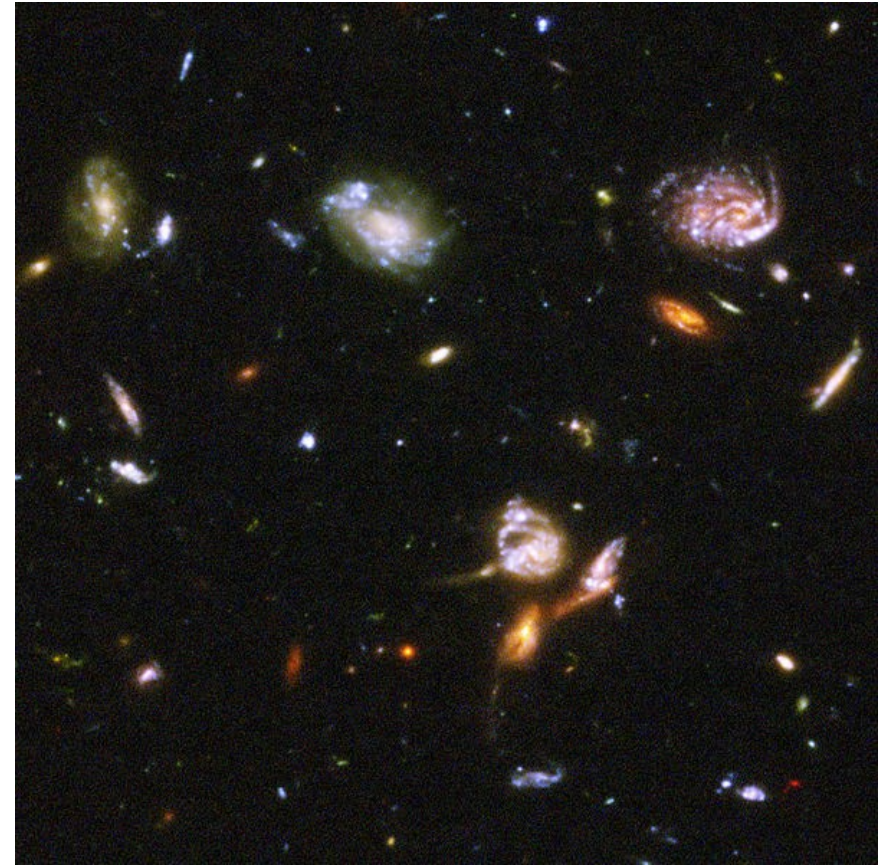


# Dynamique des galaxies et matière noire



Hubble ultra deep field  
200" x 200"  
Lune : ~ 2000"

# Plan

- 1) Historique de la découverte de la matière sombre
- 2) Dynamique : fondements théoriques
- 3) Aspects observationnels : comment étudier la matière sombre dans les galaxies ?
- 4) Etudes dynamiques actuelles et futures

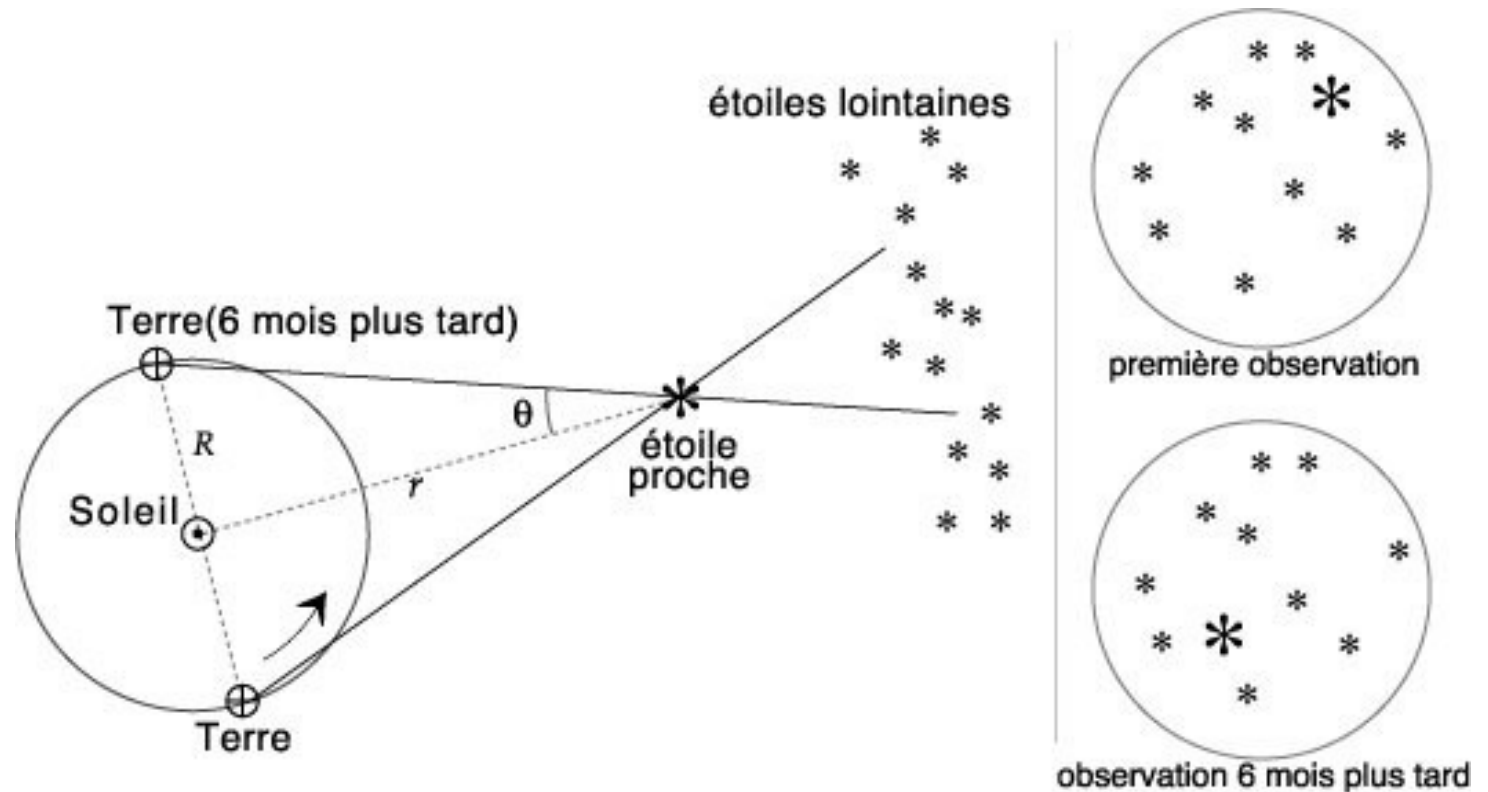
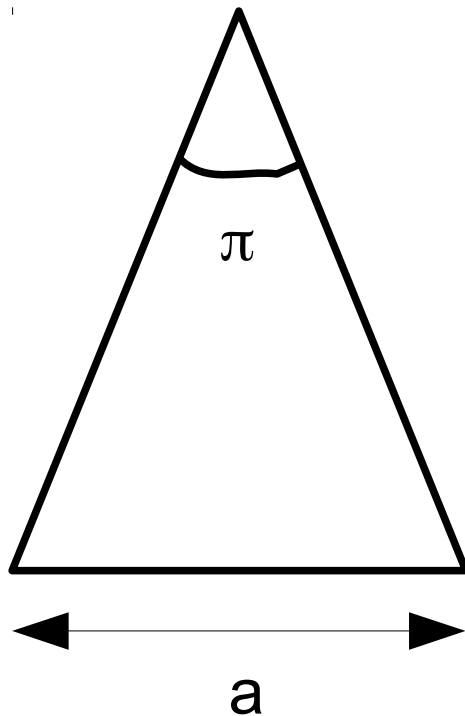
# 1) Historique

- GRECS : Rivière de lait (Voie Lactée). Le mot Galaxie dérive d'ailleurs du mot grec signifiant lait.
- 1610 : Galilée grâce à sa lunette voit que la voie lactée est composée de milliers d'étoiles.
- 1771 : Catalogue Messier de nébuleuses 1771 (45) et 1784 (103)
- 1785 : William et John Herschel -> inventaire avec un télescope de 1.22m
  - > certaines résolues d'autres non
  - > autres voies lactées?

**Besoin d'évaluer les distances**

# Comment évaluer les distances ?

- Etoiles proches : méthode des parallaxes



$R =$  unité astronomique

# Comment évaluer les distances ?

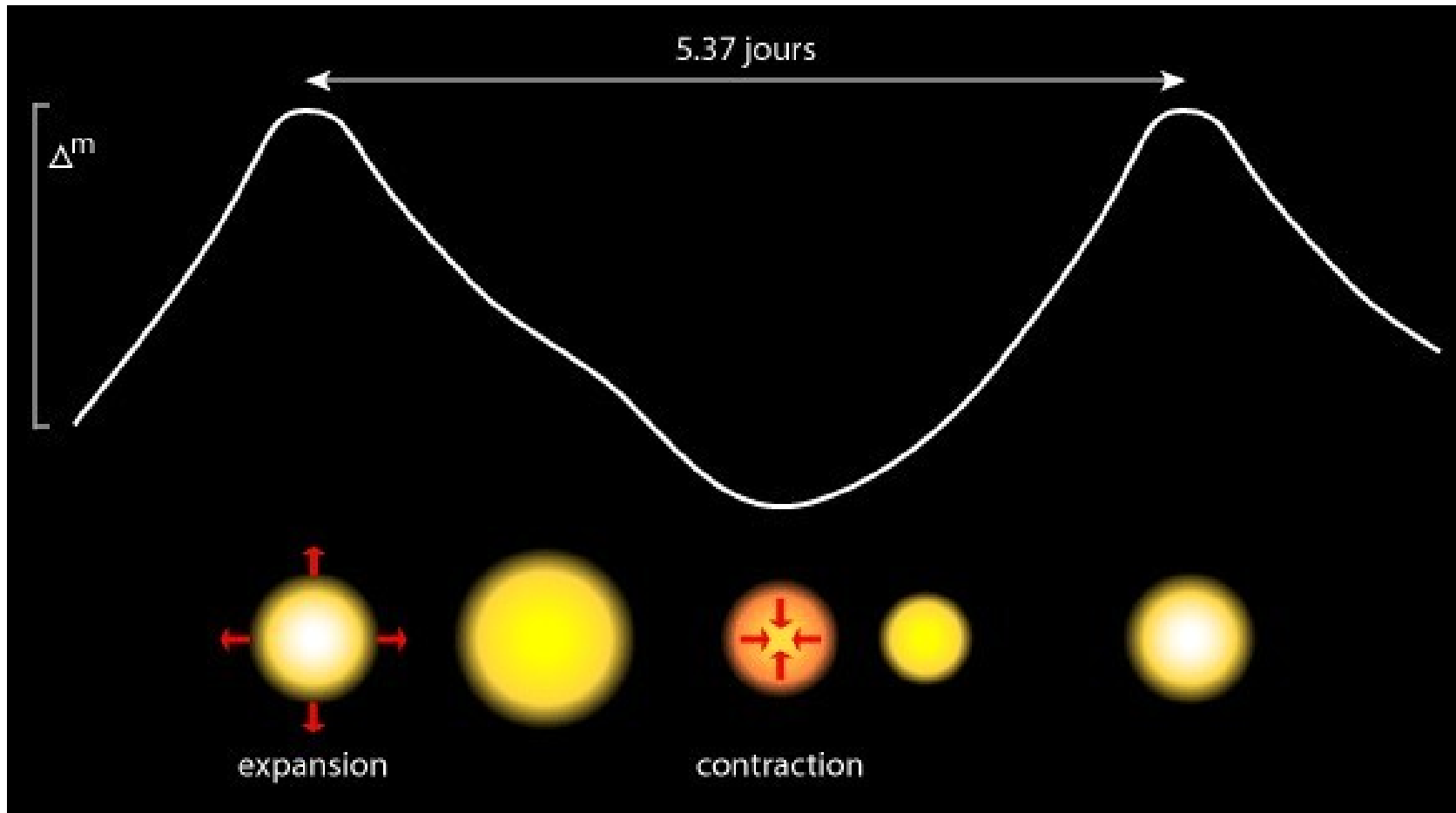
- Unités de distance en astronomie
  - Unité astronomique : distance moyenne Terre-Soleil  
 $1 \text{ u.a.} = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$
  - Le parsec : distance qu'aurait un objet dont la parallaxe est de 1"  
 $1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{16} \text{ m}$
  - L'année lumière : distance parcourue par la lumière en une année  
 $1 \text{ a.l.} = 9.45 \times 10^{15} \text{ m}$

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ a.l.}$$

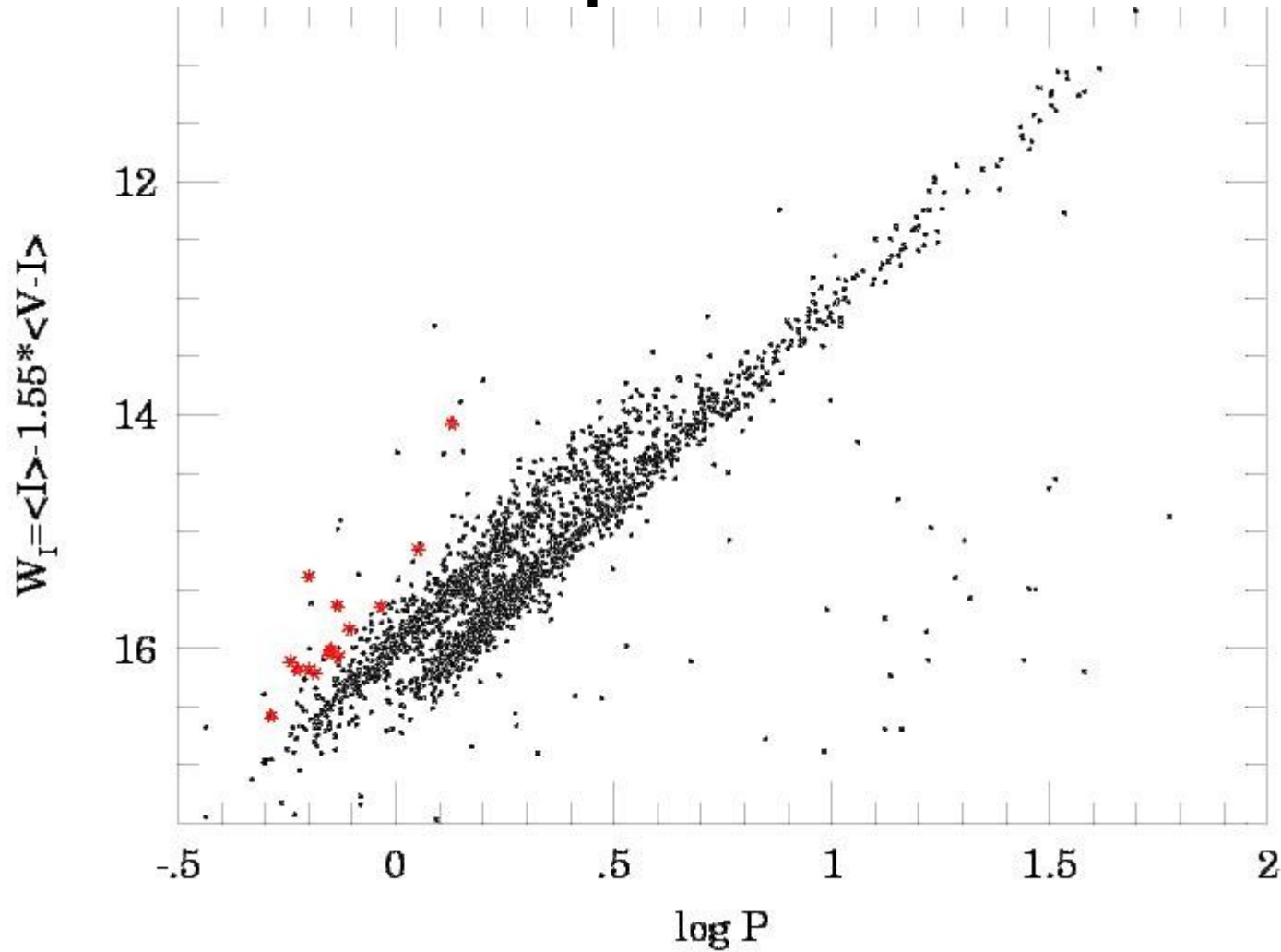
# Comment évaluer les distances ?

