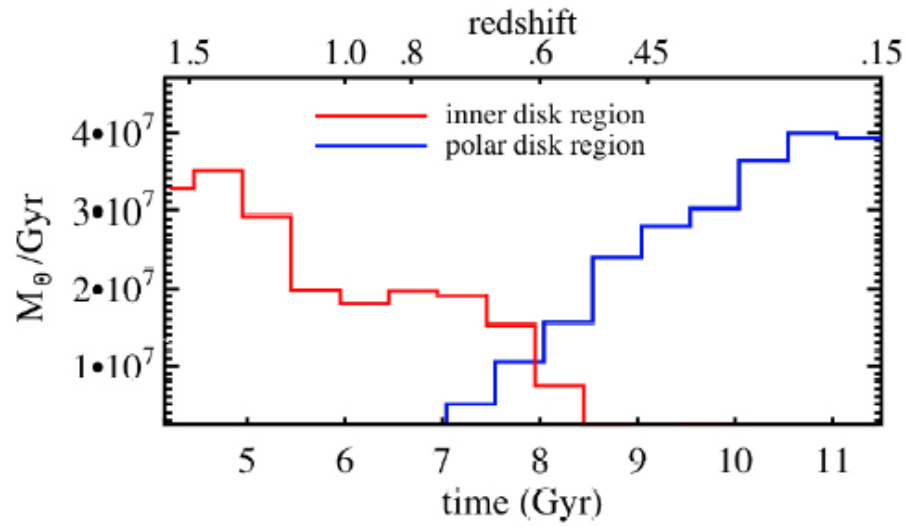
Orbites inclinées, non circulaires

Calcul plus difficile, lorsque la déformation est importante

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

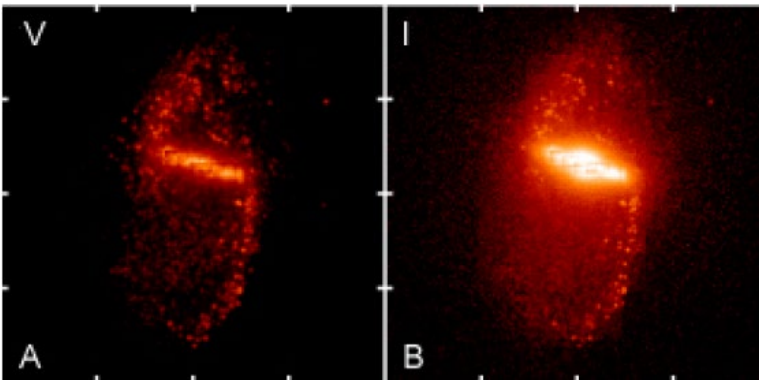


Galaxies avec anneau polaire



