

# **ASTROPHYSIQUE**

## **14 – LA VOIE LACTÉE ET LES GALAXIES SPIRALES**

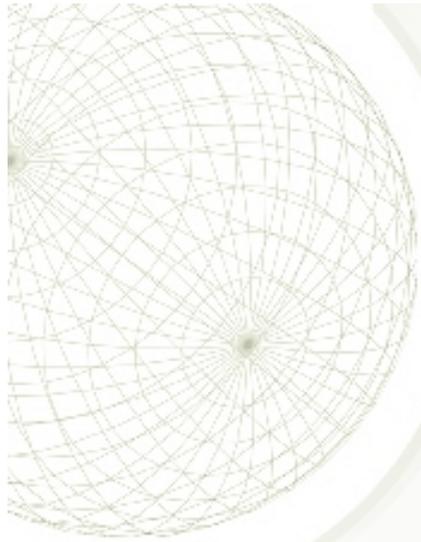


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

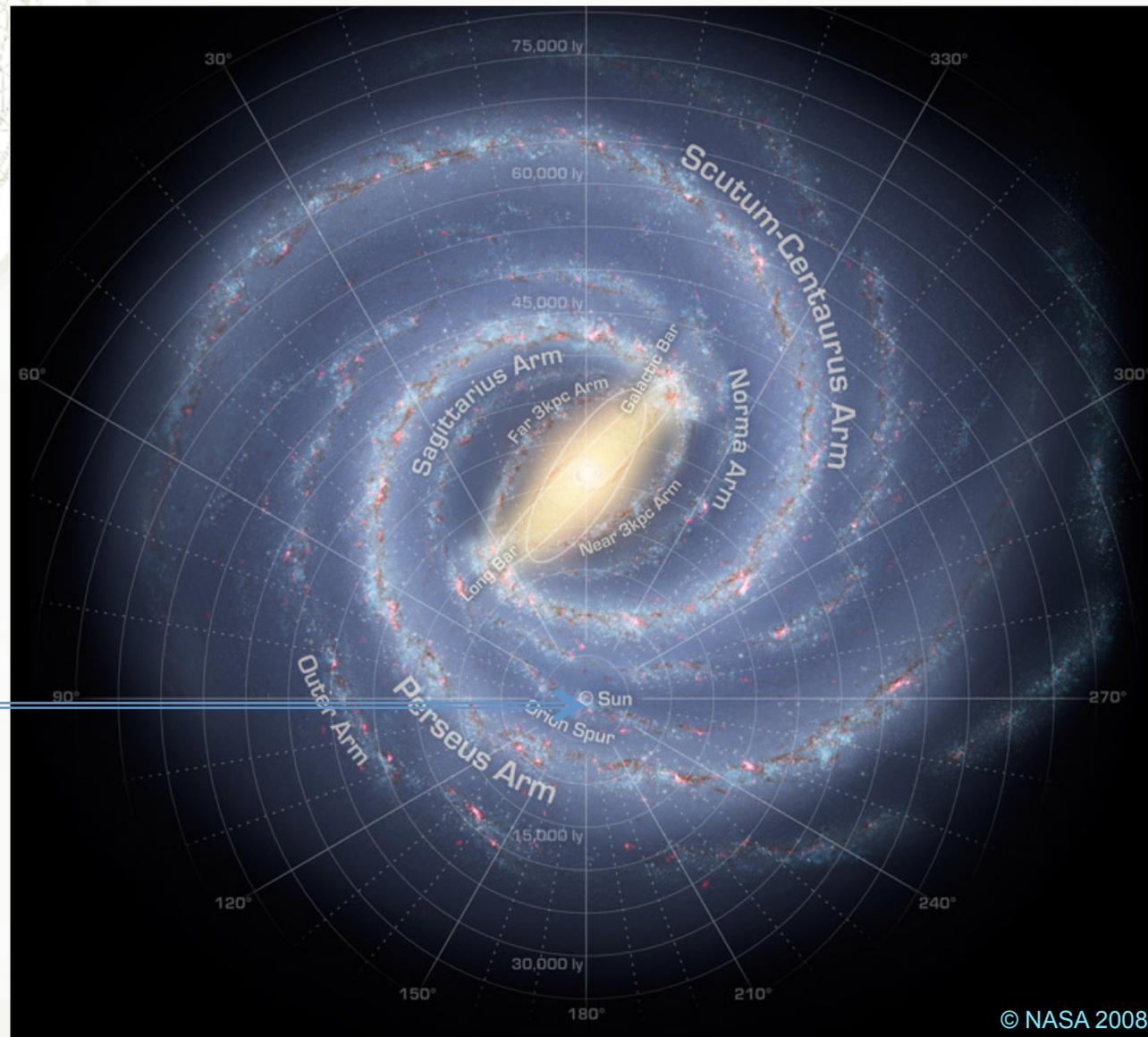
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





# LA VOIE LACTÉE

# LA VOIE LACTÉE



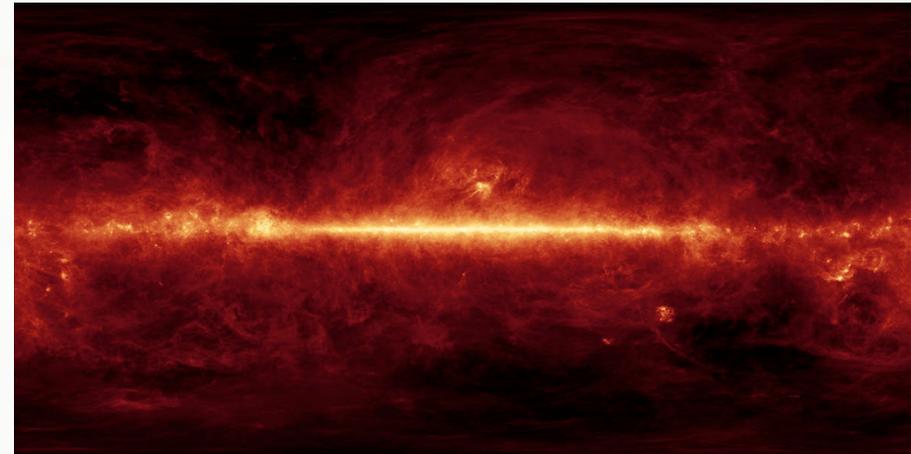
Le Soleil

# OBSERVATIONS TRÈS FACILES... ET TRÈS DIFFICILES !

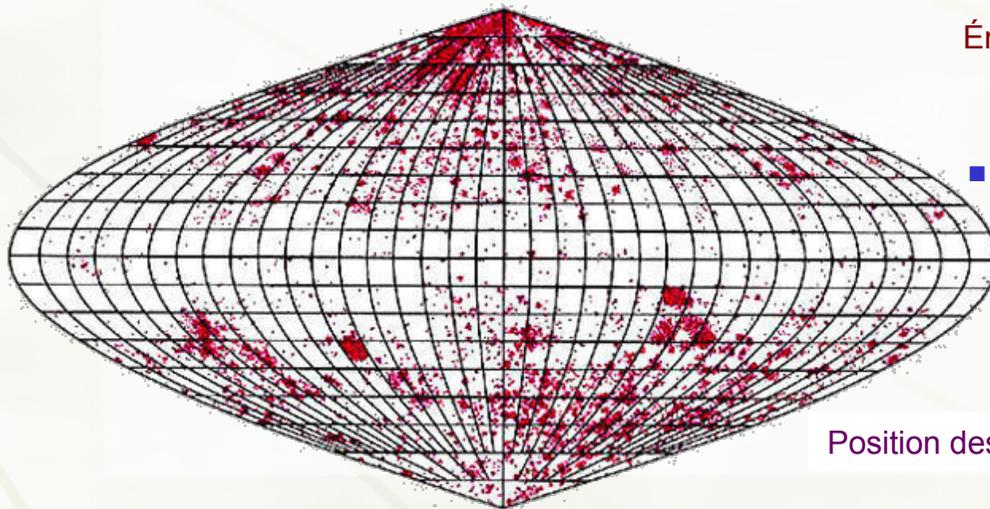
- Un disque très mince, vu par la tranche



- Une absorption considérable dans le plan du disque ( $\sim 1$  mag/kpc)



Émission infrarouge de la poussière à 100  $\mu\text{m}$  ©Cobe-Dirbe



Position des objets extra-galactiques

- $\Rightarrow$  « zone d'évitement » (*zone of avoidance*)

# DISQUE(S)

## ■ « Disque mince »

- Diamètre ~ 50 kpc
- Épaisseur ~ 500 pc (1/100 diamètre)
- Distance CG = 8,5 kpc (IAU)
- **Diminution exponentielle de la densité d'étoiles**
  - du centre vers la périphérie
  - et perpendiculairement au disque

$$n(r,z) = n_0 e^{-r/r_0} e^{-z/h}$$

- avec  $r_0 \approx 3,5$  kpc et  $h \approx 300$  pc

## ■ Gaz : distribution similaire, mais dans un disque plus mince ( $h \sim 160$ pc)

- Masse de gaz  $\approx 5 \times 10^9 M_\odot$
- Masse de poussières  $\approx 10 \times 10^6 M_\odot$

## ■ « Disque épais »

- Échelle de décroissance  $h \approx 1400$  pc
- Métallicité bien plus faible que dans le disque mince
- $\Rightarrow$  étoiles plus âgées
- $\Rightarrow$  épaissement dynamique avec le temps

## ■ Luminosité des étoiles

- $L_B \approx 18 \times 10^9 L_\odot$

## ■ Masse totale

- $M \approx 60 \times 10^9 M_\odot$
- $\Rightarrow M/L_B \approx 3$
- Étoiles SP :  $L/L_\odot \approx (M/M_\odot)^3$
- $\Rightarrow \langle M \rangle \approx 0,6 M_\odot$

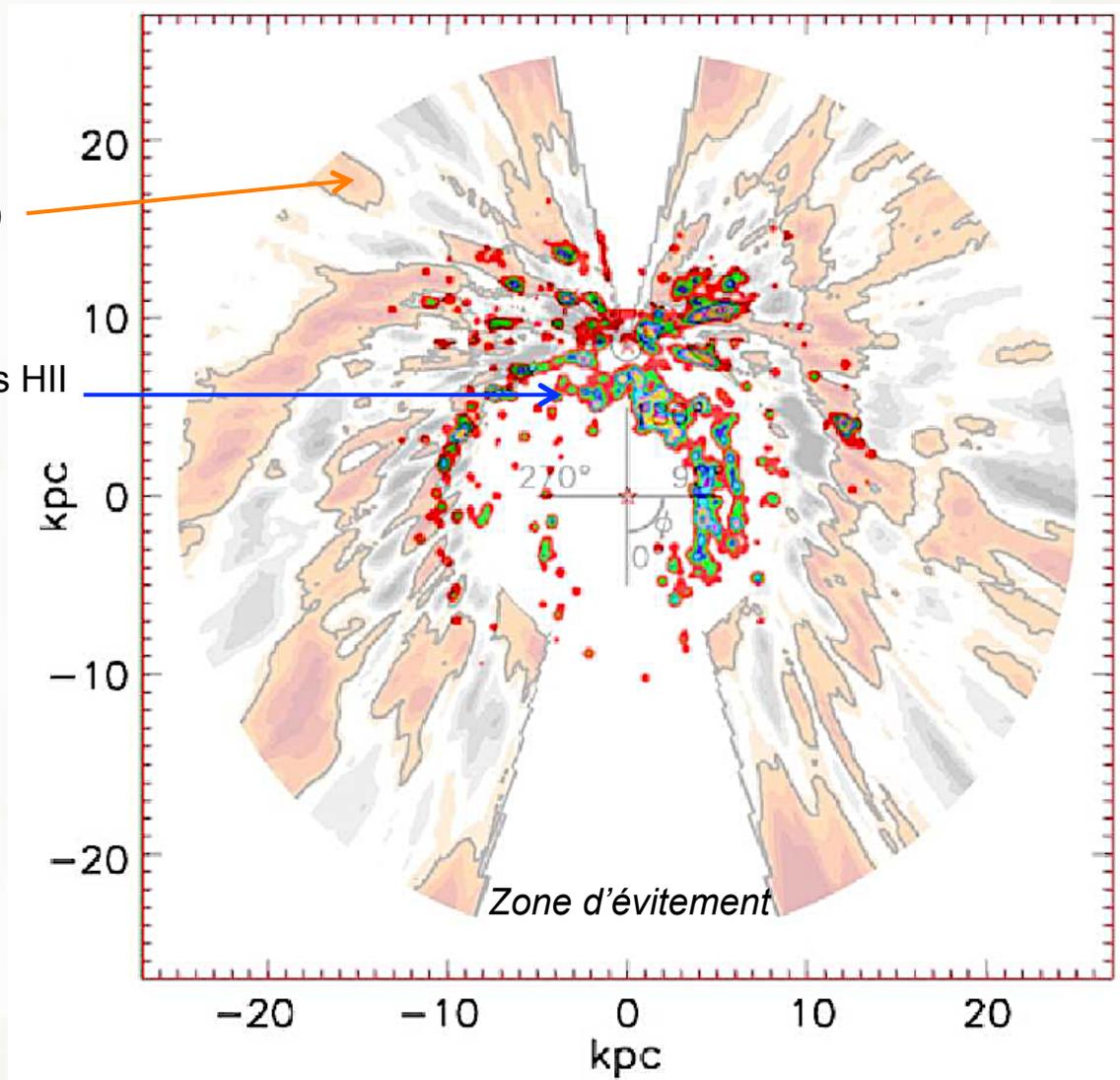
# GAZ : HYDROGÈNE NEUTRE ET IONISÉ, HÉLIUM



