



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Le problème de la matière noire: galaxies spirales



Françoise Combes



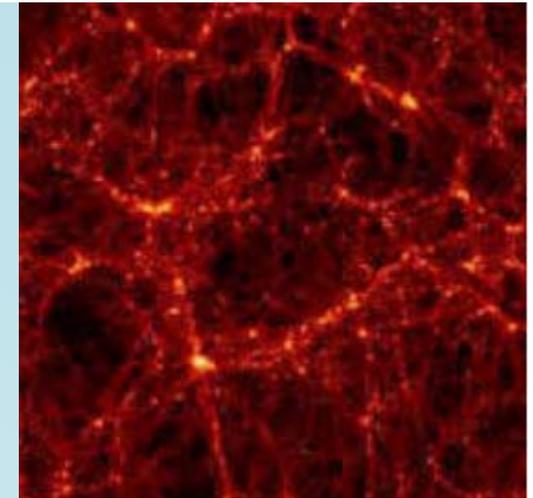
Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

La matière noire est partout

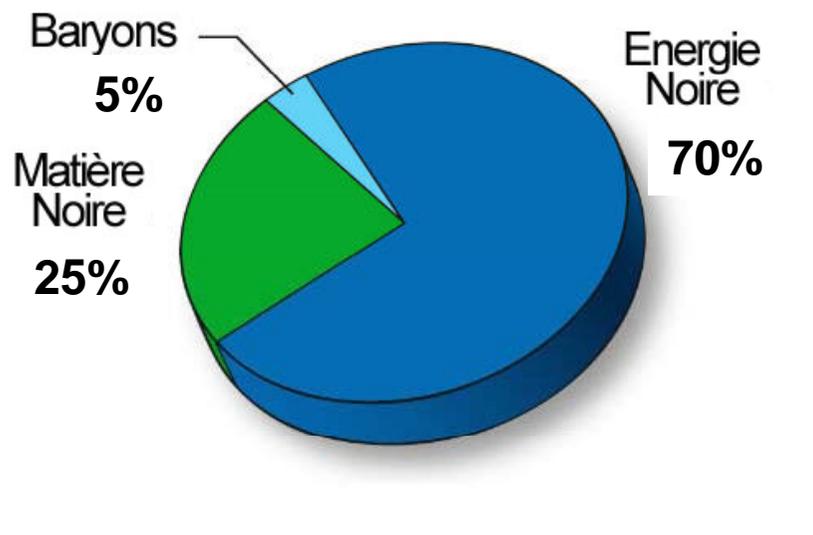
Galaxies



Amas de galaxies,
Filaments cosmiques



Les atomes (baryons) correspondent à une fraction $f_b = 5/(25+5) = 17\%$ de la matière dans l'Univers ($M/M_b=6$)



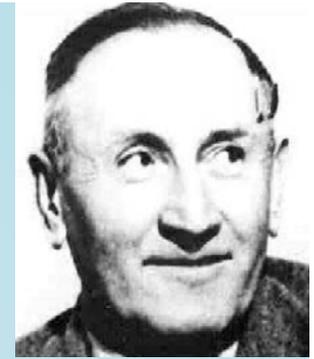
Recherche directe
Production dans les accélérateurs



Satellite Planck, 2013

LHC

Premières évidences de matière noire

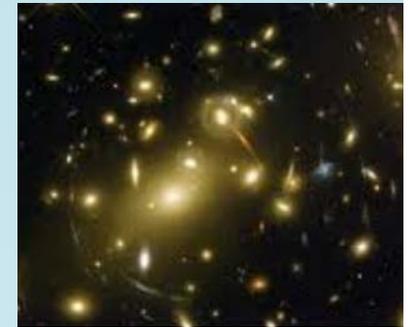


1937 – Fritz Zwicky calcule la masse de l’amas de Coma
En utilisant le théorème du Viriel. Vitesses mesurées $V \sim 1000 \text{ km/s}$
 $M \sim 5 \cdot 10^{14} M_{\odot}$

$$M/L = 500 M_{\odot}/L_{\odot}$$

Il ne voyait pas tous les baryons + pb de distance

- matière noire dans les galaxies
- poussière entre les galaxies + obscuration
- modification de la loi de Newton à grande échelle



Sinclair Smith 1938: amas de Virgo, même M/L



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



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



Babcock 1939

V(km/s)

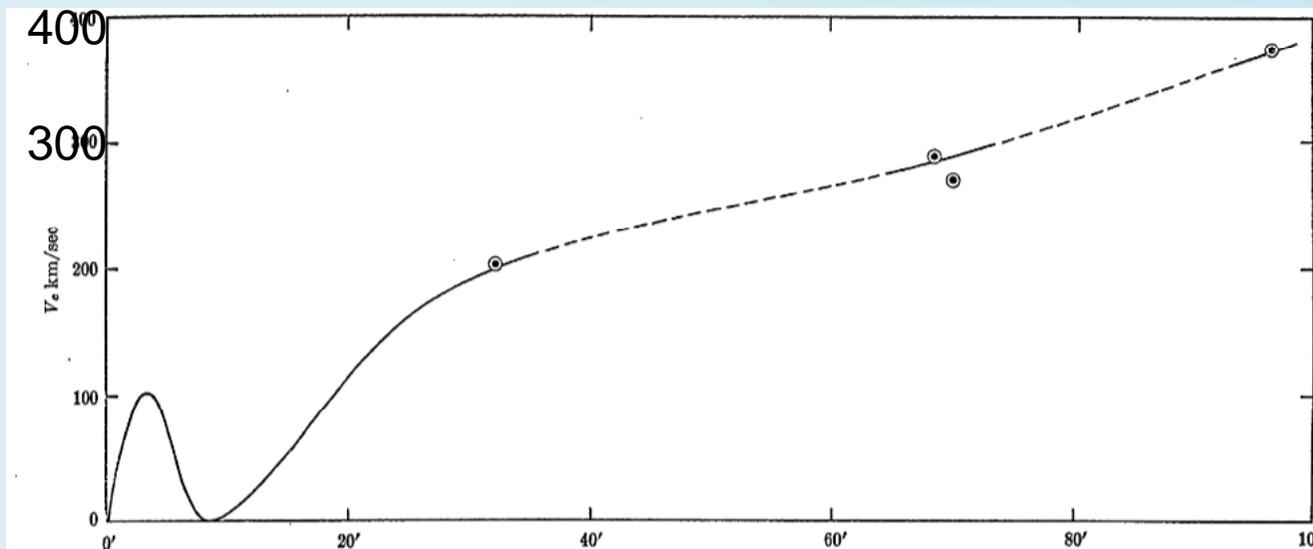
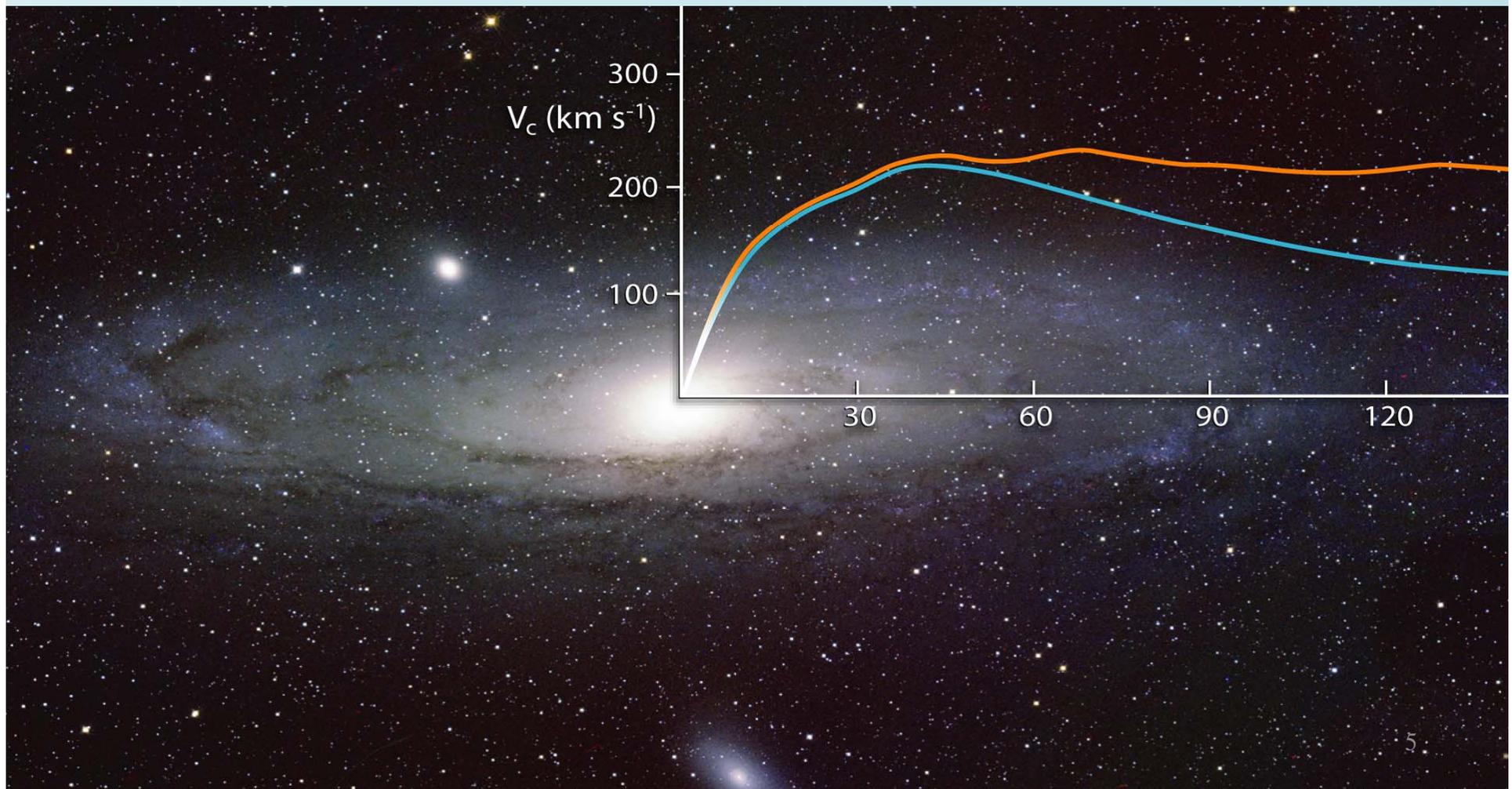


Fig. 4. Mean velocities of rotation in the plane of the spiral.

Raies abs
étoiles, H, K
H δ
Nébuleuses
[OII], [OIII]

M31=Andromède, confirmation

Plus de connaissance de la distribution de masse (infrarouge),
et du gaz à grande distance



Même résultat pour plusieurs galaxies

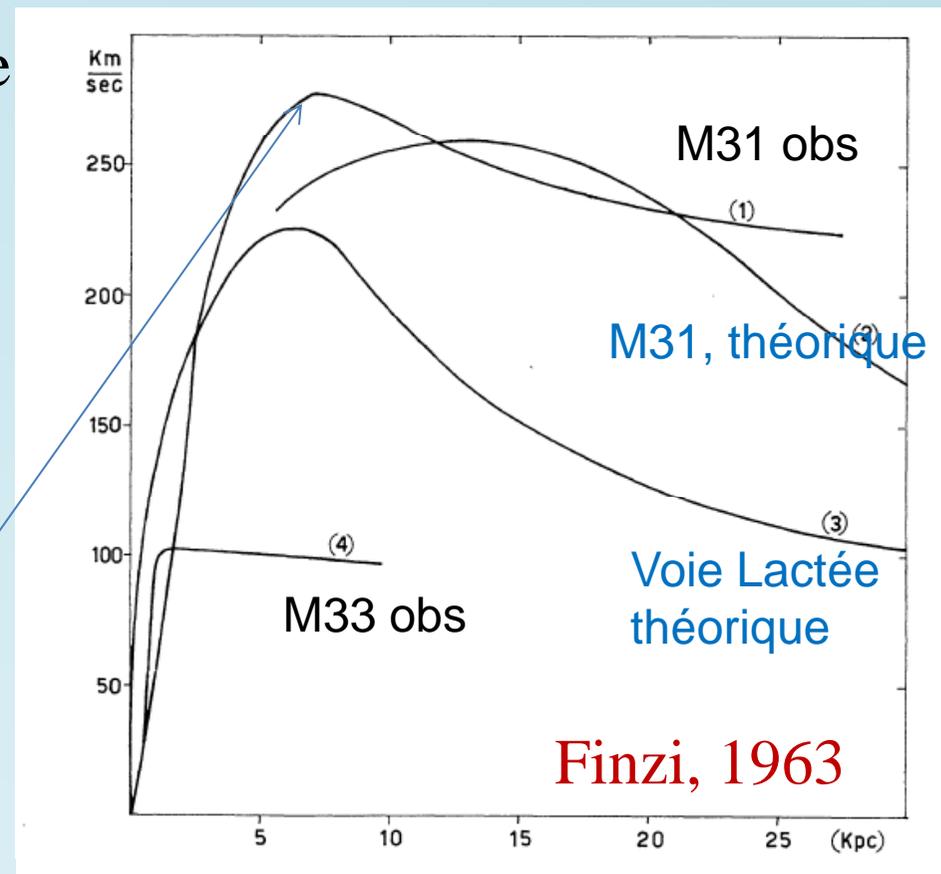
Courbes de rotation **optique**:
étoiles et gaz ionisé ($H\alpha$ et $[NII] 0.6\mu m$)

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

HI est 3-4 fois plus étendu en
rayons

→ **Courbes plates**

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



Arrigo Finzi (1963) loi de gravitation différente à grande distance 6

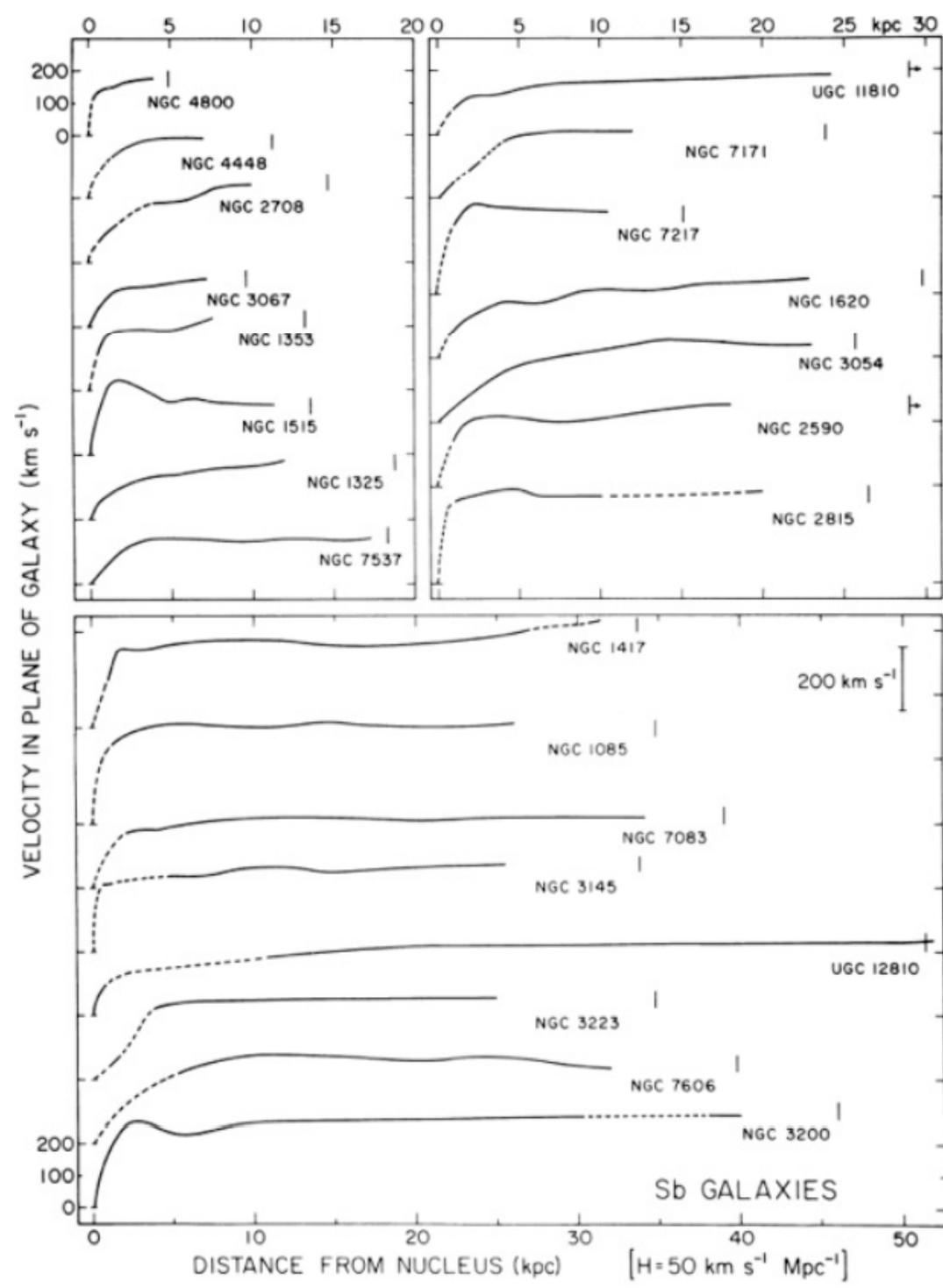
Courbes de rotation optiques

23 Sb, jusqu'à R_{25}
 25 mag par " 2

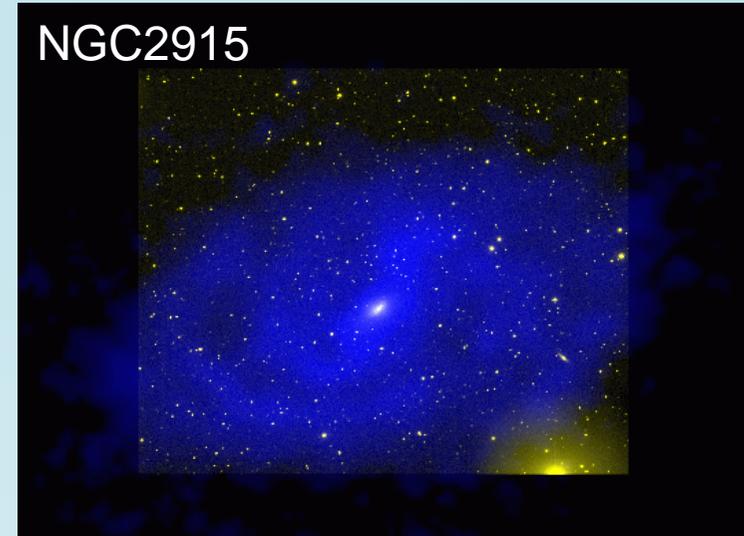
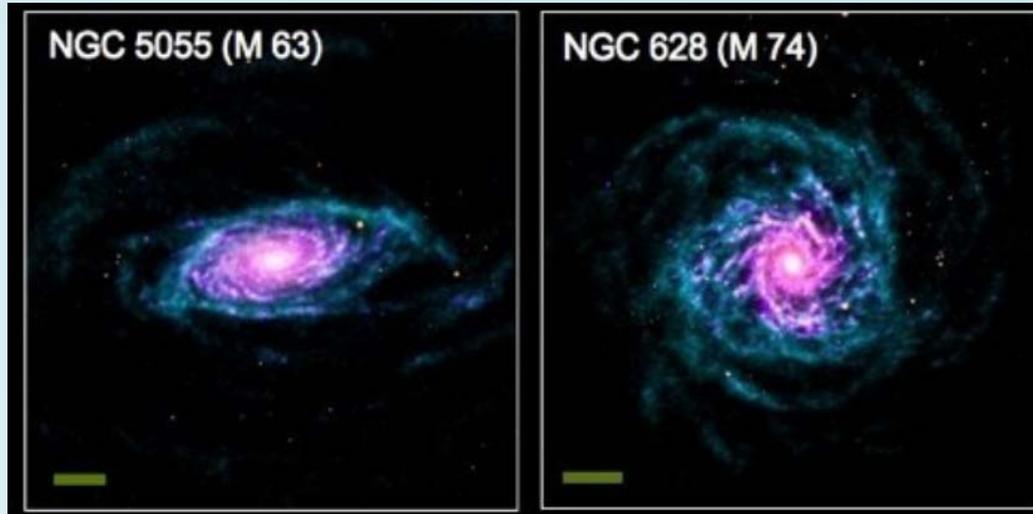
M/L varie selon les types
 et les populations stellaires

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

Rubin et al 1978



Hydrogène atomique dans les galaxies

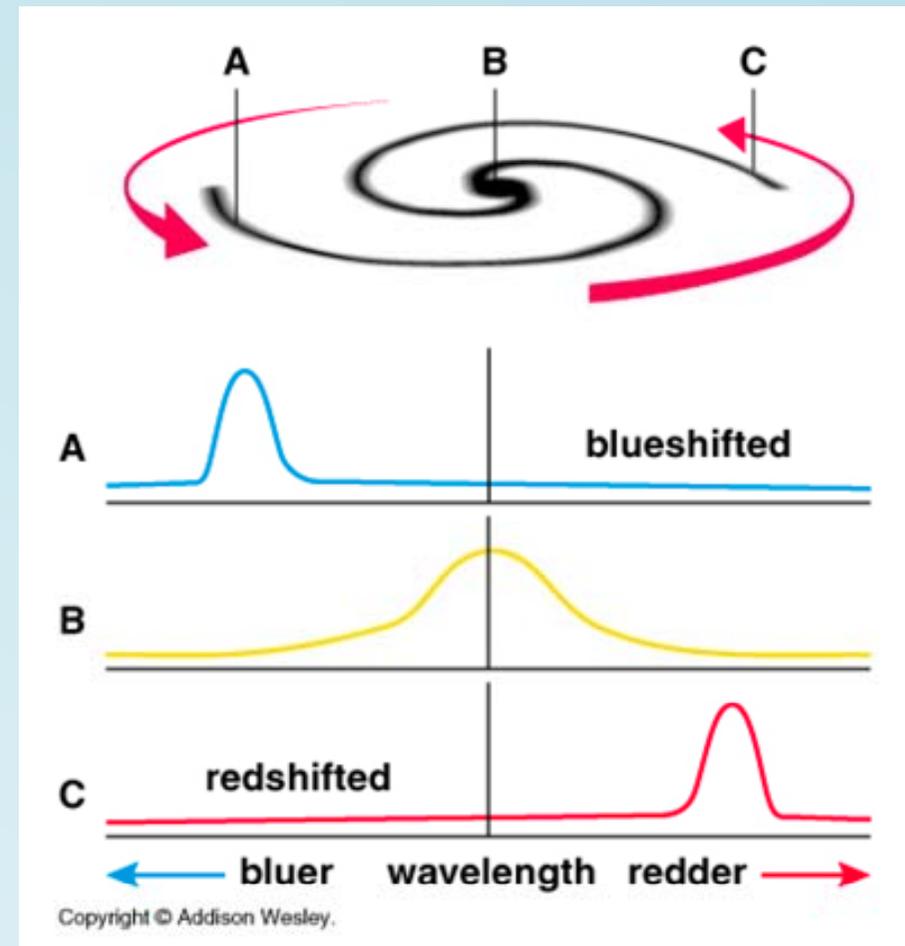
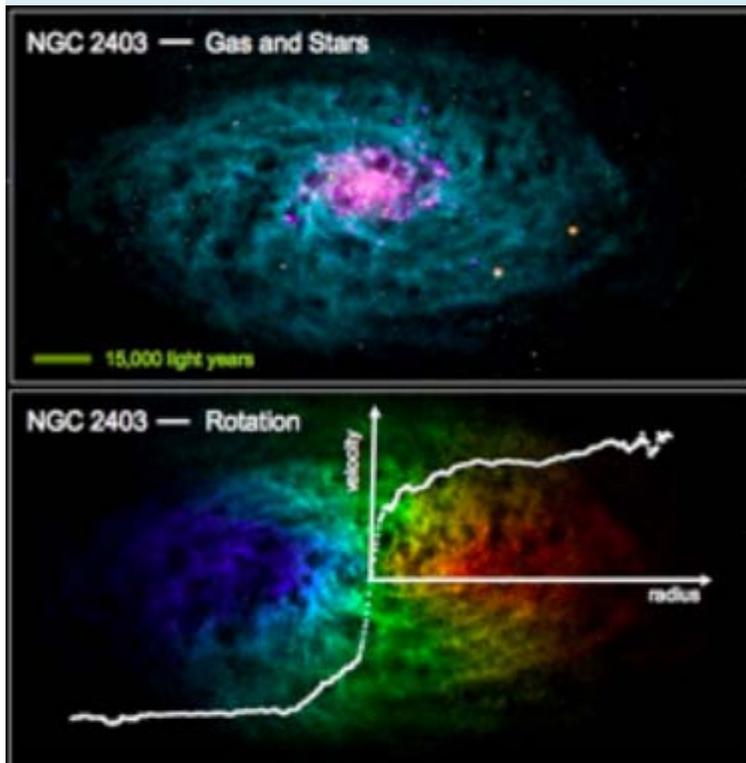


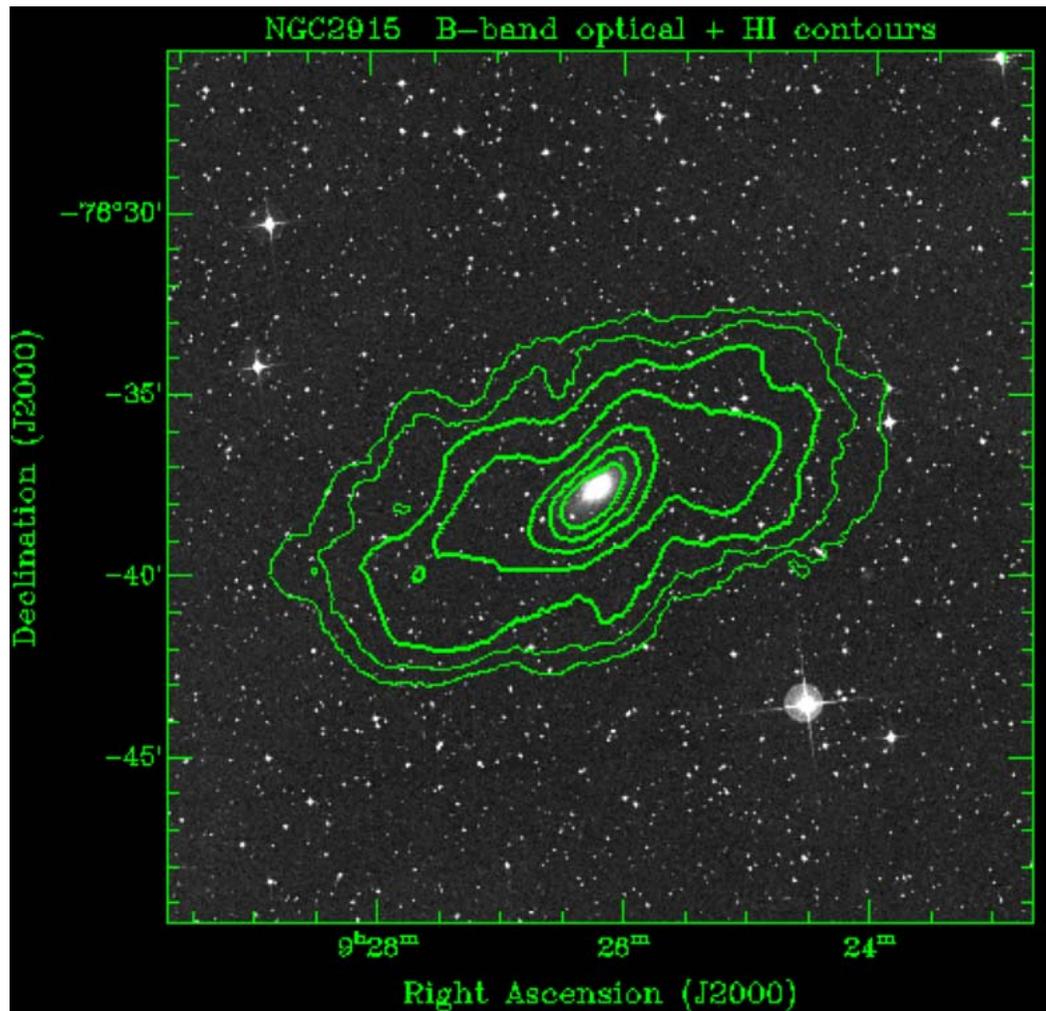
$R(\text{gaz}) \sim 2\text{-}4 R(\text{optique})$



Comment construire une courbe de rotation?