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

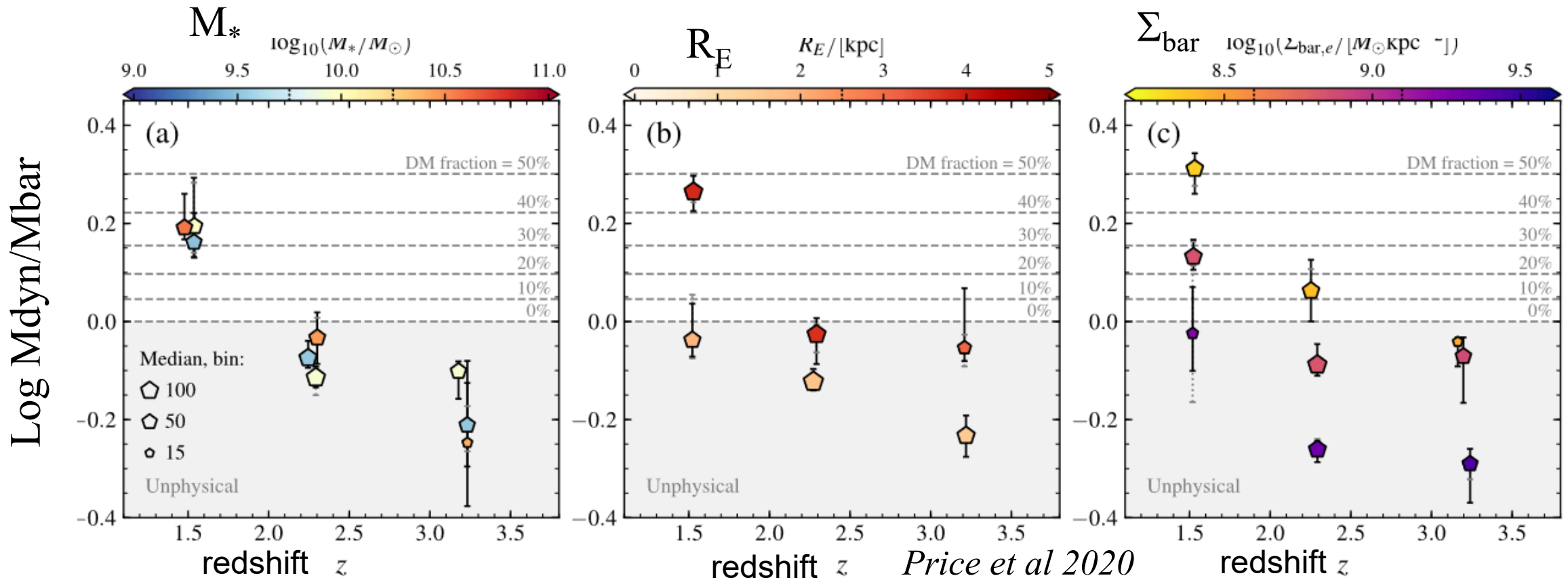
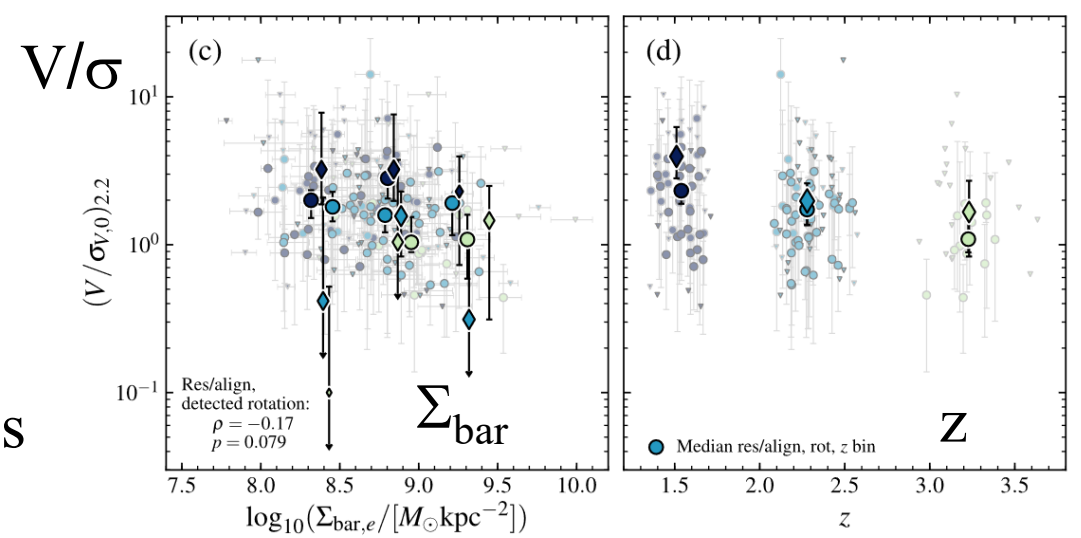
→ Modèle CDM: prédit $V_{\text{pol}} < V_{\text{eq}}$
Ou bien $V_{\text{pol}} = V_{\text{eq}}$, si accrétion