Régions HI (Levine et al. 2006)

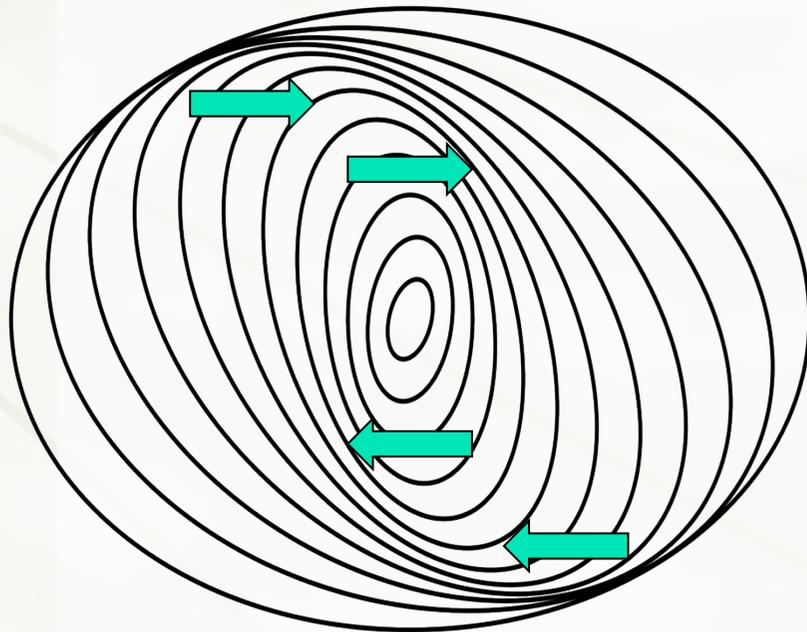
Nuages moléculaires et régions HII  
(Hou et al. 2009)

Masse totale de gaz  $M \approx 5 \times 10^9 M_{\odot}$

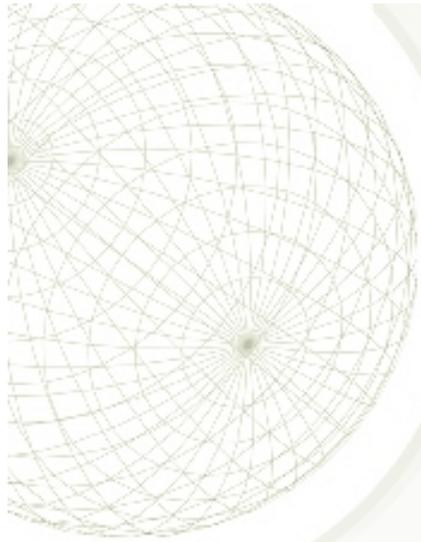


# BRAS SPIRAUX

- Rotation différentielle
  - la Galaxie ne tourne pas comme un corps solide
  - l'extérieur « traîne » % intérieur
  - ⇒ enroulement des bras



- Mais
  - une rotation dure 100 à 300 millions d'années
  - la Galaxie est vieille de 14 milliards d'années
  - ⇒ les bras spiraux ne sont pas permanents
- ⇒ Ondes de densité (Bertil Lindblad, 1925)
  - une onde de densité tourne beaucoup plus lentement que le disque et provoque une formation d'étoiles sur son passage
  - théorie rendue plus quantitative par C.C. Lin et F. Shu en 1964
- Formation d'étoiles chaudes et brillantes
  - ⇒ matérialisent la position de l'onde de densité lors de leur formation
  - ⇒ disparaissent rapidement après le passage de l'onde ⇒ bras marqués



# **CINÉMATIQUE ET DYNAMIQUE**

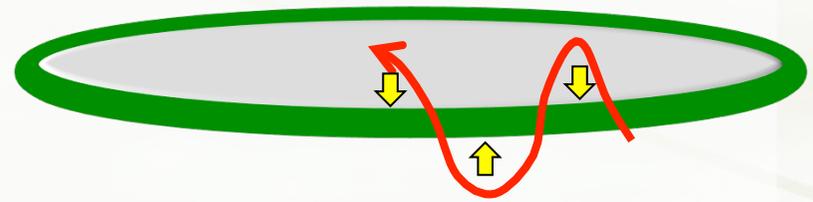
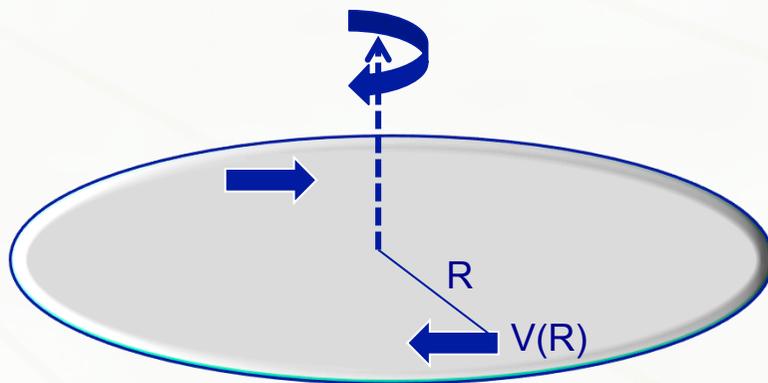
# LES MOUVEMENTS DES ÉTOILES (ET DU GAZ)

- Combinaison de 3 mouvements

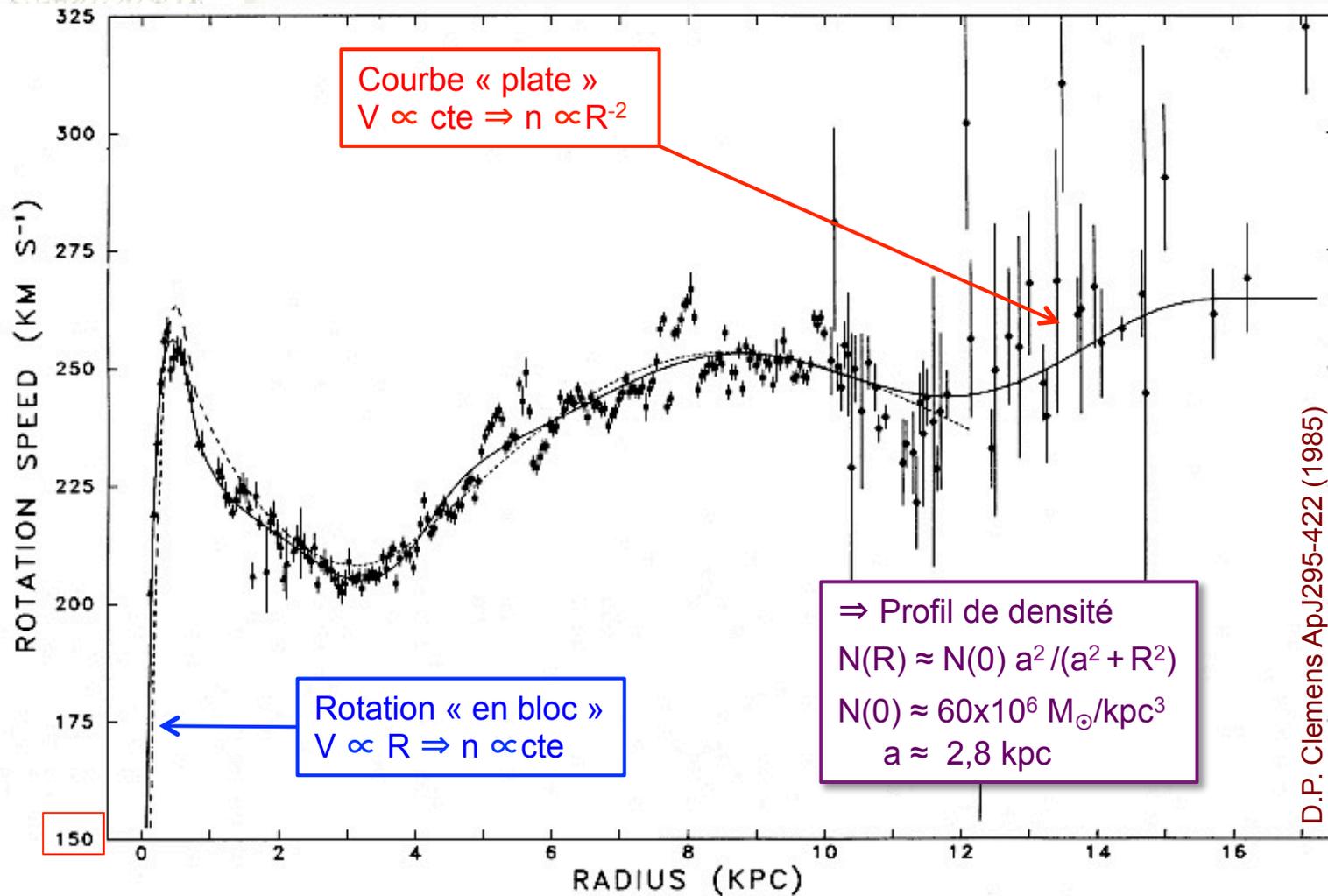
1. mouvement de rotation d'ensemble  
 $V(R) \approx 200-250 \text{ km/s}$
2. oscillations perpendiculaires au plan du disque  
 $V(z) \approx 20-50 \text{ km/s}$
3. vitesses particulières  $V \approx 20-50 \text{ km/s}$