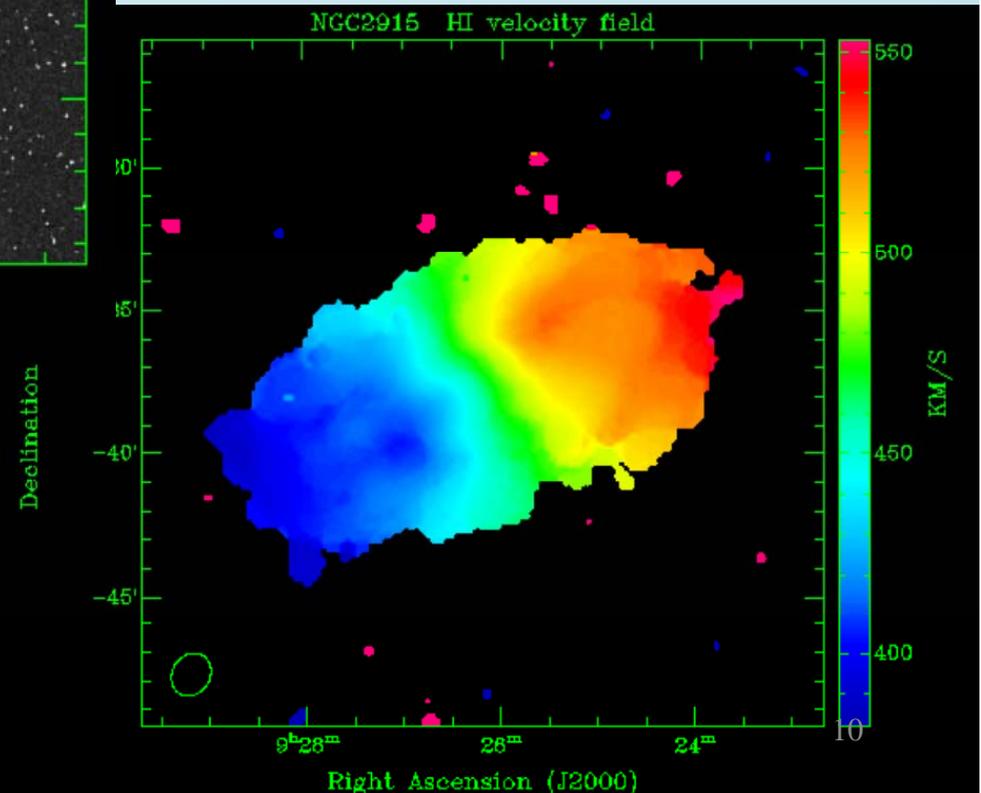
- Effet Doppler
- Repliement des deux côtés,





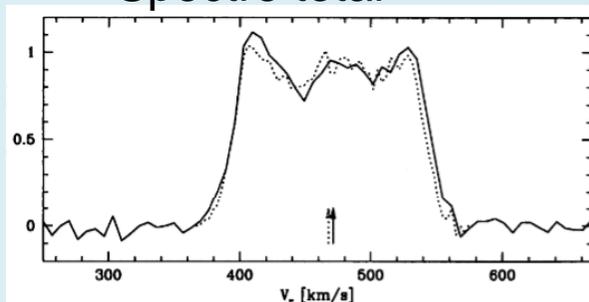
Champ de vitesses
Diagramme de l'araignée

NGC 2915
M/L ~ 80

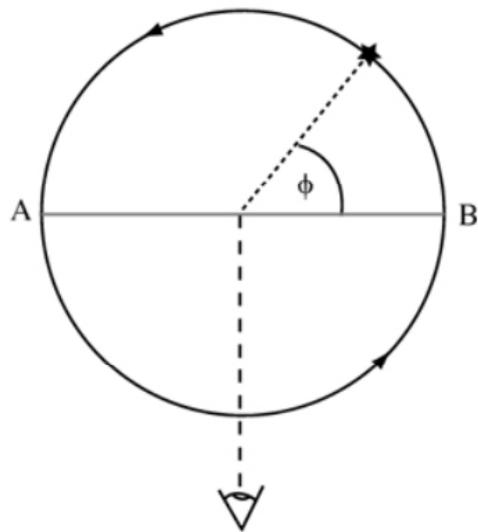
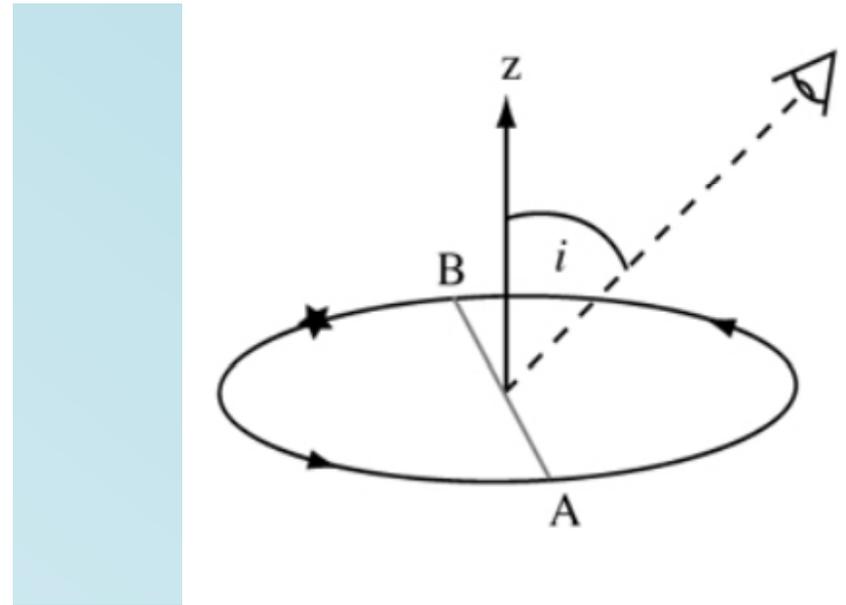
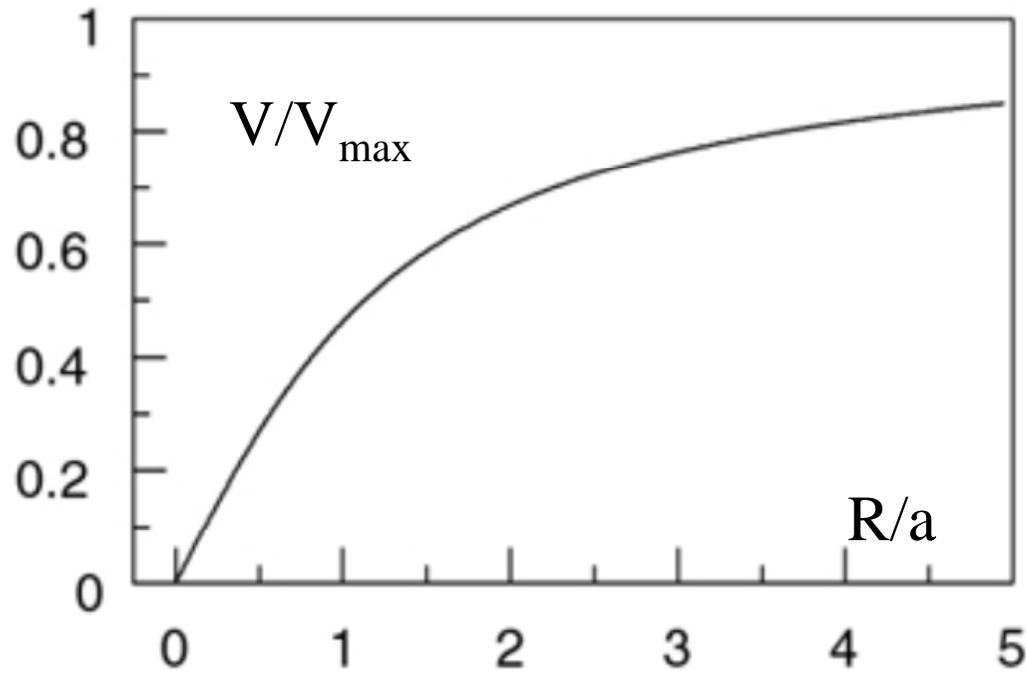


Spectre total

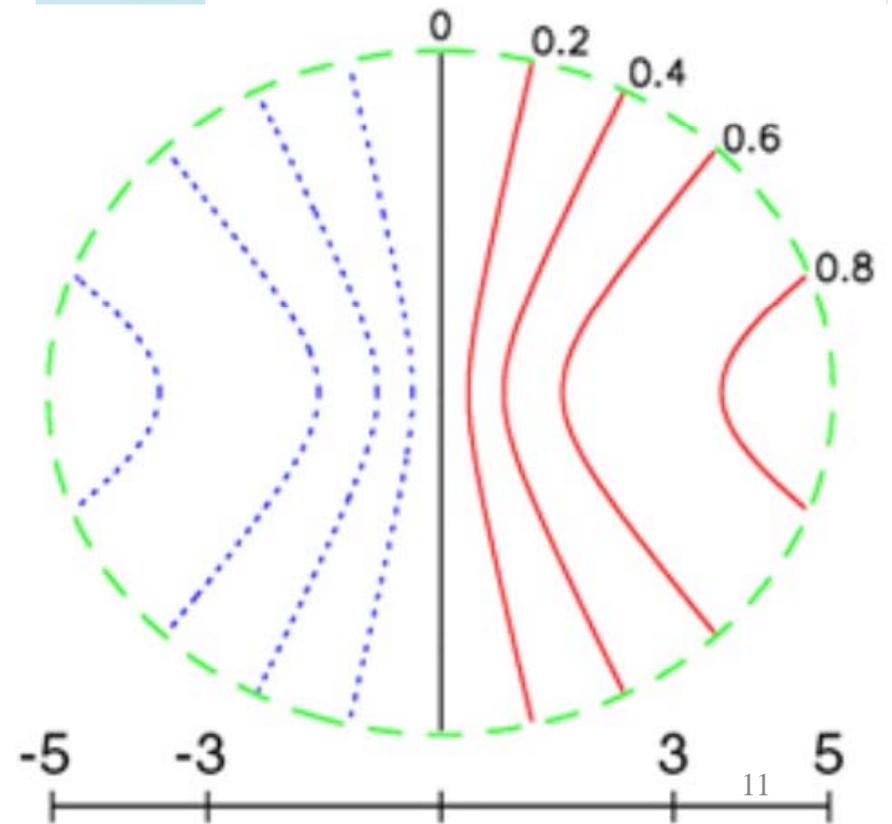
Flux HI



Meurer et al 1996, Bureau et al 1999

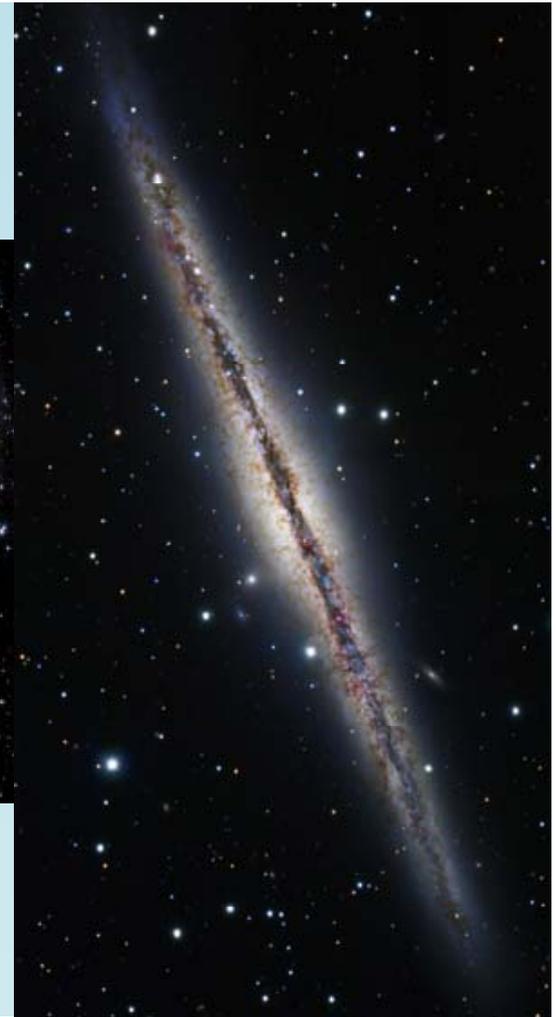
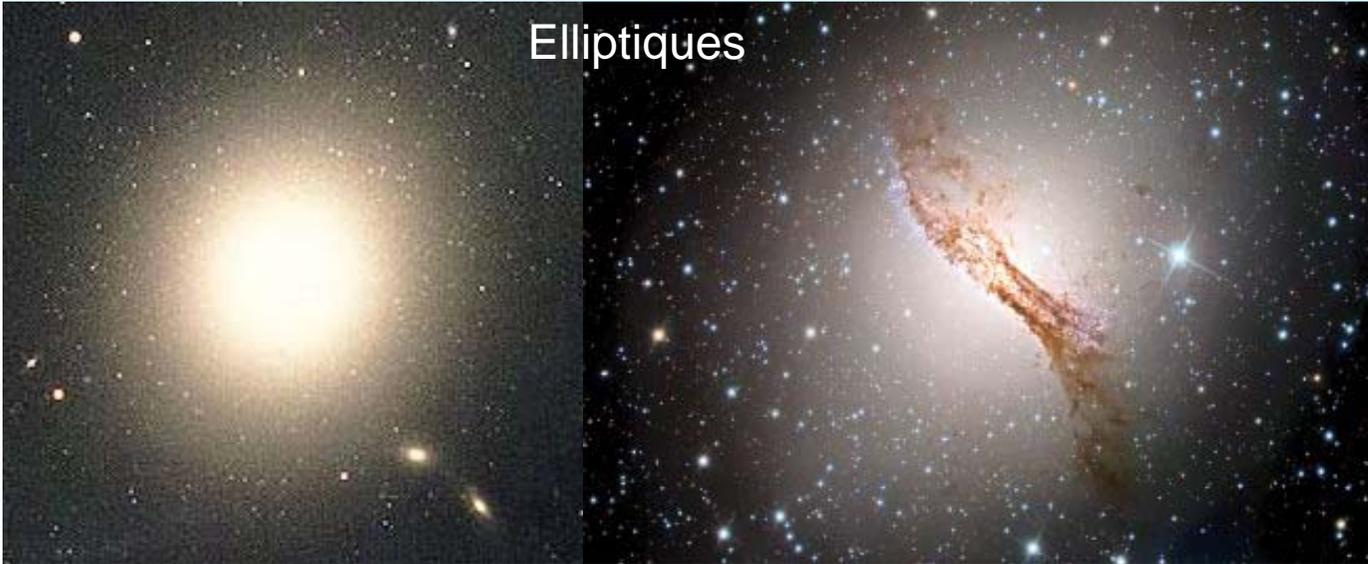


$$V_{\text{obs}} = V_{\text{sys}} + V_{\text{rot}} \sin i \cos \phi + V_r \sin i \sin \phi$$