- Objets lointain : méthodes photométrique
    - Besoin d'objets de référence de luminosité connue
- $$F=L/(4\pi d^2)$$

# Relation période-luminosité des Céphéïdes



# Relation période-luminosité des Céphéïdes



Crédit : Scienza Per Tutti, <http://scienzapertutti.Inf.infn.it/risposte/ris271.html>



# Distance des autres galaxies

- **1923 - 1924: Première mise en évidence des galaxies :**
  - M31 et M33 résolues en étoiles par Edwin Hubble.
  - Mesure des périodes de 22 céphéides pour M33 et 12 pour M31
    - distance de 285 kpc, au-delà de notre Galaxie (actuellement 660 kpc).
  - Confirmation par nova dans M31 en 1923
  - La vitesse d'éloignement proportionnelle à la distance (loi de Hubble).

$$v = H_0 \times d$$

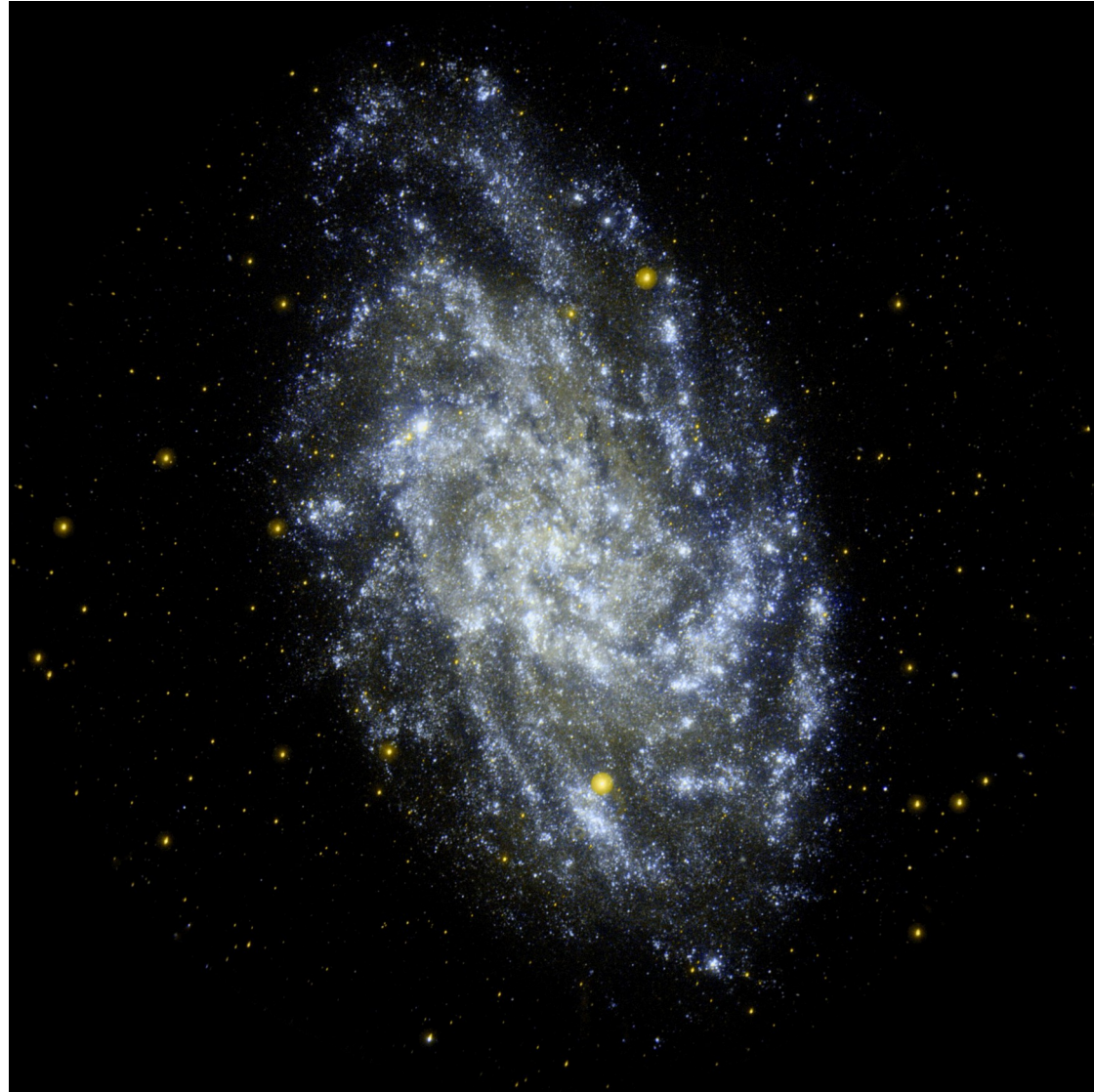
$H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$ : constante de Hubble

# M31 : galaxie d'Andromède



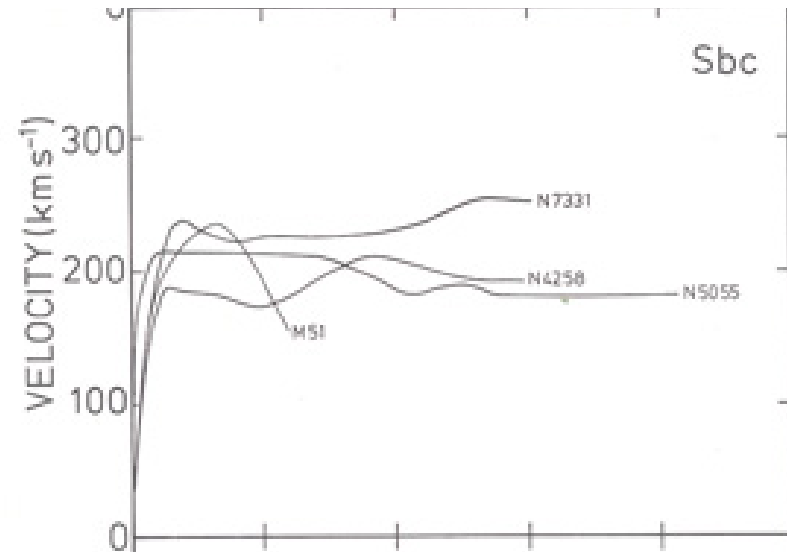
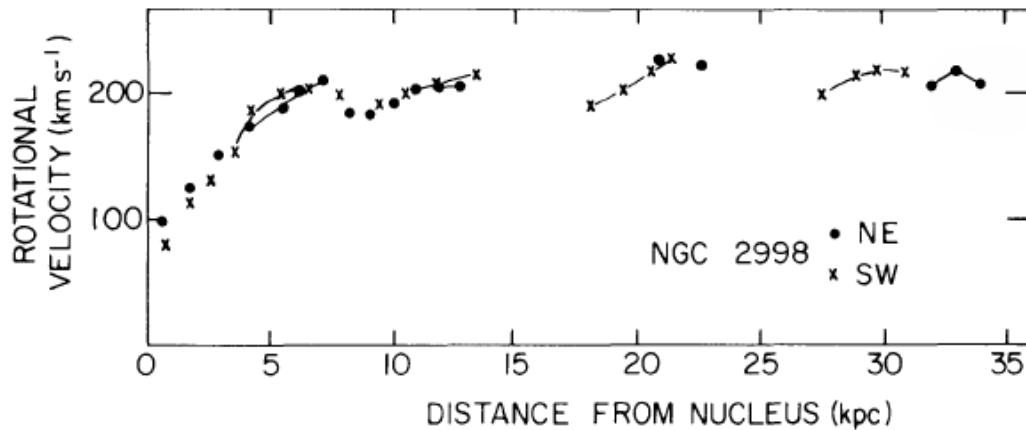
Photo Credit: Bill Keil

# M33 : galaxie du Triangle



# Mise en évidence de la matière sombre

- Cinématique à grand rayon :



Rubin et al. (1978) : gaz ionisé

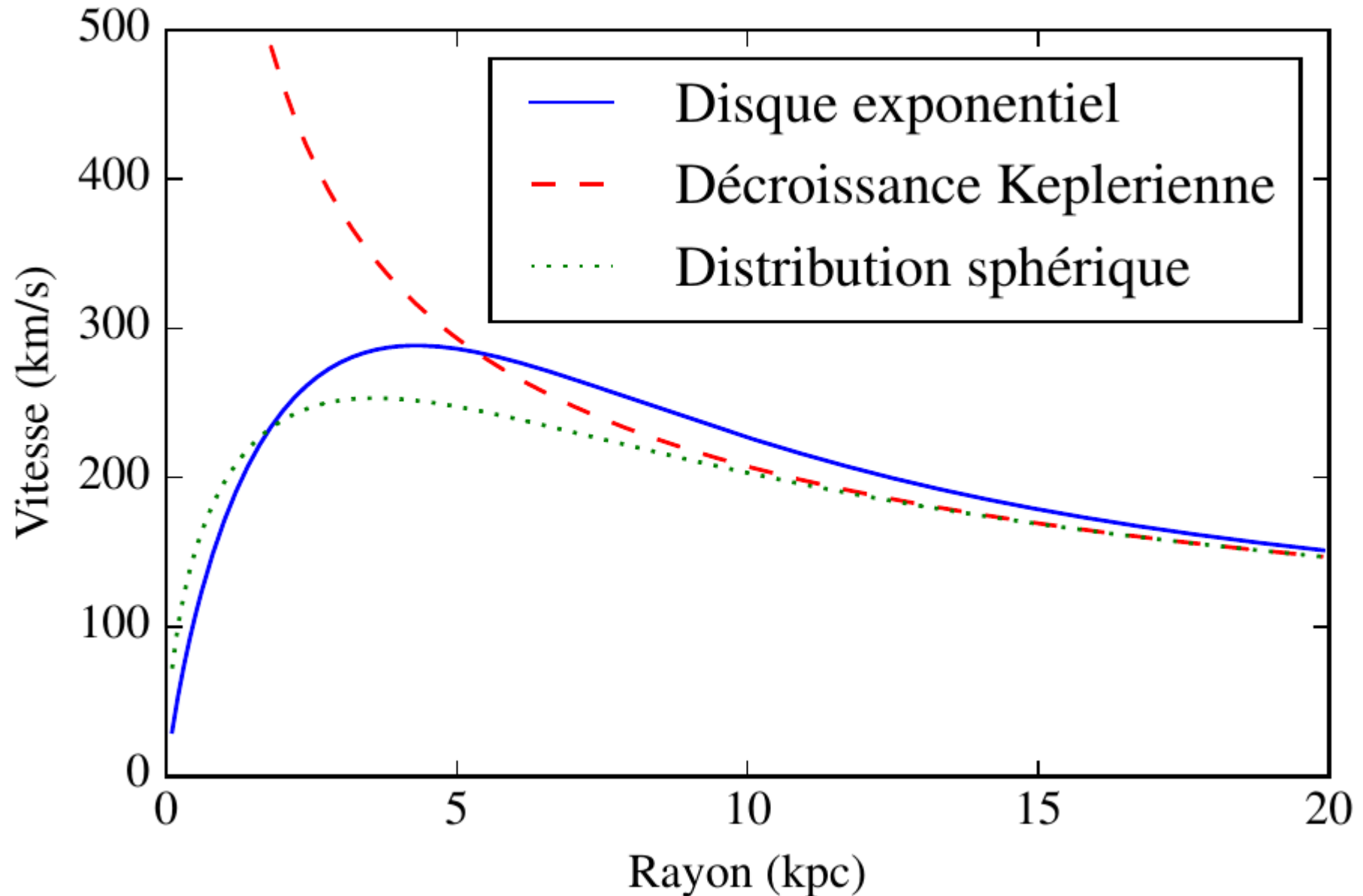
Bosma et al. (1978) : gaz neutre

- Courbes de rotation plates à grand rayon, indépendamment du traceur !
- Pour divers types morphologiques de galaxies.
- Résultat inattendu au vu de la distribution de matière !

