



# *Astrophysique*

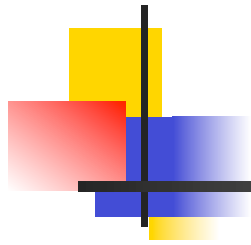
## 17 – Les galaxies

---



Alain Bouquet

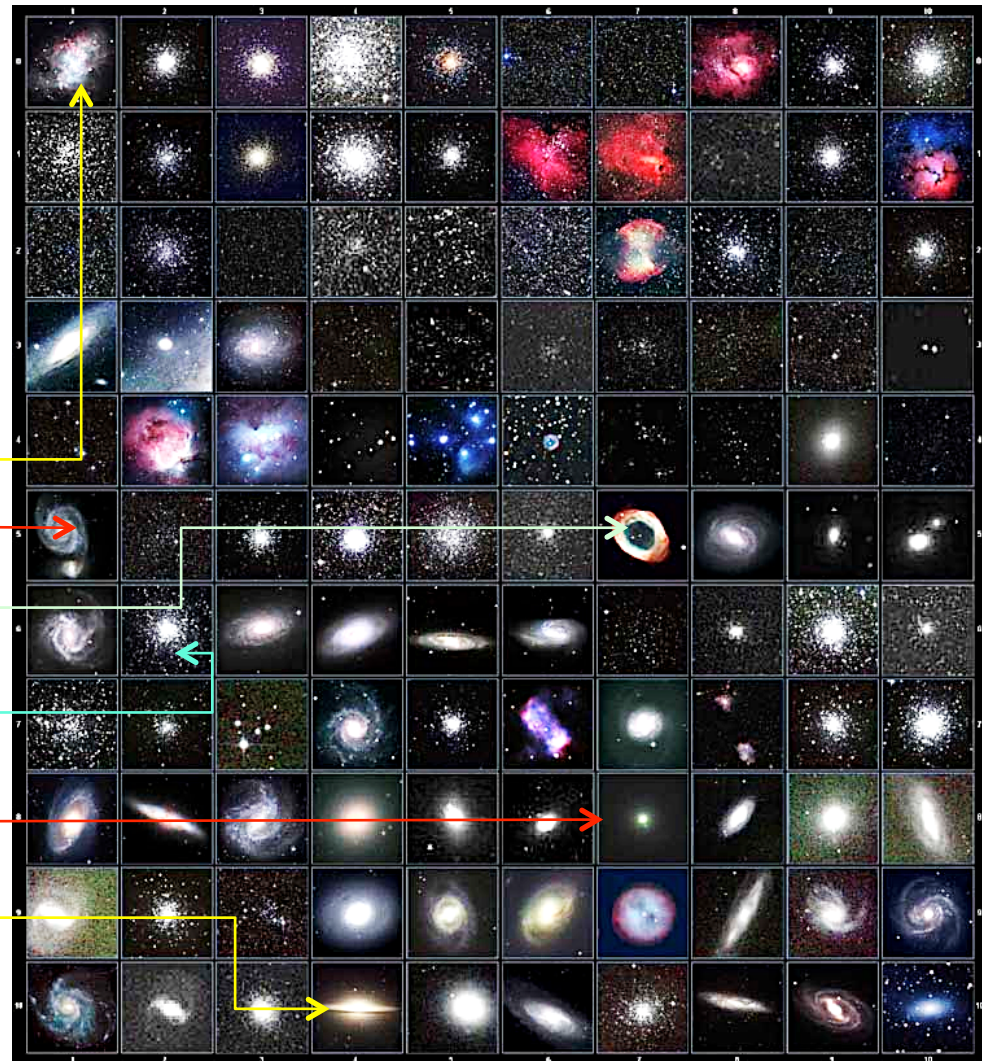
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie  
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



# LE ROYAUMES DES NÉBULEUSES

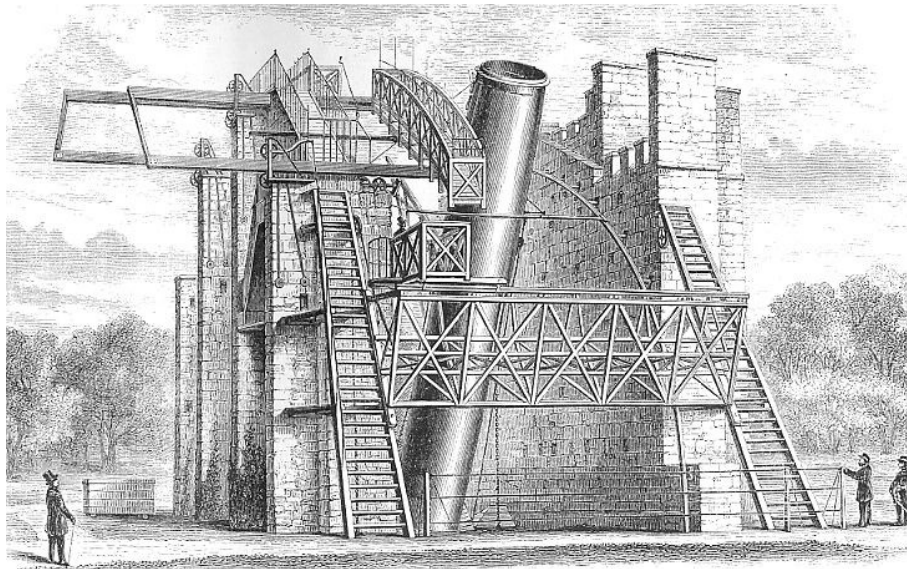
# Le catalogue Messier

- 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



# Spirales

- William Parsons, 3<sup>o</sup> comte de Rosse (1800-1867)
- Construisit en 1844 un télescope (de type Newton) de 1,83 m de diamètre et 17 m de long, surnommé le *Léviathan*
- Il lui permet d'observer pour la première fois le dessin en spirale de nombreuses *nébuleuses*