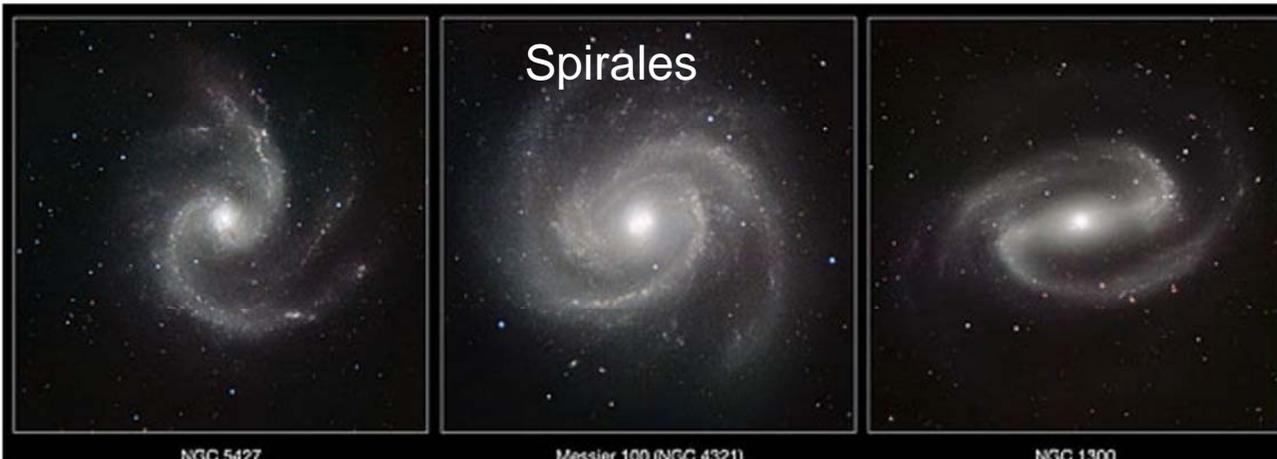


Des galaxies de tous types

Elliptiques



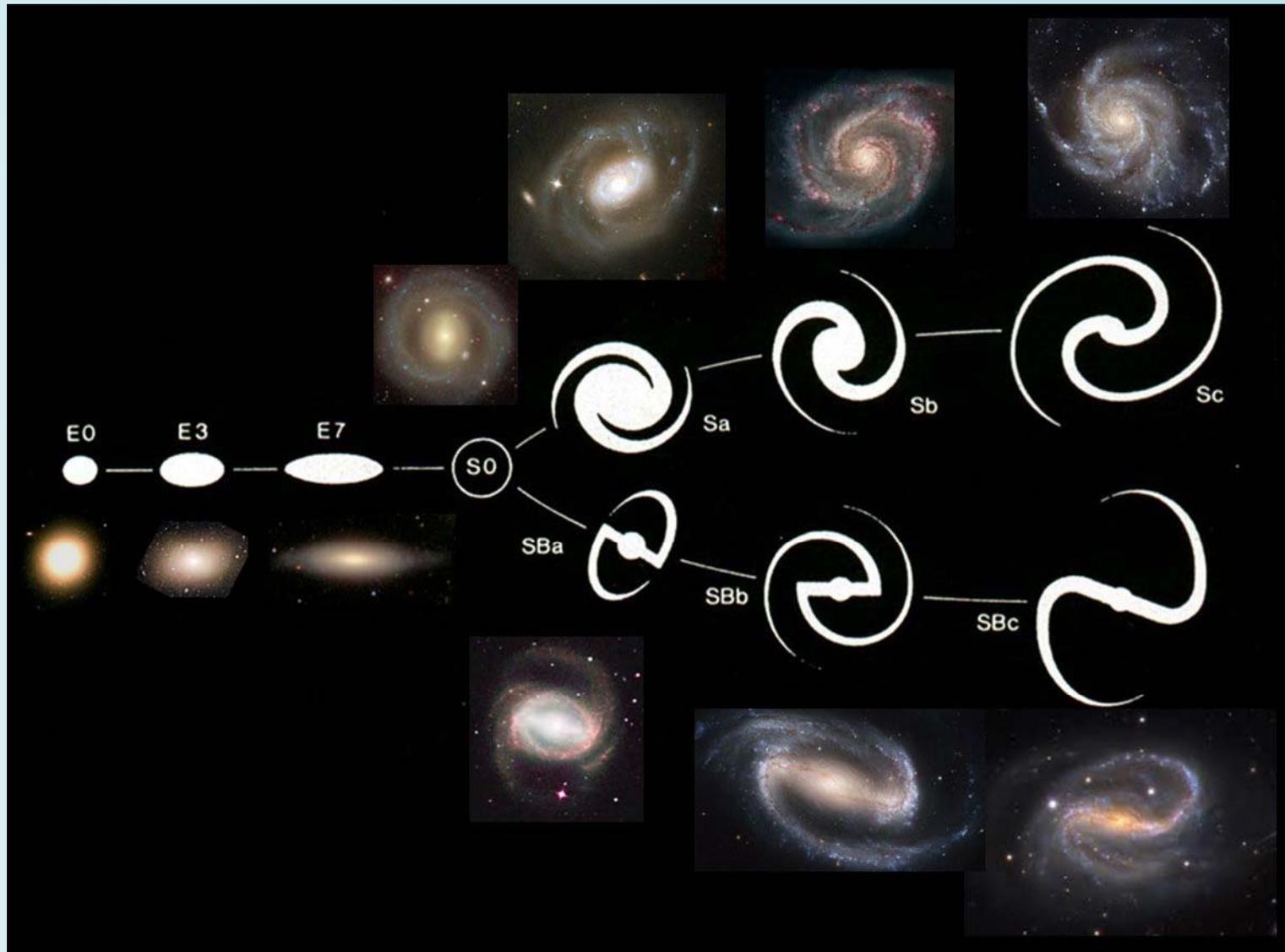
Spirales



Naines



Le diapason de Hubble



Obtention des vitesses

Optique: H α , NII, raies émission gaz ionisé

Radio: HI-21cm, CO: 2.6, 1.3 mm

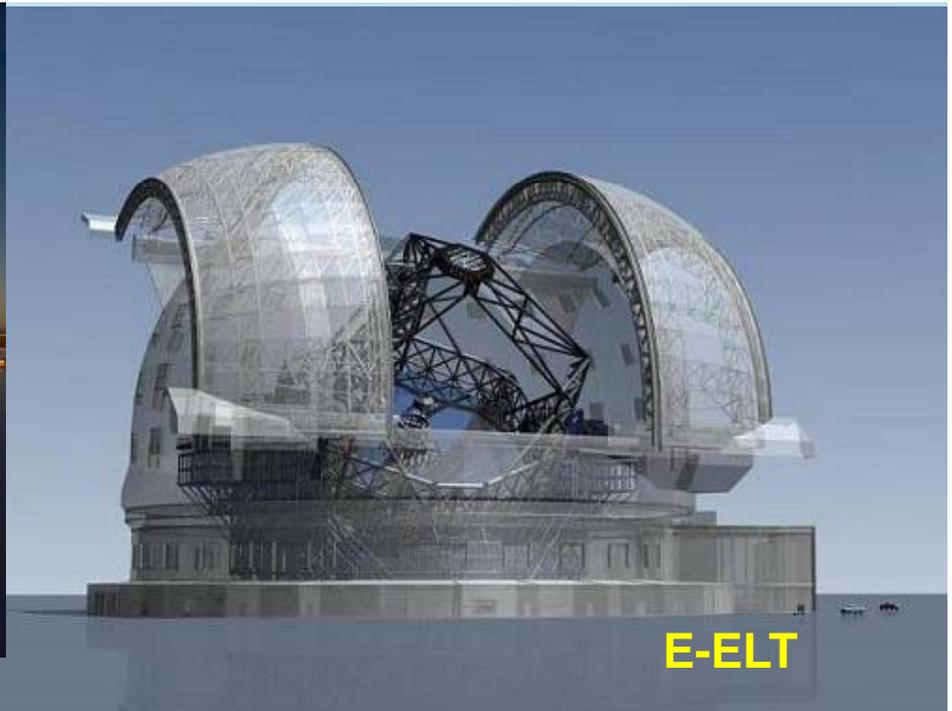
**Futur ALMA
SKA, ...**

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





VLT



E-ELT



GTC



KECK

ALMA, désert d'Atacama



Ondes millimétriques
Gaz moléculaire

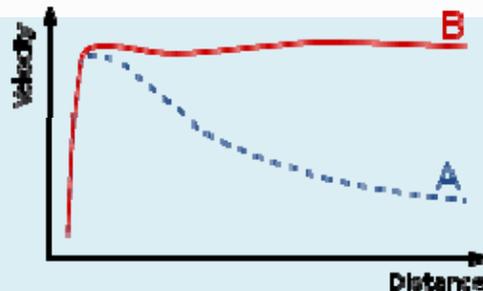
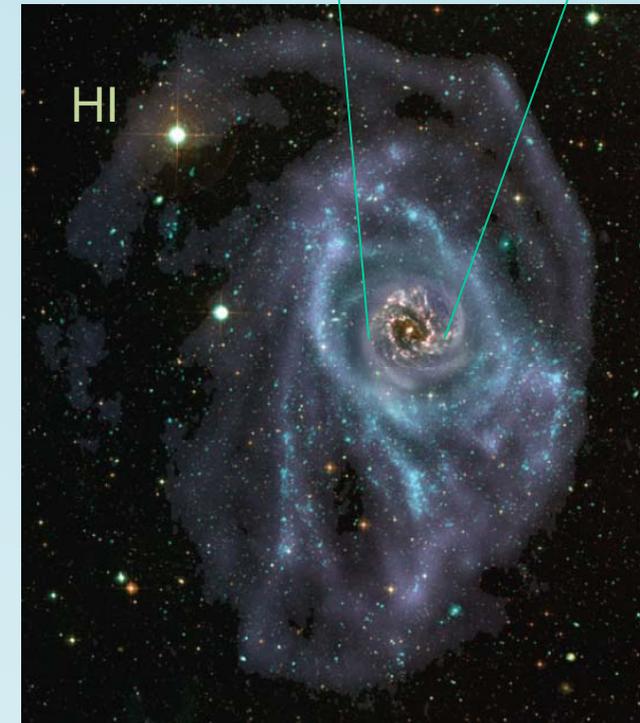
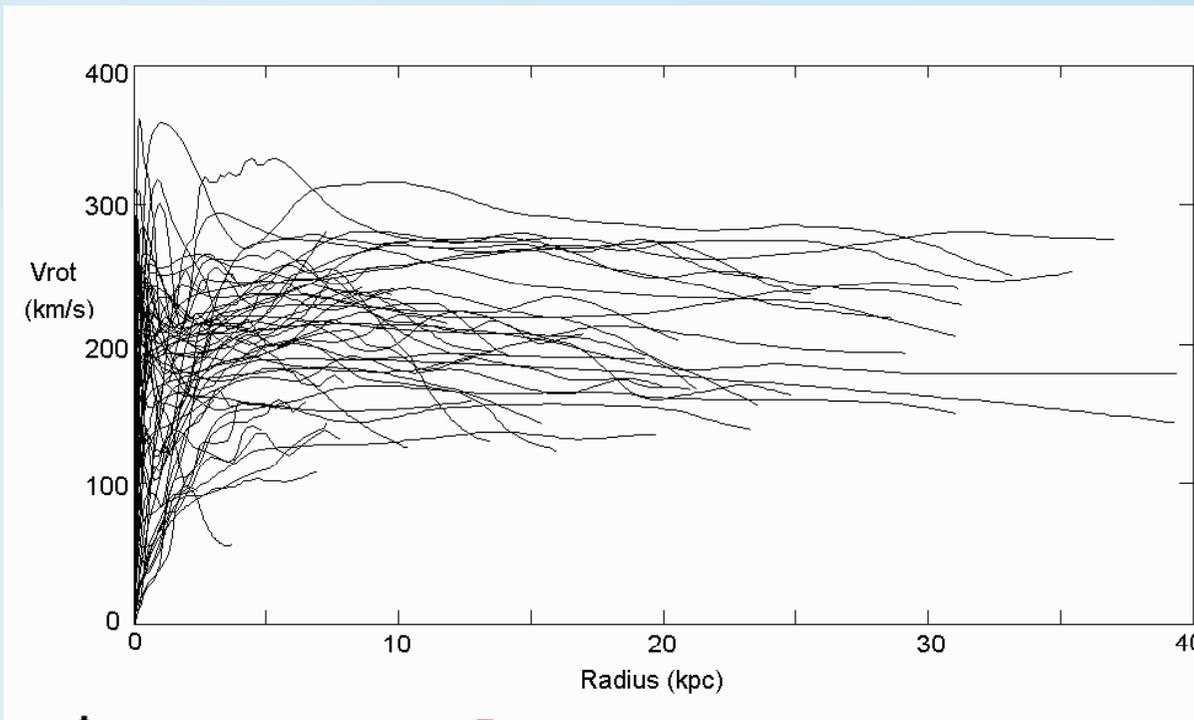


© picture-alliance/dpa

Courbe de rotation: catalogue

M83: optique

HI: cartographie de l'hydrogène atomique
Longueur d'onde 21cm (Sofue & Rubin 2001)



M83: une galaxie semblable à la Voie Lactée

THINGS

The HI Nearby Galaxy Survey

NGC 2841

NGC 3621

NGC 7331

NGC 4926
(M64)

NGC 3198

NGC 6946

NGC 3184

NGC 925

NGC 3351
(M95)

NGC 5194
(M51)

NGC 3521

NGC 4214

NGC 2976

DDO 53

NGC 1569

NGC 5236
(M83)

NGC 2366

Our Galaxy
HI
stars

M81dwB

M81dwA

IC 2574

NGC 4449

NGC 3627
(M66)

Holmberg II

NGC 7793

DDO 154

NGC 4736
(M94)

NGC 3077

Holmberg I

NGC 5055

NGC 2903

NGC 628
(M74)

NGC 5457
(M101)

NGC 3031
(M81)

NGC 2403

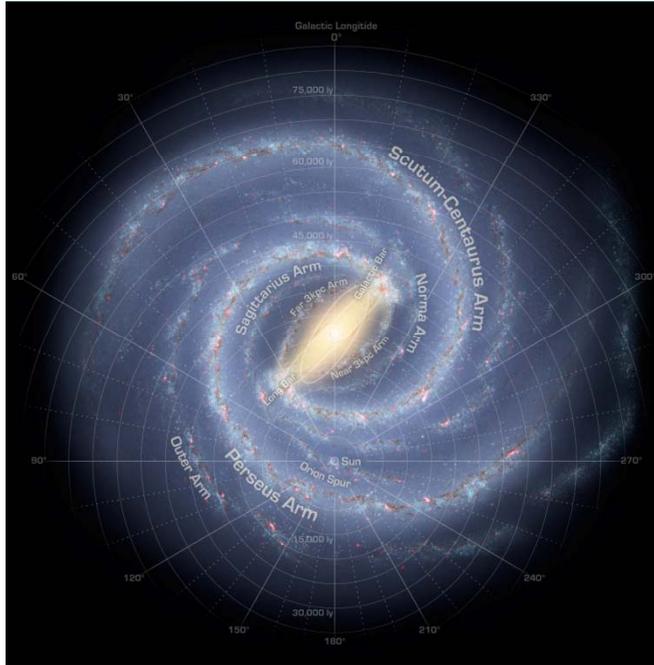
10 kpc



Data: Walter et al 2008

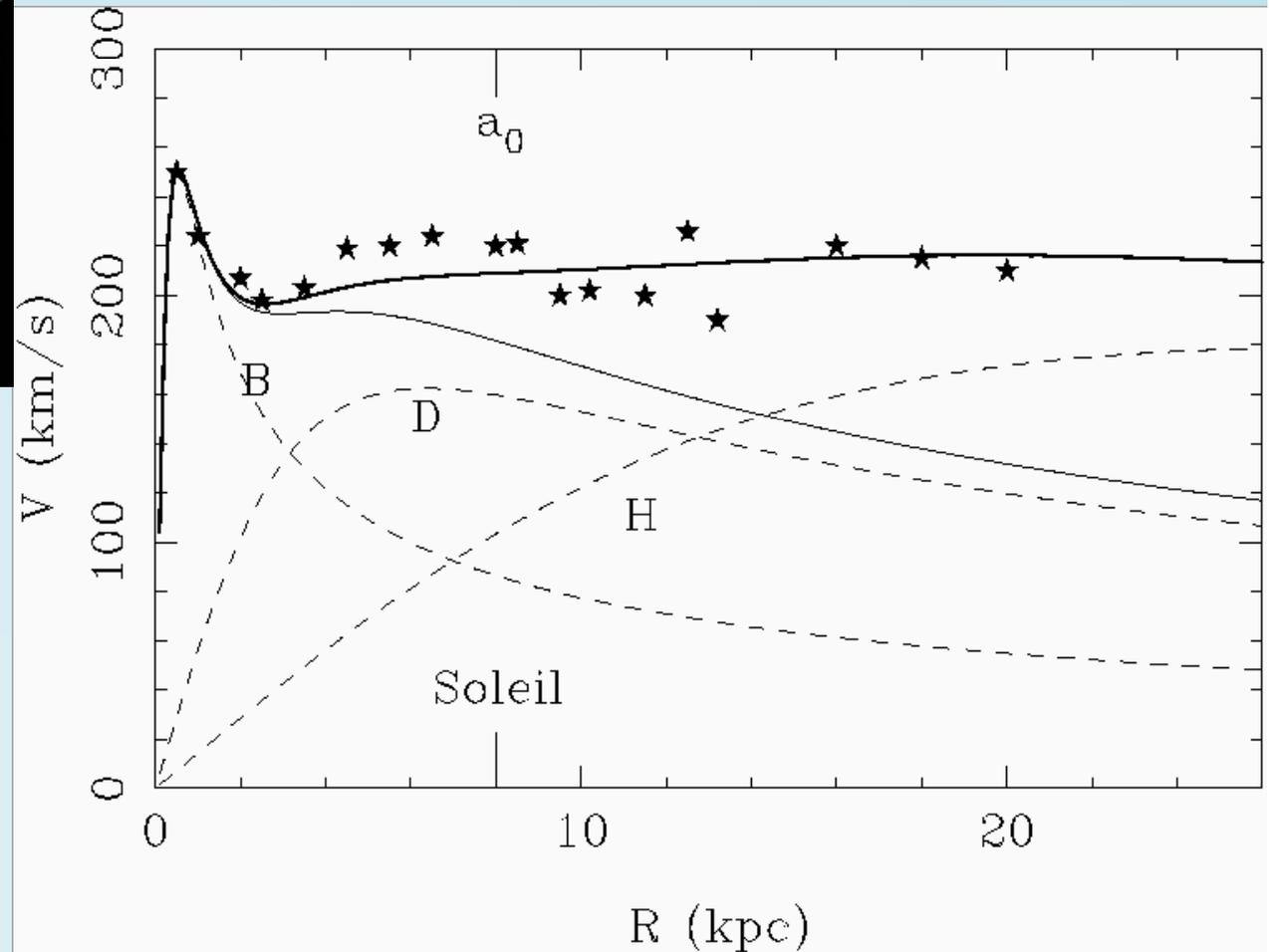
Milky Way HI map: Corn et al (1998)
Milky Way art: NASA/JPL, R. Hurt (SSC)

La Voie Lactée: déprojection difficile

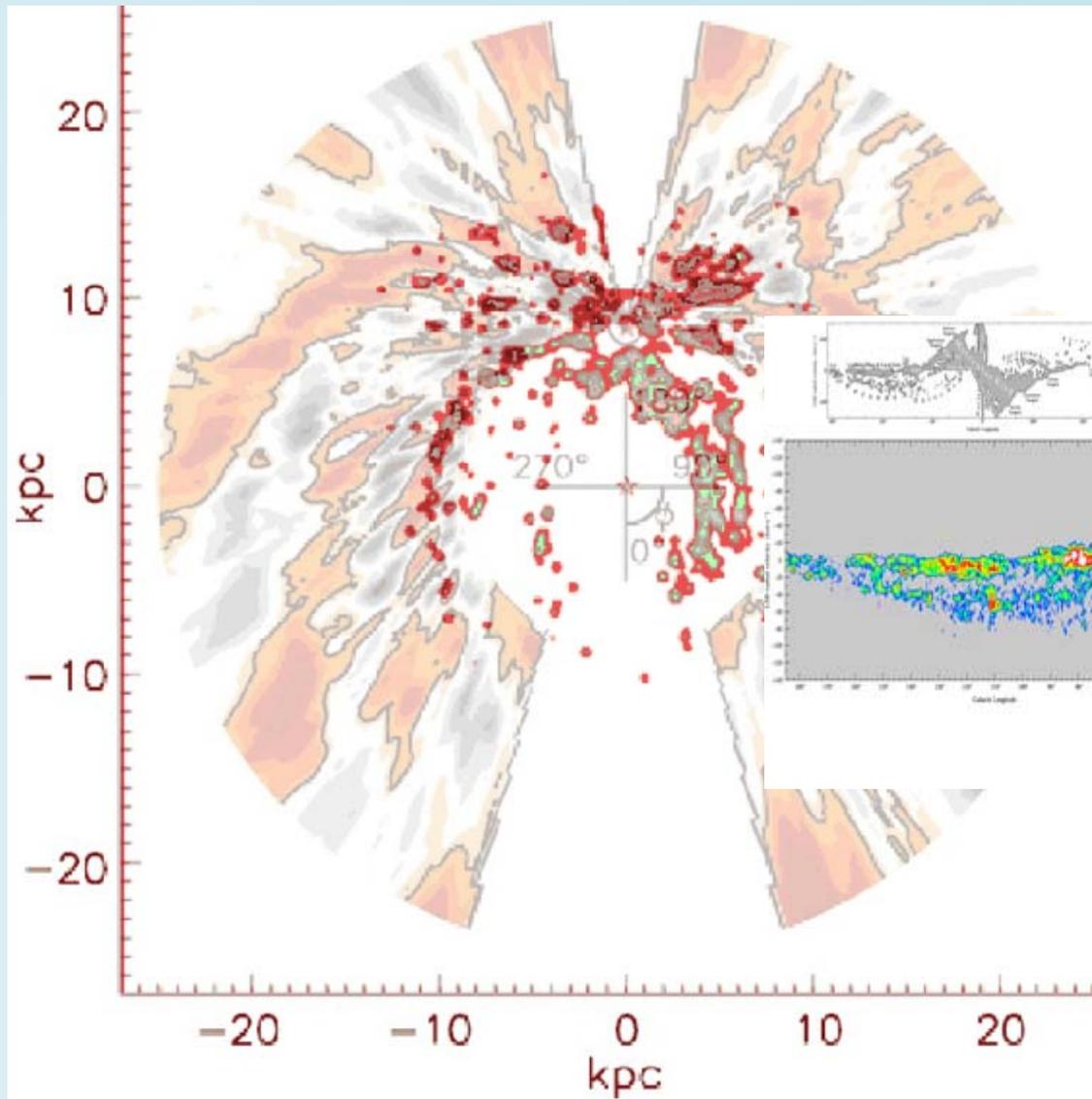


Nous ne voyons que la tranche

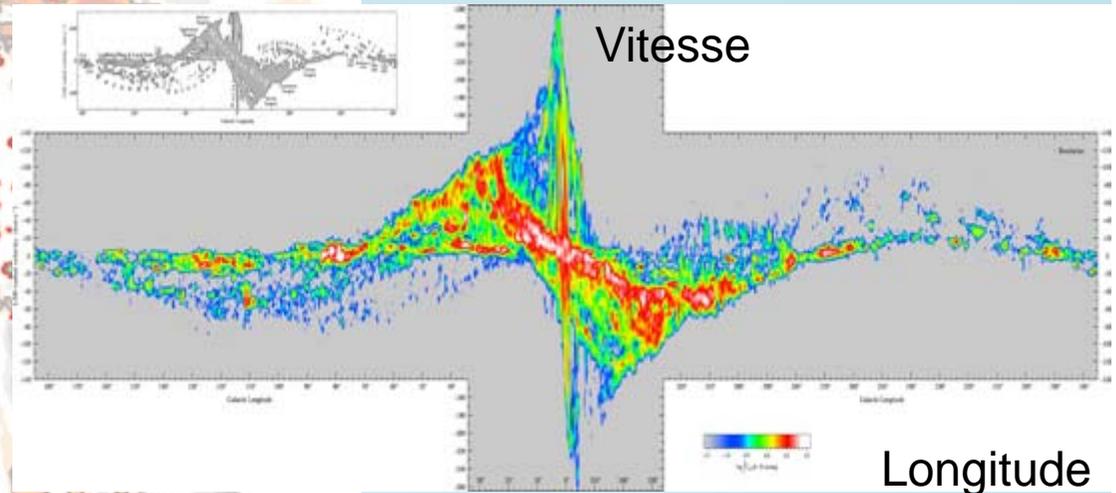
Les distances sont mal connues
Dépendent des vitesses
Ambiguïtés



La Voie Lactée: gas HI, H₂



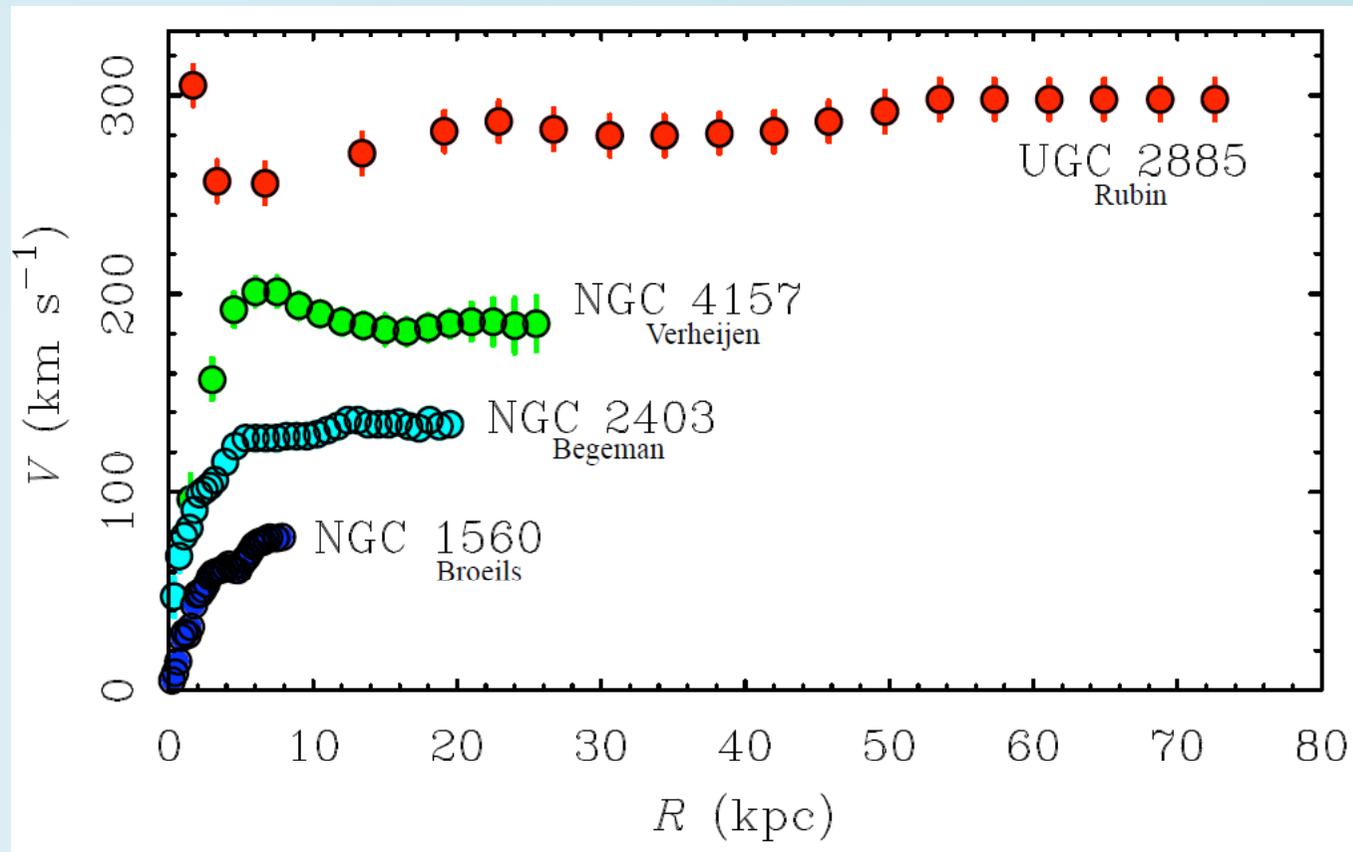
HI-21cm
Déprojection suspecte
Biais de vitesses



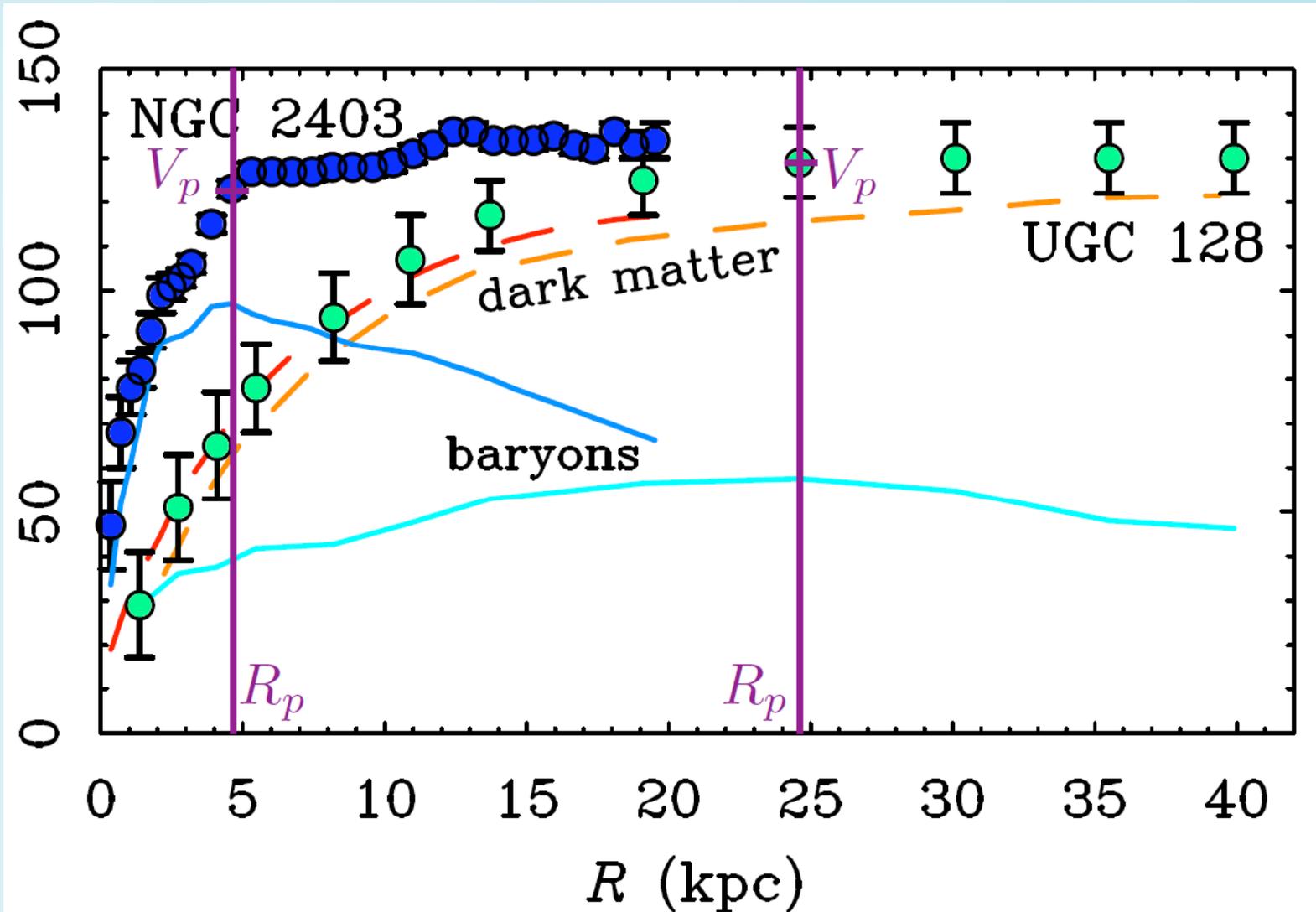
CO traceur de H₂
Vitesses non-circulaires au
centre → barre