← ⇒ Masse *totale* à l'intérieur de l'orbite

← ⇒ Masse *locale* de rappel

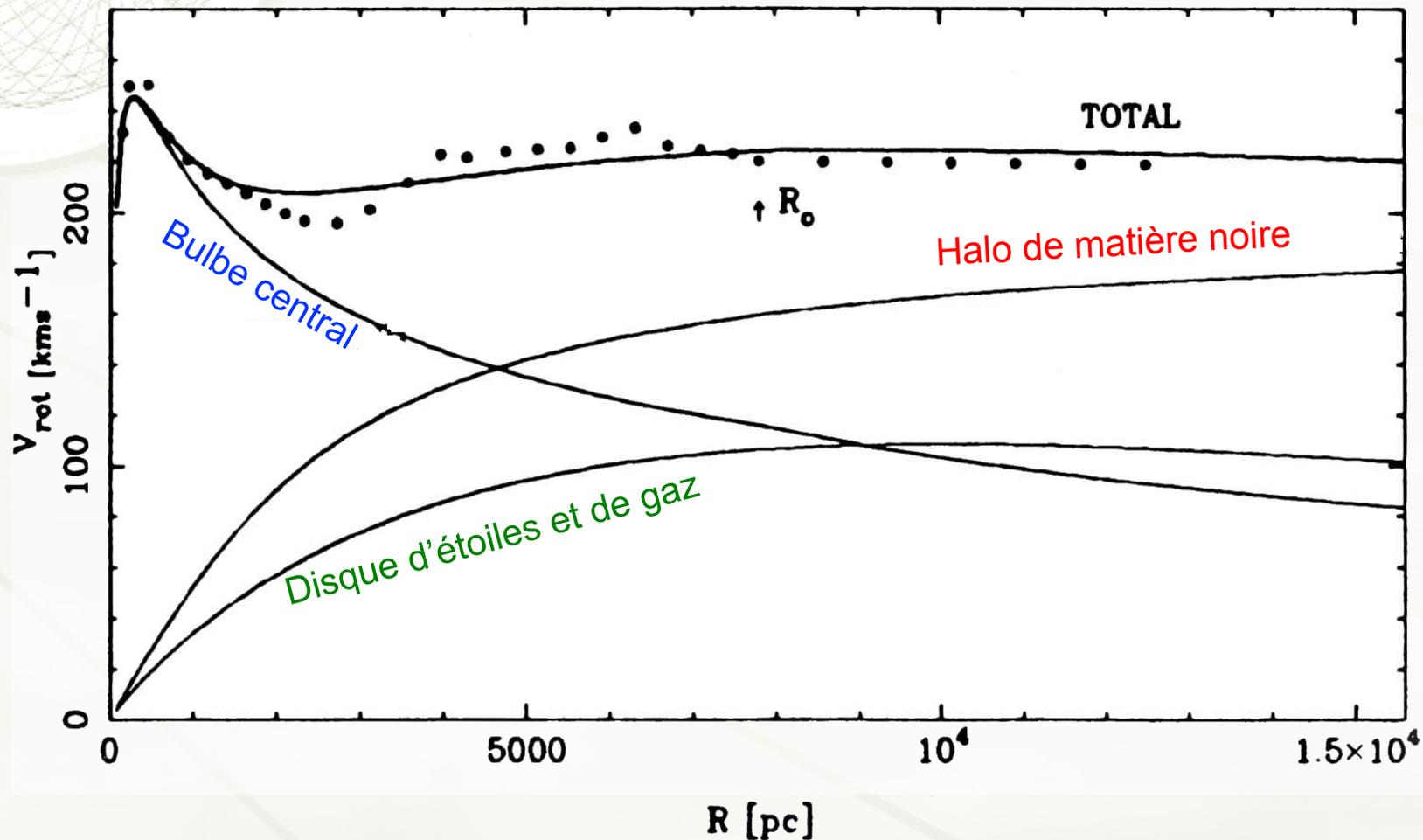


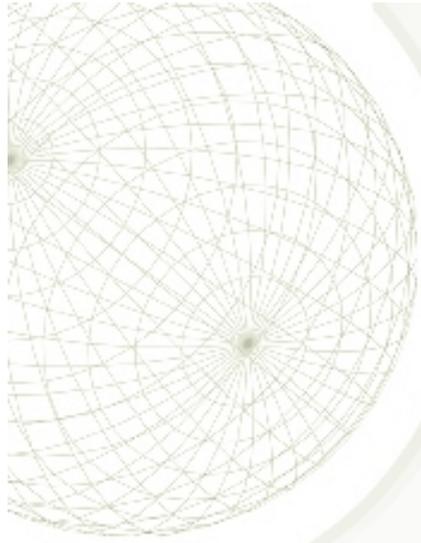
# COURBE DE ROTATION DE LA VOIE LACTÉE



# UN PROBLÈME DE POIDS

- Il est impossible de reproduire la courbe de rotation à partir des contributions du **disque** et du **bulbe** : un **halo massif** est indispensable

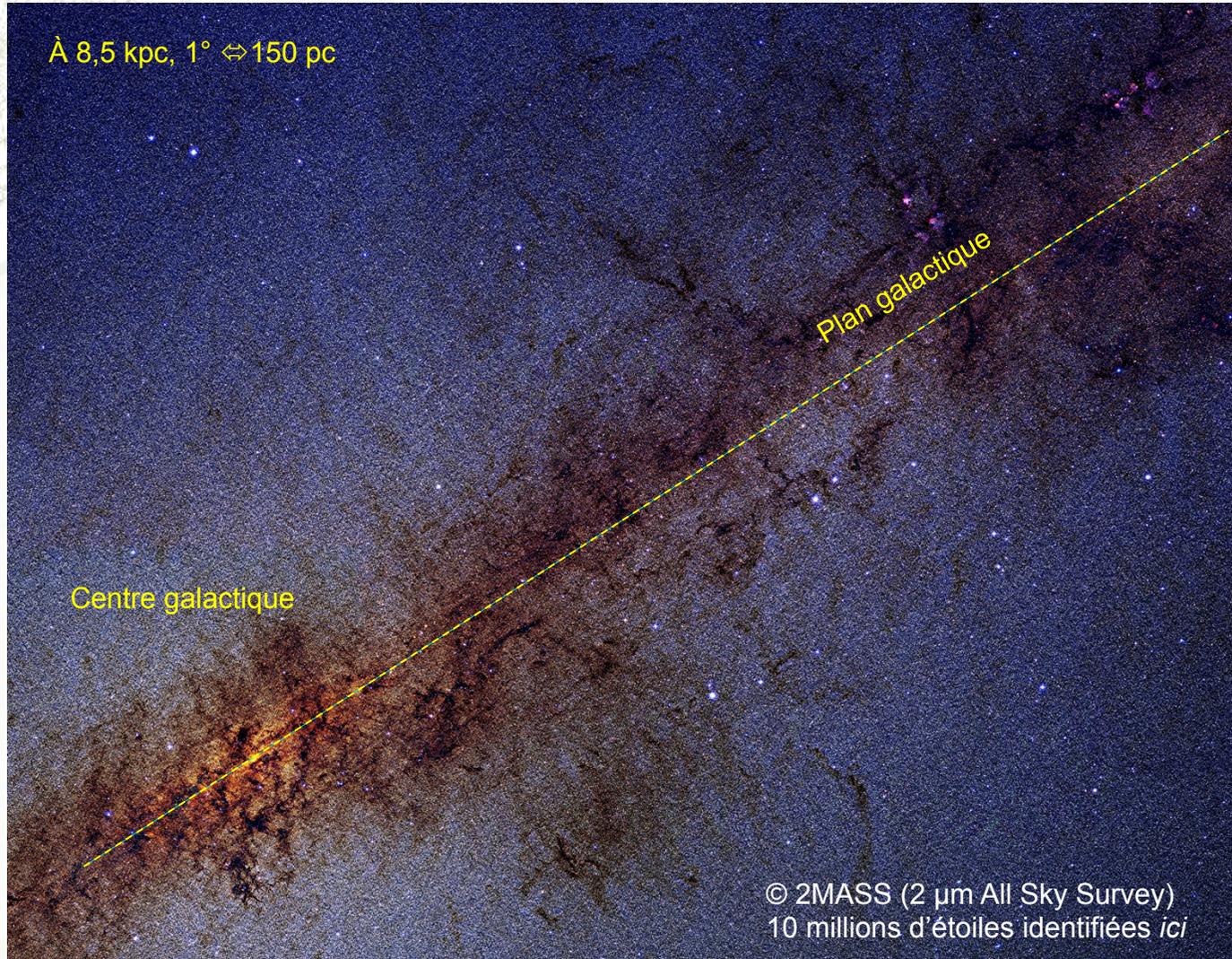




# LE CENTRE GALACTIQUE

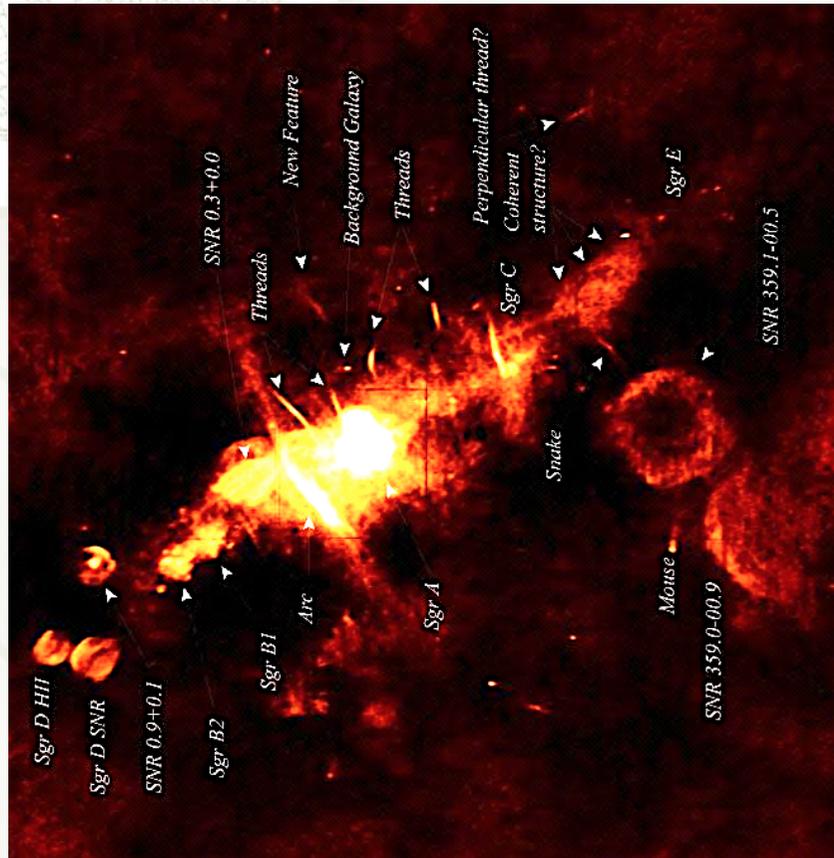
# LE CENTRE GALACTIQUE EN INFRAROUGE (10°x8°)

← 1500 pc →



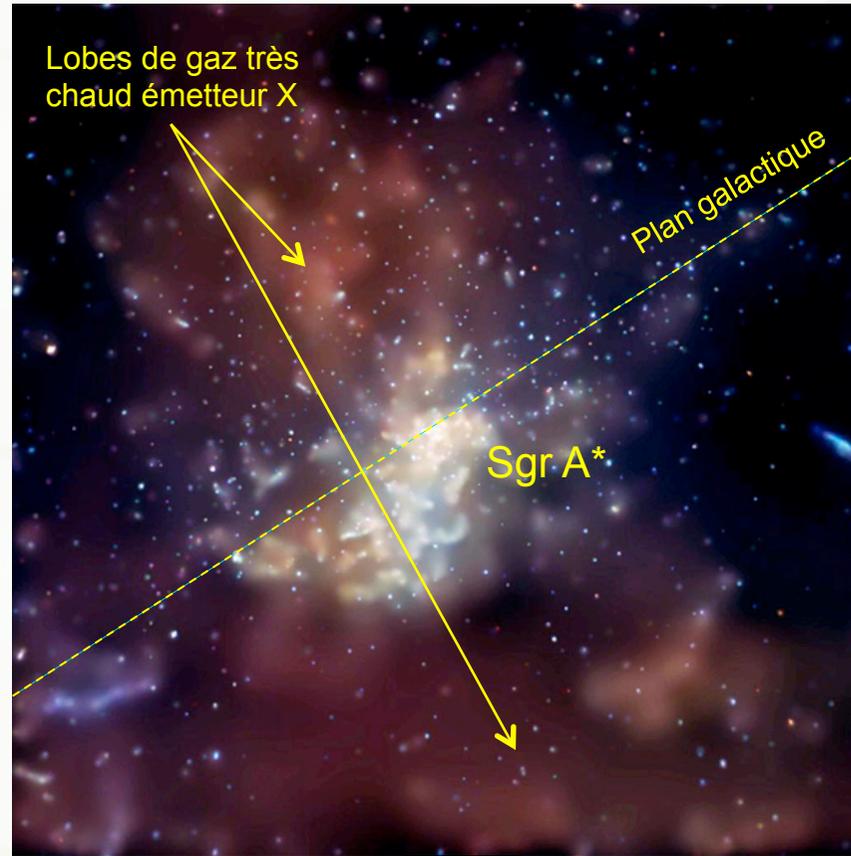
# LES RADIOSOURCES DU SAGITTAIRE

- En radio (VLA) à 90 cm de longueur d'onde



500 pc

- En rayons X (satellite Chandra)