## 2) Dynamique des galaxies

- La vitesse du gaz et des étoiles dépend de la distribution de la matière (potentiel gravitationnel) :
  - Loi de Newton, loi de Gauss (cas distribution symétrie sphérique), introduction du potentiel gravitationnel et de la vitesse circulaire
  - Cas décroissance Keplerienne
  - Exemple d'une distribution sphérique
  - Exemple d'une distribution plane : disque exponentiel

# Cinématique des disques



### 3) Aspects observationnels

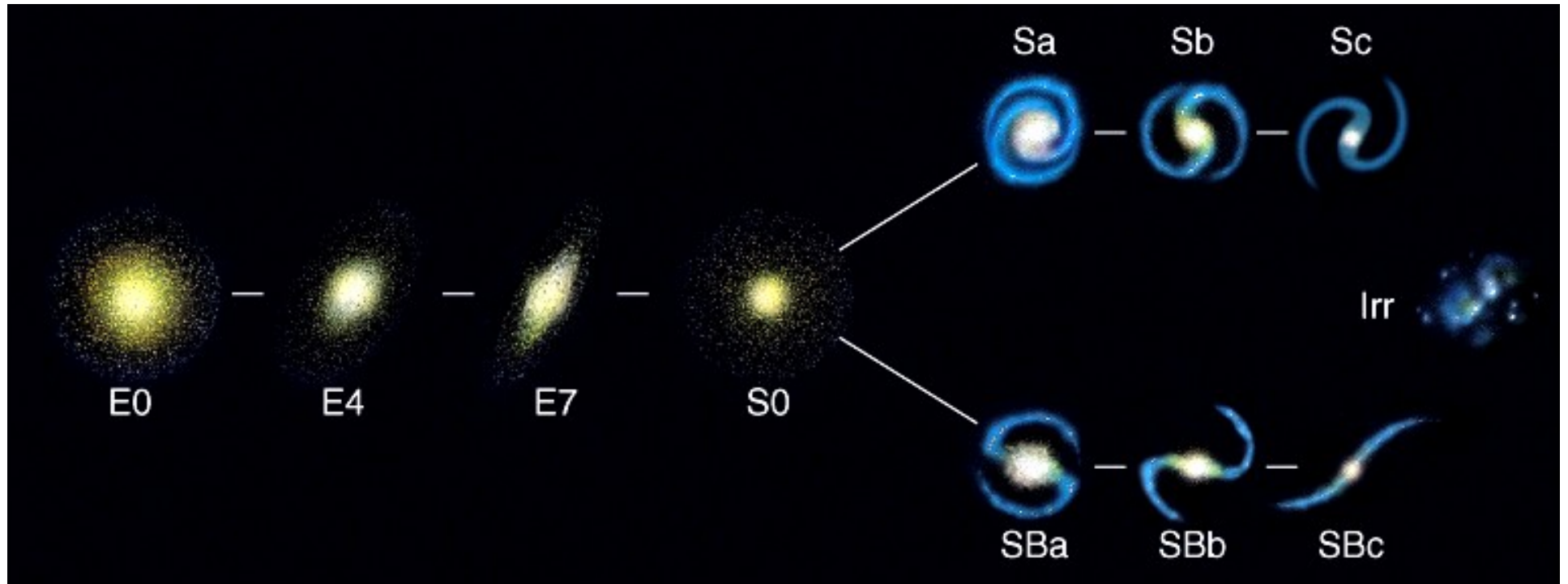
---

- On peut observer la matière baryonique:
  - les étoiles
  - la poussière
  - le gaz (neutre, ionisé et moléculaire)

# Diapason de Hubble

Précoces

Tardives



Luminosité / masse croissante

Bulbe croissant

Disque décroissant

Étoiles de plus en plus vieilles

Galaxies de plus en plus rouge

Fraction de gaz décroissante

Taux de formation d'étoile décroissant



# Spirales

- Bulbe + disque + bas spiraux
- De Sa à Sc :
  - importance décroissante du bulbe
  - Bras spiraux plus ouverts
  - Plus de poussière, de gaz ionisé et d'étoiles jeunes
  - Diminution de la luminosité totale



M81

Type Sa



M51

Type Sb

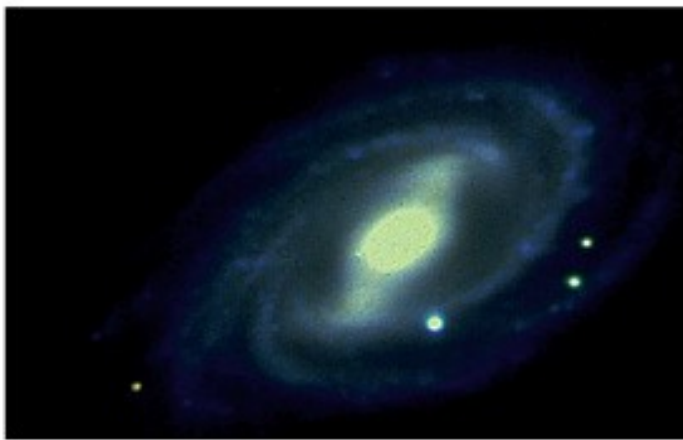


NGC 2997

Type Sc

# Spirales barrées (SB)

- Bulbe + disque + bas spiraux + barre centrale
- Barre = élément linéaire d'intensité presque uniforme centré sur le noyau
- SBa → SBc : idem spirales non barrées



NGC 3992

Type SBa



NGC 1433

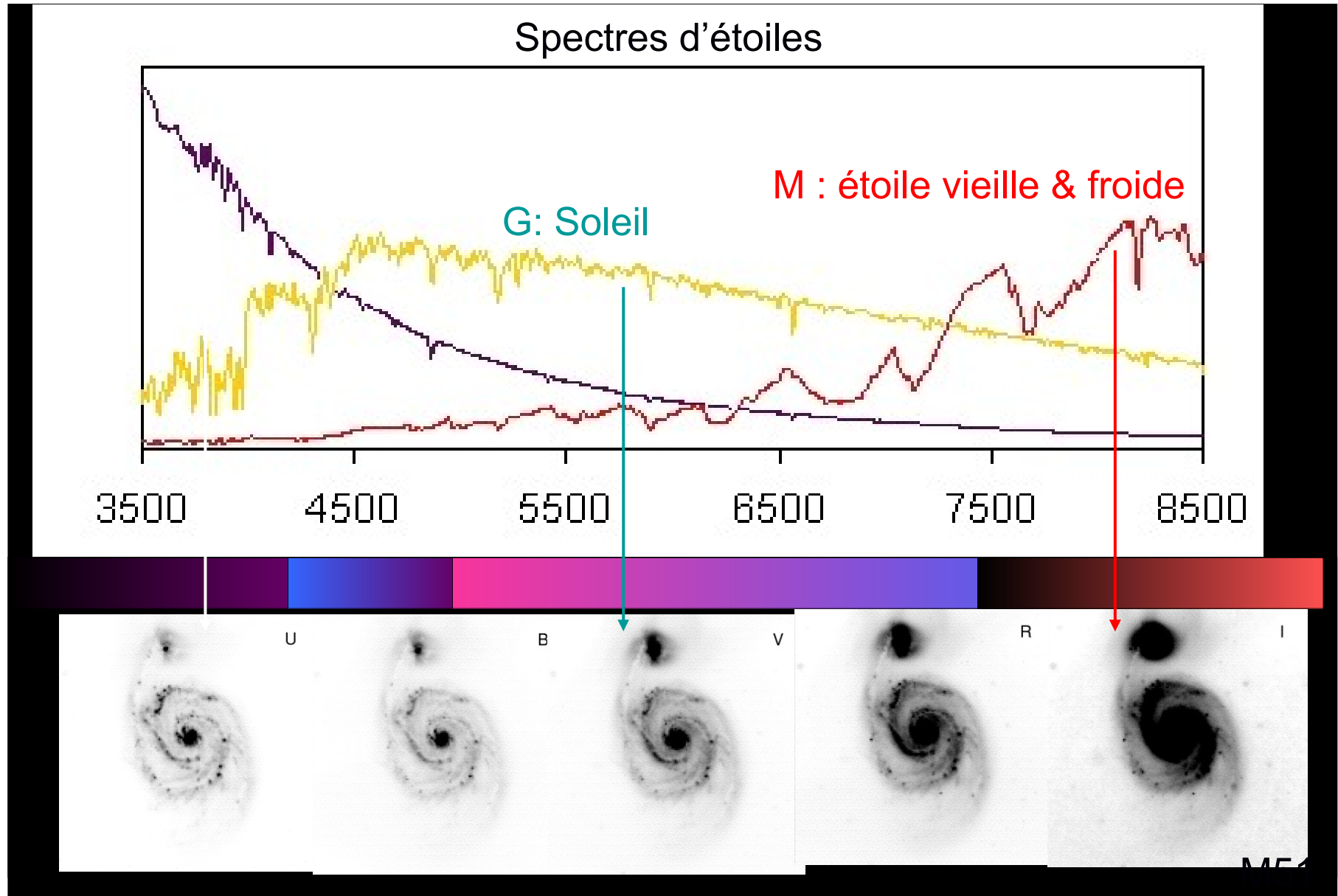
Type SBb



NGC 1300

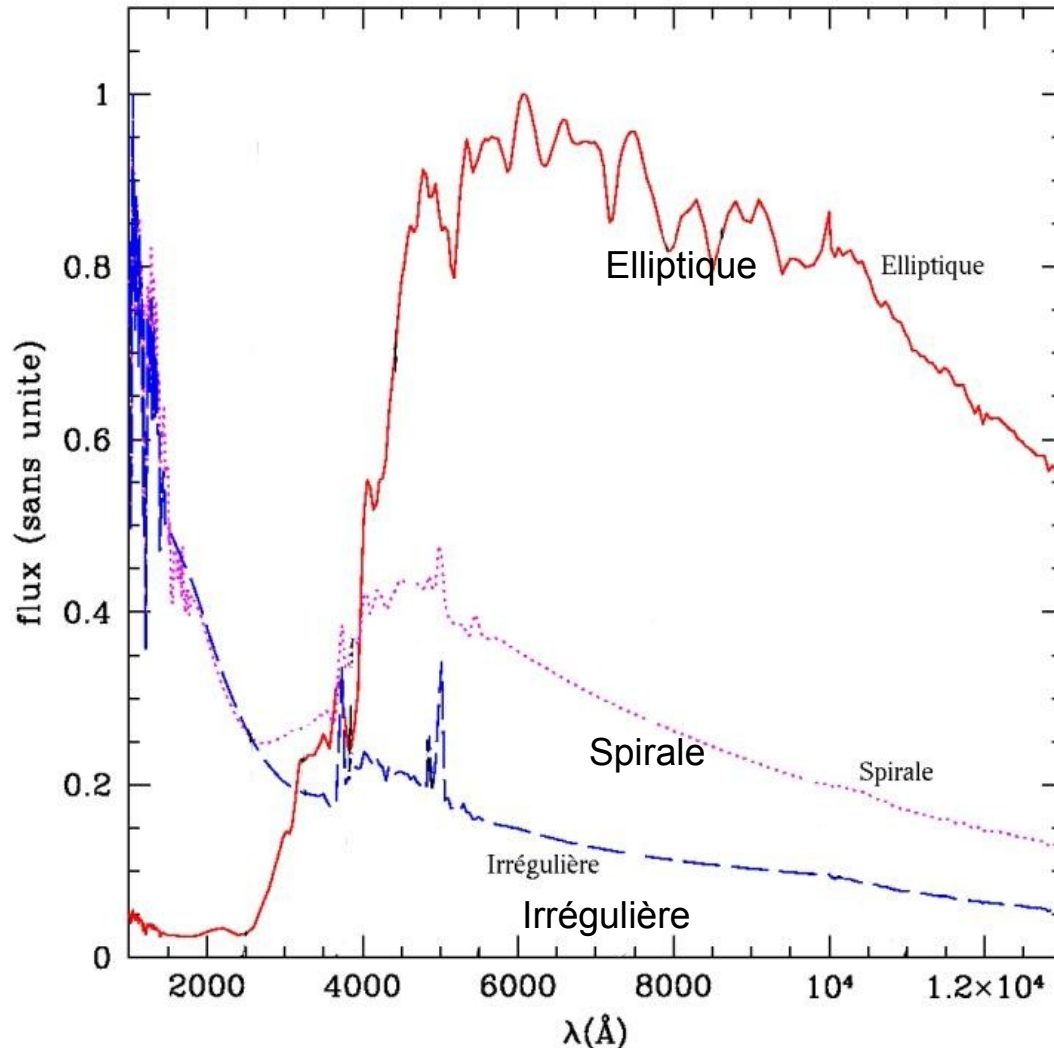
Type SBc

# Les populations stellaires à l'origine de la morphologie multi-longueur d'onde



# Caractériser les galaxies : le spectre

👉 La Distribution spectrale d'énergie (SED)



Dans l'univers local :