Courbe Universelle

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



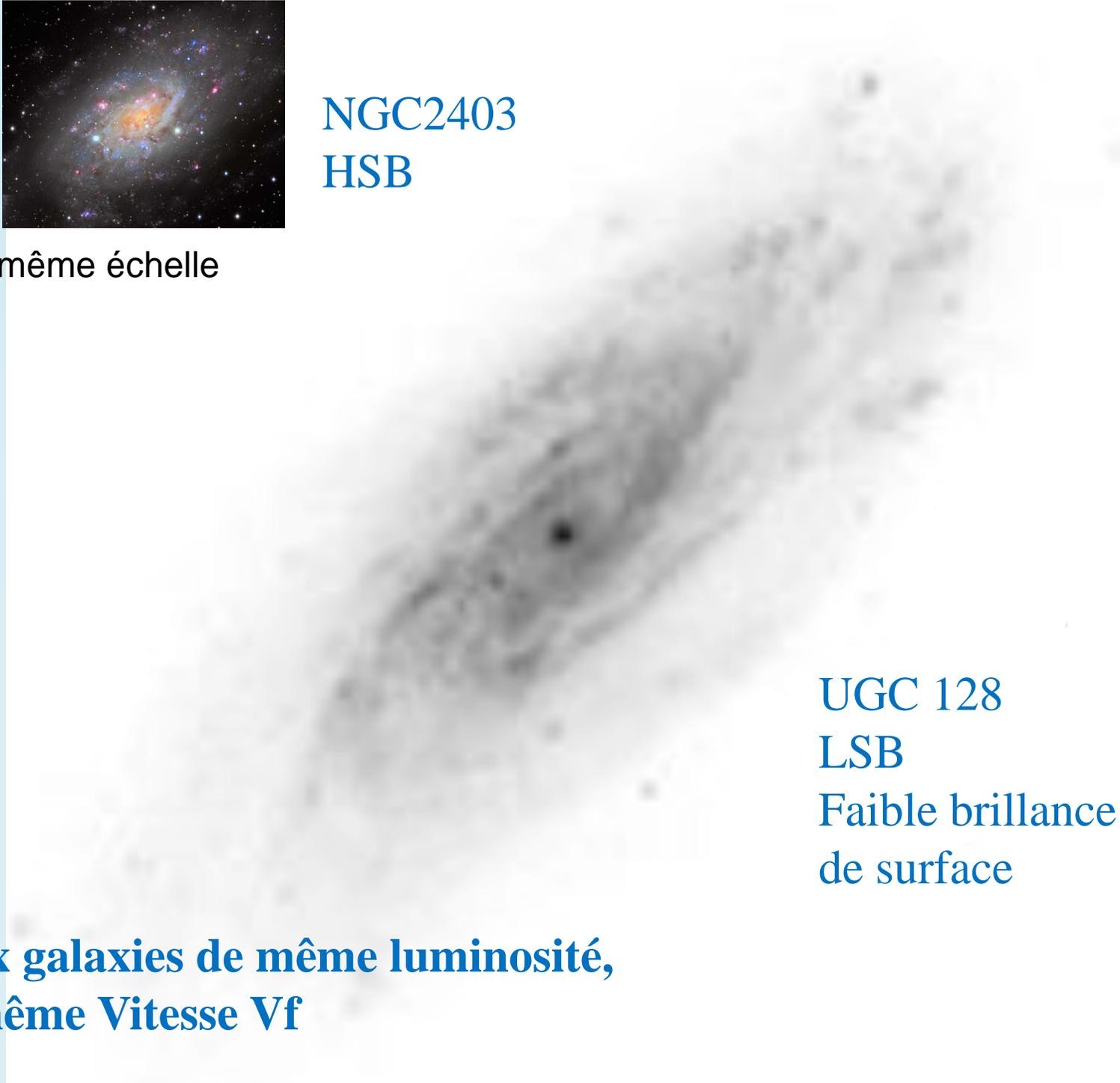
Interprétation des diverses courbes





NGC2403
HSB

A la même échelle



UGC 128
LSB
Faible brillance
de surface

**Deux galaxies de même luminosité,
Et même Vitesse V_f**

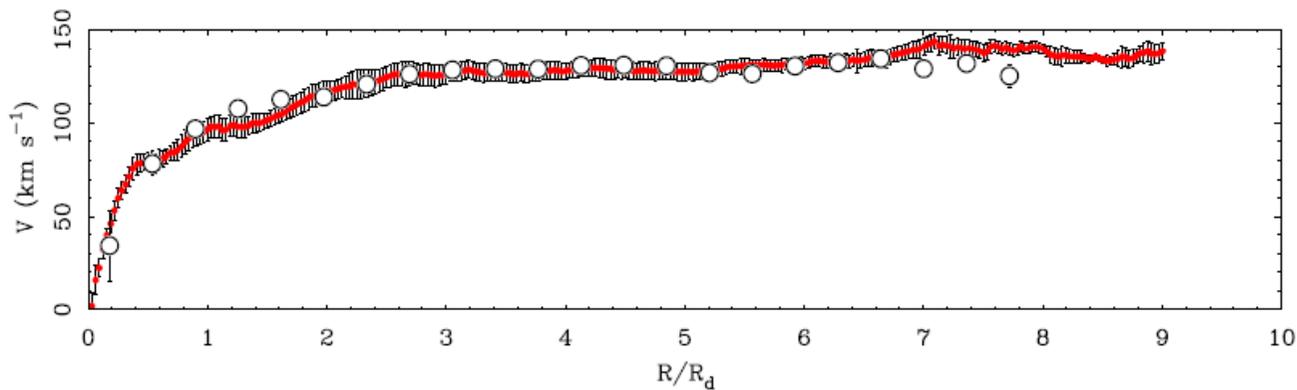
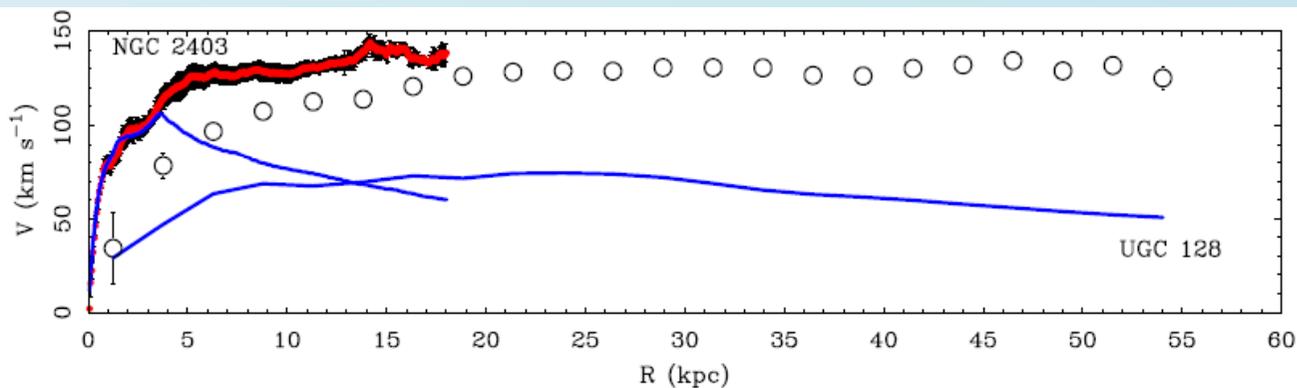
Normalisation à R_d disque exponentiel

Plusieurs façons de faire

--disque maximum

-- même halo noir

-- normalisation au disque optique



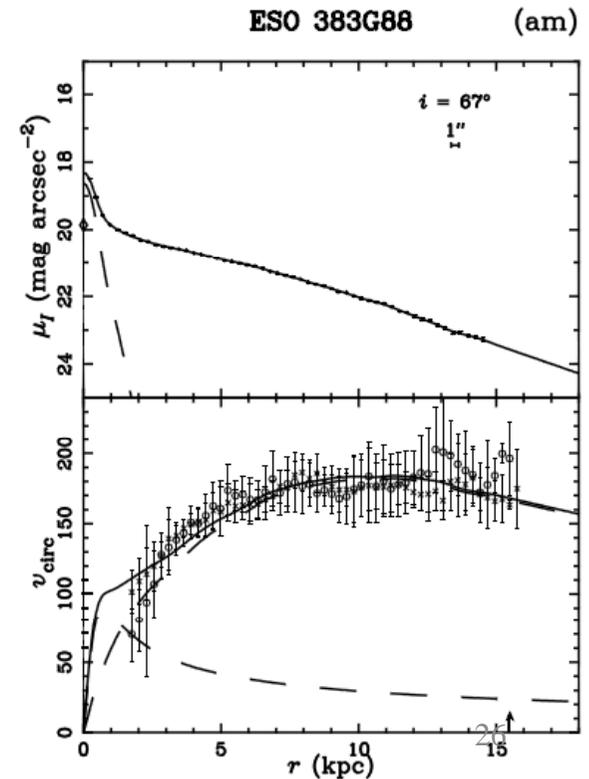
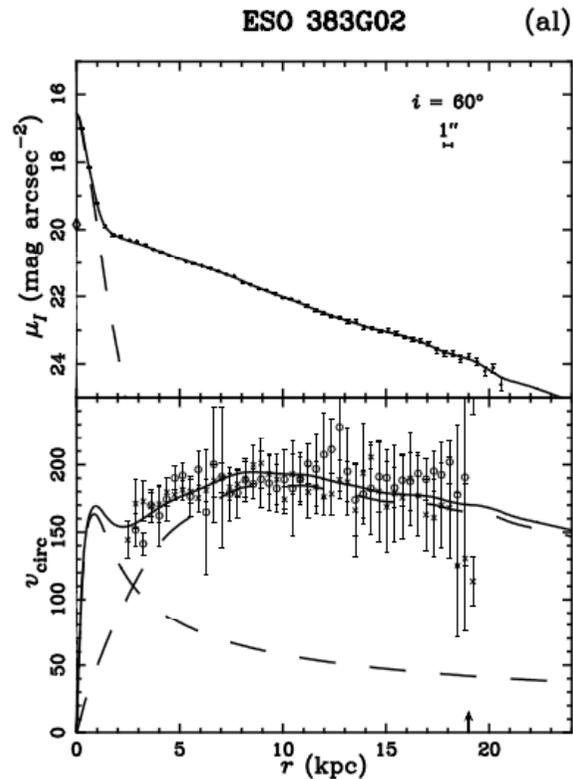
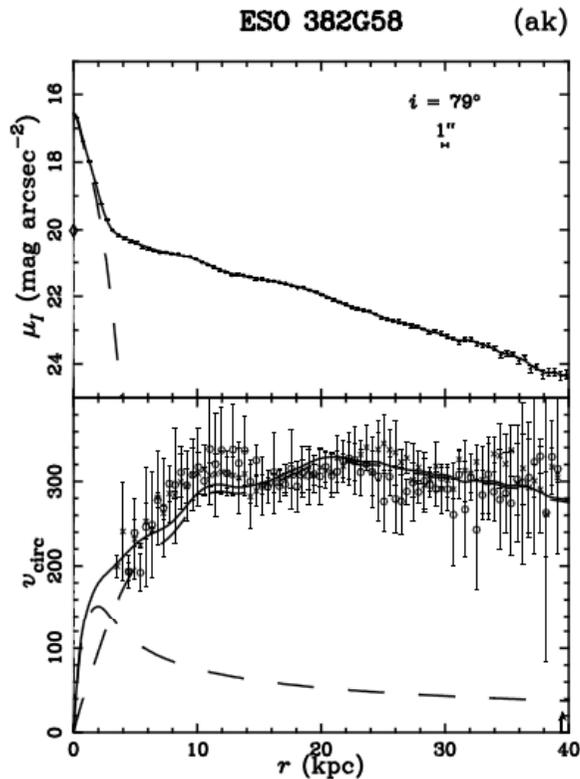
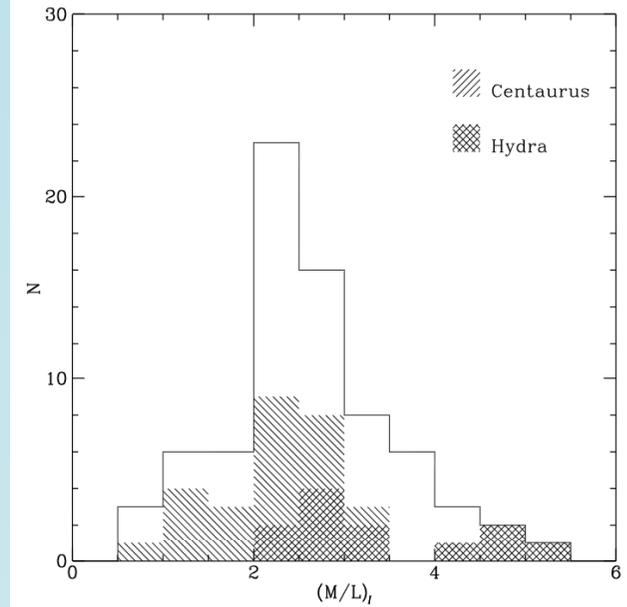
McGaugh 2014

Le disque maximum

74 galaxies spirales: bon accord avec une modélisation bulbe+ disque $M/L = 1-5$

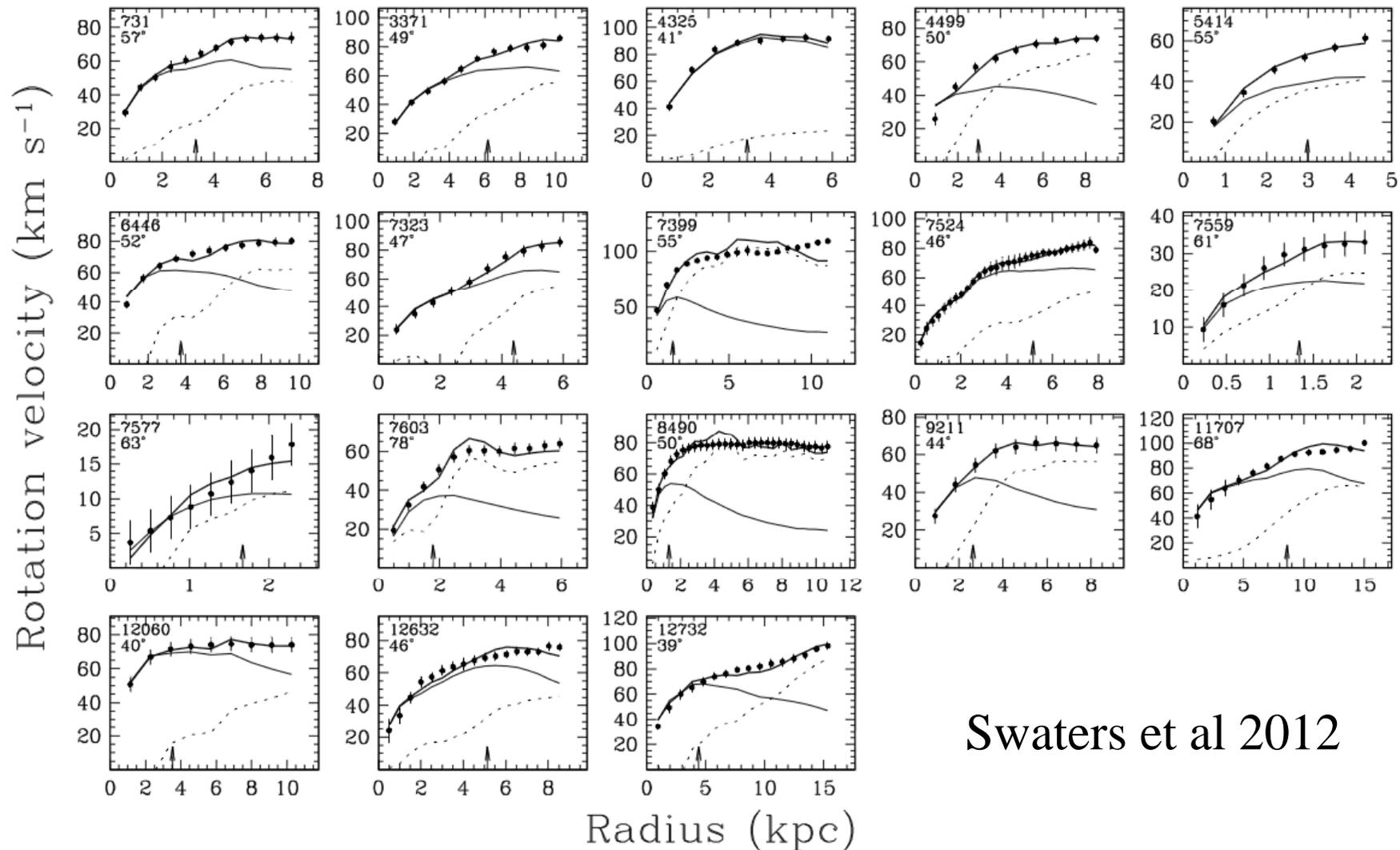
→ MN suit les étoiles?

Palunas & Williams 2000

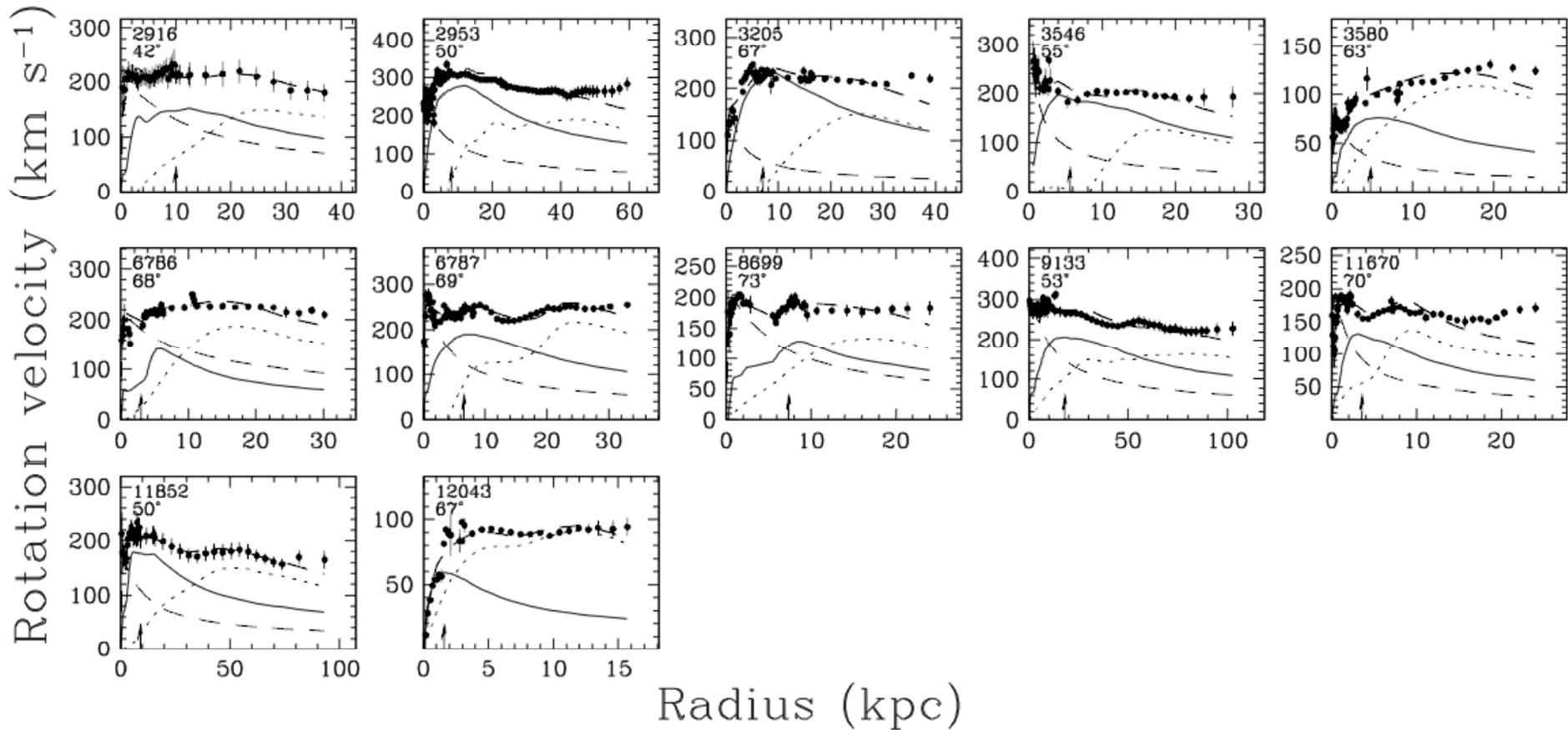


Couplage MN-baryons: Galaxies naines

Les ondulations des courbes de rotation suivent les baryons: une fois mis a l'échelle (M/L cst), on retrouve la courbe de rotation observée



Couplage MN-baryons: Galaxies massives



L'accord est moins bon au bord: ionisation du gaz HI

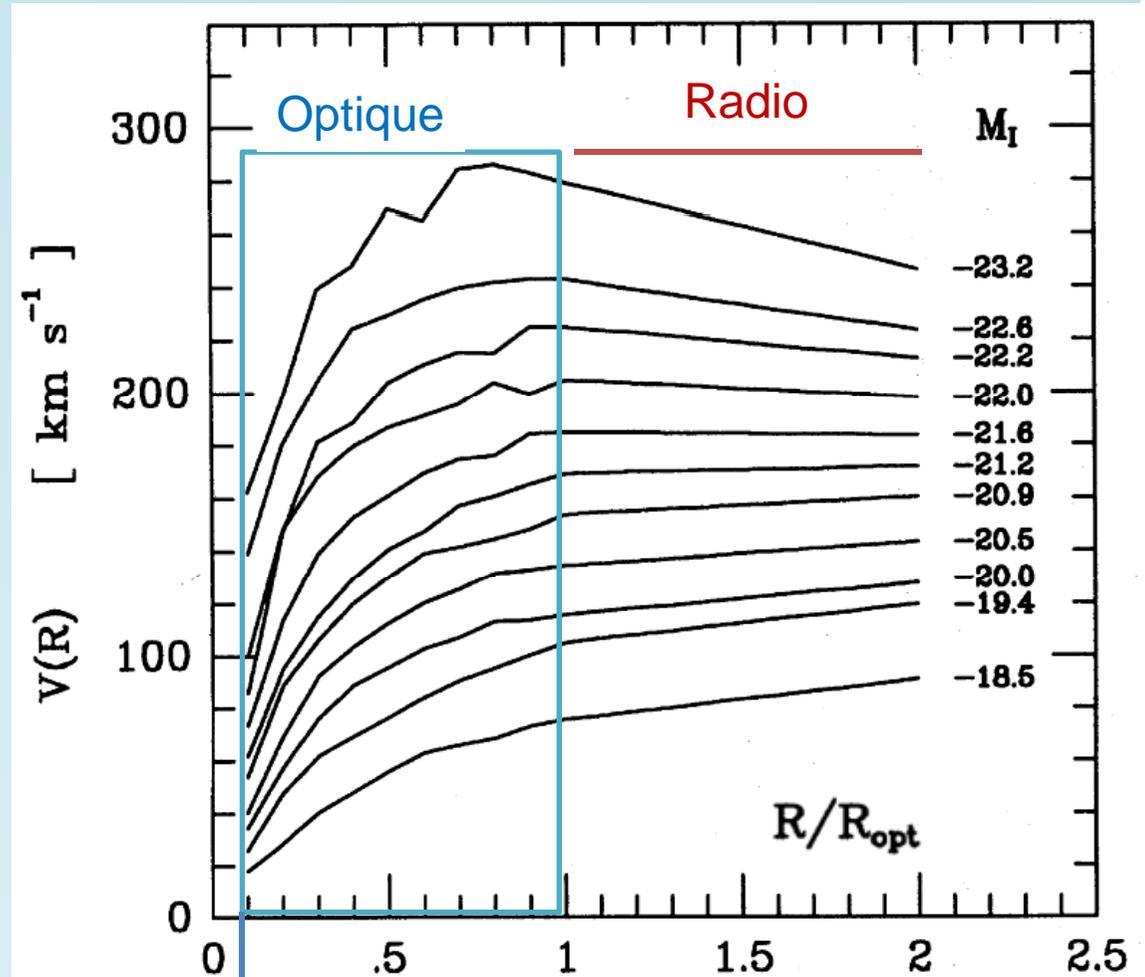
Courbe de rotation universelle

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

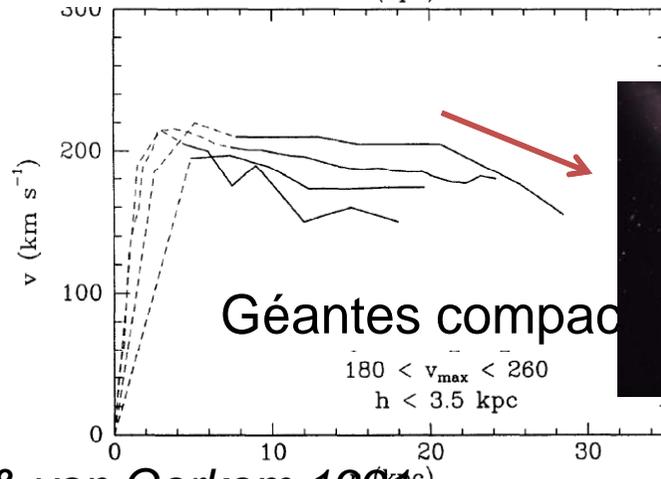
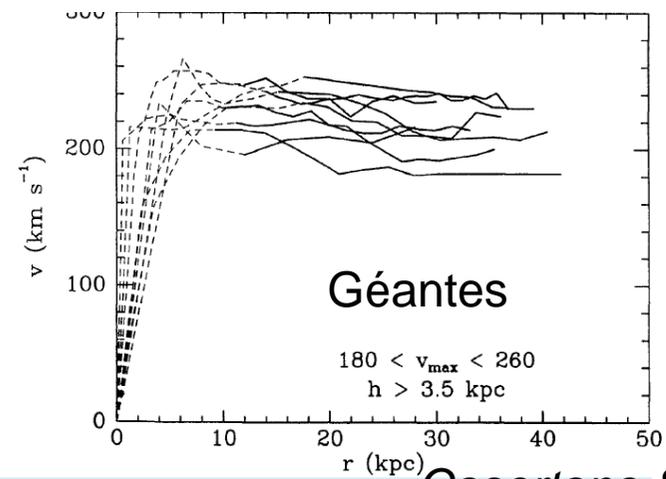
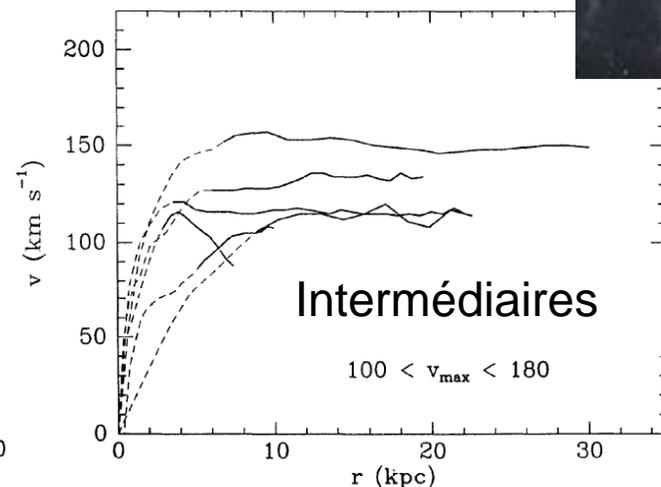
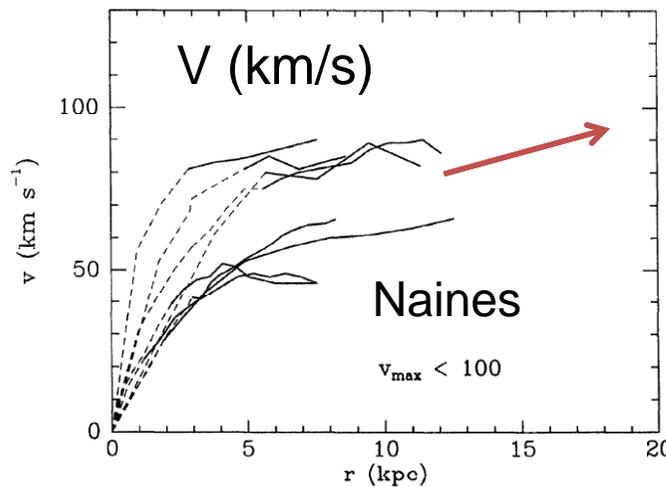
DDO154, naine