20 pc

# UN TROU NOIR DE $2,6 (\pm 0,2) \times 10^6 M_{\odot}$

NACO May 2002

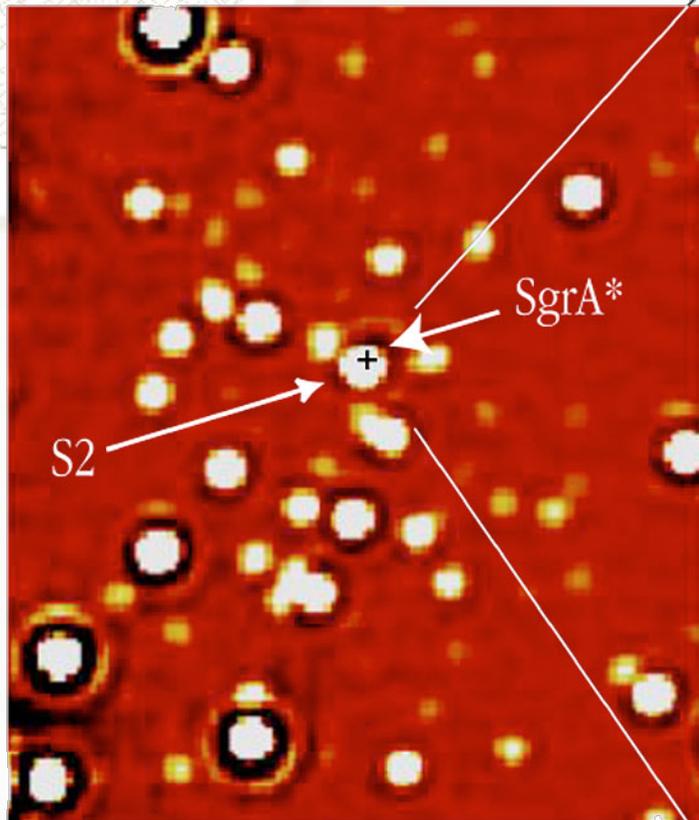
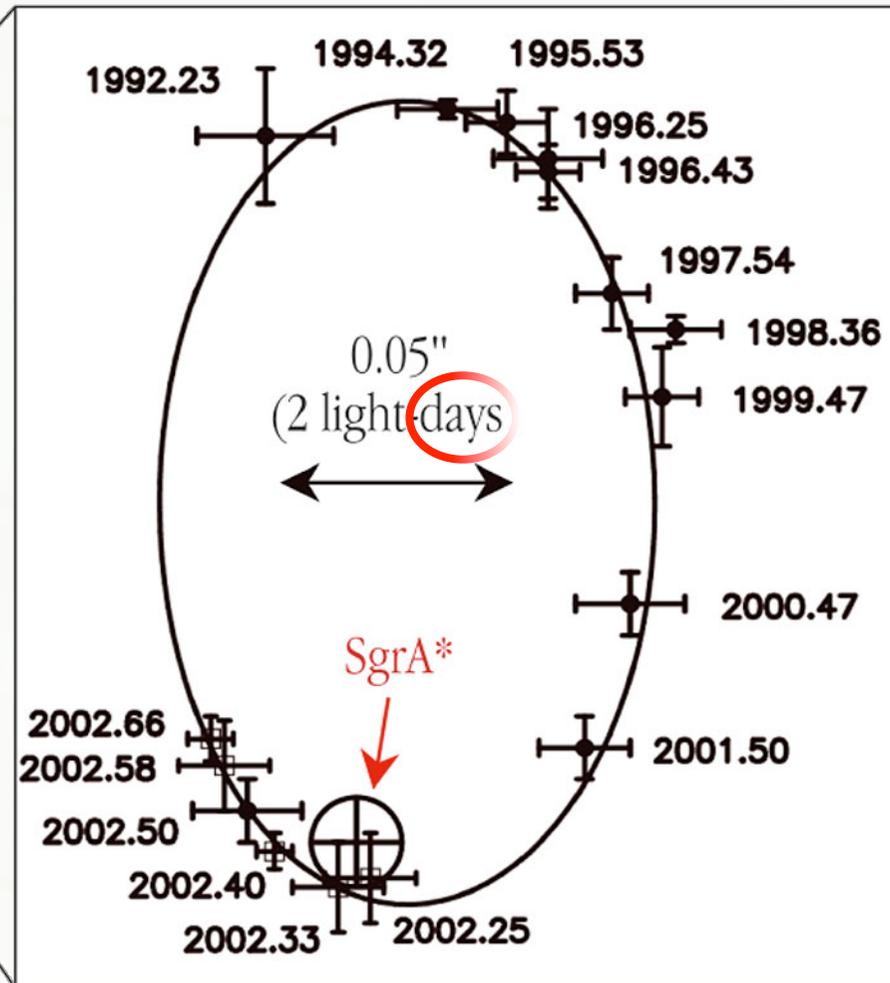
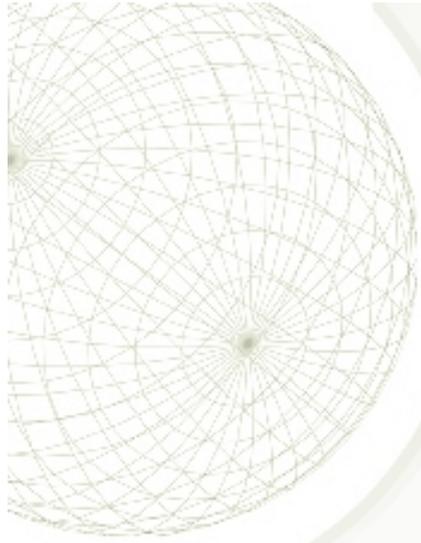


Image prise au VLT avec la caméra infrarouge NACO ( $\lambda = 2,1 \mu\text{m}$ )

S2 Orbit around SgrA\*

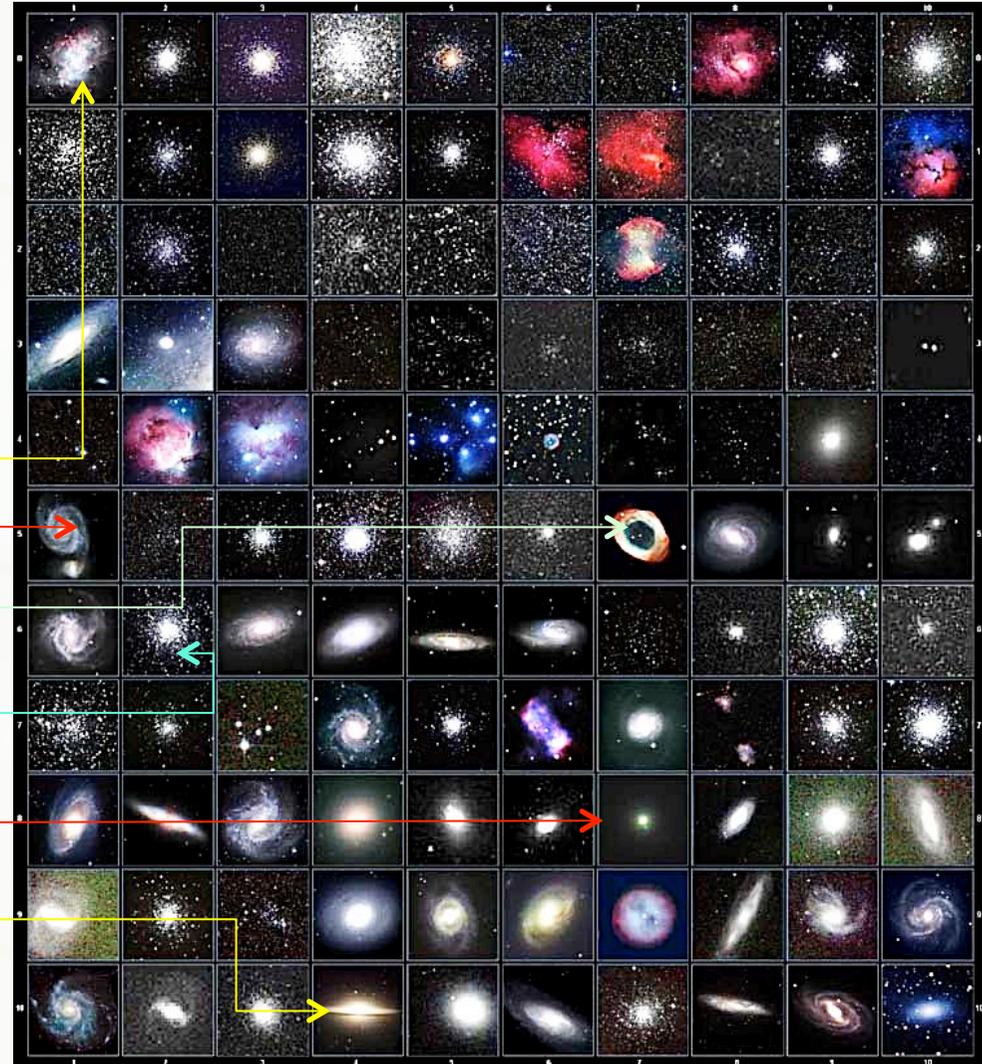




# LE ROYAUMES DES NÉBULEUSES

# LE CATALOGUE DE MESSIER

- 1774 : Charles Messier commence un catalogue des objets diffus qui ressemblent aux comètes (pour éviter la confusion)
- 1784 : le catalogue atteint 103 objets, de nature très diverse :
  - M1 : nébuleuse du Crabe (reste de la supernova de 1054, pulsar)
  - M51 : galaxie spirale du Tourbillon (*Whirlpool*)
  - M 57 : nébuleuse planétaire de la Lyre
  - M62 : amas globulaire
  - M87 : galaxie elliptique au centre de l'amas de la Vierge
  - M104 : la galaxie spirale du Sombrero
- Aujourd'hui 110 objets

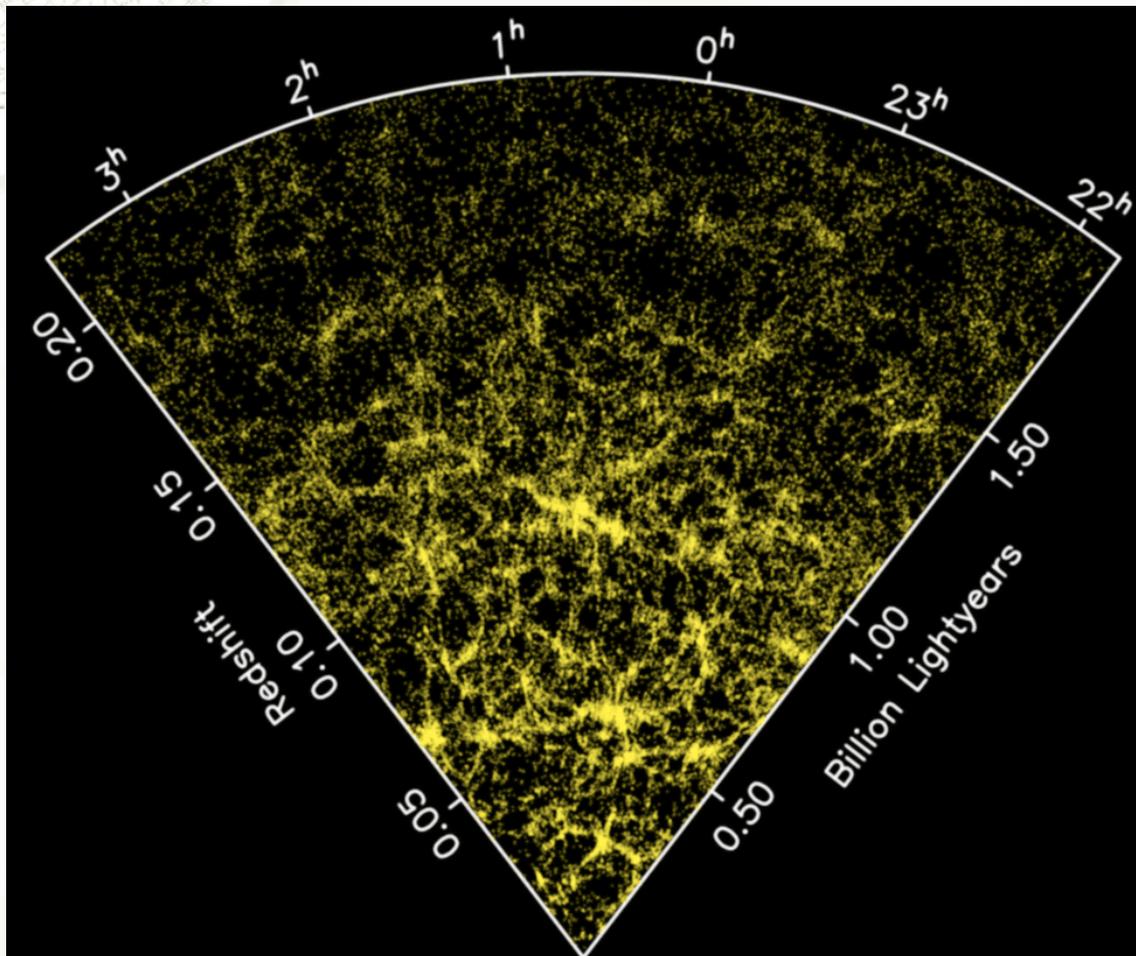


## MESSIER 51 (PAR LE HST)



# DISTRIBUTION SPATIALE DES GALAXIES

- Amas de galaxies
- Galaxies « de champ »