les types morphologiques sont caractérisés par une SED

On peut ajuster des modèles pour déterminer entre autres la masse des galaxies

# Profils de luminosité

- Elliptiques : loi  $r^{1/4}$
- Disques : loi exponentielle

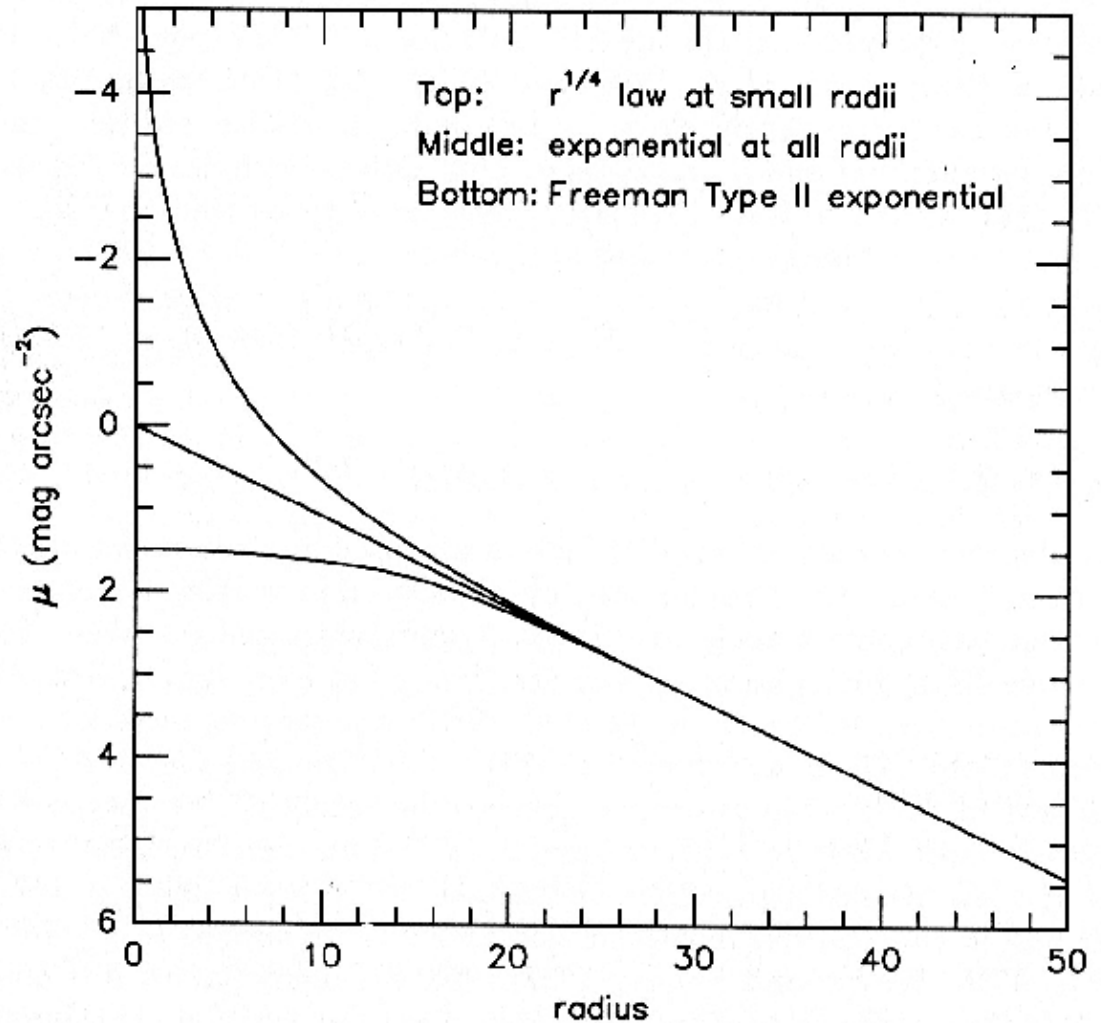
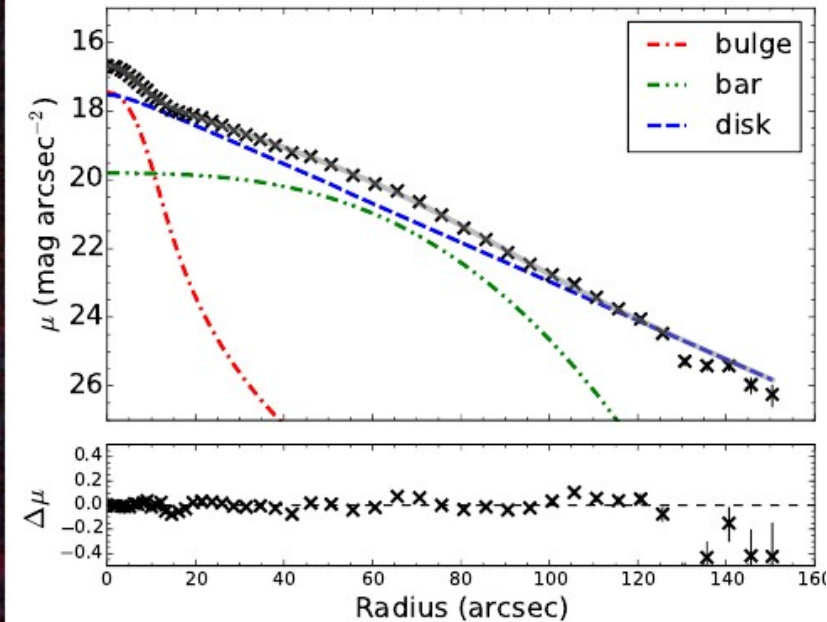


Fig. 9. Schematic disk brightness profiles.

# Profils de luminosité

## Décomposition du profil de luminosité



UGC3463, Korsaga et al. (2018)

- Décroissance exponentielle du disque
- La barre est dans le disque

# Contenu des galaxies – gaz interstellaire

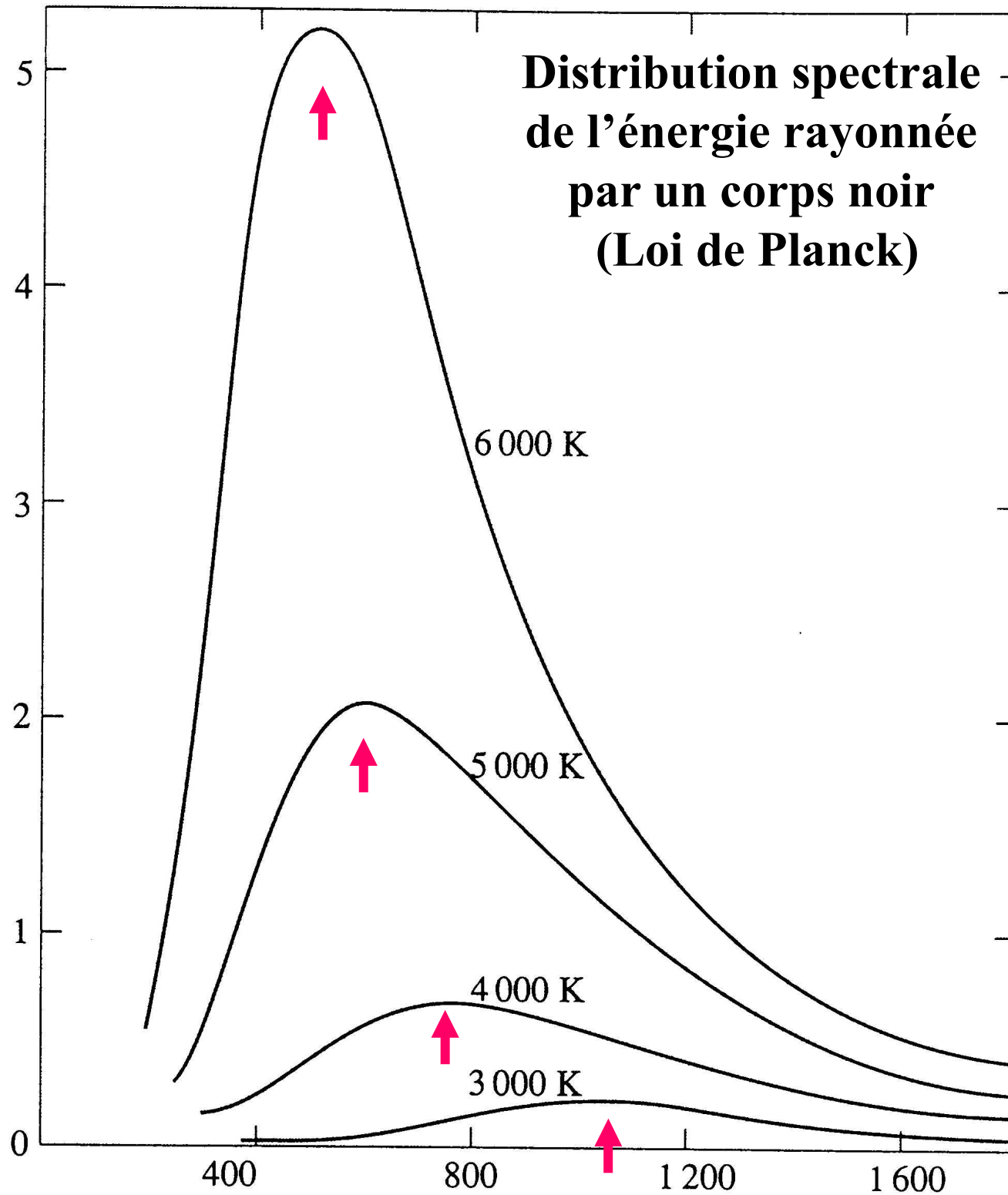
- Les étoiles se forment à partir du gaz
- Molécules, atomes et ions
- Plutôt transparent
- Principalement de l'hydrogène
- En général dans un plan (disque)

# Contenu des galaxies – gaz interstellaire

- Le gaz est ionisé près des étoiles jeunes
  - Etoiles O et B1 possèdent un fort rayonnement UV car plus chaudes
  - Le gaz absorbe les photons UV ( $<91.2$  nm)
    - => Raies d'émission (cascade de recombinaisons des électrons depuis un état excité)
    - => Sphère de Strömgren (1939) : équilibre entre absorption et recombinaisons ( $T \sim 10000$  K)

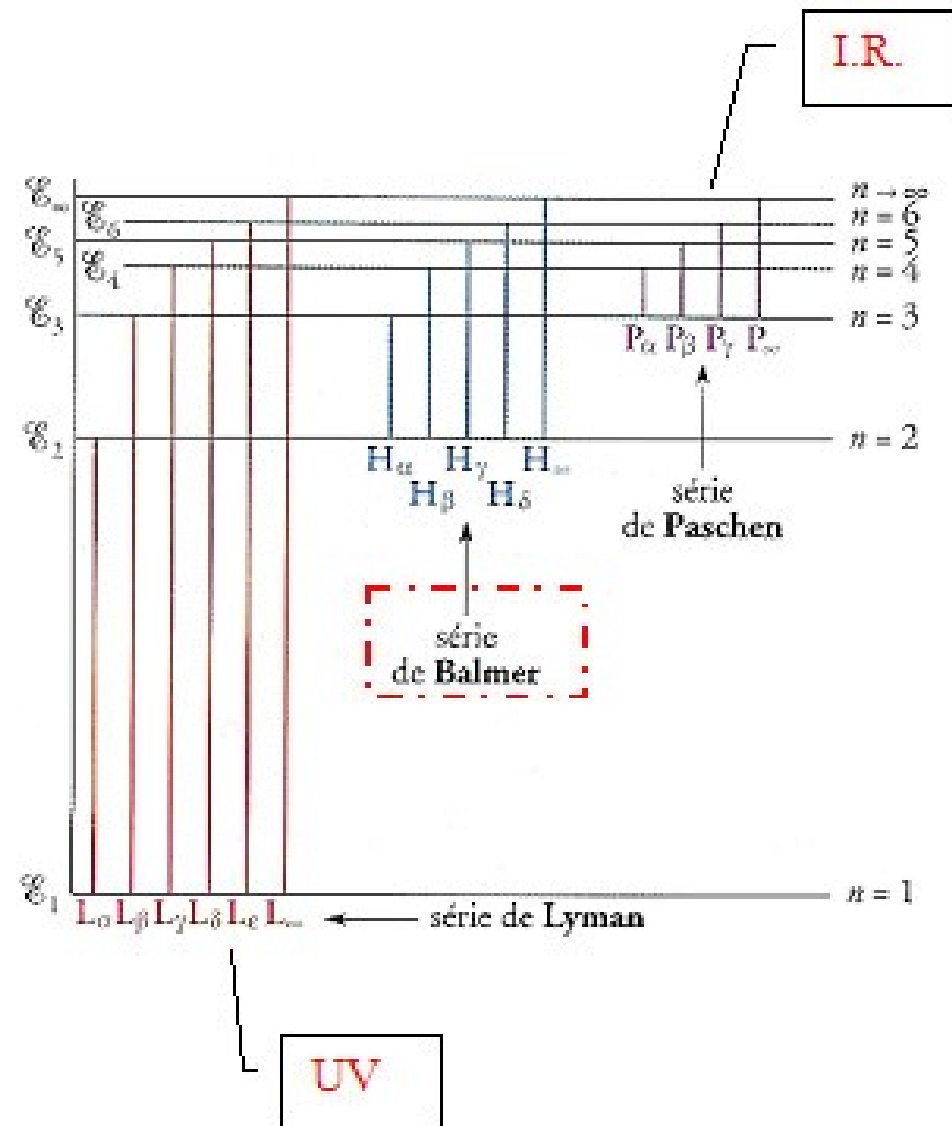


flux  
relatif

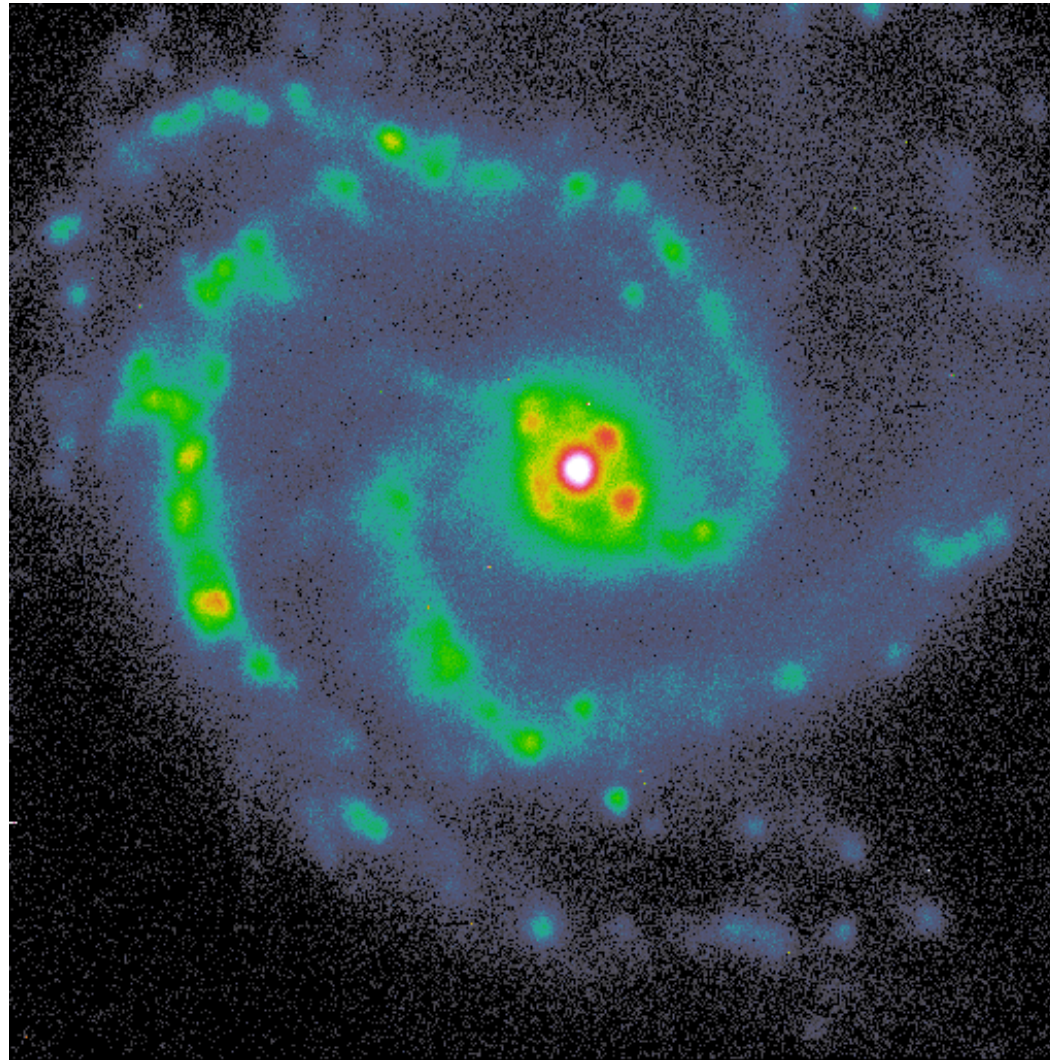


$\lambda$  (nm)