Fin de la conspiration

Andromède

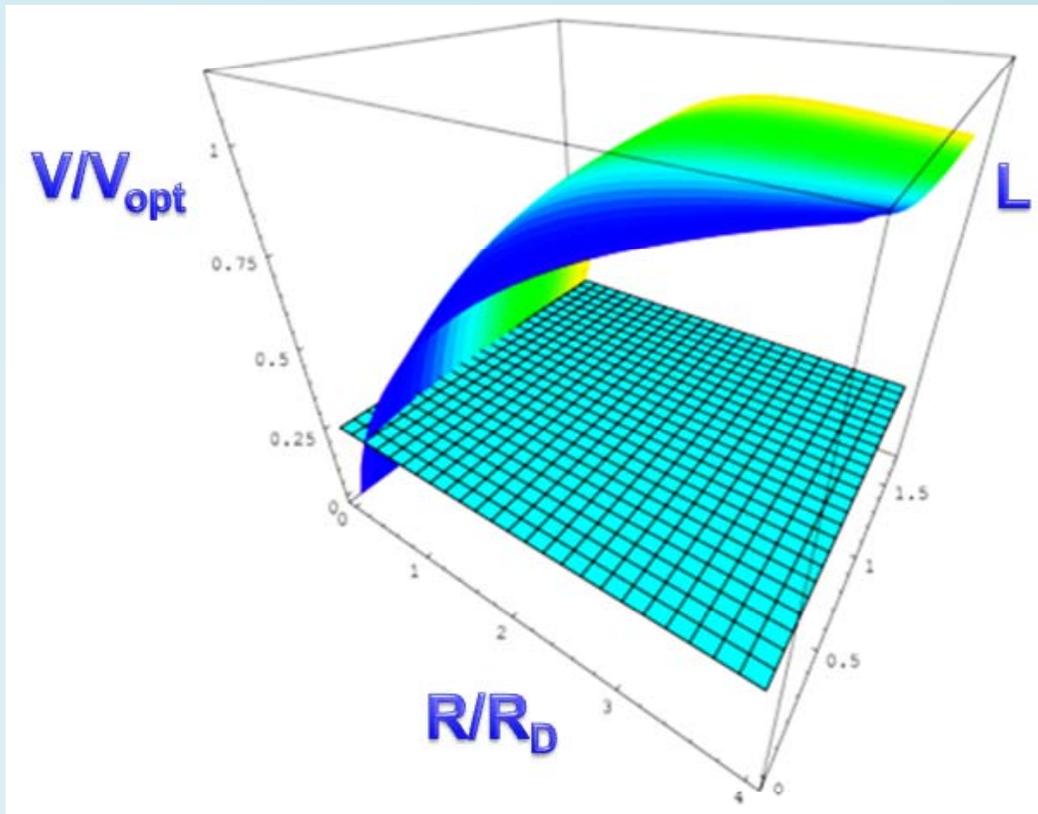
N2403

N2683



Casertano & van Gorkom 1991

Généralisation Espace 3D



La luminosité
détermine la courbe de
rotation

$V(R/R_D, L)$

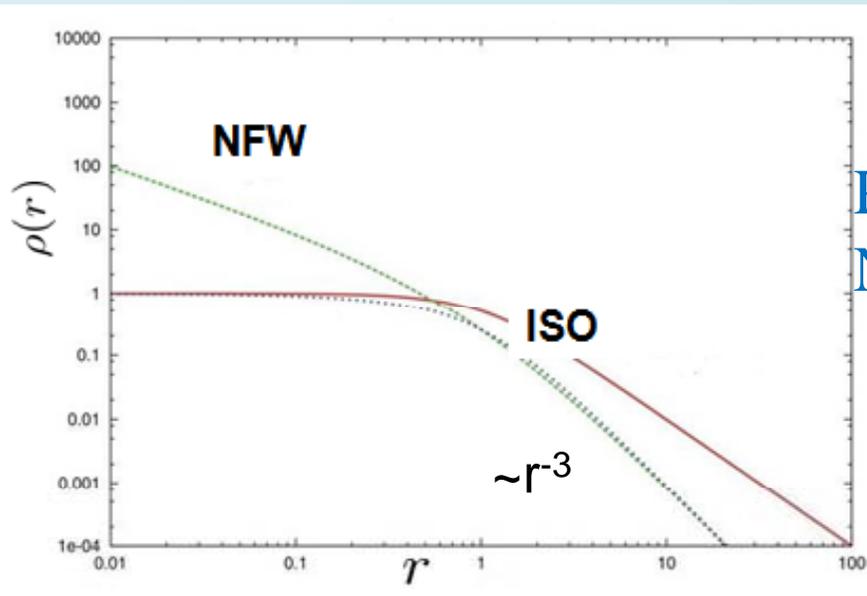
→ Les baryons sont la clef

Salucci et al 2007

Modélisation des courbes de rotation

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

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



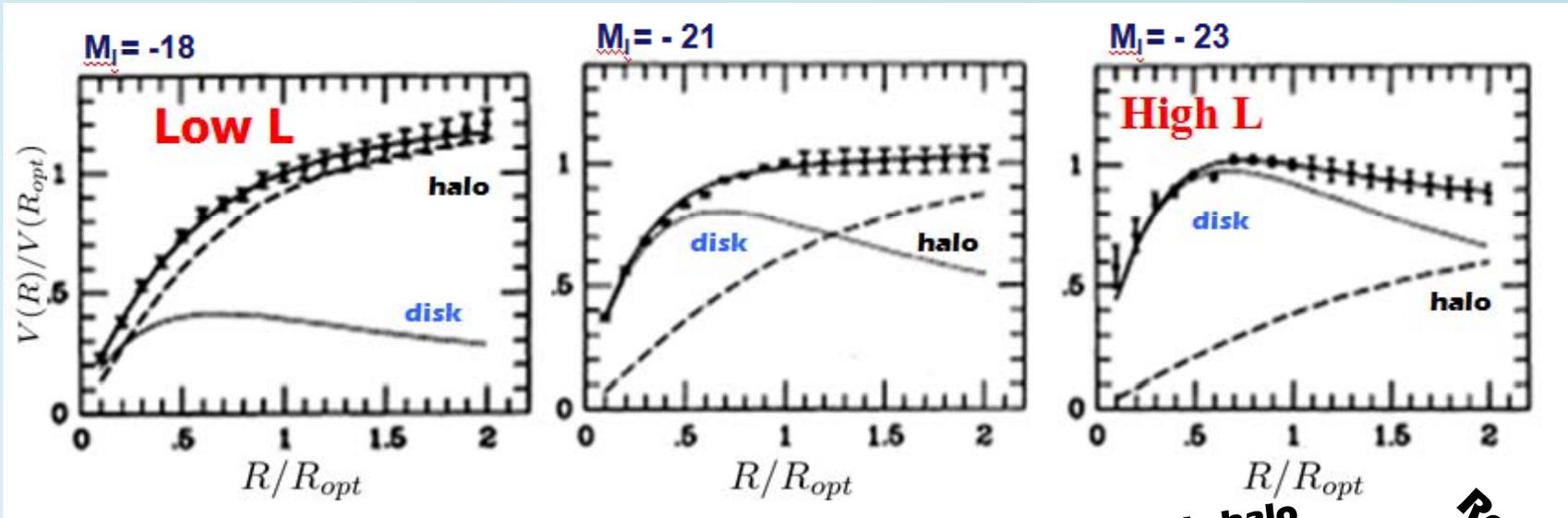
Profil prédit par simulations numériques
Navarro, Frenk & White (1997), NFW

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

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

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

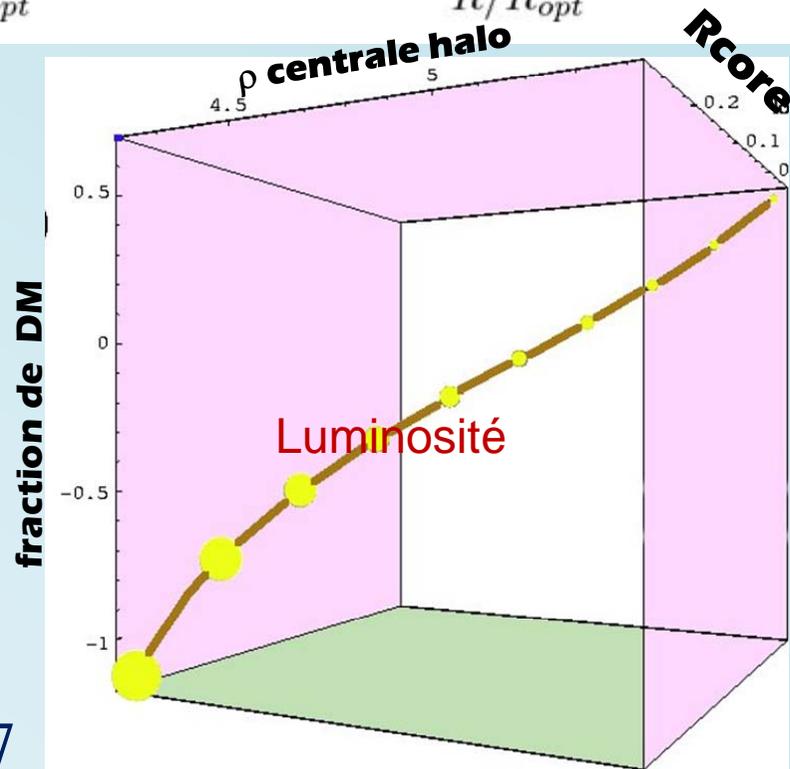
Résultats des modèles



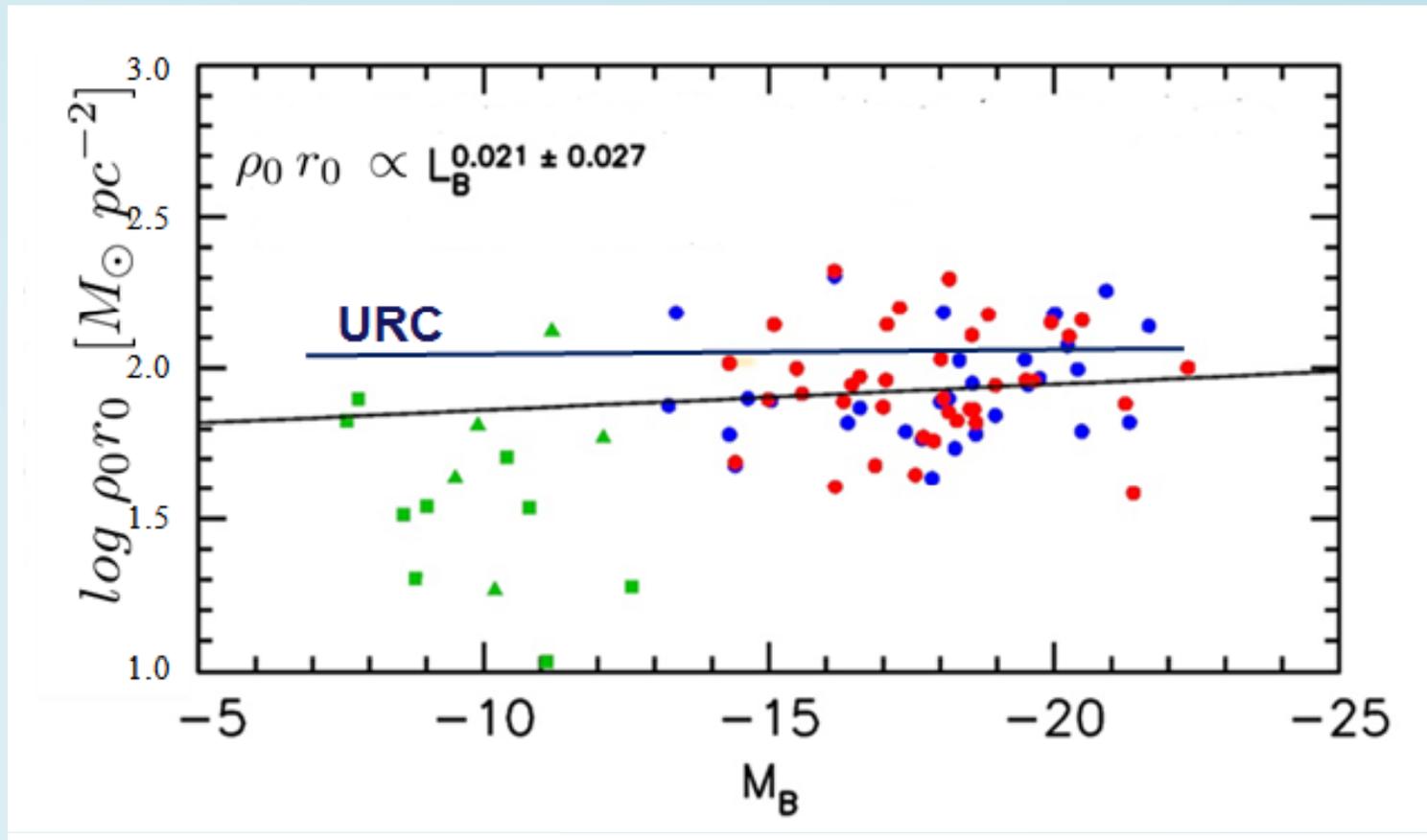
Les courbes sont déterminées par la Luminosité

Les petites galaxies ont plus de matière noire en proportion, avec une densité plus grande

- Persic et al 96, Salucci et al 2007



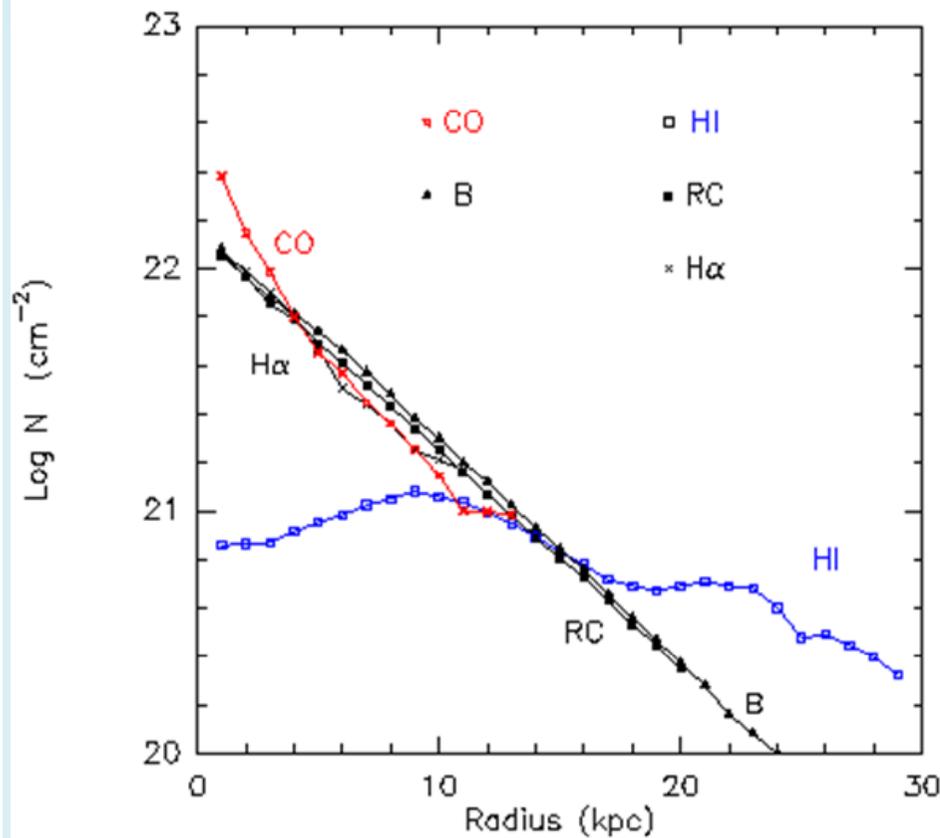
La densité de surface au centre $\rho_0 r_0$ est constante pour le halo des spirales



$$\rho_0 r_0 = 100 M_\odot / \text{pc}^2$$

Kormendy & Freeman (2004)

Distribution radiale des divers composants



Le gaz moléculaire H_2 ne rayonne pas

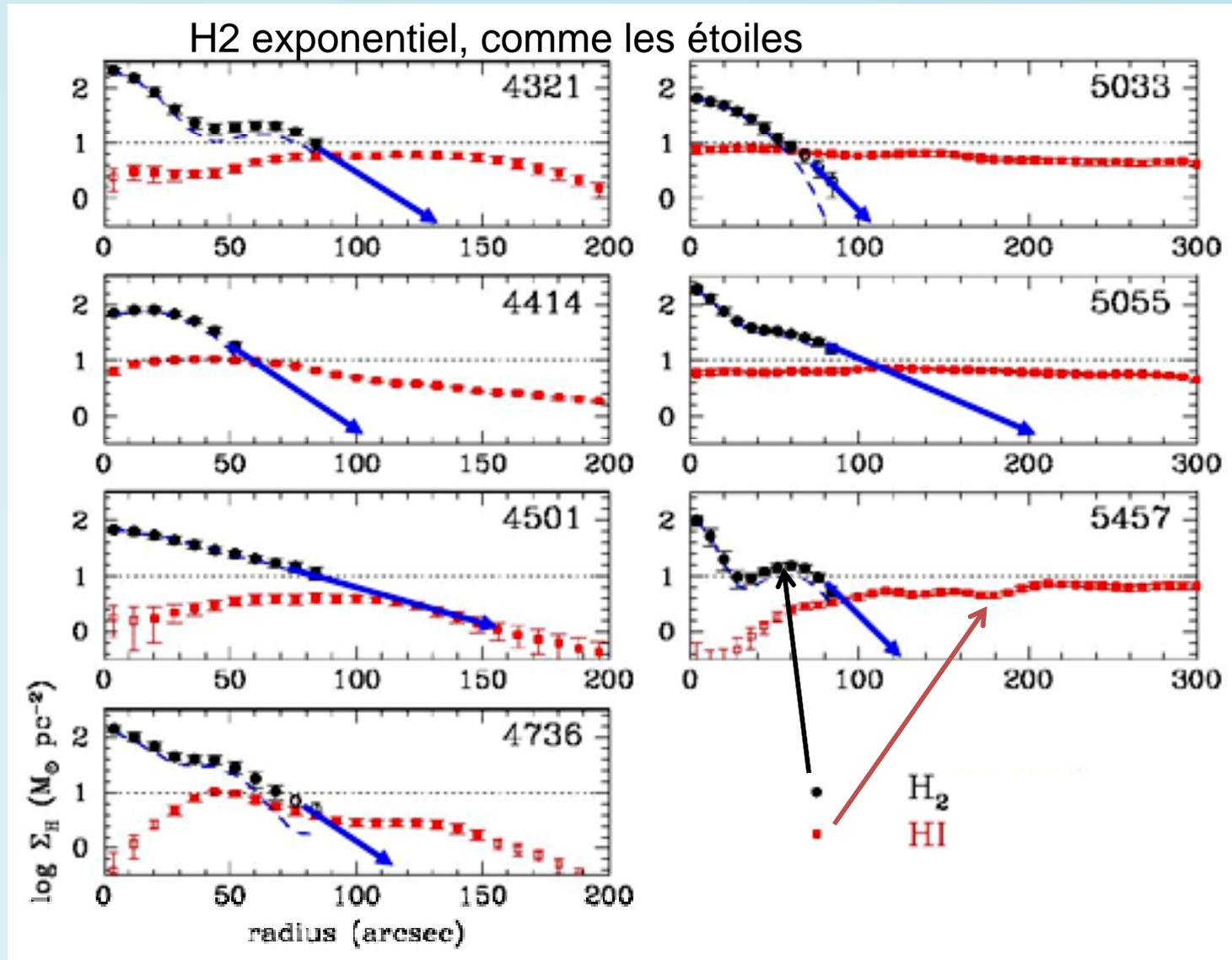
La molécule la plus abondante CO sert de traceur