Brook et al 2008

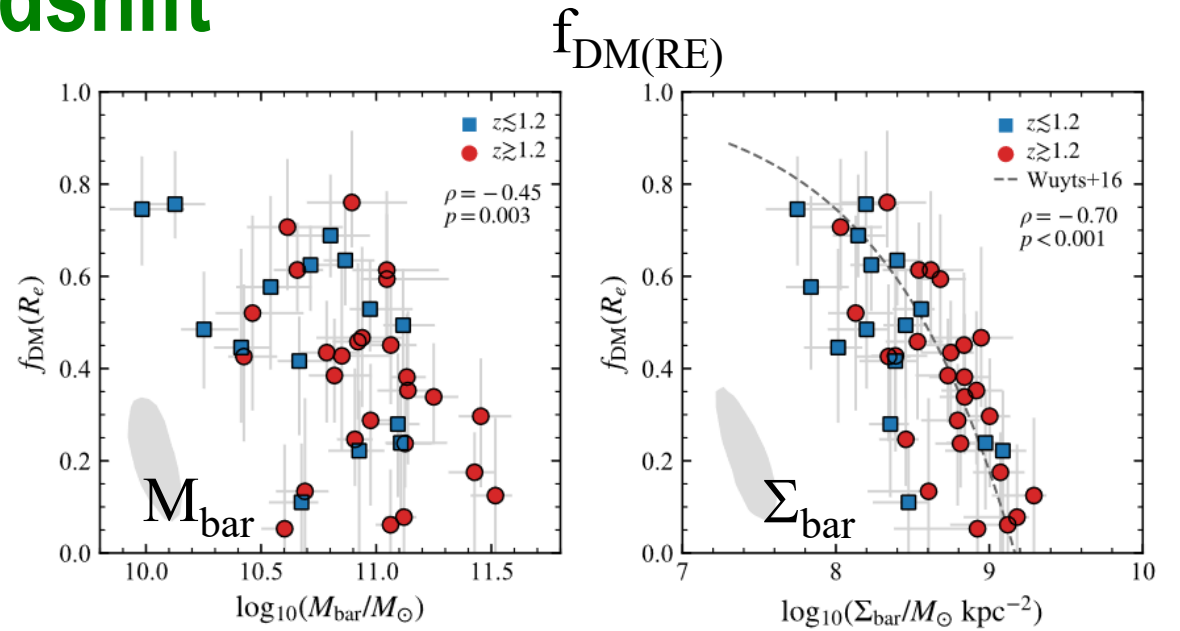
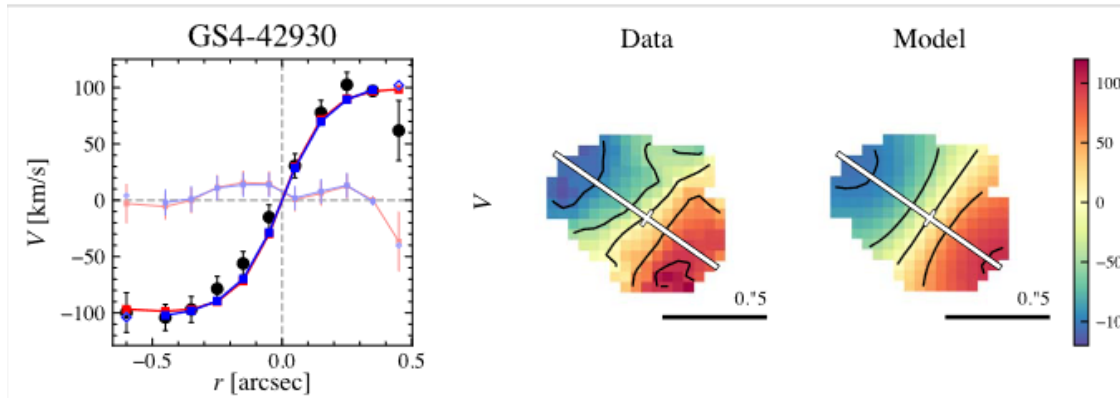
Rapport $M_{\text{dyn}}/M_{\text{bar}}$ vs redshift

V/σ diminue un peu avec Σ_{bar} ,
Et aussi avec z : disques plus instables et plus épais

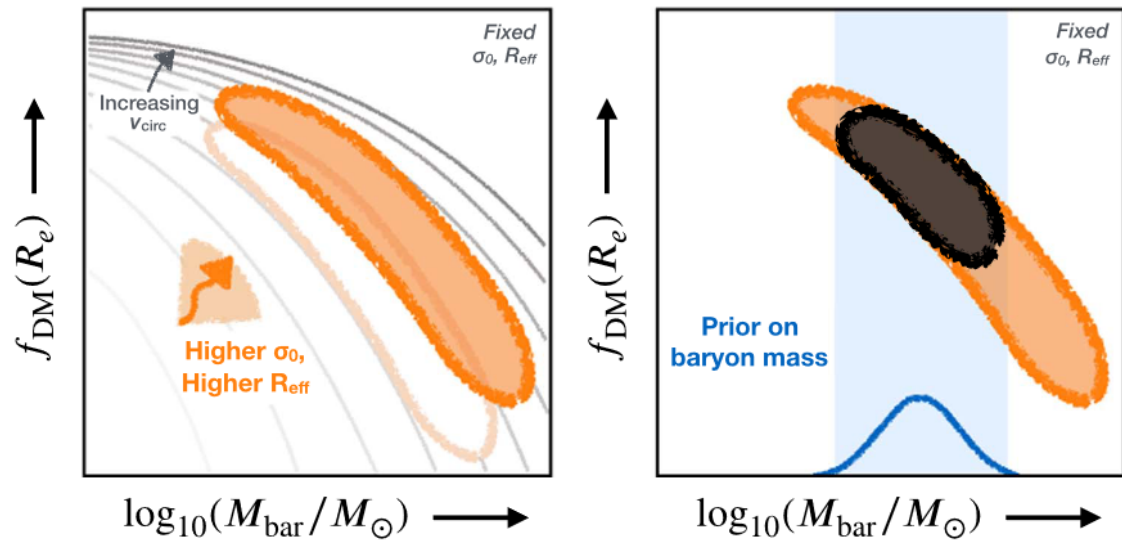


Fraction de matière noire vs redshift

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 α , 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 ?