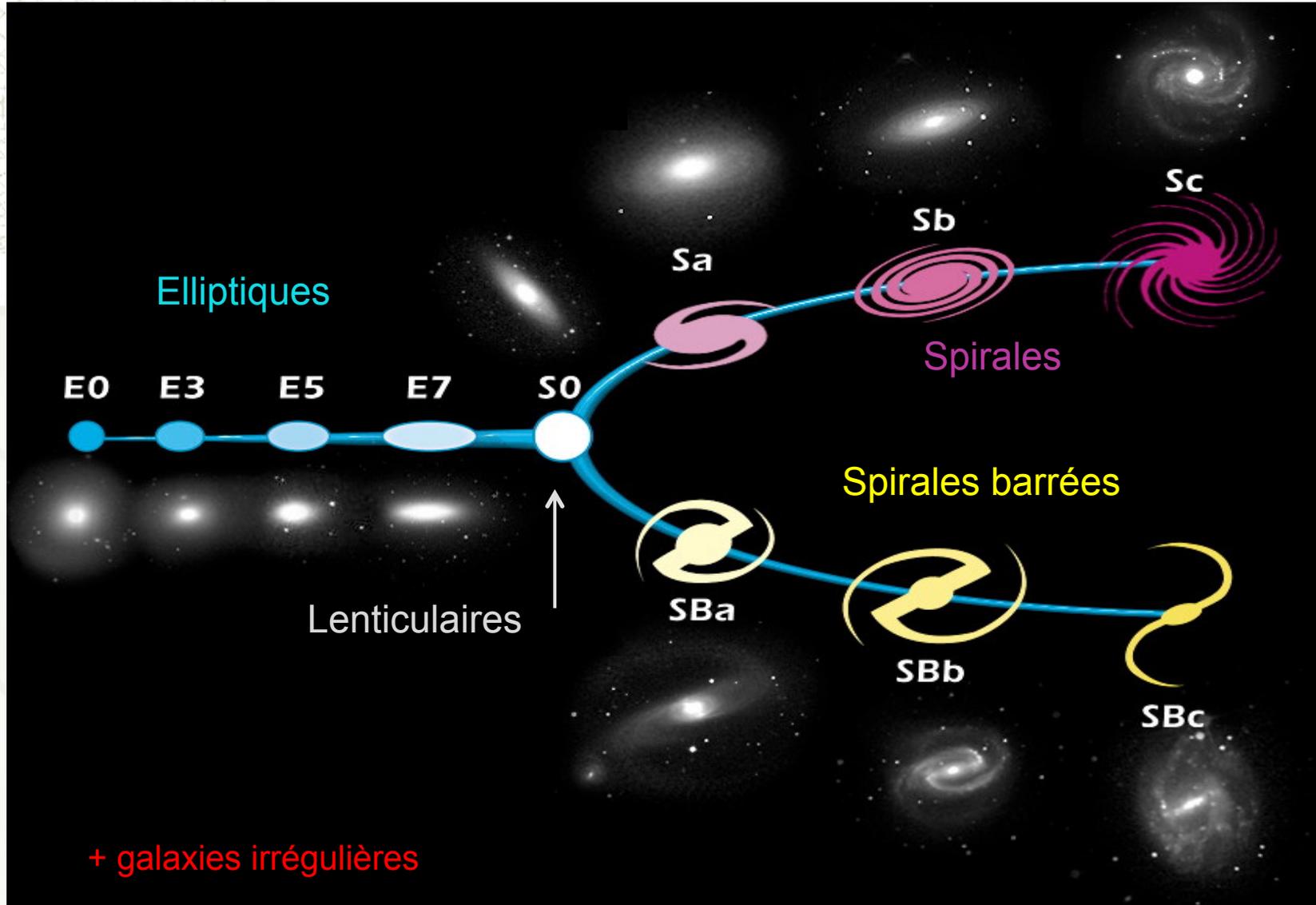
En gros :

- La moitié des galaxies se trouvent dans des amas
- 80% des galaxies « de champ » sont des spirales

2dF Galaxy Redshift Survey

- 1500 degrés carrés
- 221 000 galaxies  $z < 0,2$

# CLASSEMENT DES GALAXIES: LE DIAPASON DE HUBBLE

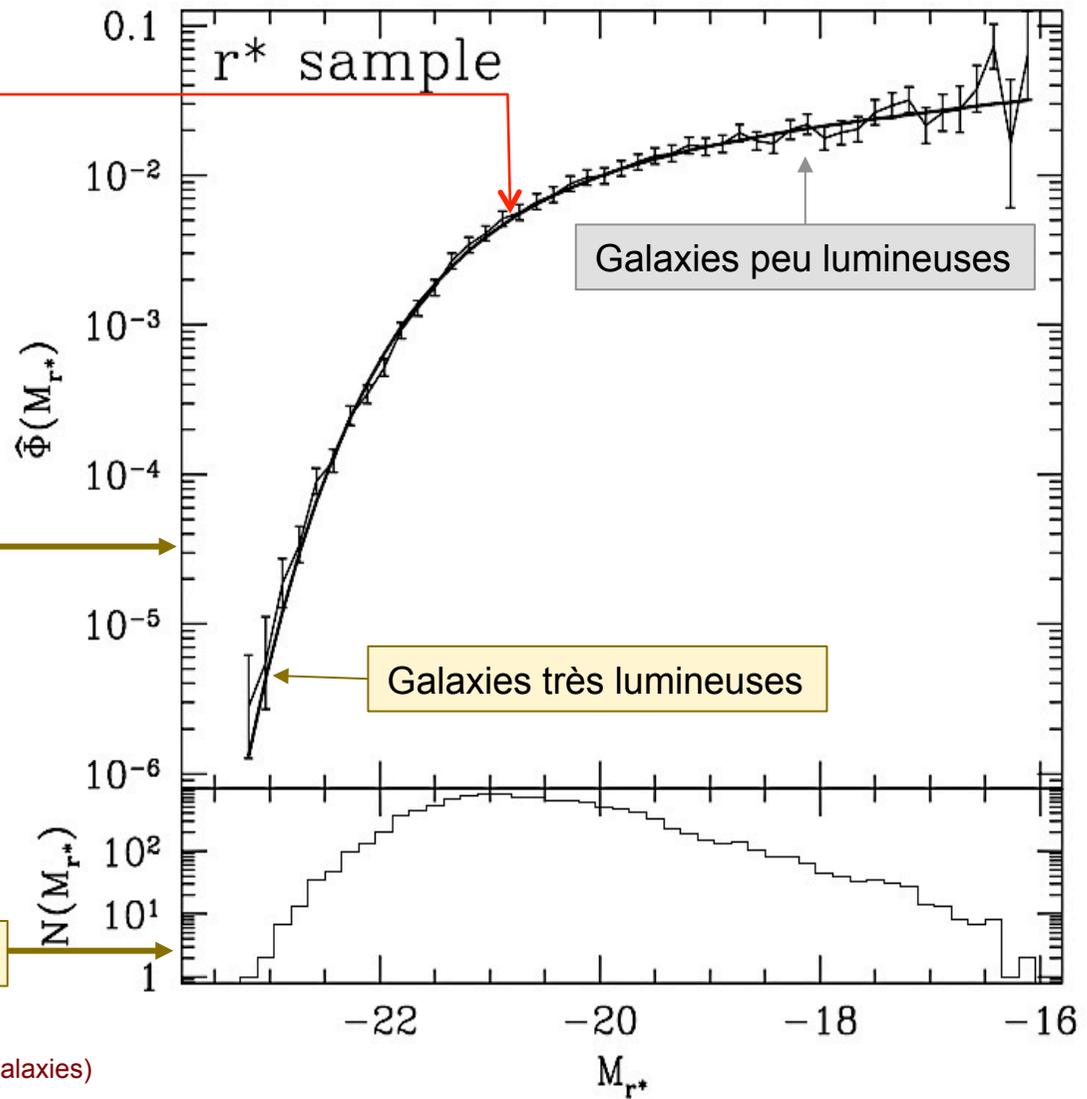


# LUMINOSITÉ DES GALAXIES

Galaxie  $L^* \approx 10^{10} L_{\odot}$

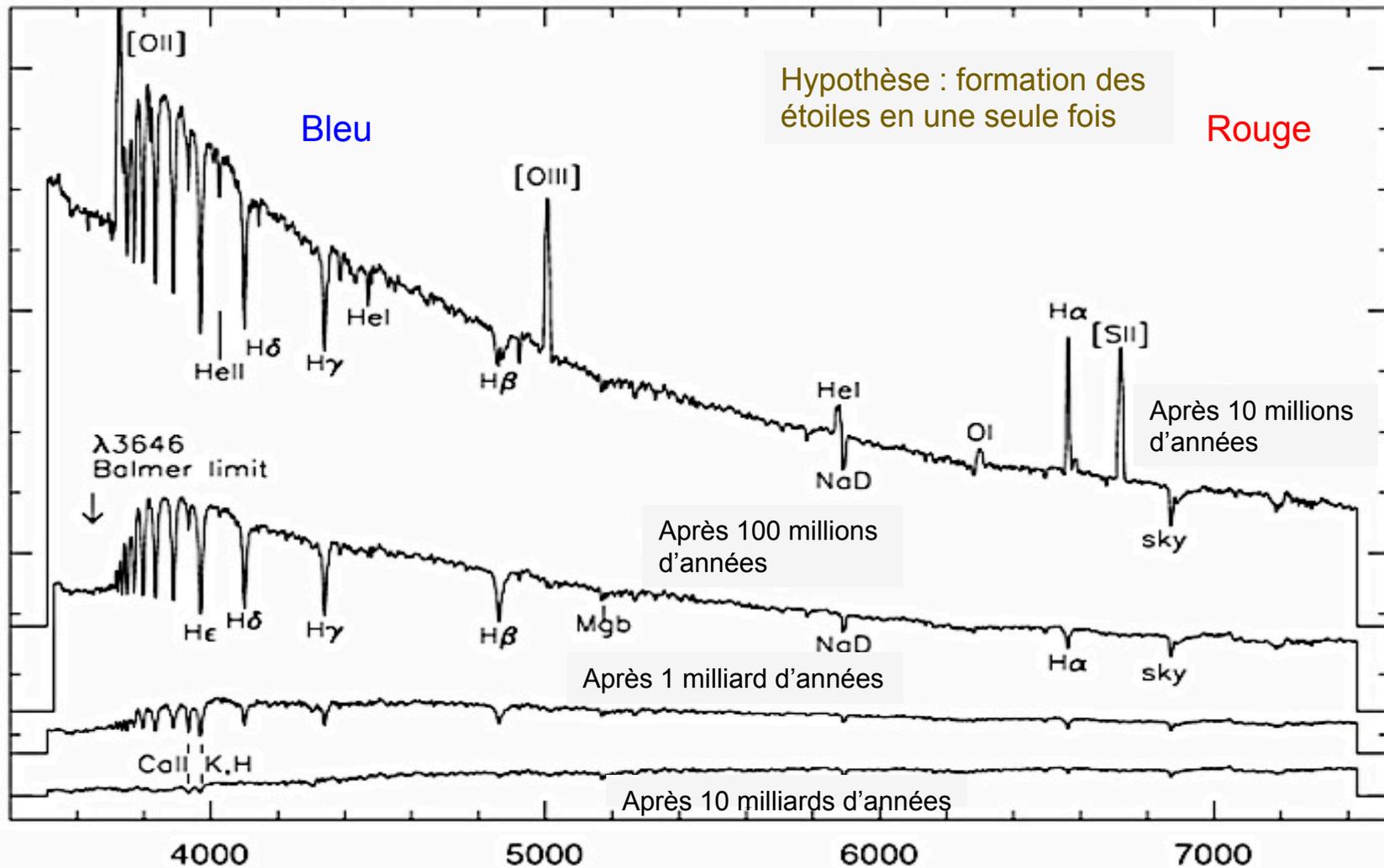
Nombre de galaxies par unité de volume et de luminosité