Sa distribution radiale est exponentielle, comme les étoiles

Le gaz atomique présente une dépression centrale

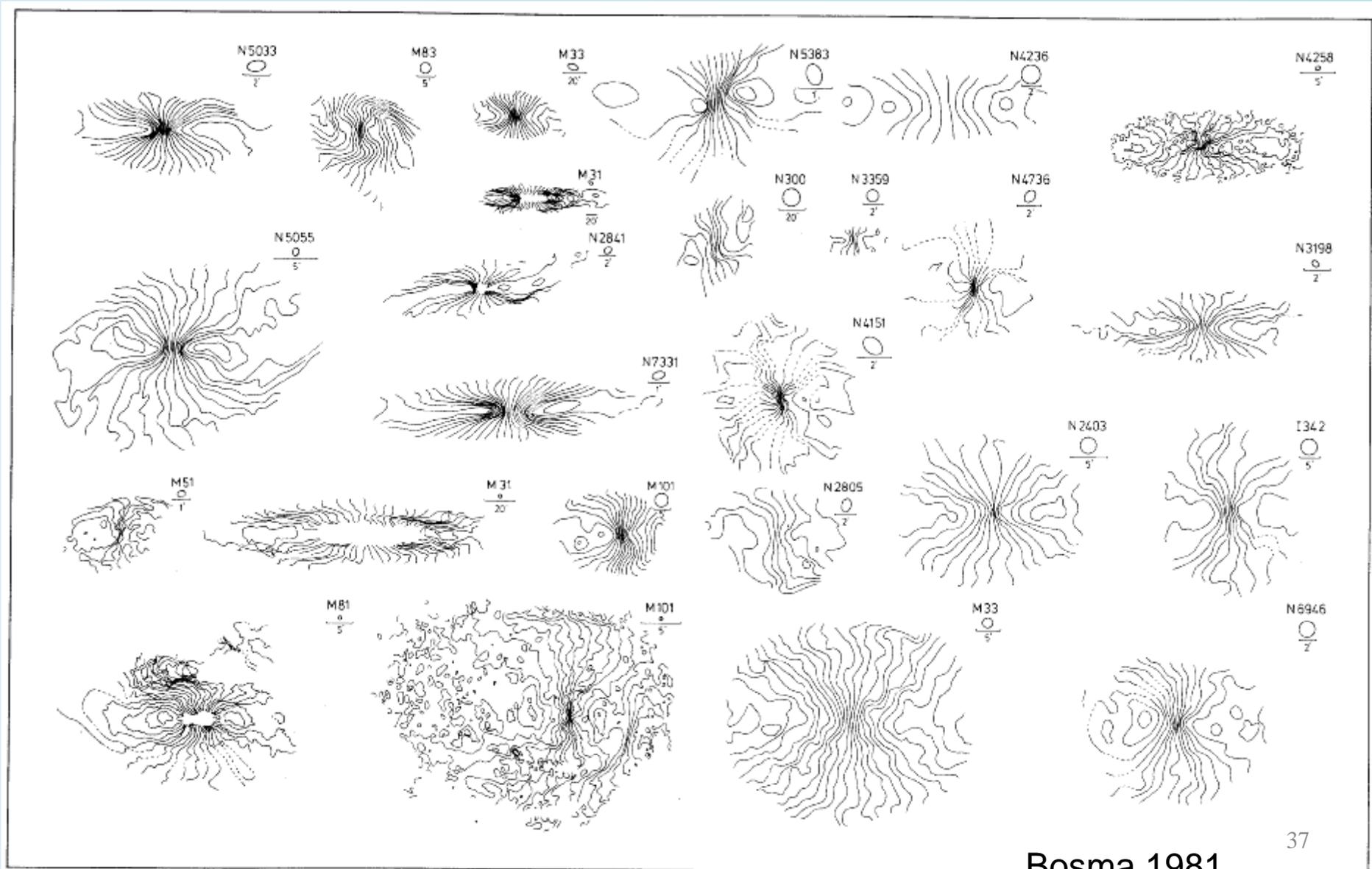
Distribution plus plate ou $1/R$

Distribution du gaz: HI, H₂



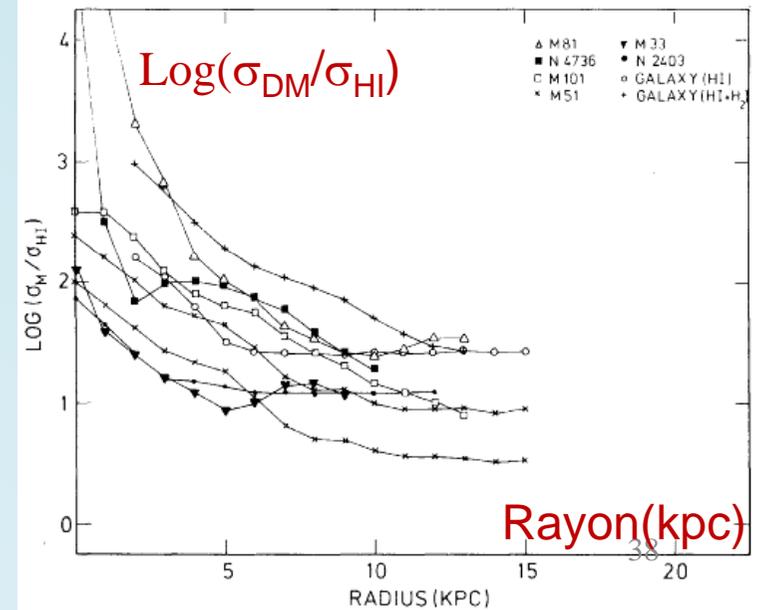
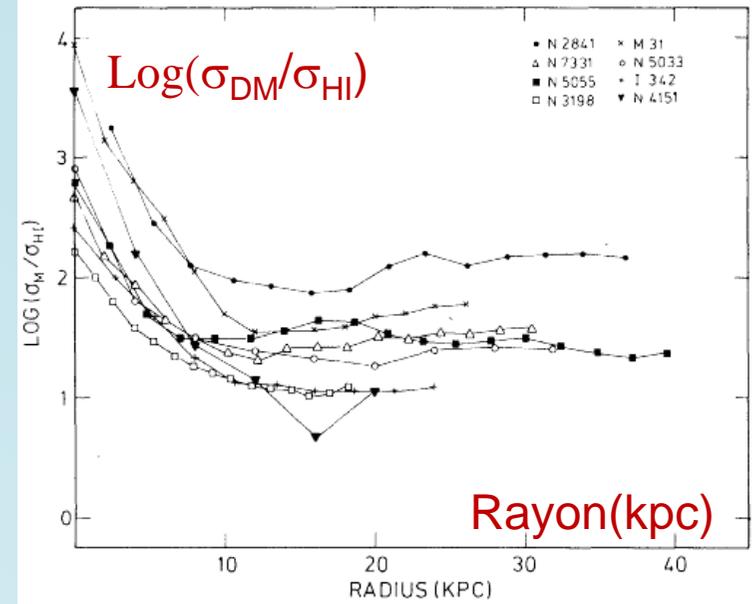
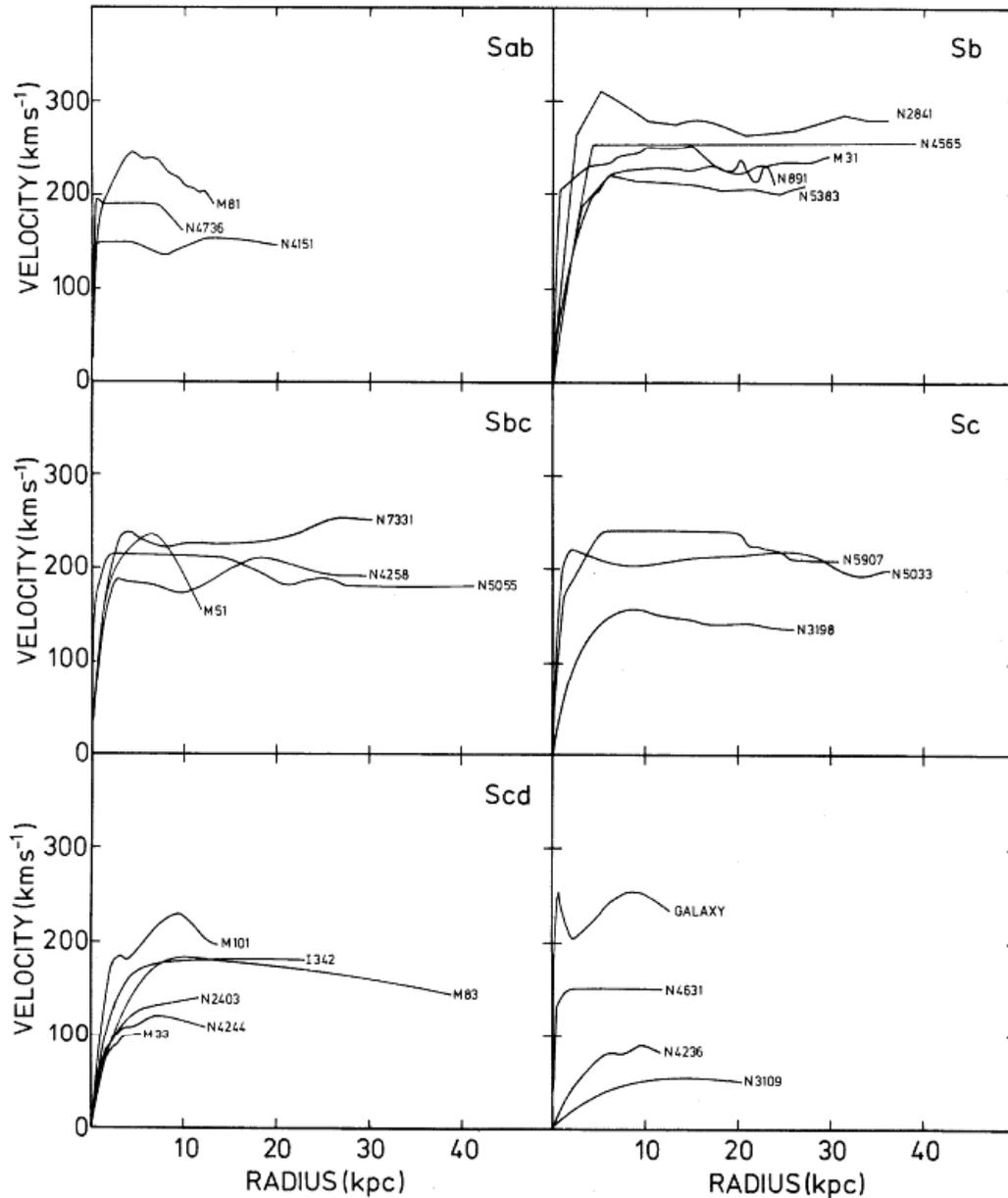
Wong & Blitz (2002)

Courbes de rotation HI-21cm

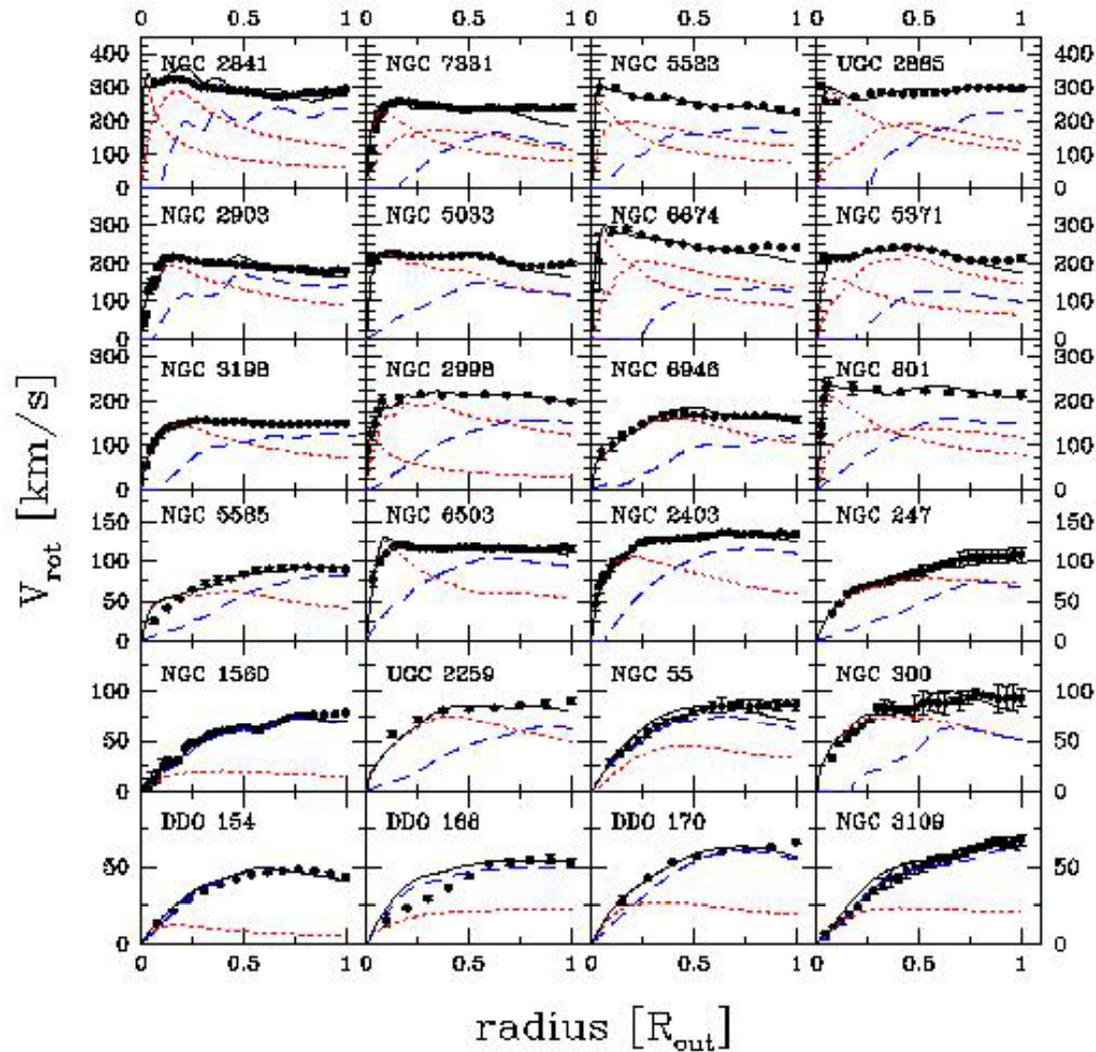


Rapport des densités de surface

Bosma 1981



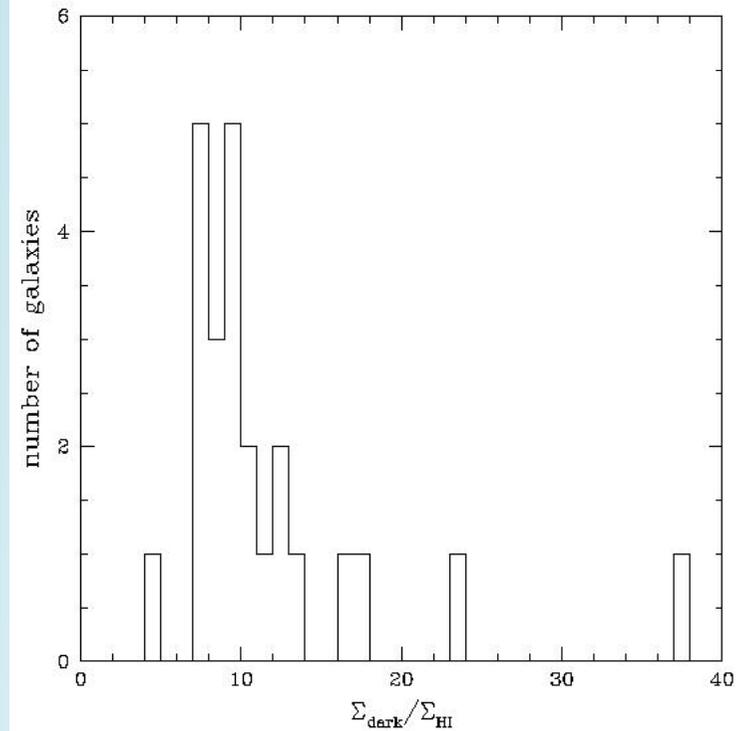
Hoekstra et al (2001)



Rapport des densités
de surface

$$\sigma_{\text{DM}}/\sigma_{\text{HI}}$$

En moyenne ~ 10



La MN et le gaz atomique HI ont la même distribution

Relation de Tully-Fisher

Relation entre vitesse maximum
et luminosité

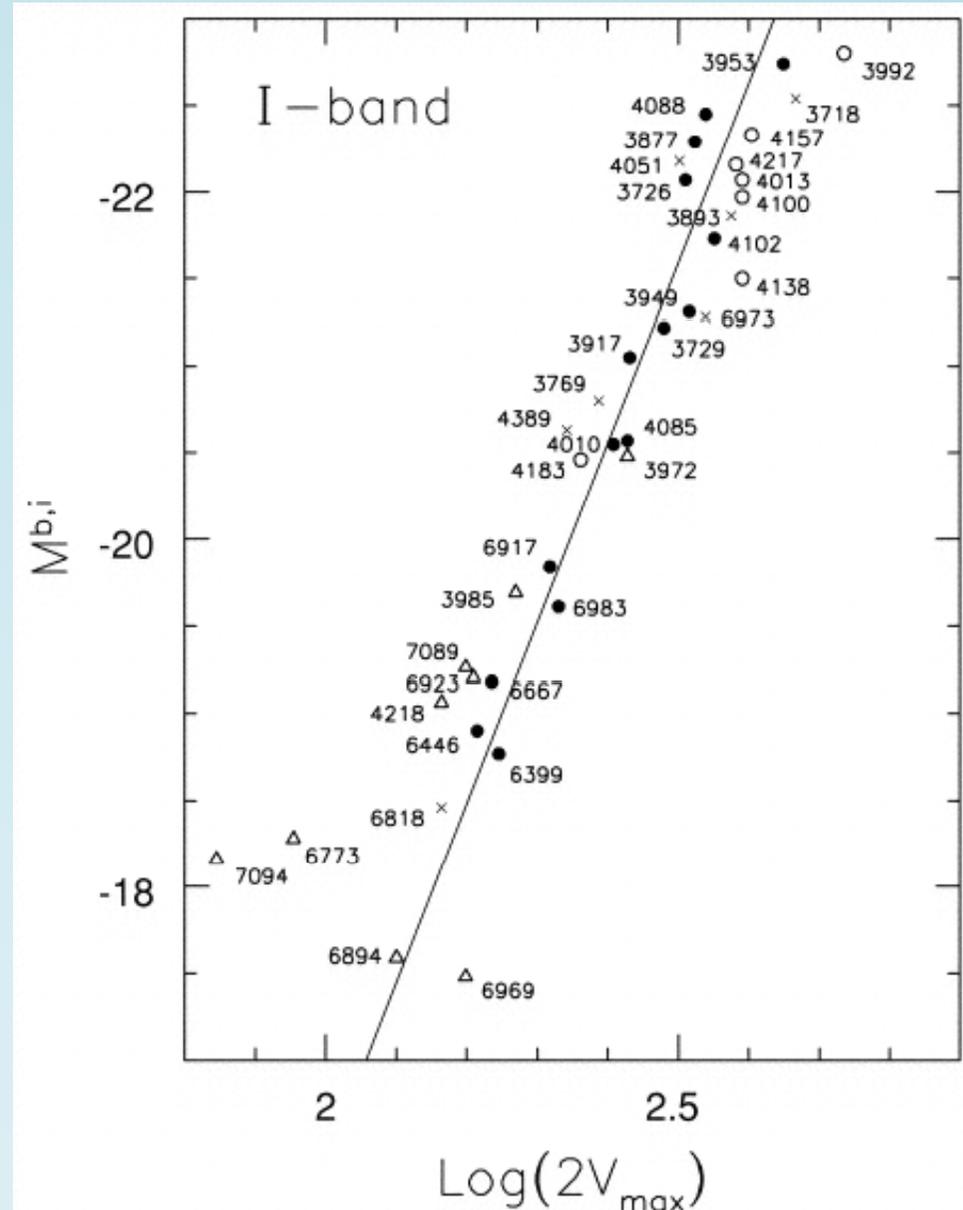
DV corrigé de l'inclinaison

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

Corrélation avec V_{flat}

Meilleure que V_{max}

Verheijen 2001

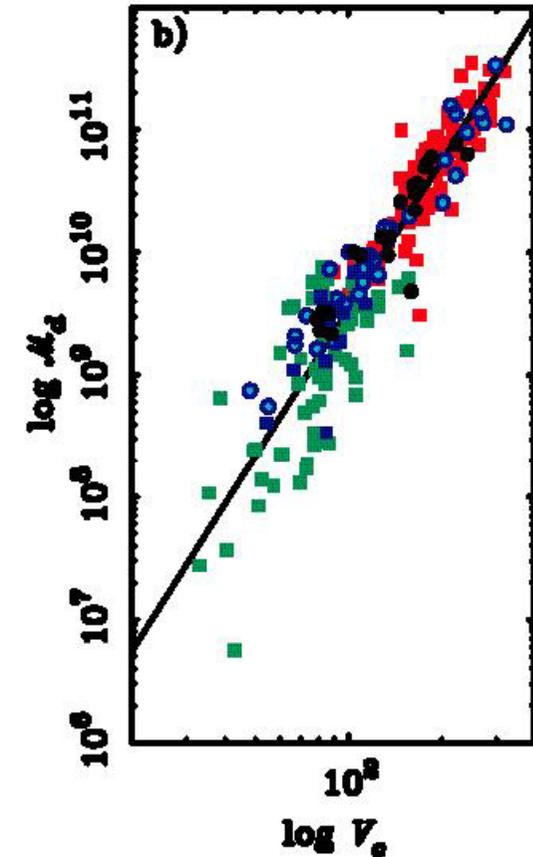
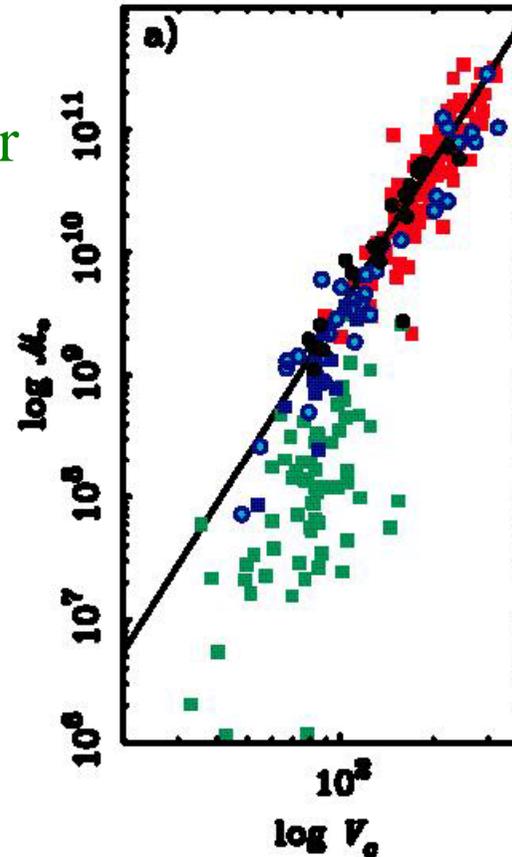


La relation de Tully-Fisher pour les galaxies naines comprenant plus de gaz que d'étoiles