# Niveaux d'énergie de l'hydrogène



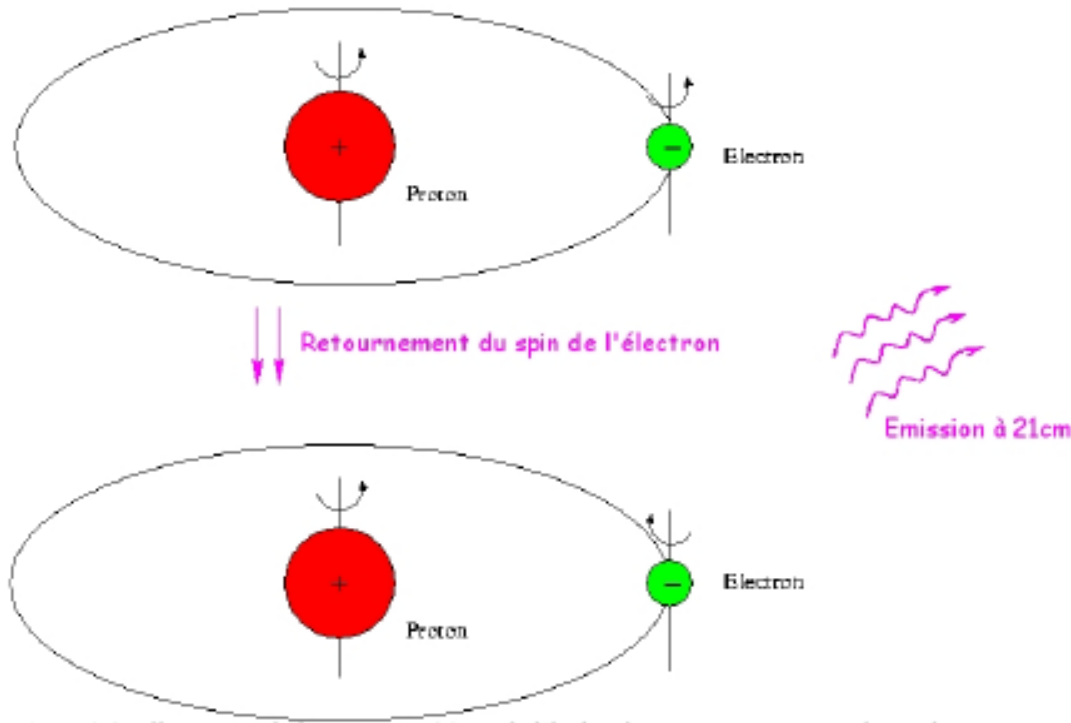
# H $\alpha$ dans NGC 5427



# Contenu des galaxies – gaz interstellaire

- Le gaz est neutre loin des étoiles jeunes
  - Gaz froid ( $\sim 100\text{k}$ )
  - $\sim 10\%$  de la masse de la Voie Lactée
- On observe la raie Ly alpha en absorption à 121.6 nm
- On observe la raie HI à 21cm (radio)
  - Transition entre 2 sous-niveaux de l'état fondamental (structure hyperfine de l'atome)
    - > lorsque l'électron renverse son spin

# Hydrogène neutre (HI) dans les Galaxies

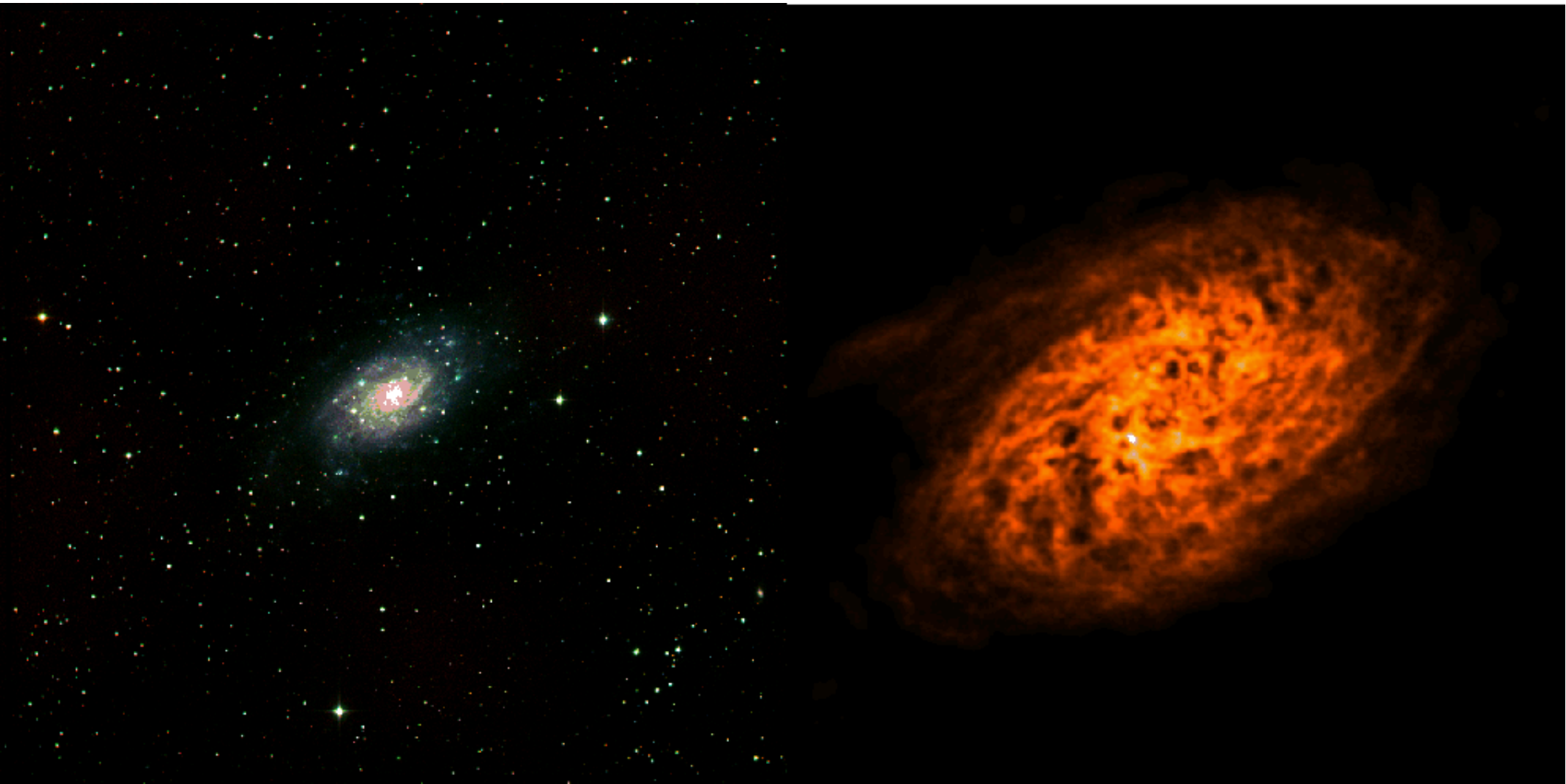


Spin-flip par  
collision

Decay  $\sim 10^7$   
années

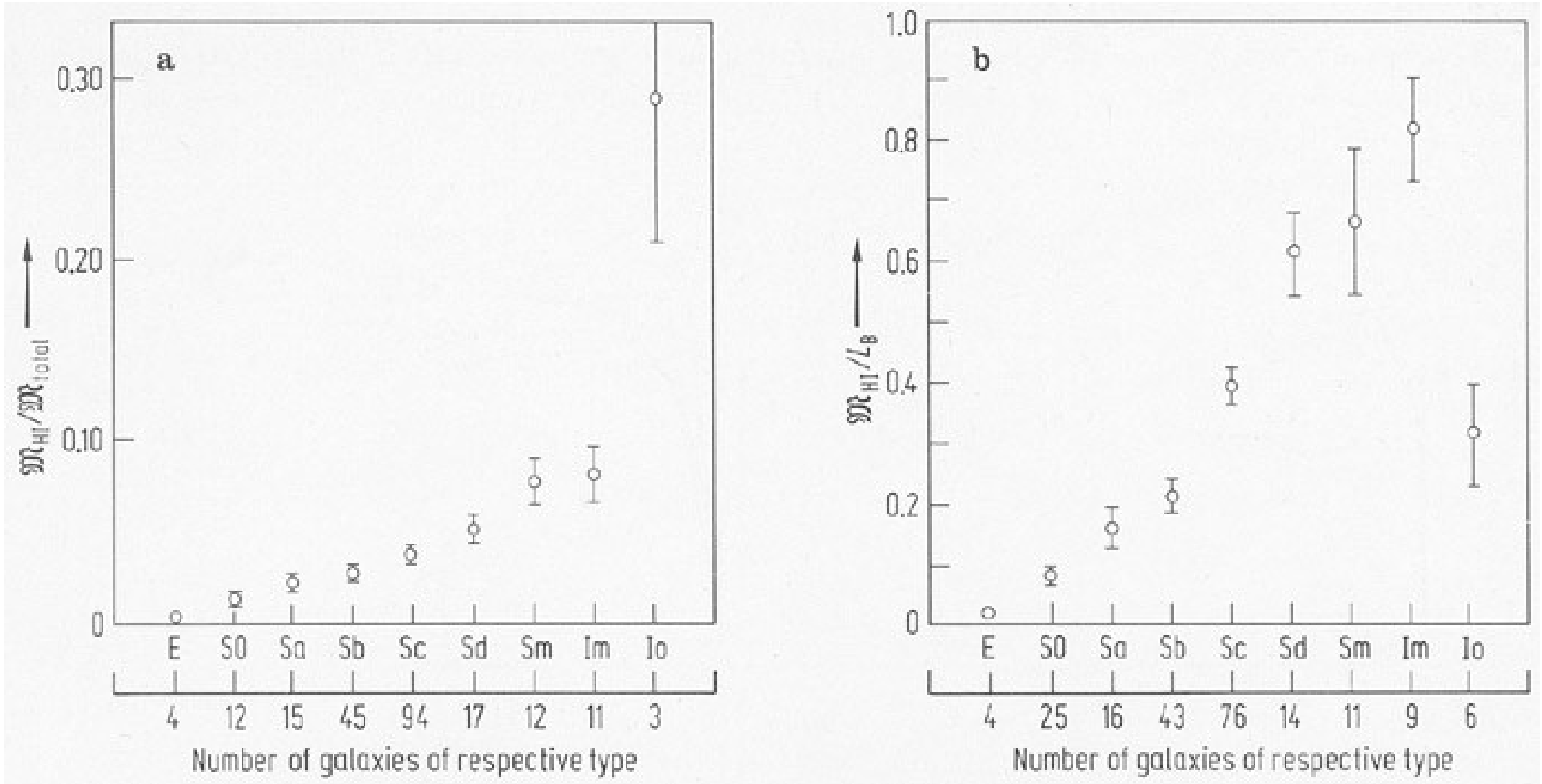
- 2 états dans le *niveau fondamental*, séparés par leur couplage spin-orbite
- Energie des spins parallèles supérieure à celle des spins anti-parallèles
- Le *decay* produit l'émission d'un photon à 1420.406 MHz.

NGC 2403. Data from Fraternali, F., Oosterloo, T., Sancisi, R., van Moorsel, G.A. 2001, ApJ, 562, L47



Transition de l'Hydrogène à 21cm (HI) : ~10% de la masse visible des galaxies spirales est sous forme gazeuse.

# Hydrogène neutre (HI) dans les Galaxies



- Contenu en HI pour différents types
- a) Rapport masse HI / masse totale
- b) Rapport  $M/L_B$

# Mesurer la formation d'étoiles

Infrarouge moyen et lointain:

- Traceurs indirects de la formation stellaire
- Rayonnement radiatif des poussières interstellaires
- Avantage : pas d'extinction
- Inconvénient : décalé vers les ondes radios à haut  $z$



Spitzer – MIR

UV, gaz ionisé, gaz moléculaire :

- Traceurs directs des étoiles jeunes



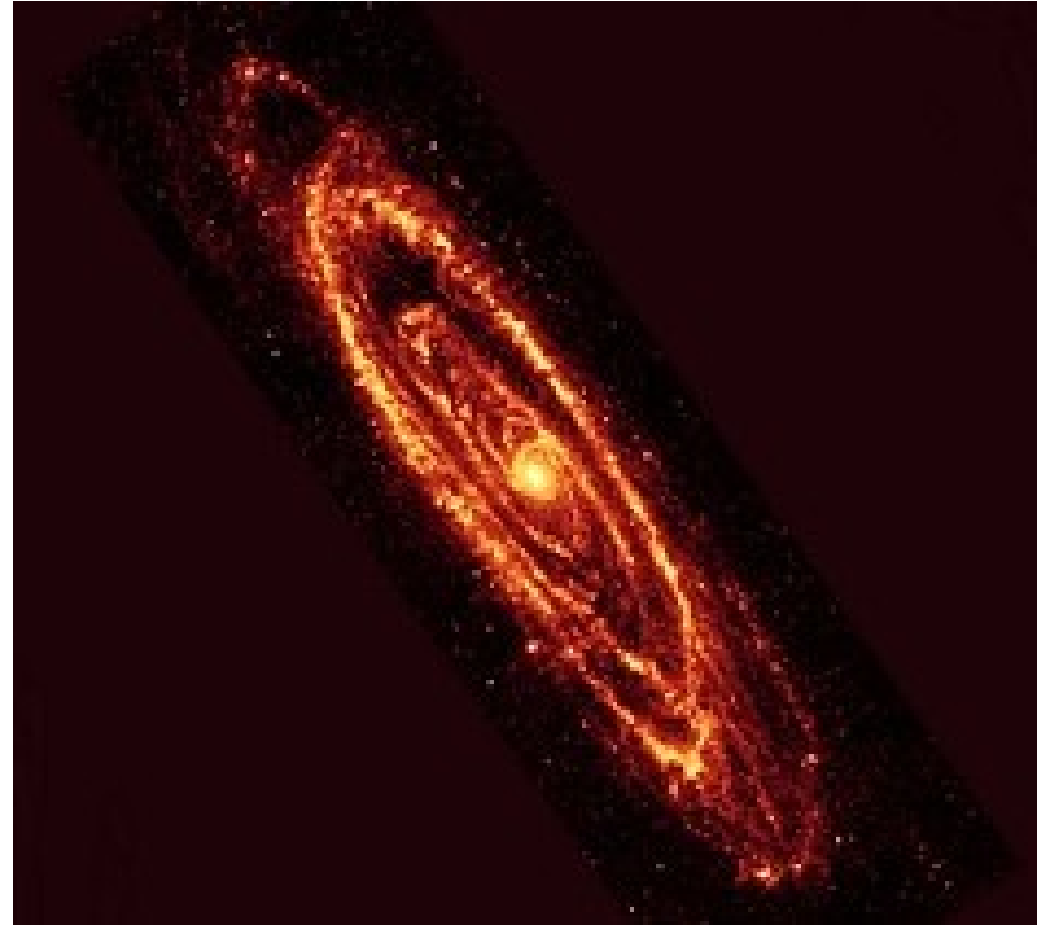
GALEX - UV



# Contenu des galaxies - poussières



M31 en optique



M31 en infra-rouge (Spitzer)

Poussière découverte parce que taille des grains  $\sim$  longueurs d'onde visibles (lumière pas seulement absorbée mais rougie)

Peu de masse

# Loi Kennicutt-Schmidt

Lien entre SFR (Star Formation Rate ou taux de formation d'étoiles) et densité de gaz.