Nombre de galaxies de l'échantillon



Blanton et al. 2001(données du SDSS 11 275 galaxies)

# SPECTRE DES GALAXIES: UNE ÉVOLUTION AU FIL DU TEMPS

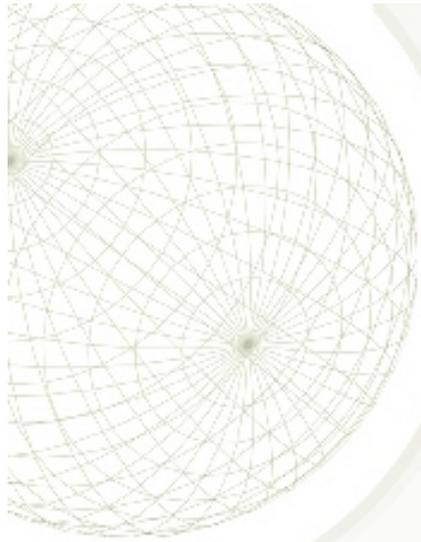


## POPULATIONS I, II (ET III ?)

- 1944 : Walter Baade profita du *black-out* à Los Angeles pour résoudre en étoiles le centre de M31 et les galaxies du Groupe Local
- Il découvrit des différences systématiques
  - dans les bras des spirales : étoiles bleues, jeunes et de forte métallicité  
⇒ Population I
  - dans le bulbe des spirales et dans les elliptiques : étoiles rouges, anciennes et de faible métallicité  
⇒ Population II
- **Spéculations actuelles sur l'existence d'une toute première génération d'étoiles, la Population III**

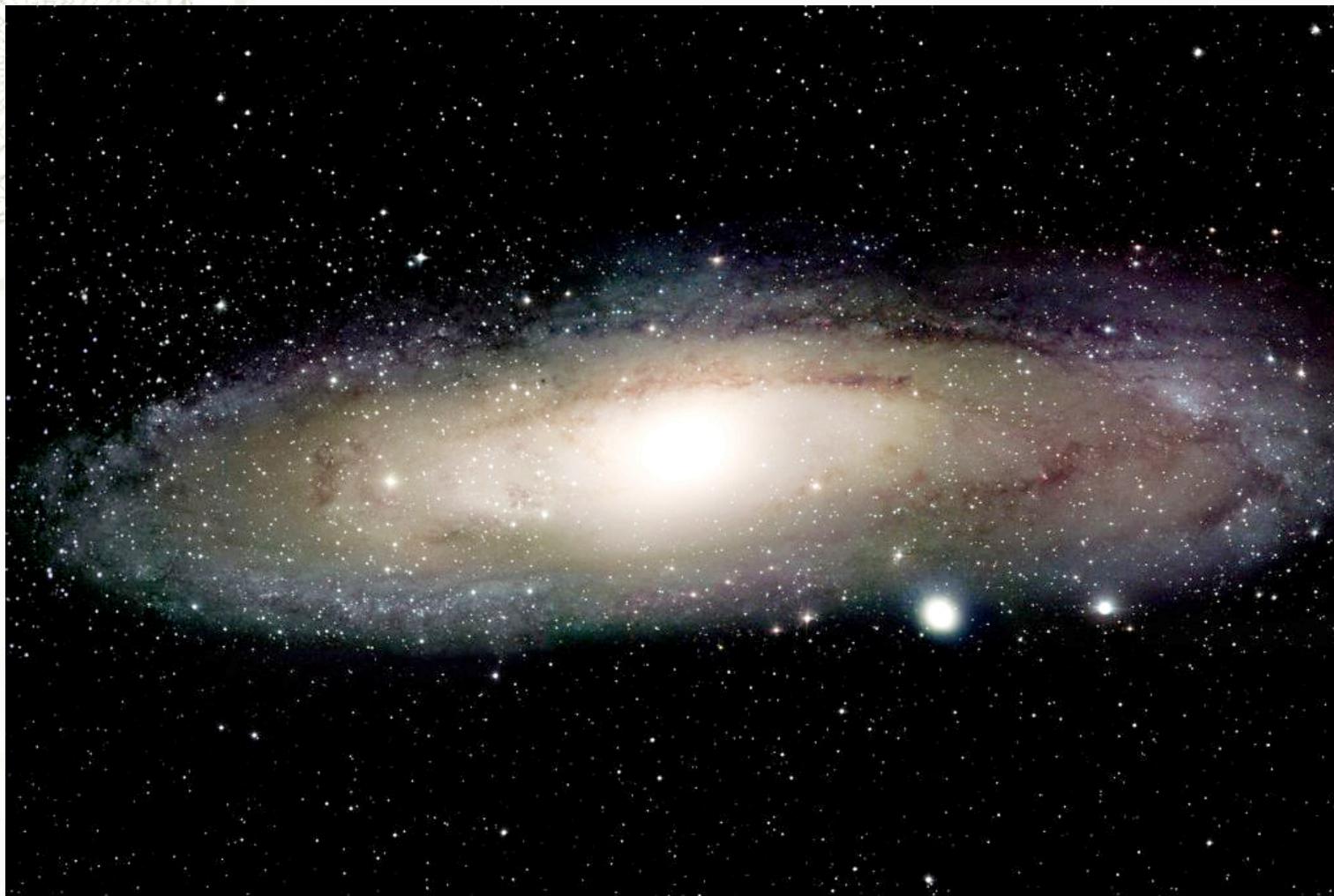


- En *première* approximation
- Elliptiques
  - formation d'étoiles rapide (bouffée initiale) consommant tout le gaz
  - ⇒ étoiles anciennes
  - ⇒ étoiles de faible métallicité
  - ⇒ étoiles rouges (naines et géantes)
- Spirales
  - formation continue d'étoiles
  - ⇒ présence d'étoiles jeunes
  - ⇒ étoiles de forte métallicité
  - ⇒ étoiles bleues