→ prendre en compte la masse du gaz

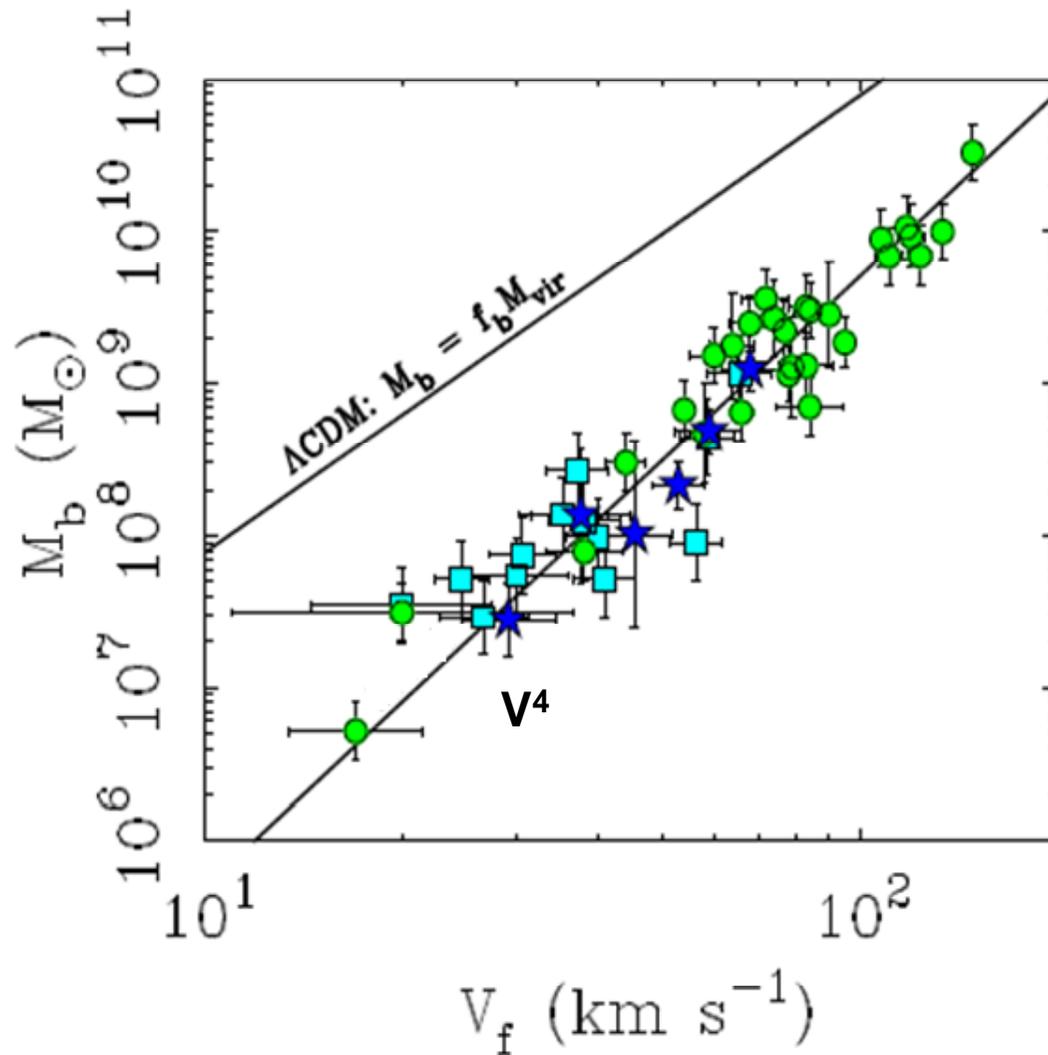
Relation M_{baryons} avec V Rotation

$$M_b \sim V_c^4$$



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

Tully-Fisher baryonique



f_b fraction universelle
de baryons = 17%

CDM: Cold Dark Matter

Λ énergie noire

Relation Tully-Fisher

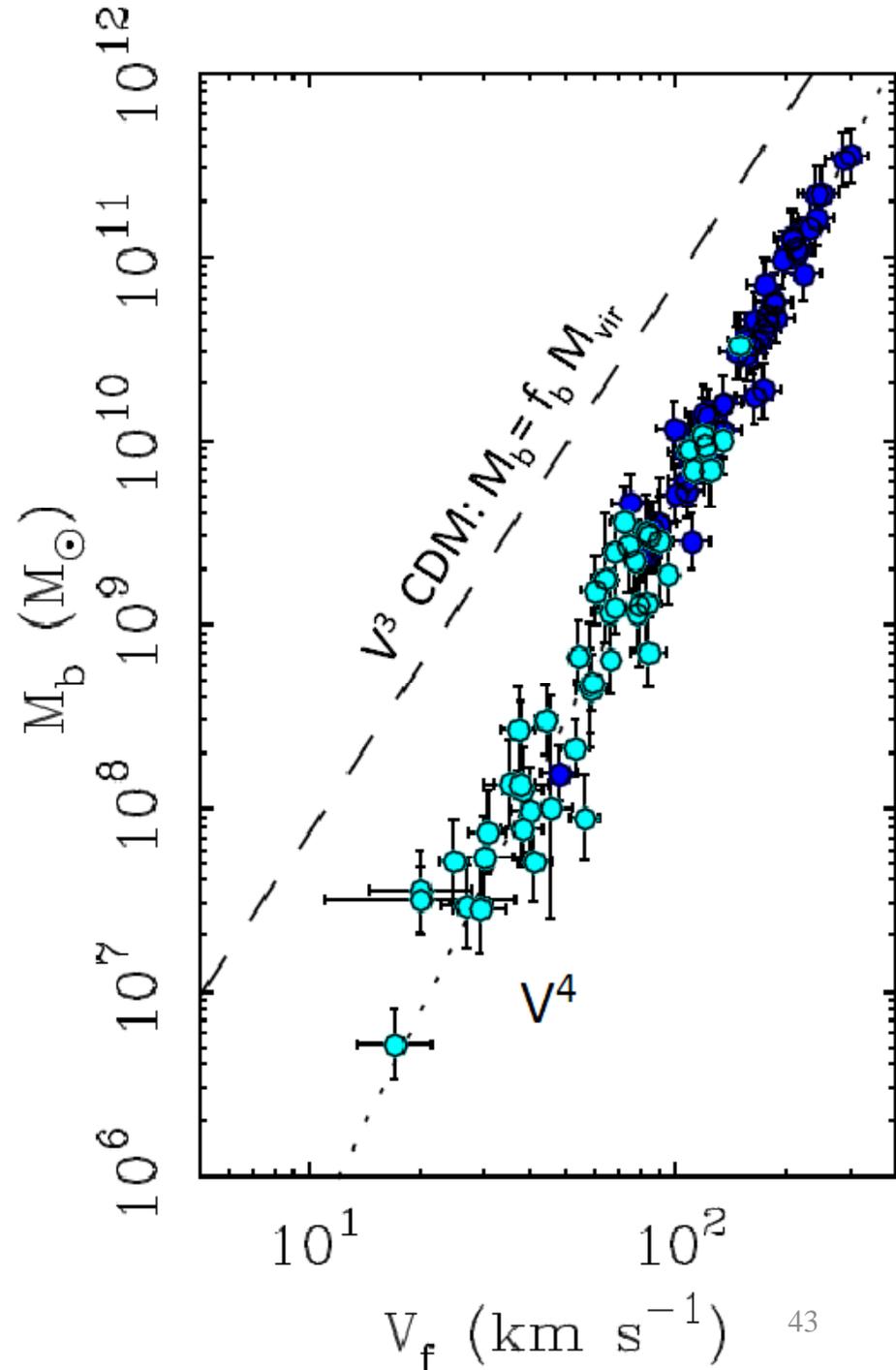
La prédiction du modèle
Standard CDM a une pente

$$M_b \sim V_c^3$$

De plus, il y a trop de baryons
dans les galaxies

Surtout pour les faibles masses
d'un facteur 10-100

Famaey & McGaugh 2012



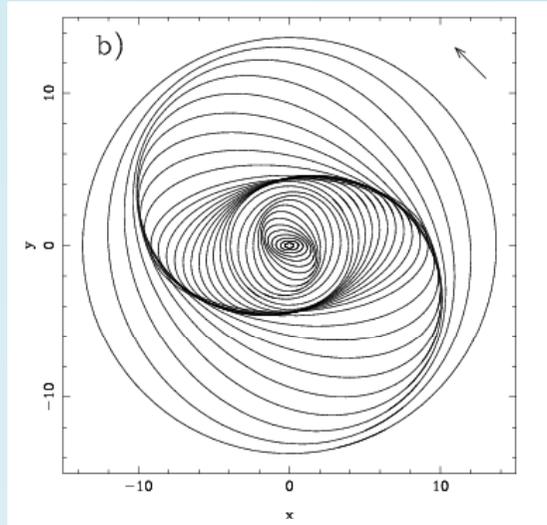
Déformations du champ de vitesses

- **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
- Epaissement des plans: généralisation des galaxies vues par la tranche

→ Problème pour les cuspidés/cœur

→ Problème pour la masse totale

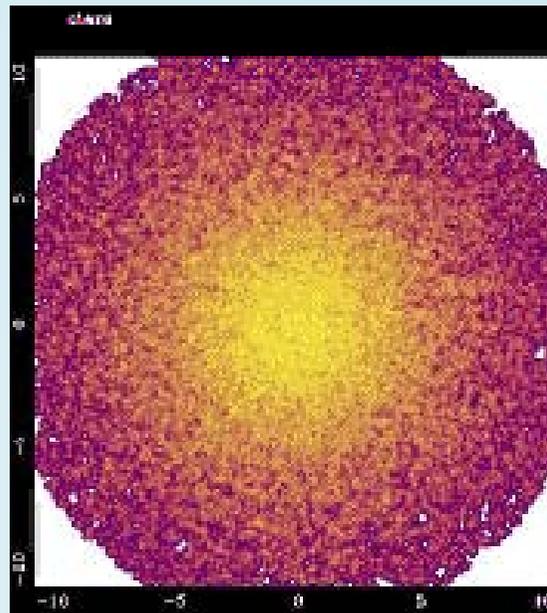
Orbites non-circulaires: barres



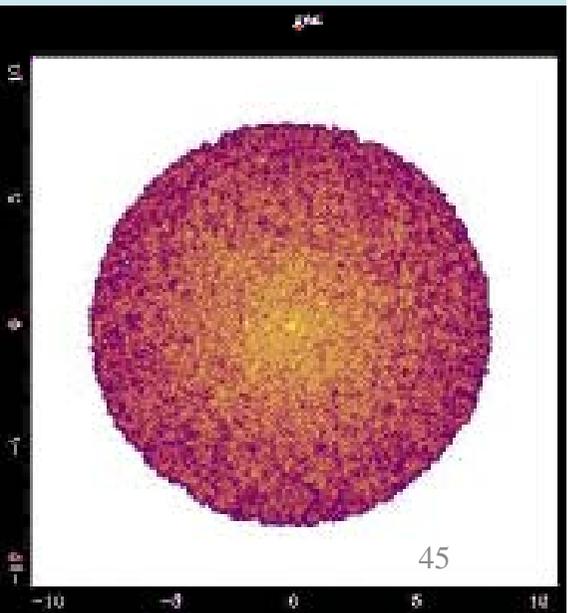
Les écarts à la circularité deviennent cohérents grâce à une onde spirale ou barrée

Les galaxies spirales sont instables et forment des barres

Etoiles



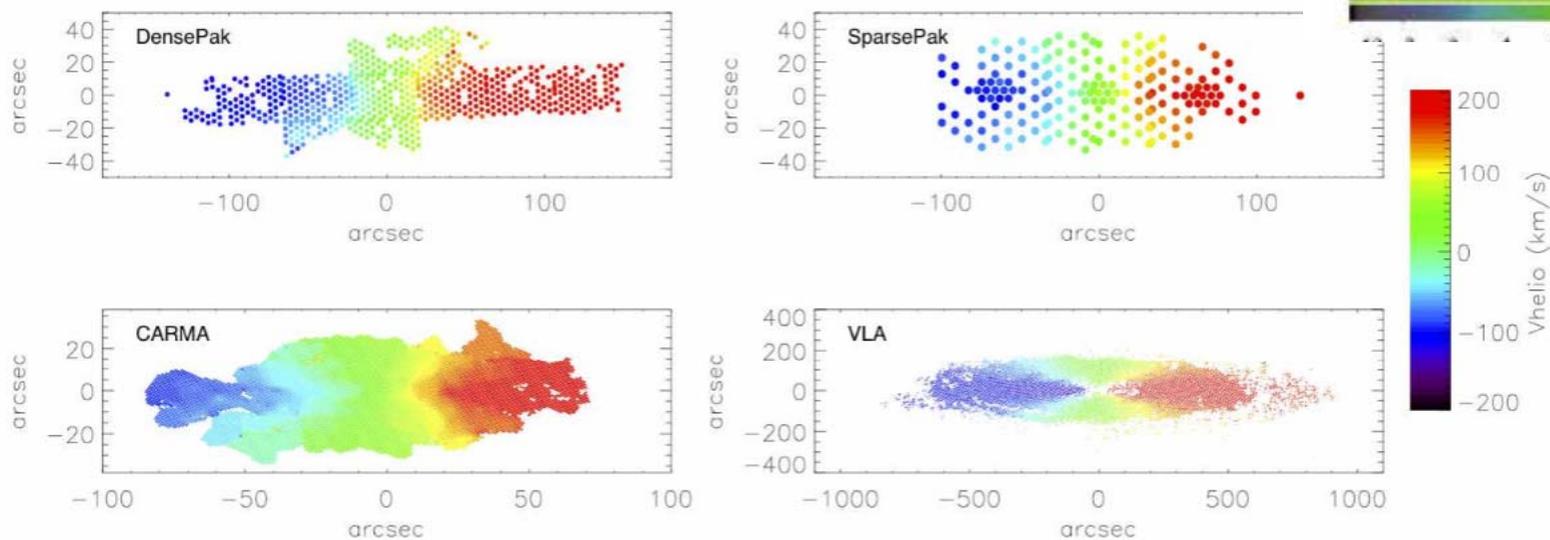
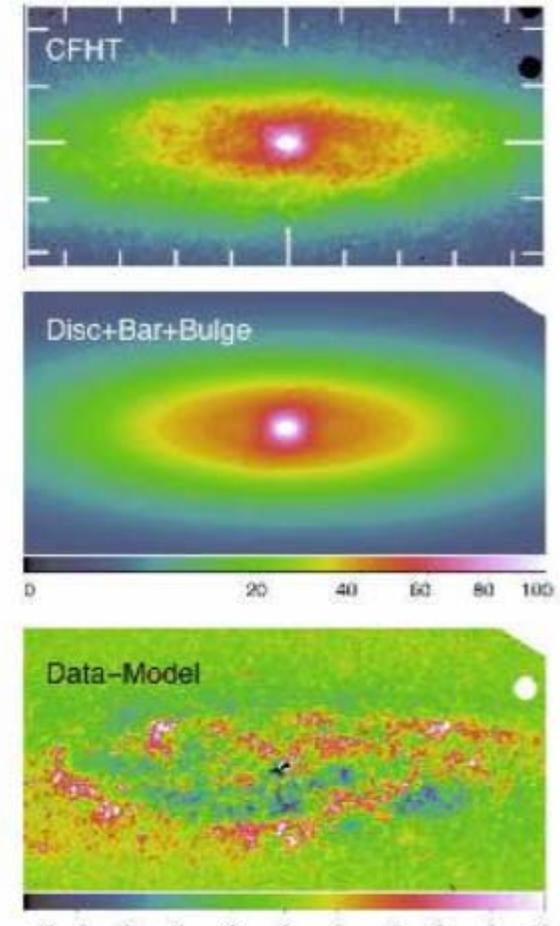
Gaz



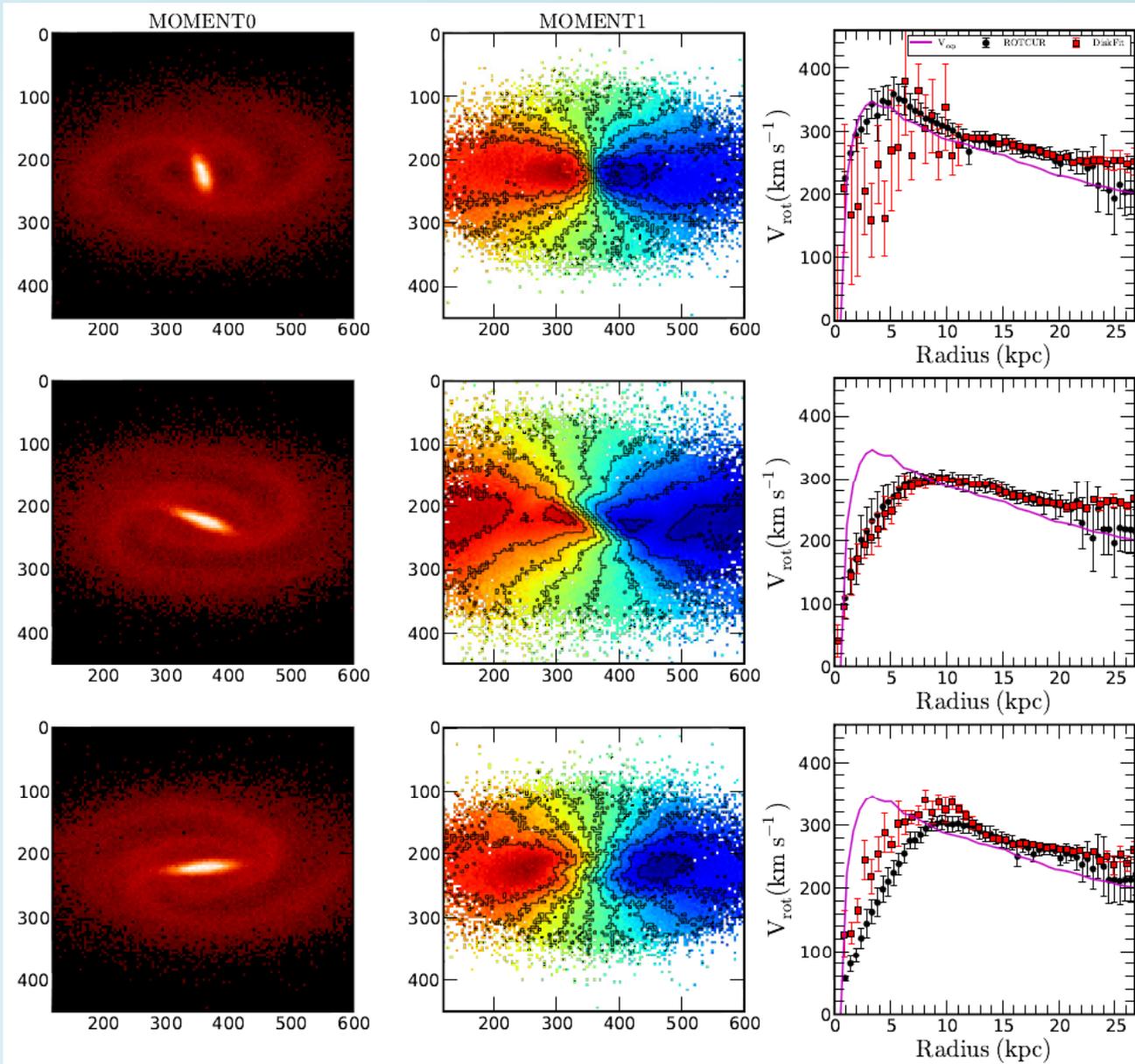
Correction des orbites allongées



N6503, Kuzio de Naray et al 2012



Courbes de rotation de galaxies barrées

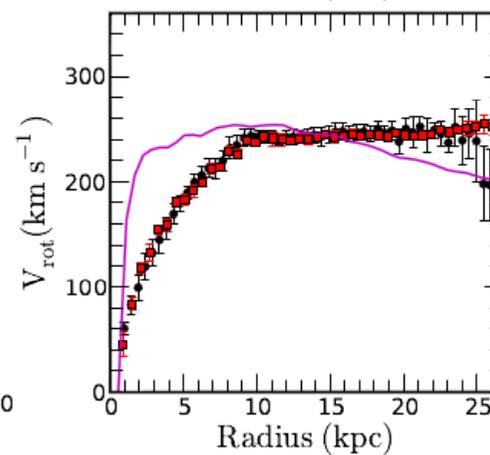
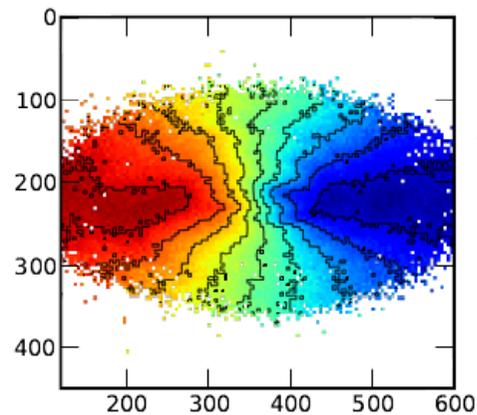
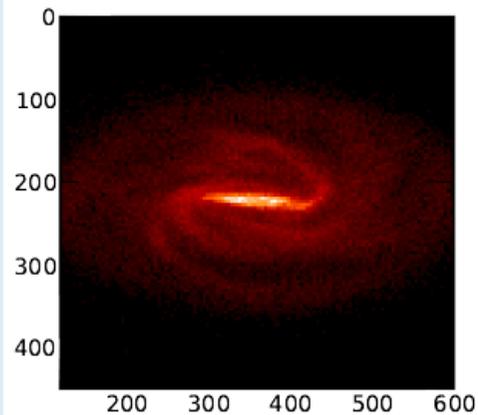
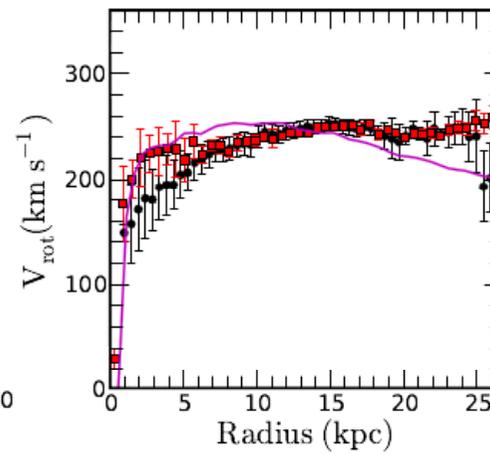
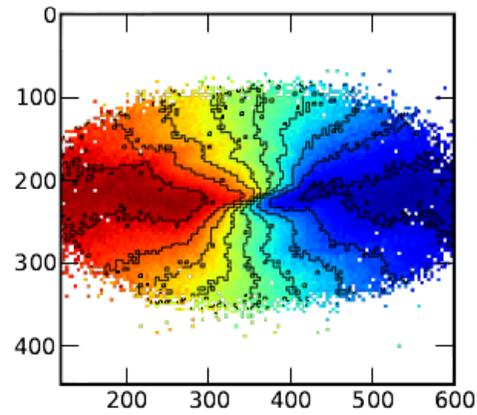
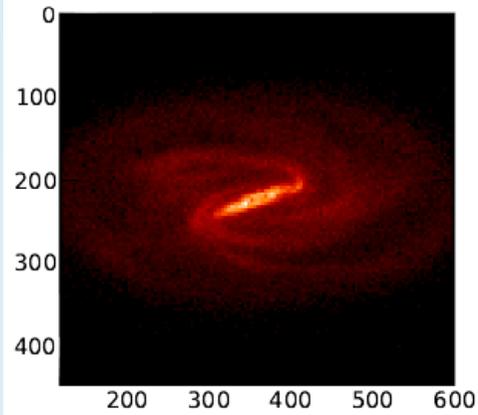
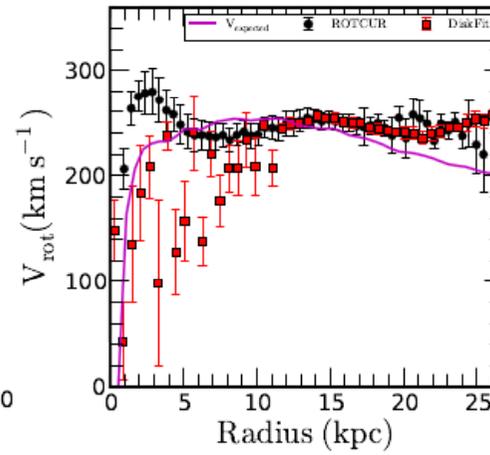
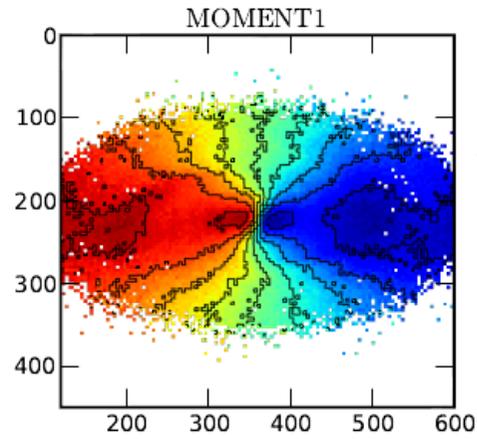
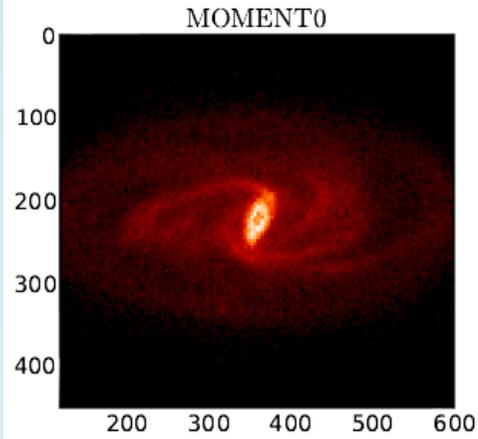


gSa (halo ISO)
Barre: perpendiculaire

Barre: intermédiaire

Rotcur: points noirs
Diskfit: rouges

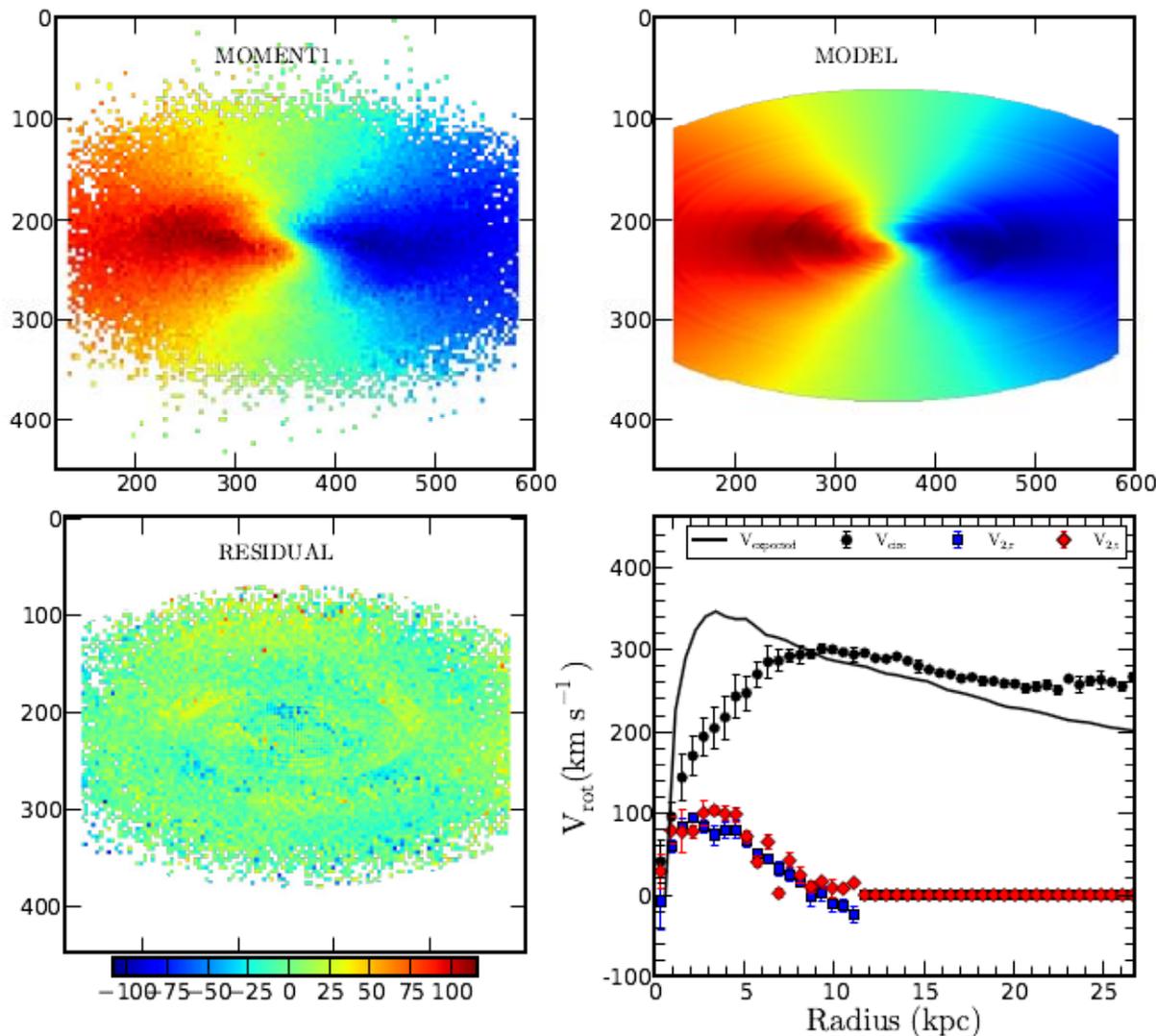
Barre: parallèle au
grand axe



gSb

Rotcur
Modélisation
d'orbites
circulaires
PA, incl
variables

Pourquoi DiskFit ne corrige pas?