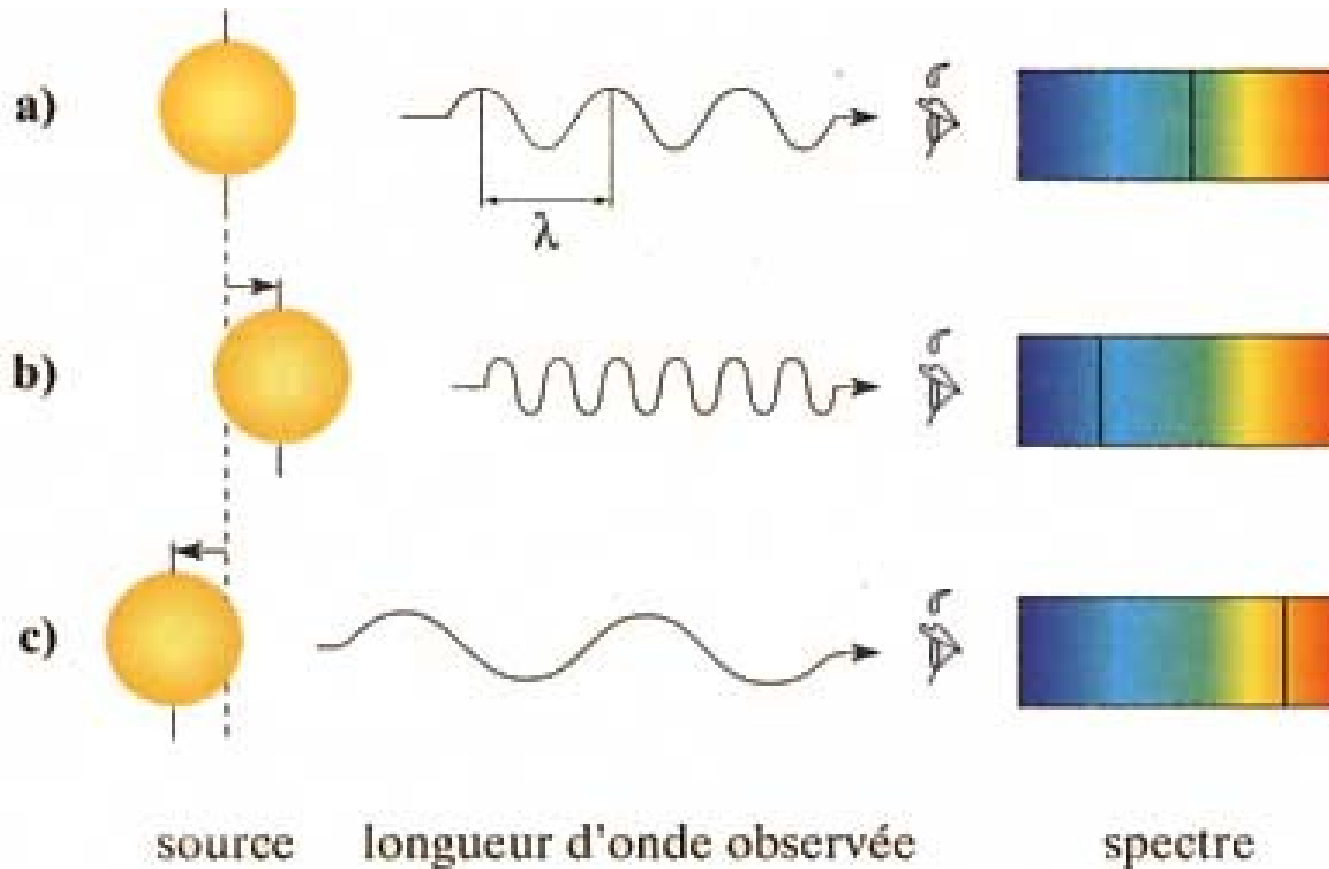
→ estimation de la masse de gaz à partir

- SED
- Poussières
- UV
- Gaz ionisé
- Gaz moléculaire

# Cinématique des galaxies

- Comment observer les mouvements au sein des galaxies ?
  - Habituellement impossible de résoudre les étoiles
  - Période de rotation très grande ( $\sim 10^8$  ans)
    - mesure différentielle impossible
  - Utilisation de l'effet Doppler permettant de mesurer la vitesse le long de la ligne de visée

# Effet Doppler



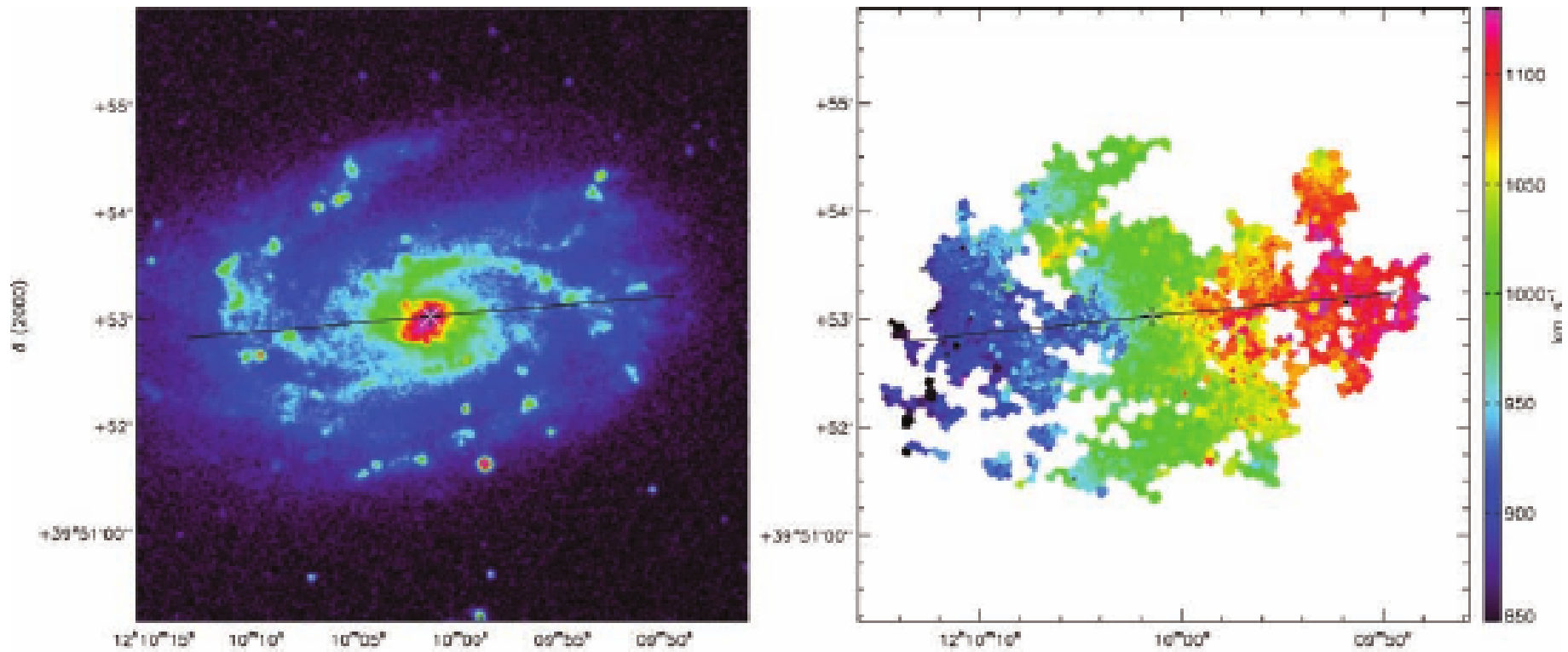
$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} - 1$$

# Cinématique des galaxies

- Spectroscopie à fente → une direction
- Spectroscopie à champ intégral → un spectre par pixel
- Résolution spectrale :  $R = \lambda / \delta\lambda = c / \delta v$  → besoin de  $1500 < R < 20000$
- Galaxies elliptiques :
  - On utilise le spectre des étoiles (pas de raie d'émission gazeuse car peu de gaz)
  - Une composante aléatoire + une composante rotation
- Galaxies spirales :
  - On peut utiliser le spectre des étoiles dans les régions les plus brillantes (bulbe)
  - On utilise souvent des raies d'émission du gaz (ionisé ou neutre)
  - Gaz principalement en rotation

# Cinématique des disques



Epinat et al. (2008)

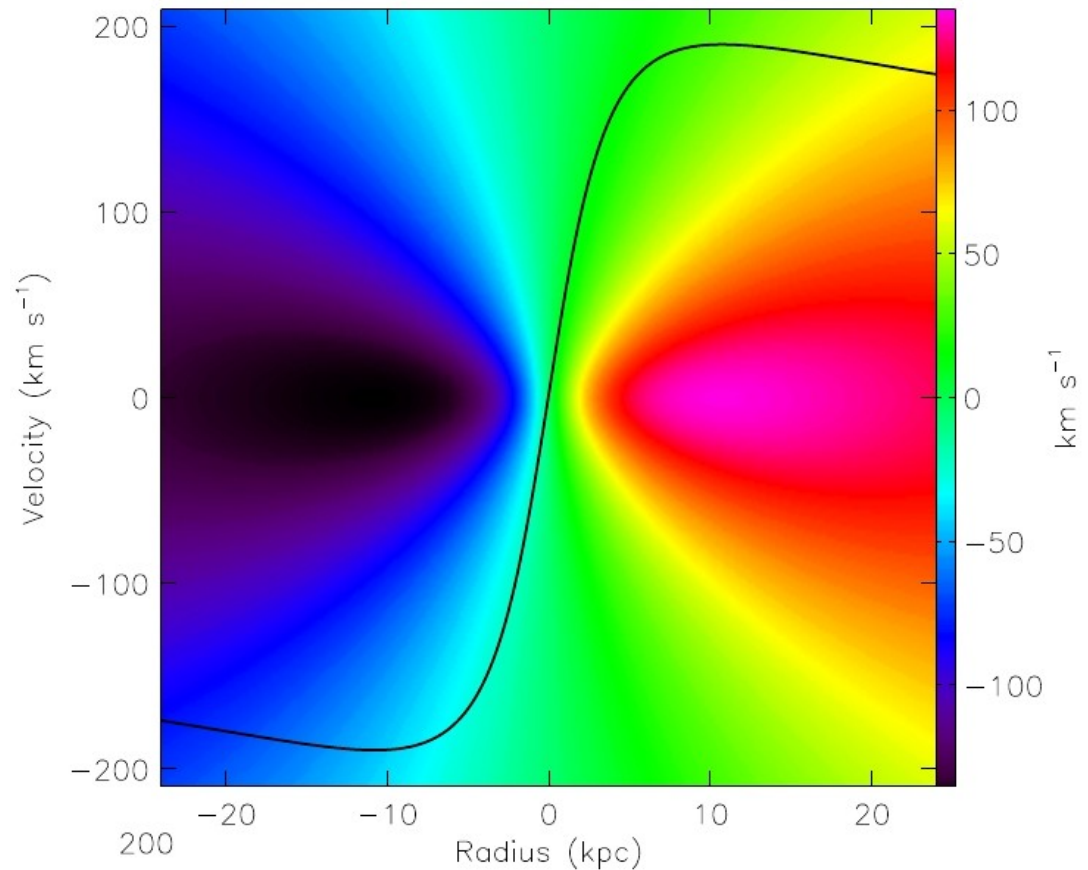
UGC7154

# Cinématique des disques

Impact de la géométrie sur la mesure des vitesses réelles

$$V_{\text{obs}} = V_{\text{sys}} + \boxed{V_{\text{rot}}(R) \cos \theta \sin i} \\ + V_{\text{exp}}(R) \sin \theta \sin i \\ + V_z(R) \cos i.$$