# **GALAXIES SPIRALES**

## LA GALAXIE M31 (NGC224) DANS ANDROMÈDE



## LA GALAXIE M31 EN ULTRAVIOLET



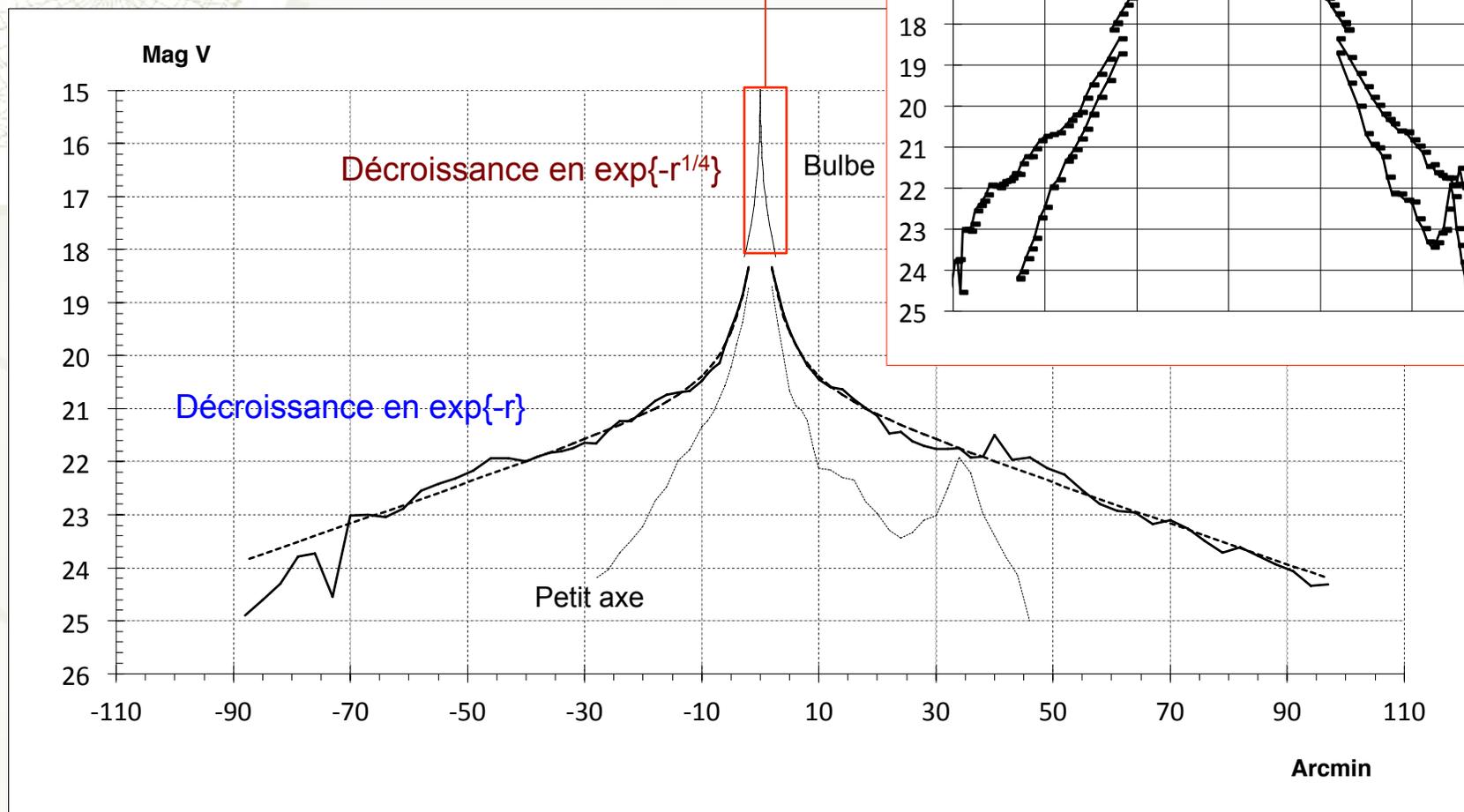
NASA / Wise

## LA GALAXIE M31 EN INFRAROUGE (24 $\mu\text{M}$ )



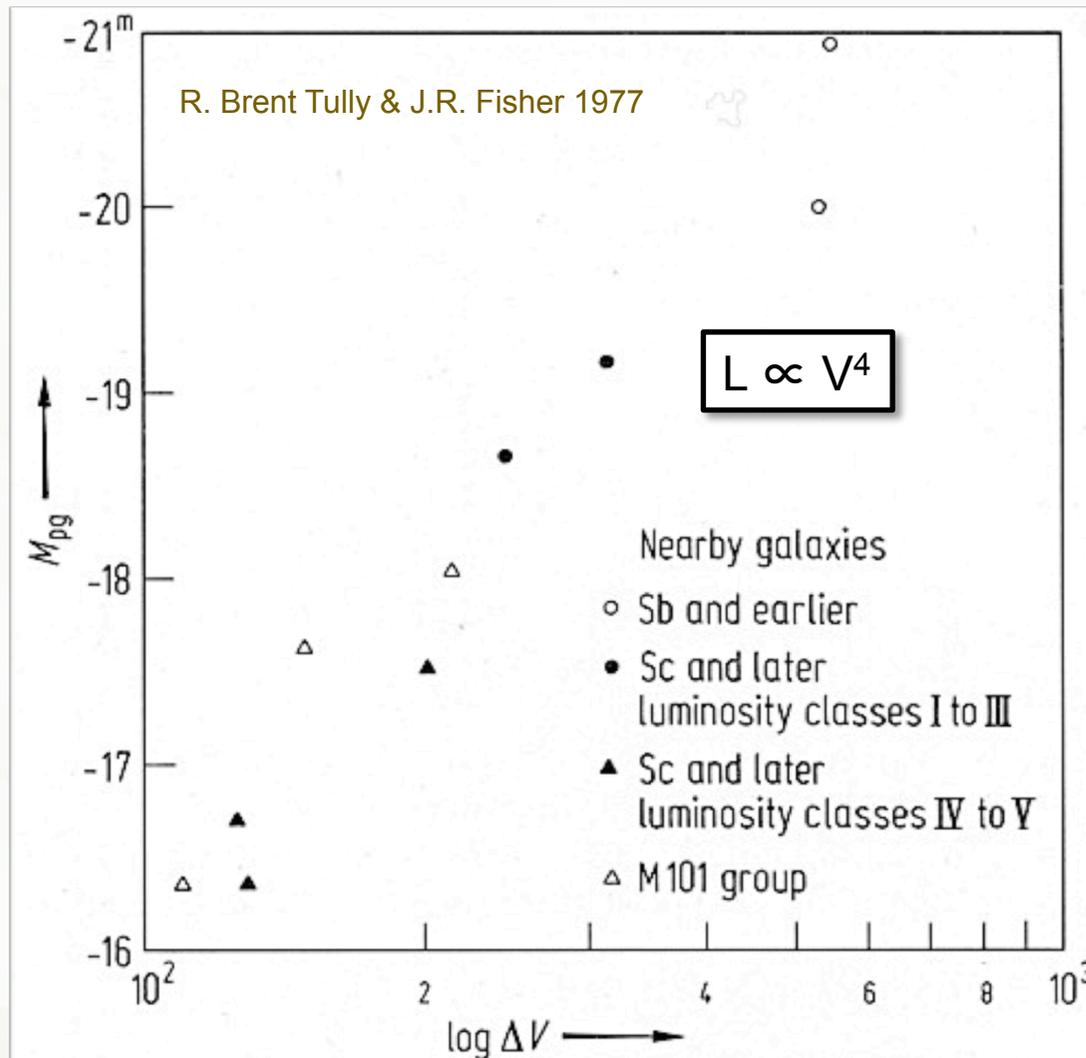
NASA / Spitzer

# PROFIL DE LUMINOSITÉ DE M31



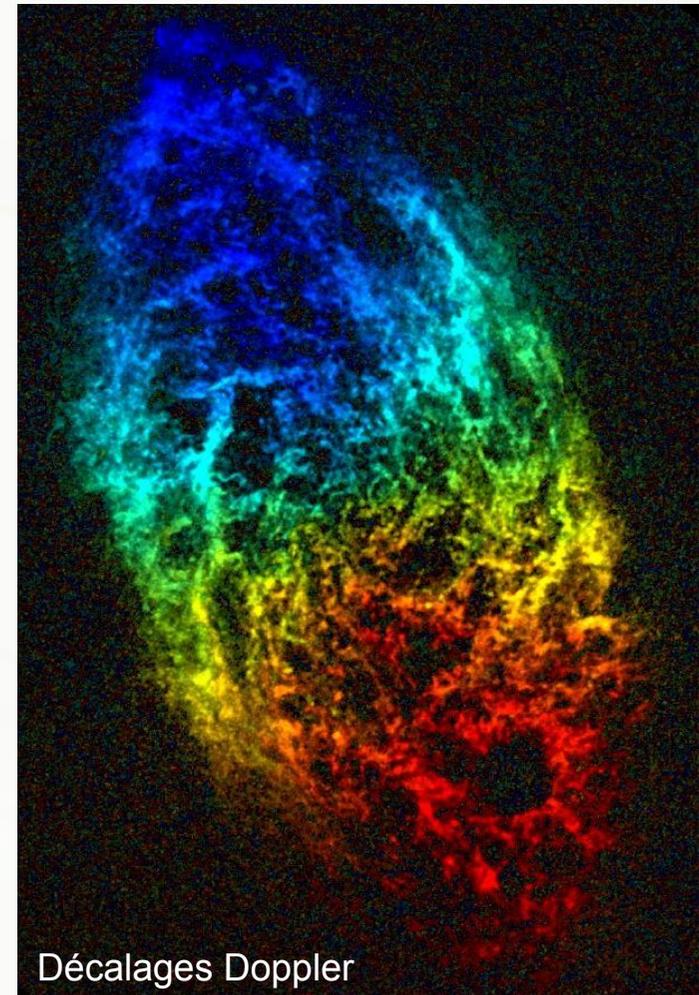
# RELATION DE TULLY-FISHER (1977)

- Relation **empirique** entre vitesse de rotation et luminosité **absolue** des spirales
- Logique ?
  - luminosité  $\nearrow$  avec la masse de la galaxie
  - vitesse de rotation  $\nearrow$  avec la masse de la galaxie
  - $\Rightarrow$  **corrélation**
- Mais  $L \propto V^4$  difficile à obtenir « naturellement »
- Tully-Fisher  $\rightarrow$  **estimateur de distance** pour les galaxies spirales

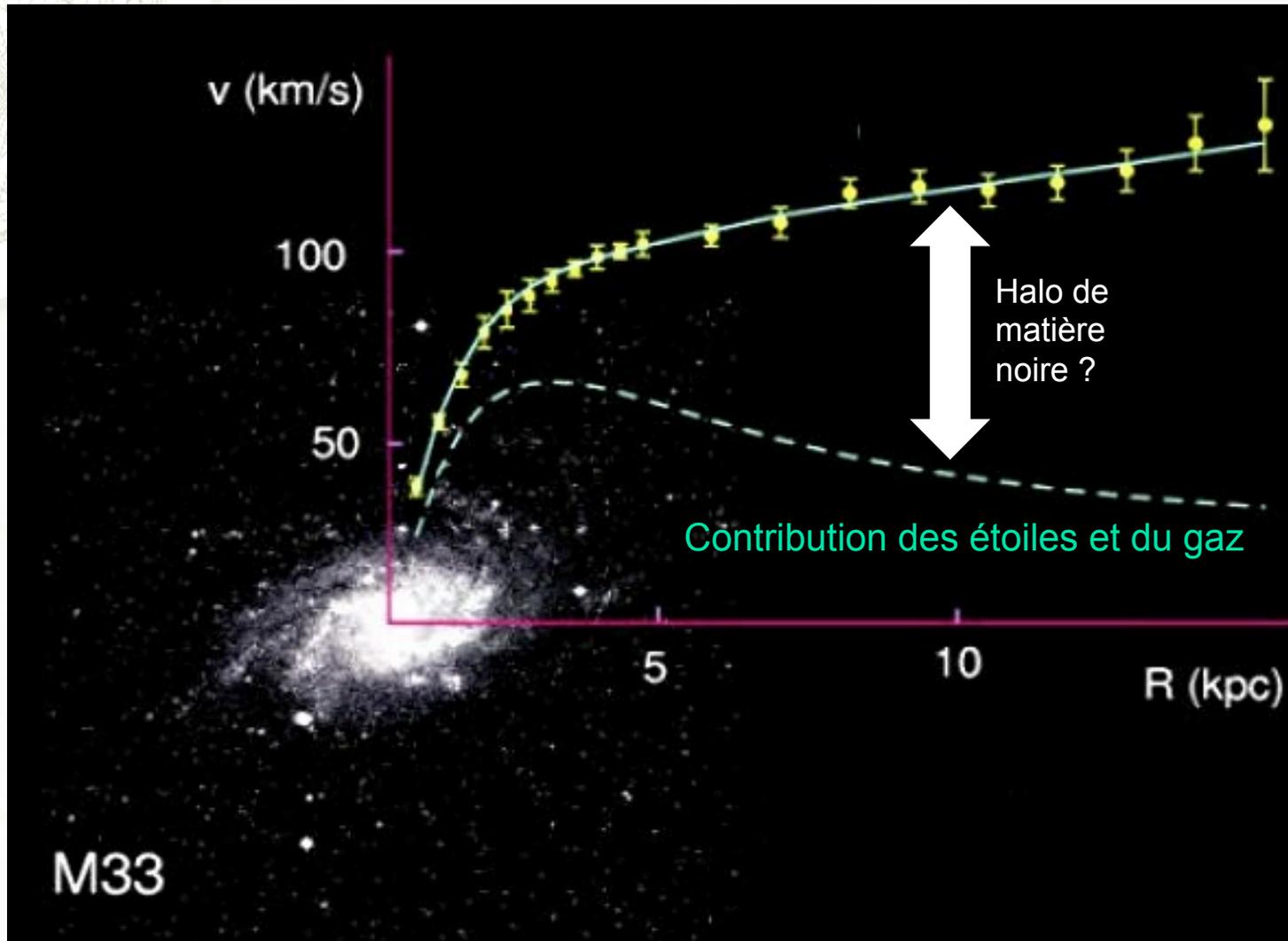


# LA MATIÈRE NOIRE DANS LES GALAXIES SPIRALES

- Les étoiles des galaxies se déplacent « trop » vite
- Une galaxie spirale « typique » : M33, vue de 3/4
  - Des étoiles jeunes, bleues, brillantes
  - Un cœur stellaire très dense, des bras diffus
    - Visibles en optique
  - Une enveloppe gazeuse étendue
    - Visible en radio ( $\lambda=21$  cm)
  - Tout l'ensemble est en rotation
    - Certaines étoiles et nuages de gaz s'approchent
    - D'autres s'éloignent
  - « Normalement » la vitesse de rotation des étoiles et du gaz devrait **diminuer** en s'éloignant du centre galactique où étoiles et gaz se concentrent
- **Mais ce n'est pas le cas**