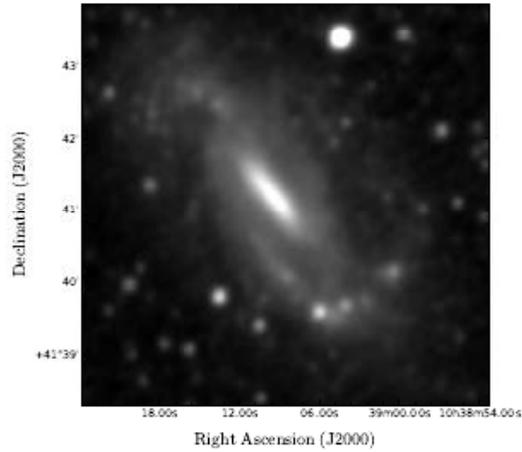


Le logiciel modélise une barre, quand elle est bien visible dans les vitesses

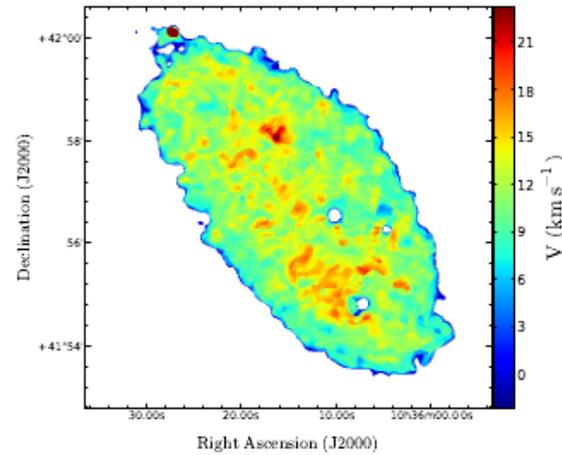
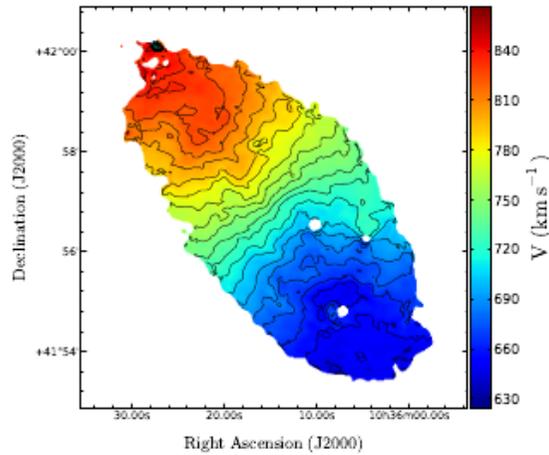
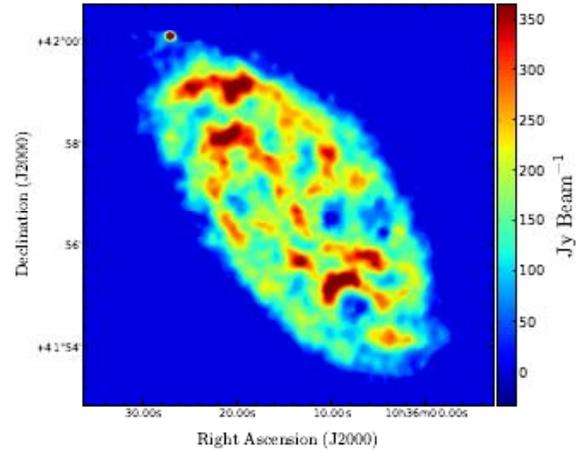
Ne peut pas lorsque la barre est parallèle aux axes de symétrie

Calculs sur un cas concret: NGC 3319

Wise 3.4 μ m



HI-21cm



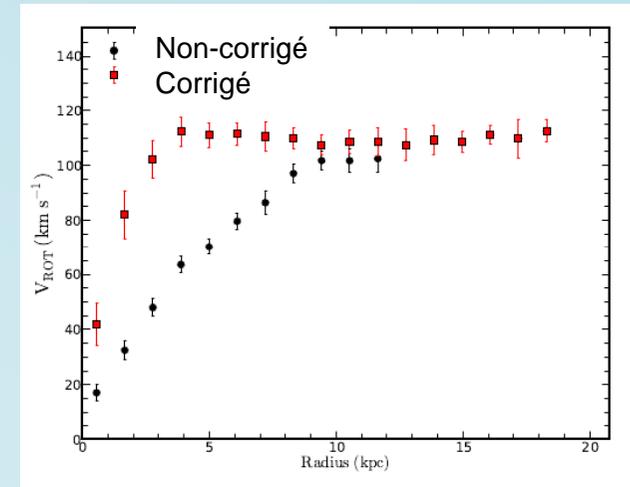
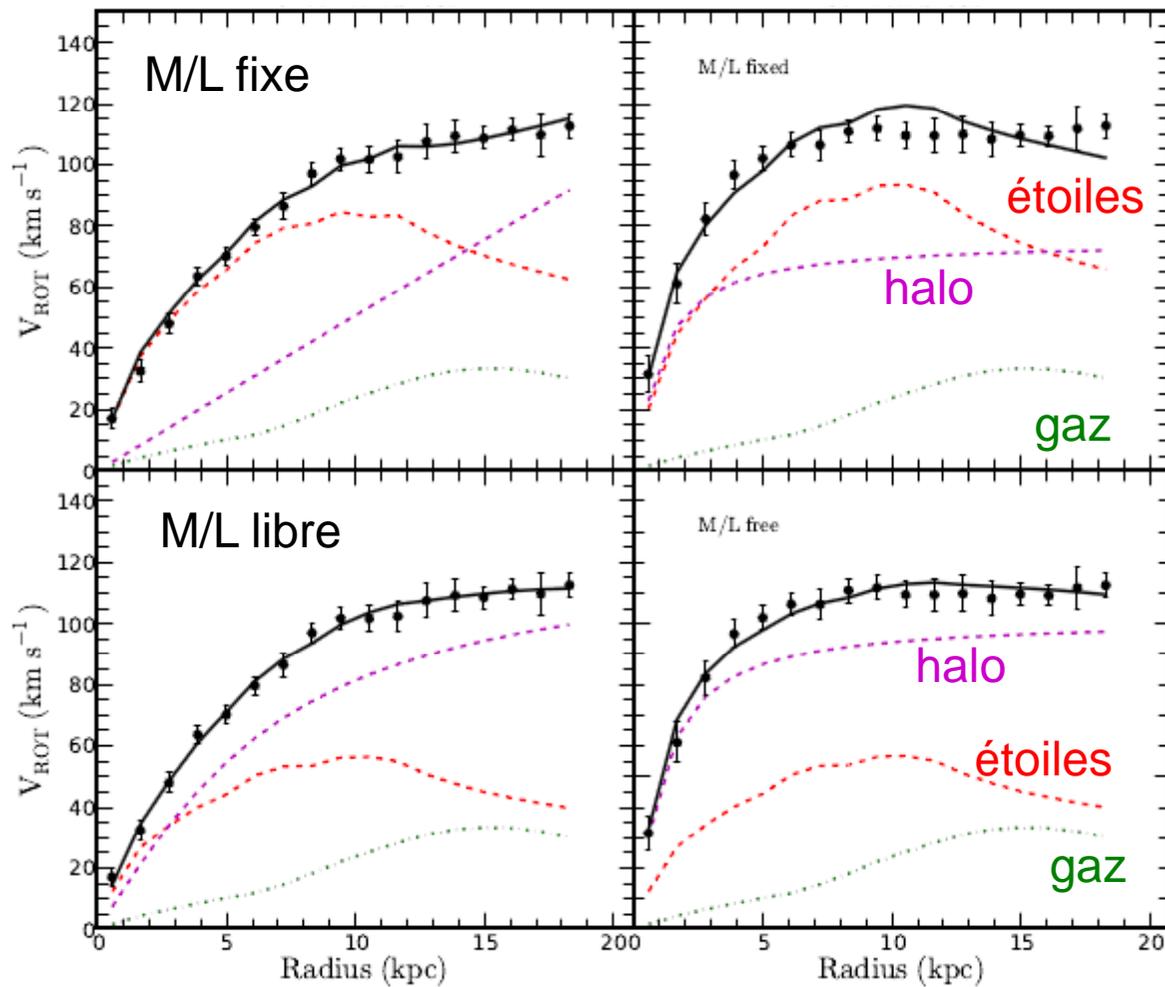
Vitesse HI

Dispersion HI

Différents modèles de NGC 3319

Vitesses brutes

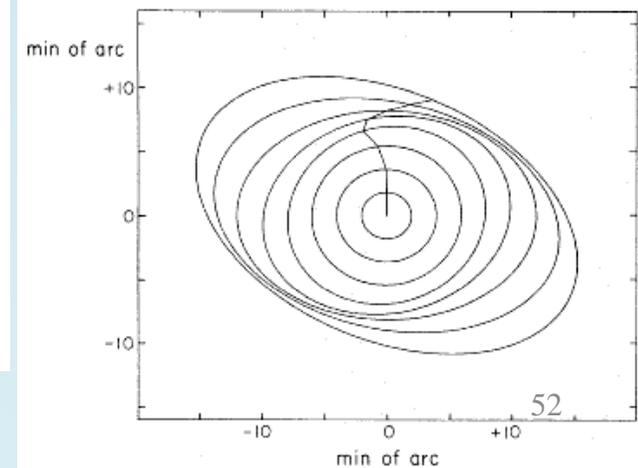
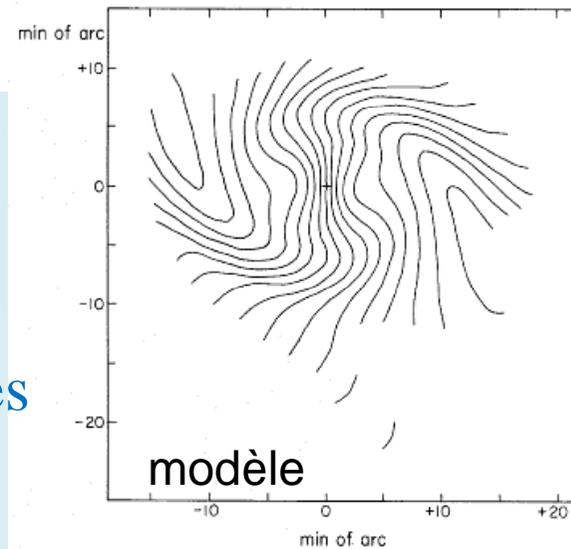
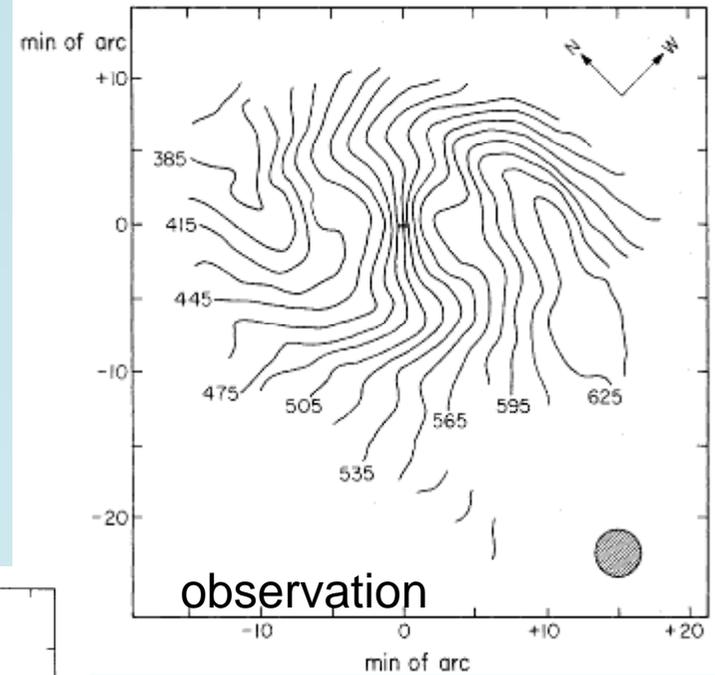
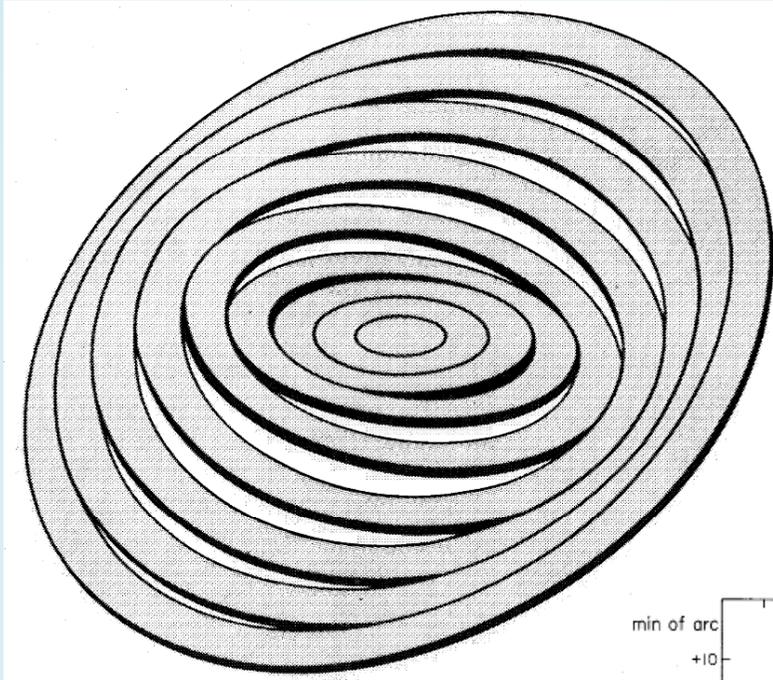
Vitesses corrigées de la barre



Les perturbations dues à la barre sont significatives

Randriamampandry et al 2014

Warp: plans gauchis

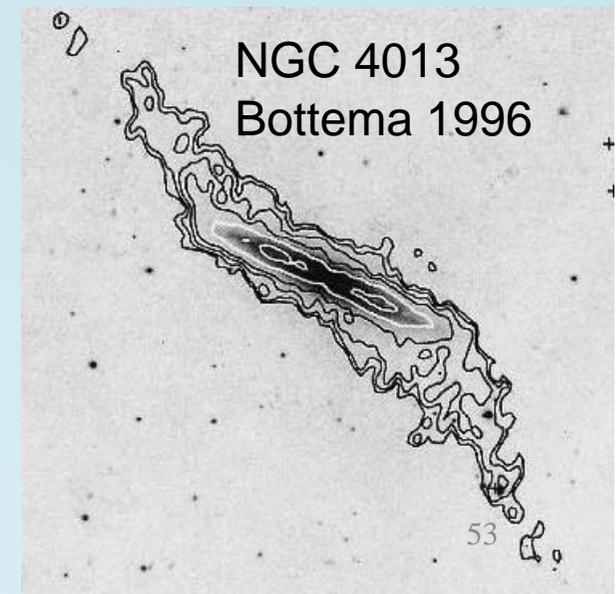
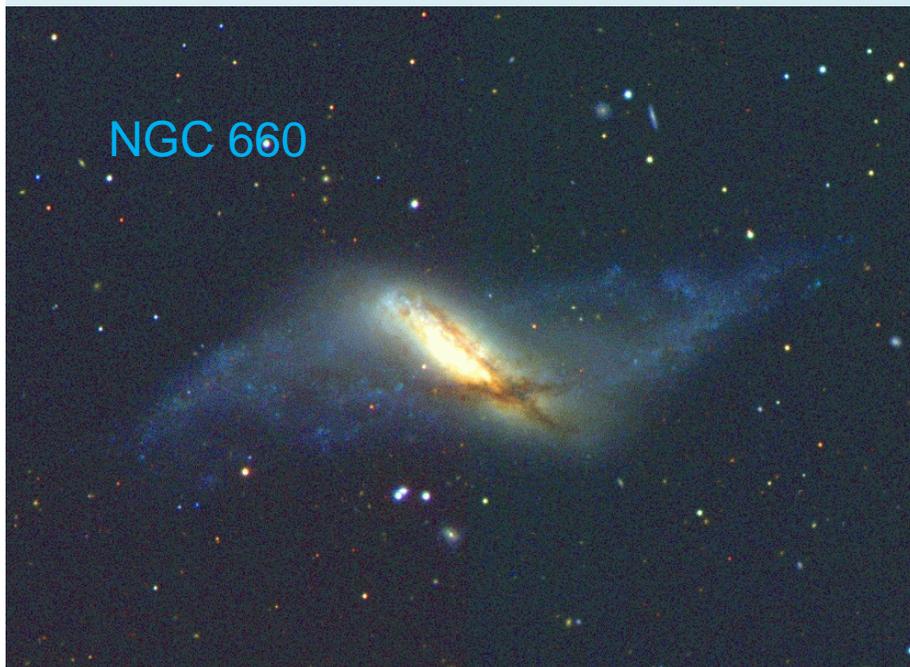
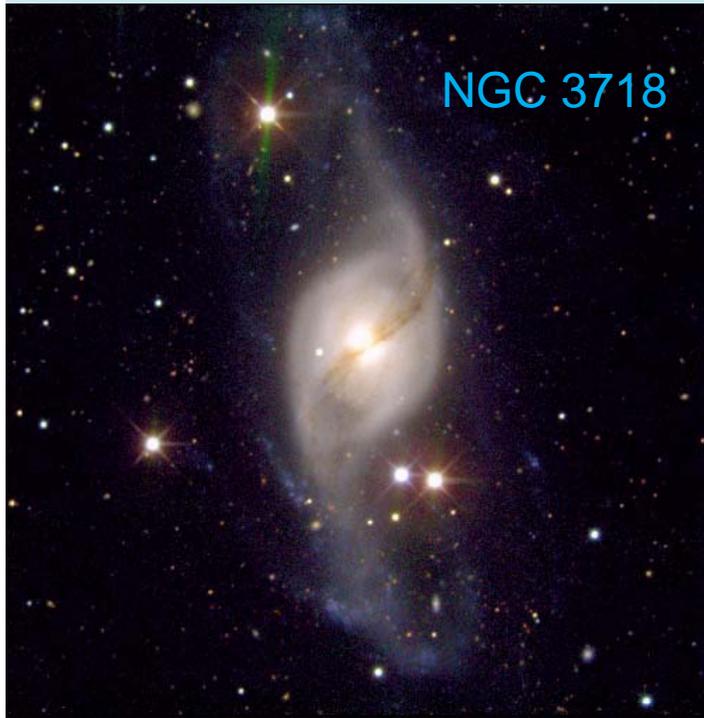


Modèle des anneaux
Inclinés, PA, i variables
Rogstad et al 1974

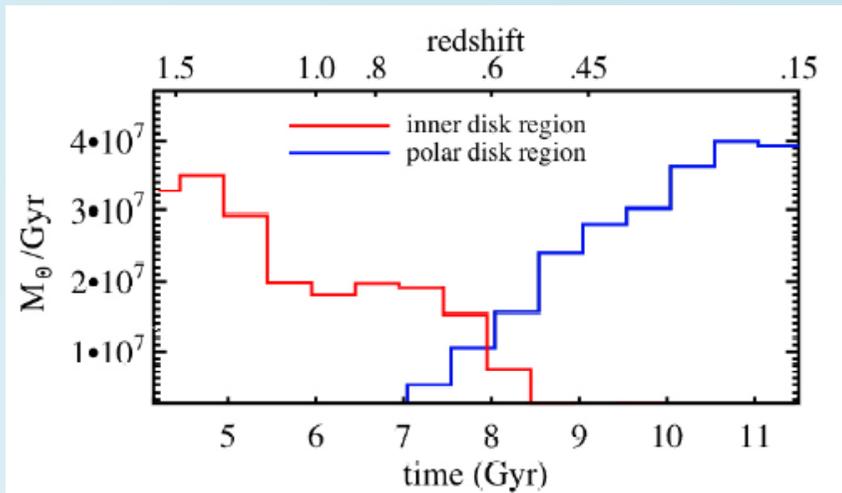
Orbites inclinées, non circulaires

Calcul plus difficile, lorsque la déformation est importante

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

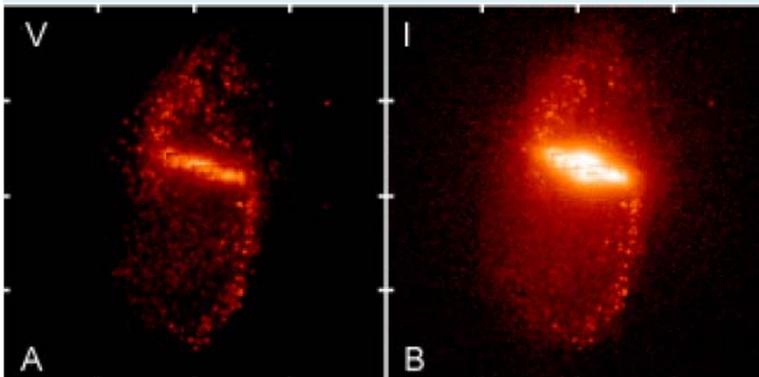
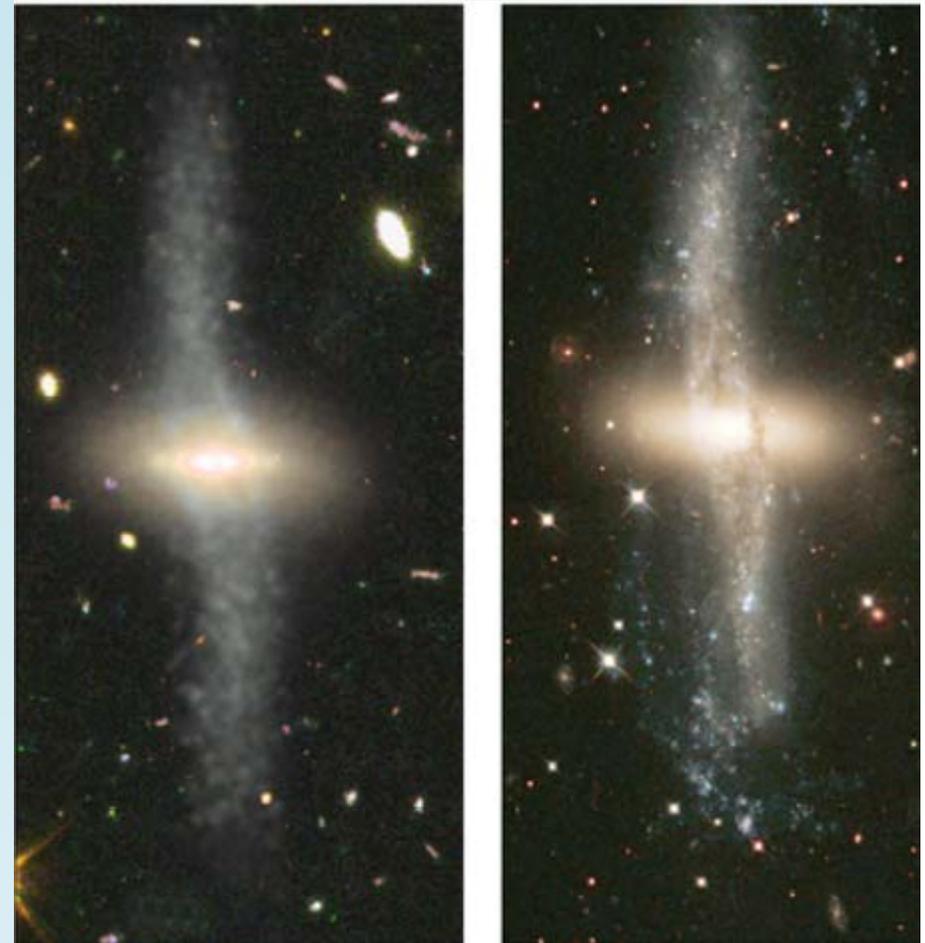


Galaxies avec anneau polaire



→ 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 accréation



Conclusion: Matière noire et spirales

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 essentiellement des baryons
- **courbe universelle $V(r/rd, L)$, disque maximum**
- Relation de Tully-Fisher
- couplage MN-baryons, $\sigma_{DM}/\sigma_{HI} \sim 10$
- **Déformations:** barres pour les parties internes,
Warps pour les parties externes