- **Fentes** : le long du grand axe
- **Champ intégral** : pas d'a priori



# 4) Etudes dynamiques actuelles et futures

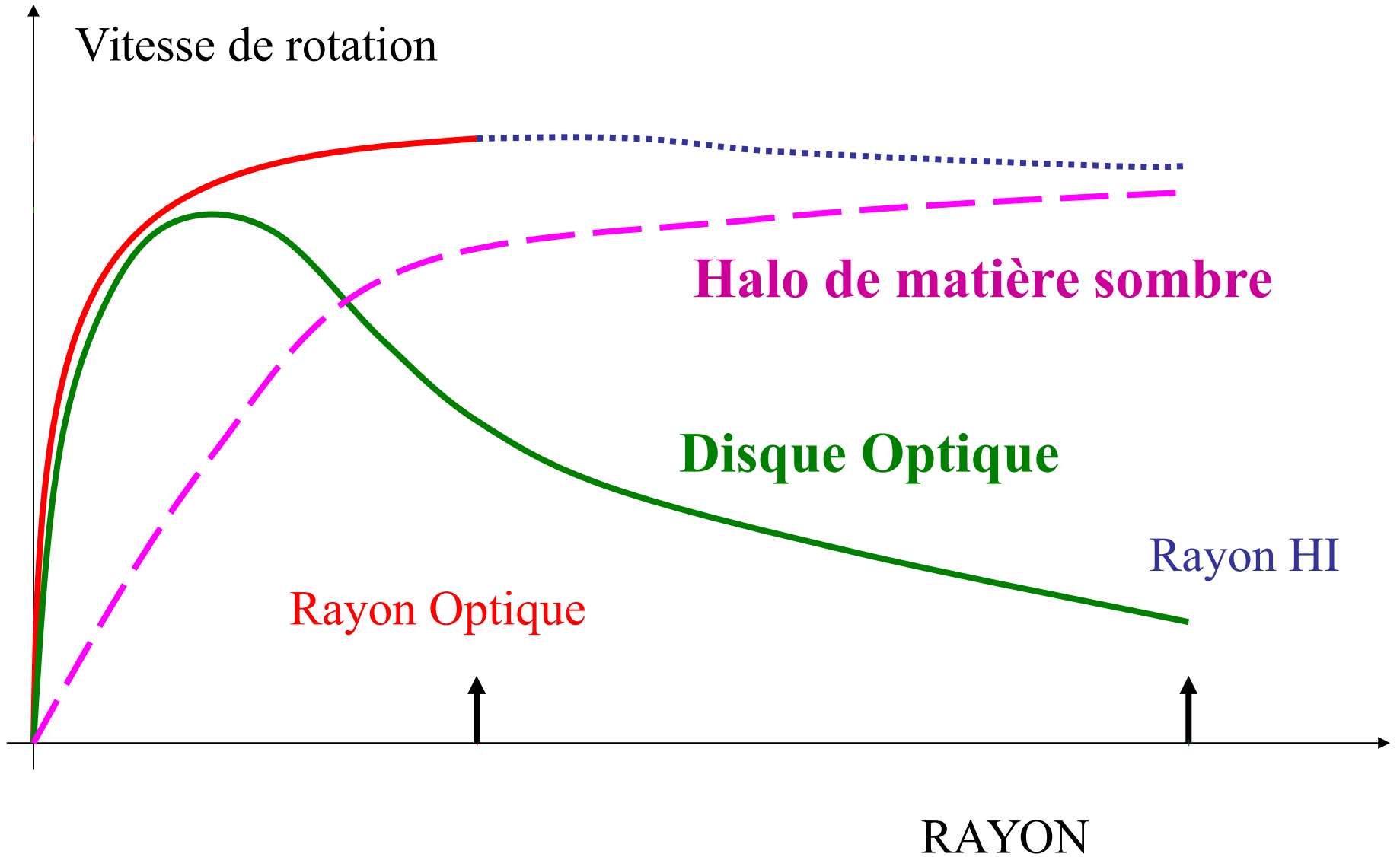
- Modèles de masse/distribution de la matière sombre
- Lien entre la dispersion/turbulence et formation d'étoiles
- Relation de Tully Fisher
- Etude du moment angulaire
- Etudes du plan fondamental (elliptiques) : rayon effectif, brillance de surface, dispersion centrale.
- Impact des barres, bulbes
- etc.



# Modèles de masse

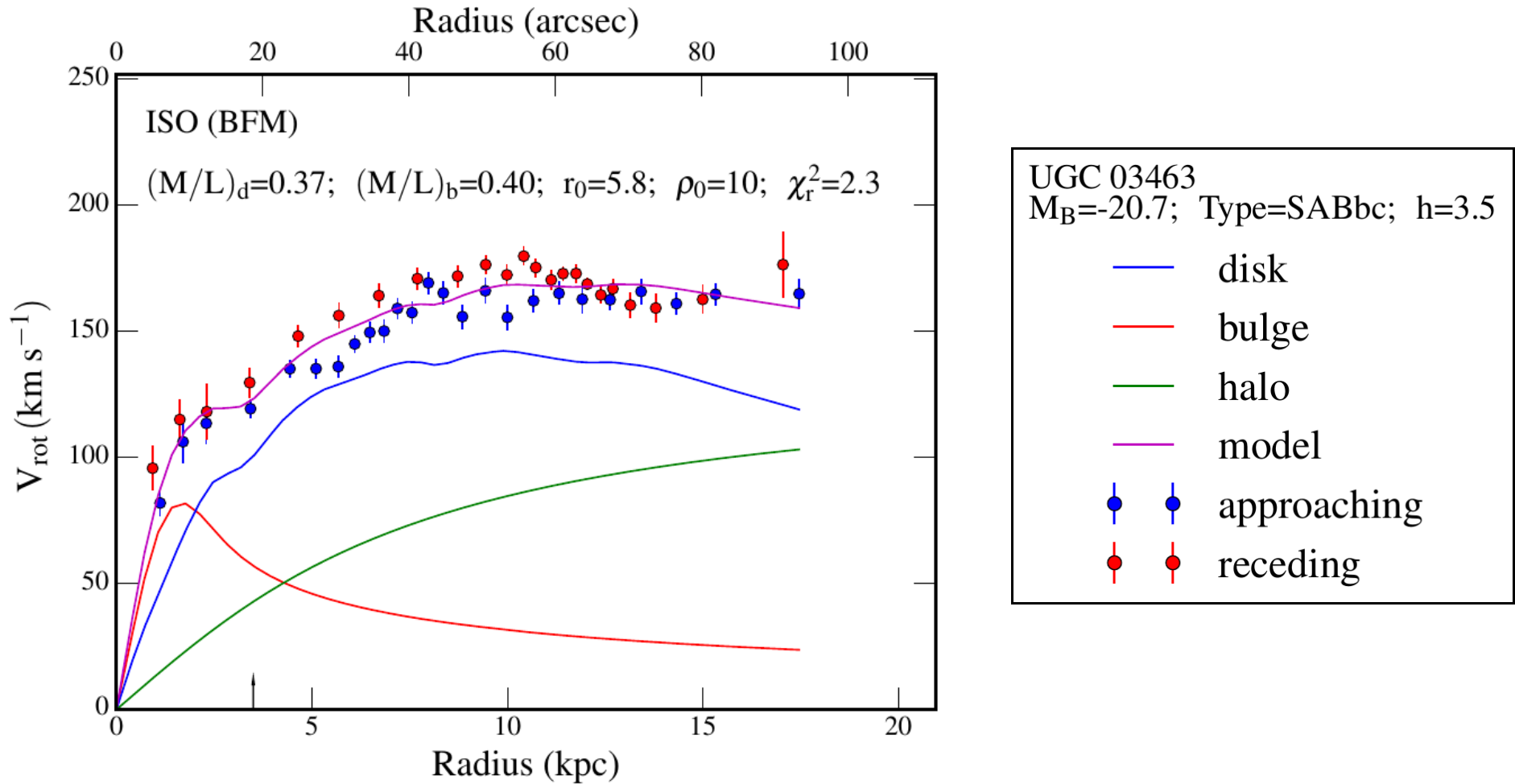
- Ingrédients observationnels pour un modèle de masse
  - **Une courbe de rotation HI**
  - **Une courbe de rotation optique**
  - **Un (des) profil(s) radial(aux) photométrique(s) bande R, I (disque, bulbe)**
  - **Un profil radial HI corrigé de He**

# Modèles de masse



# Modèles de masse

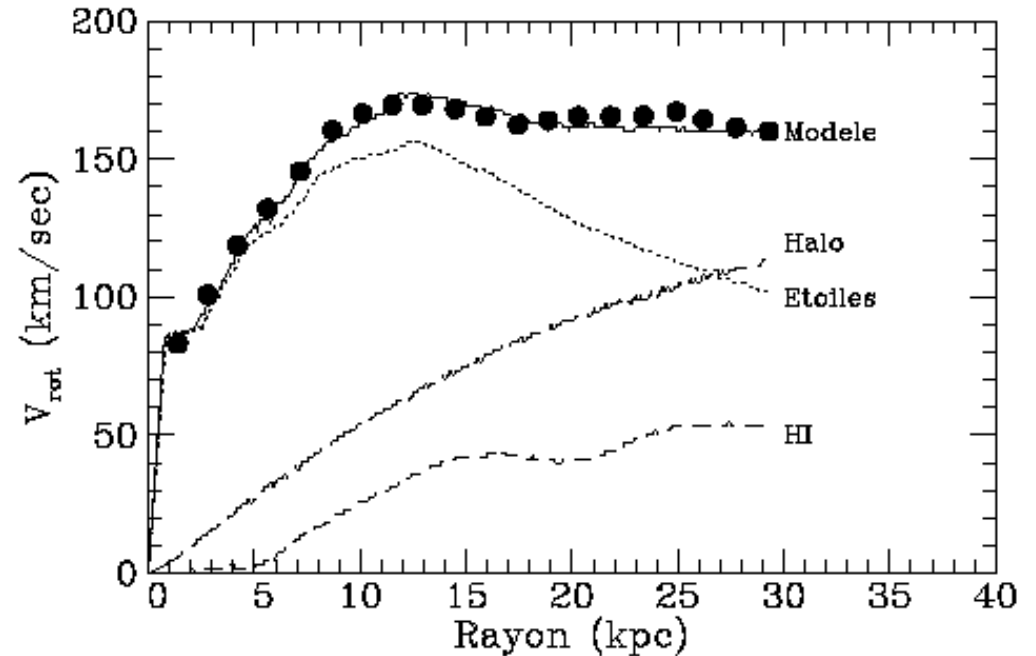
## Etude de la distribution de matière sombre



Korsaga et al. (2018)

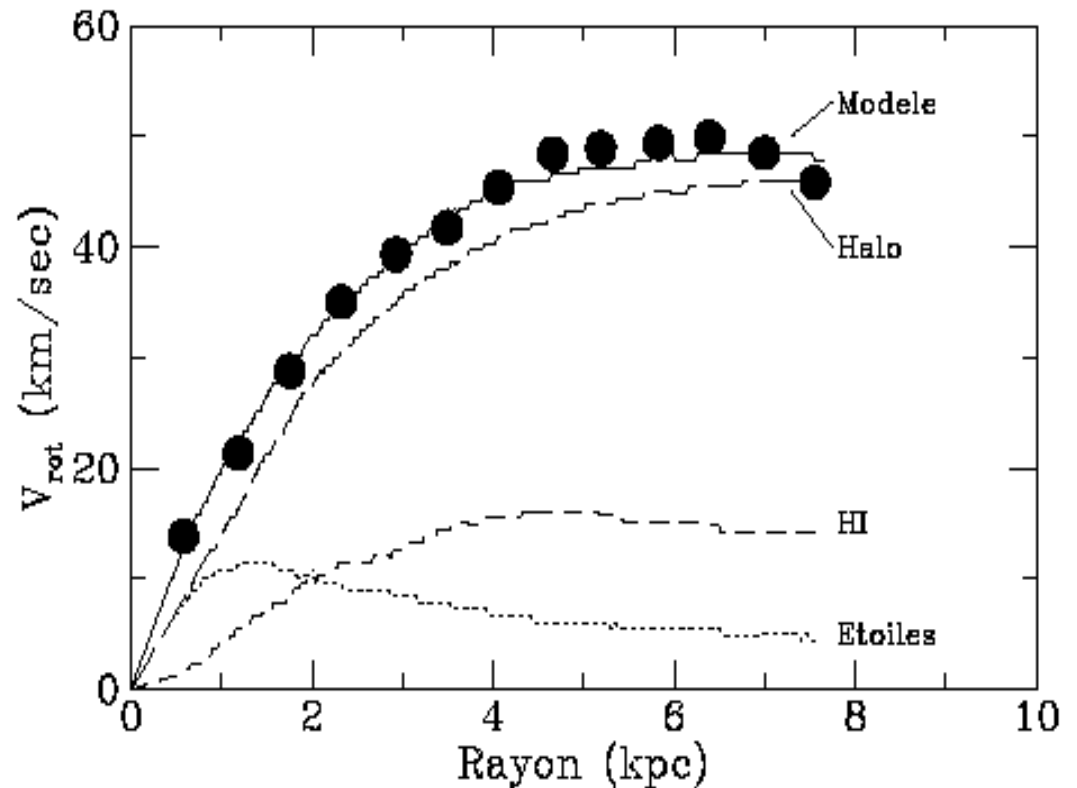
# Matière sombre dans les spirales

- Dans les régions internes, la matière visible (gaz & étoiles) suffit à expliquer les vitesses de rotation
- À la fin du disque stellaire, la matière visible et la matière sombre contribuent à peu près également aux vitesses
- Dans les régions externes, la masse est totalement dominée par la matière sombre

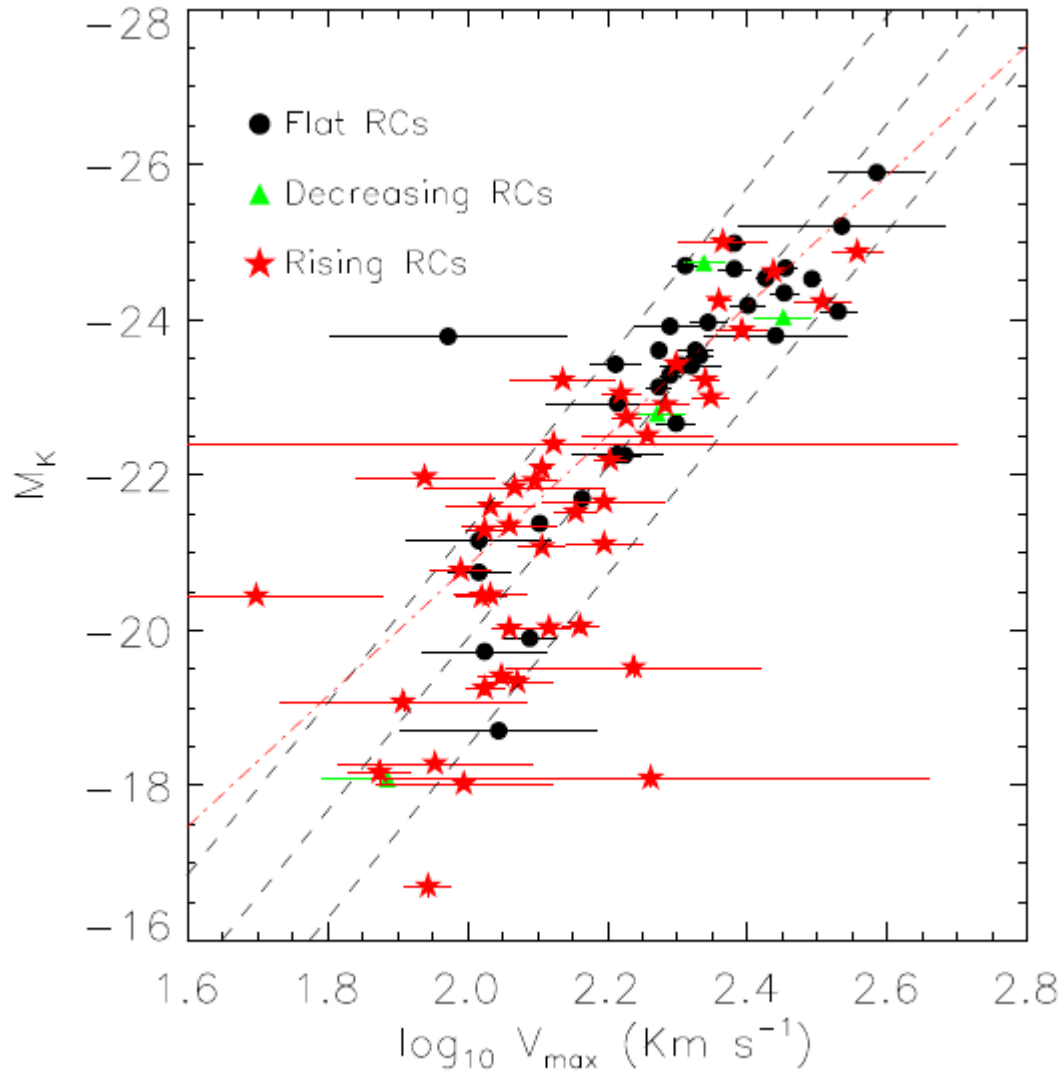


# Matière sombre dans les dlrrs

- Le halo de matière sombre domine à tous rayons
- Il y a même plus de matière lumineuse sous forme de gaz que sous forme d'étoiles
- 90% de la masse est sous forme de matière sombre