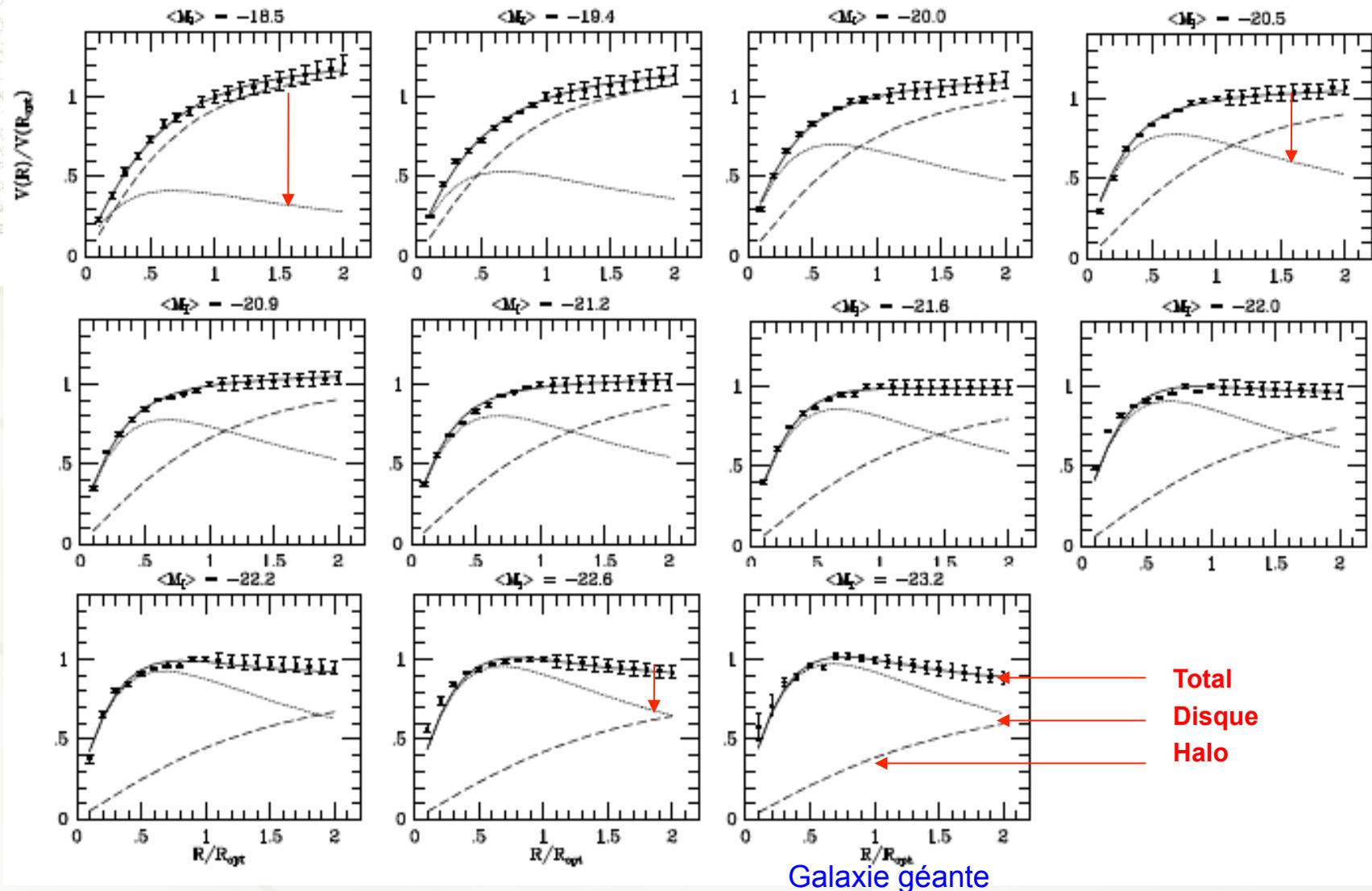


## → COURBE DE ROTATION



# EFFET SYSTÉMATIQUE, PLUS MARQUÉ POUR LES NAINES

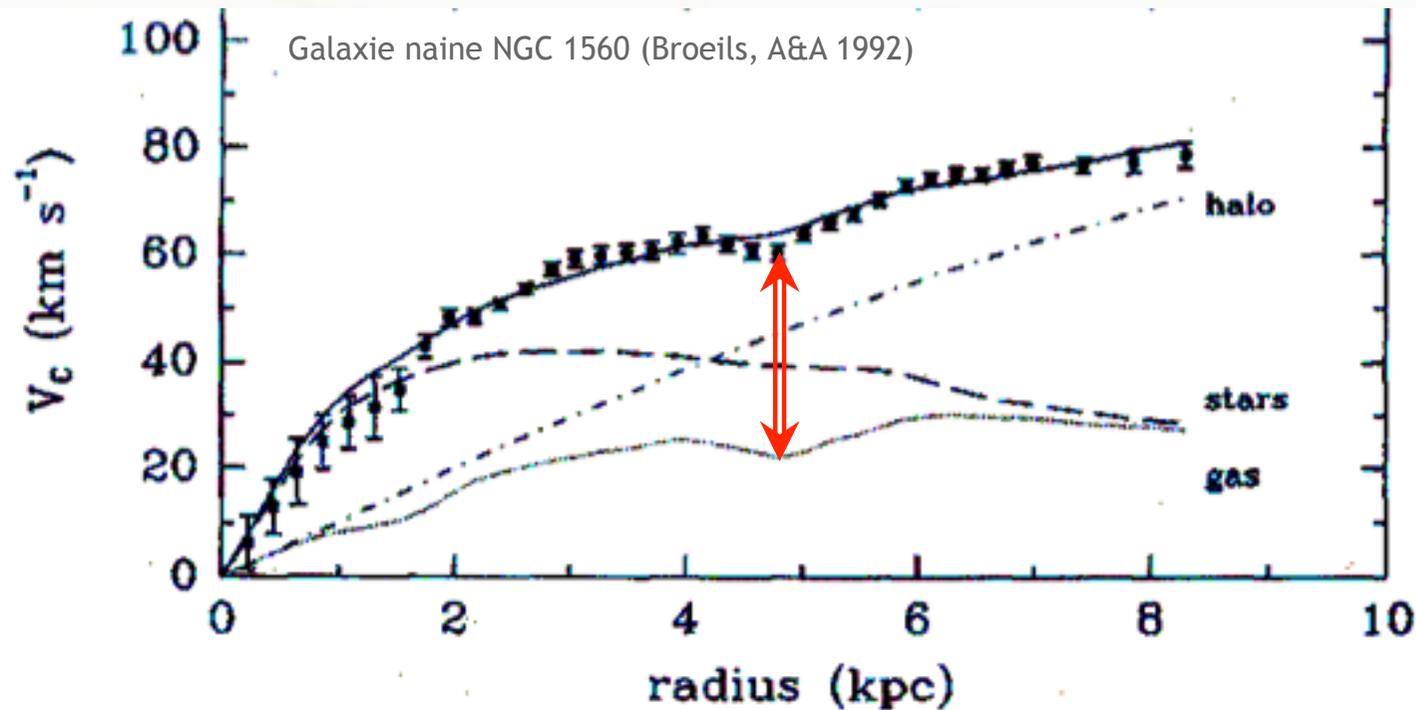
Galaxie naine



# CONSPIRATION

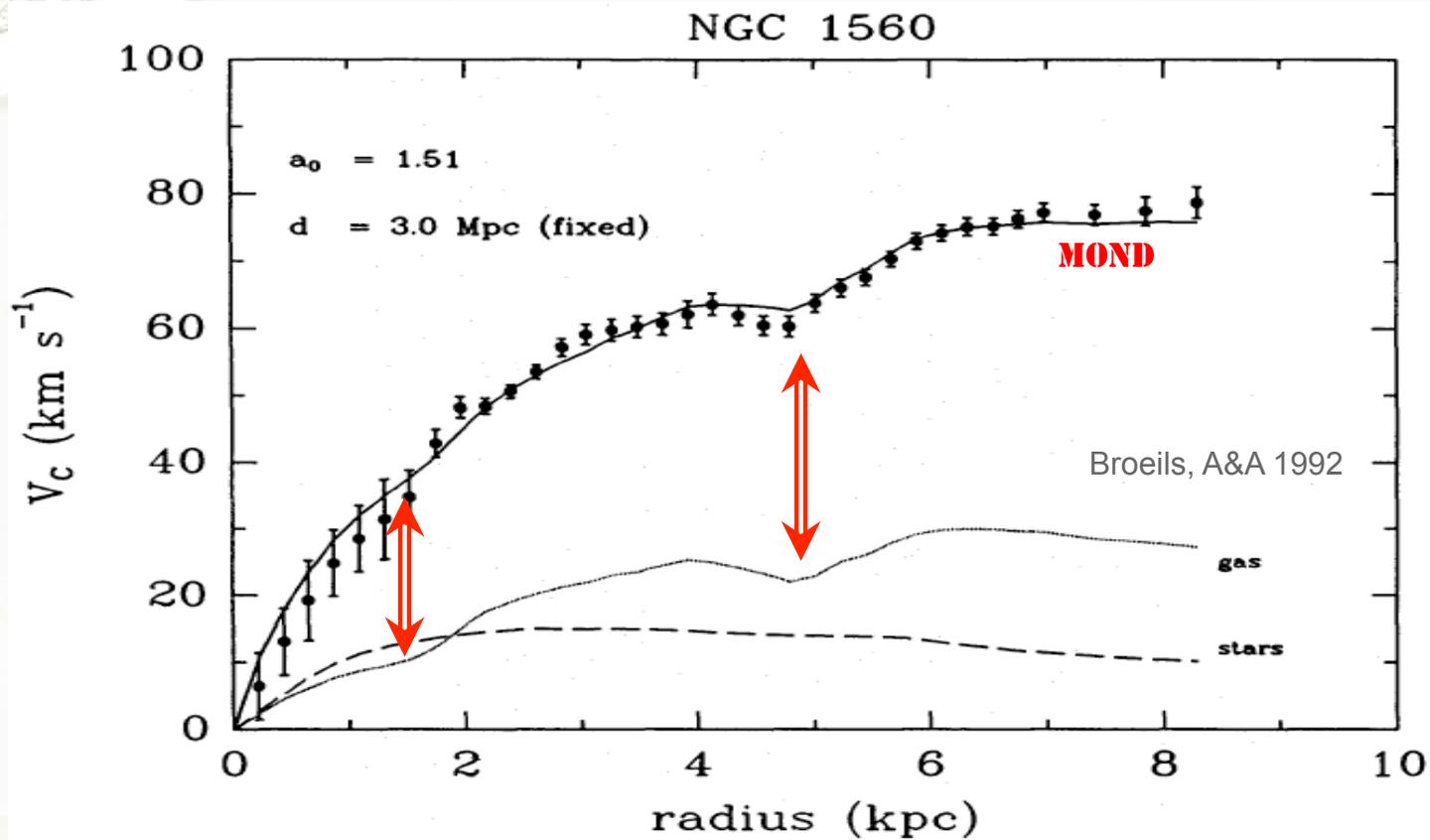
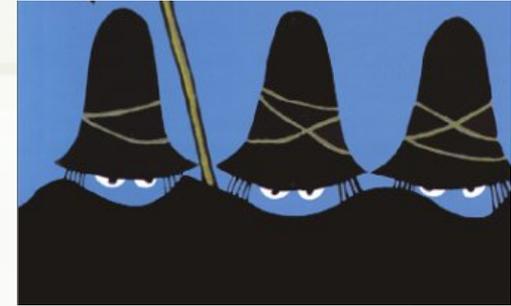


- Corrélation entre le profil requis pour le halo et la distribution de matière lumineuse
  - → le halo est-il formé de matière ordinaire, mais non lumineuse ?
  - comme des étoiles peu lumineuses (naines brunes, naines blanches ou noires) ?
  - ou du gaz ne rayonnant pas en radio, comme l'hydrogène moléculaire  $H_2$  ?



# CONSPIRATION

- Ou alors, il n'y a **PAS** de matière noire :
- la relation entre masse et vitesse n'est pas la bonne → **MOND**





## MODIFIER LA *DYNAMIQUE* DE NEWTON ?

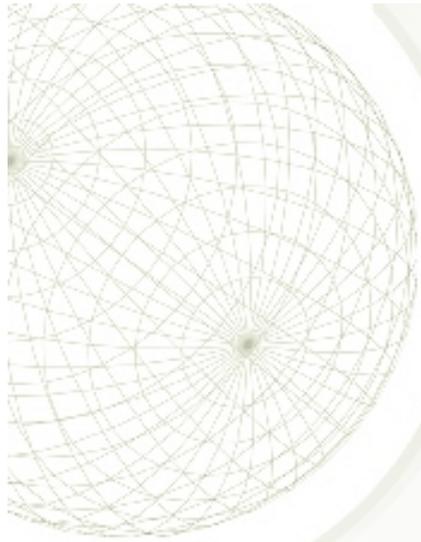
- Désaccord entre :
  - quantité de matière lumineuse
  - quantité calculée en appliquant les lois de Newton aux mouvements de la matière lumineuse
- Rien ne garantit que les lois de Newton (de la dynamique *ou* de la gravitation) soient correctes en dehors du domaine où elles sont bien vérifiées: le système solaire
- En 1983, [Mordehai Milgrom](#) (Institut Weizmann) proposa une légère modification de la relation  $\mathbf{F} = m \gamma$  (entre force et accélération)

$$\mathbf{F} = m\gamma^2/\gamma_0 \text{ quand } \gamma < \gamma_0$$

(et bien entendu  $F = m\gamma$  quand  $\gamma > \gamma_0$ )

- Cela « marche » admirablement bien avec  $\gamma_0 \sim 1,2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$





Merci de votre attention !