# Relation de Tully-Fisher



Lien entre la magnitude et la vitesse de rotation des spirales

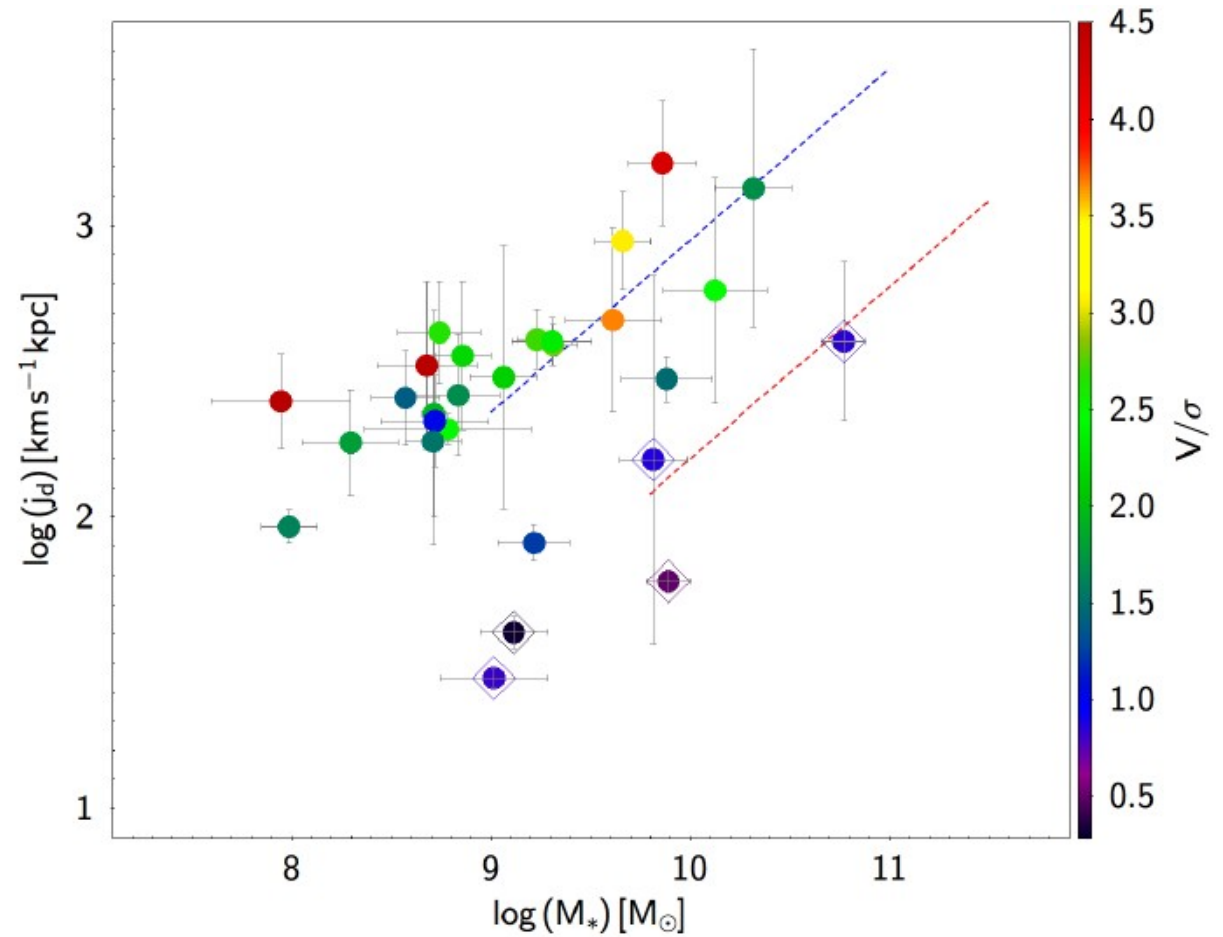
Utilisée pour

- déterminer la distance des galaxies
- étudier l'évolution du contenu en baryons en fonction du temps

Torres-Flores et al. 2011

# Moment angulaire

Moment angulaire  
spécifique :  
 $j = 2 \times V \times R$



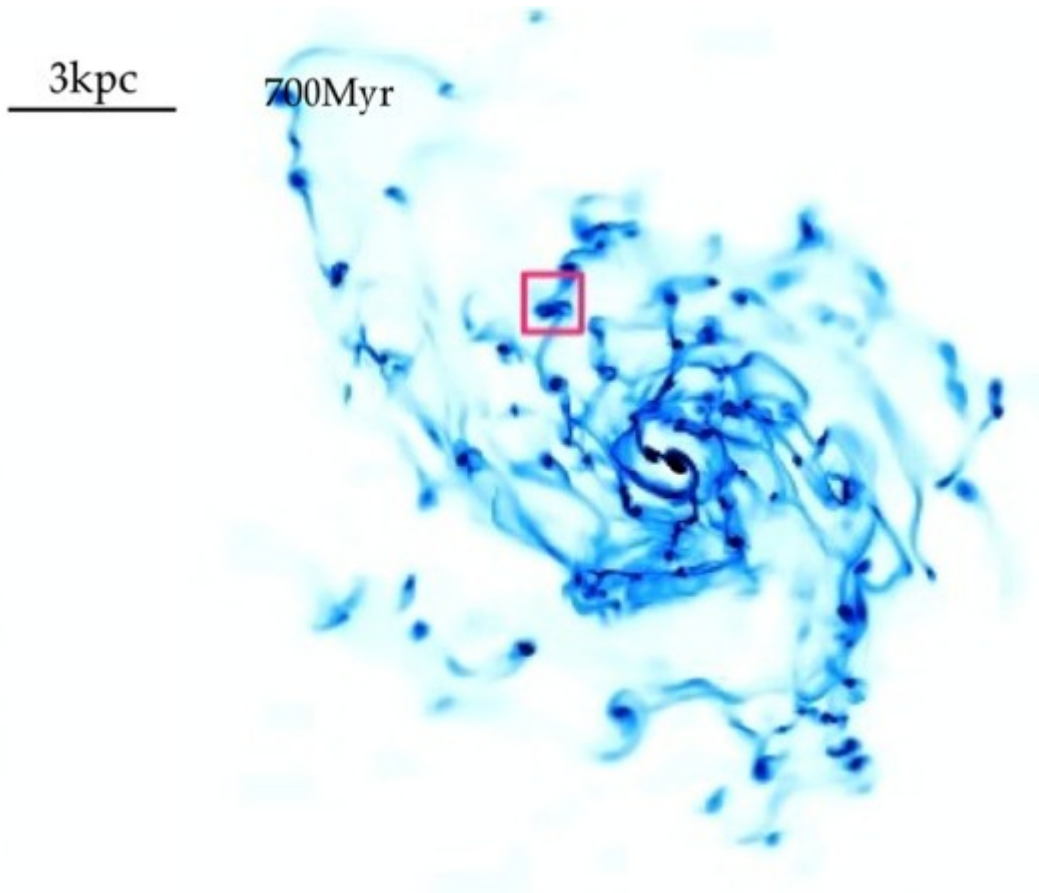
Contini et al. 2016 ( $z \sim 0.7$ )

# 4) Etudes dynamiques actuelles et futures

- Futur : grand décalage spectral
  - Evolution de la relation de Tully Fisher
  - Evolution du moment angulaire
  - Dispersion de vitesses
  - Modèles de masse/distribution de la matière sombre (pas encore possible)
  - Etudes du plan fondamental (pas encore possible)
  - Présence de clumps massifs → auto-gravitants ? (pas encore possible)



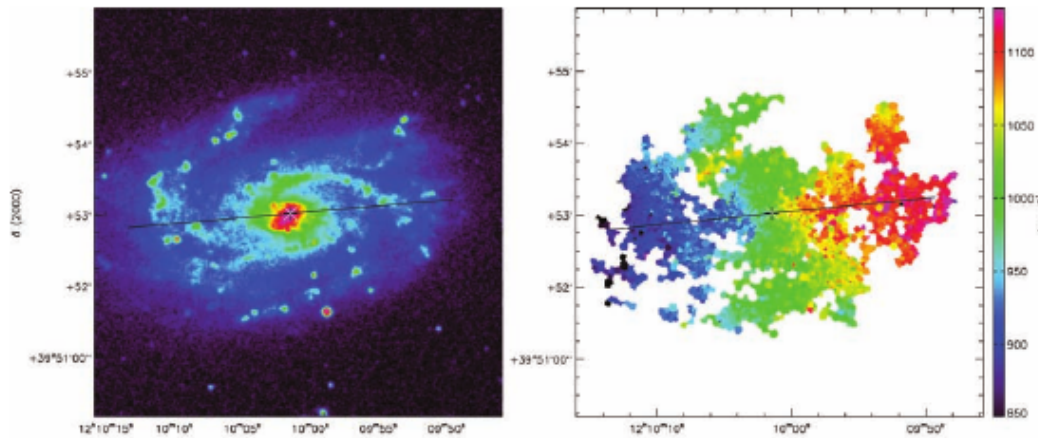
# Cas des clumps



- Simulation hydro-dynamique (Bournaud et al. 2014)
- Densité de colonne du gaz
- Nombreux clumps dans les galaxies avec beaucoup de gaz (grand  $z$ )
- Les clumps sont massifs et non résolus à grand  $z$

# Difficultés grand décalage spectral

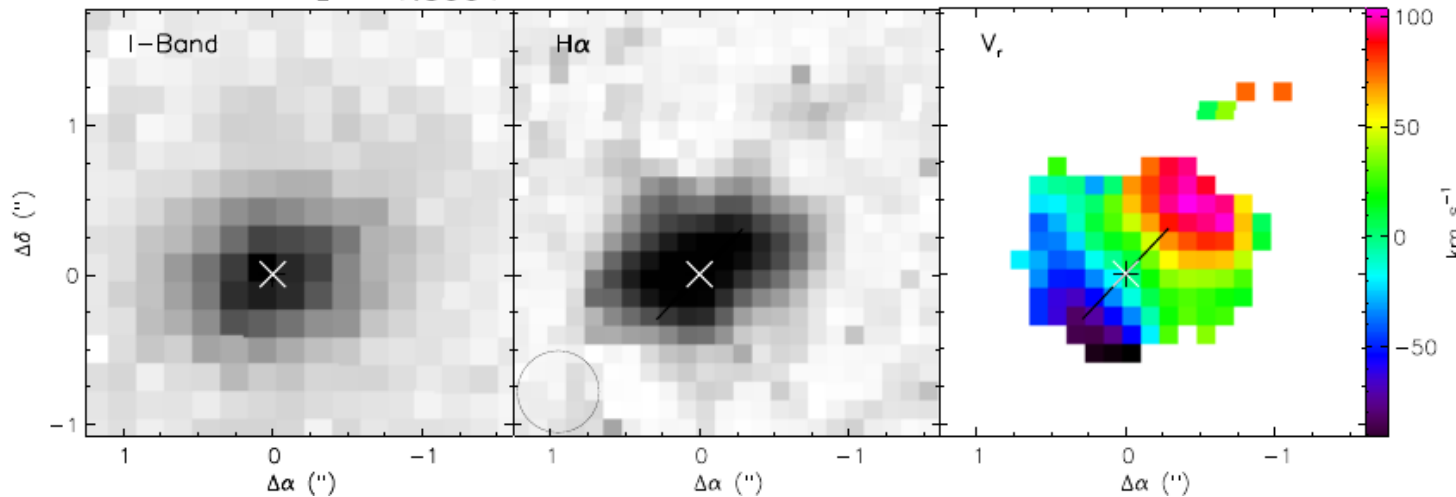
- Diminution de la taille angulaire des sources en  $1/d_a$ 
  - $z=1.7$  :  $1'' \sim 8$  kpc
    - besoin d'augmenter la résolution spatiale



$z \sim 0$

Epinat et al. 2008

WDS020106882  $z = 1.3991$



Epinat et al. 2012

# Difficultés grand décalage spectral

- Diminution de la taille angulaire des sources en  $1/d_a$ 
    - $z=1.7$  :  $1'' \sim 8$  kpc  
→ besoin d'augmenter la résolution spatiale
  - Diminution cosmologique de la brillance de surface en  $(1+z)^{-4}$   
→ besoin d'augmenter la sensibilité (surface collectrice et/ou temps d'exposition)
  - Raies décalées dans le rouge → besoin d'infra-rouge
- Futurs télescopes plus grands :
- résolution spatiale en  $\lambda/D$  (diamètre)
  - surface collectrice augmente en  $D^2$ 
    - ELT :  $\sim 40$  m de diamètre, visible et IR + optique adaptative
    - SKA : plusieurs kilomètres, fréquences radio (cm)