La nébuleuse spirale du Tourbillon M51 et la galaxie irrégulière NGC 5195 dessinés par Lord Rosse en 1845



## M 51 (par le HST)



# Catalogues

- Charles Messier
  - 45, puis 103 et finalement 110 objets
- William Herschel
  - *General Catalog* (1864) 5000 objets
- John Dreyer
  - NGC (*New General Catalog*, 1888) 7840 objets
  - IC (*Index Catalog*, 1908) 5386 autres objets
- ...

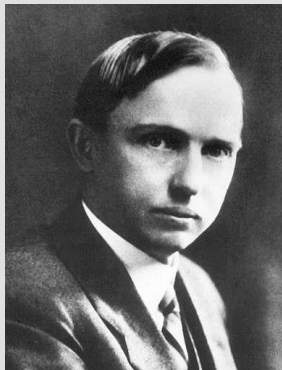
Nébuleuse planétaire de l'Œil du chat NGC 6543



- ...
- Peter Nilson
  - *Uppsala General Catalogue of Galaxies* (1973) 12 939 galaxies
- G. Paturel, L. Bottinelli, L. Gougenheim et P. Fouqué (Observatoires de Lyon et de Paris-Meudon)
  - *Catalogue of Principal Galaxies* (1989-2003) 983 261 galaxies  $B < 18$
- **Centre de données astronomiques de Strasbourg**
  - Catalogues informatisés
  - VizieR (catalogue de catalogues)
  - Simbad (propriétés de tout objet apparaissant dans un catalogue)
  - Aladin (visualisation du ciel)

# 1920: la « Grande Controverse » Shapley-Curtis

## Harlow Shapley (1885-1972)



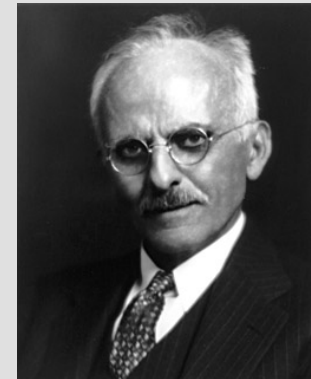
- Distribution des amas globulaires  $\Rightarrow$  diamètre de la Voie lactée  $\approx 100$  kpc
- La nébuleuse d'Andromède M31 a une taille angulaire de plusieurs degrés  $\Rightarrow$  elle ne peut pas être en dehors de la Voie lactée

- Adriaan Van Maanen avait annoncé en 1916 l'observation d'une **rotation** (en  $10^5$  ans) de la nébuleuse spirale M101  $\Rightarrow$  elle devait être à moins de 1 kpc. *Erreur de mesure.*
- Une **nova** avait été observée en 1885 dans la nébuleuse d'Andromède M31  $\Rightarrow$  sa luminosité n'était pas considérablement plus faible que celle des novae proches (*en fait il s'agissait d'une supernova*)



## Heber Curtis (1872-1942)

- Comptages d'étoiles  $\Rightarrow$  diamètre de la Voie lactée  $\approx 10$  kpc (Kapteyn)
- Les nébuleuses spirales ne correspondent à aucune phase de l'évolution des étoiles



- Les nébuleuses spirales et elliptiques ont des **décalages vers le rouge** beaucoup plus élevés que les nébuleuses planétaires
- Les nébuleuses spirales présentaient des zones sombres analogues aux **poussières** de la Voie lactée

# Edwin Hubble (1889-1953)

- Formation de juriste (qui lui fut *très* utile)
- Engagé pendant la 1<sup>o</sup> guerre mondiale (major)
- Rejoignit l'observatoire du Mont Wilson en 1919, et y resta jusqu'à sa mort
- 1924 : observations de Céphéides dans la nébuleuse d'Andromède  
⇒ Distance (et taille) des galaxies
- 1929 : relation  $\approx$  linéaire entre distances et vitesses des galaxies (*décalages vers le rouge* mesurés par Vesto Slipher)

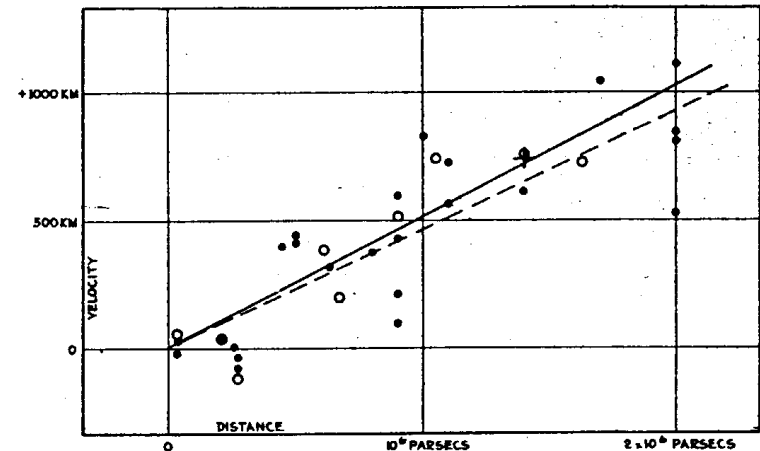
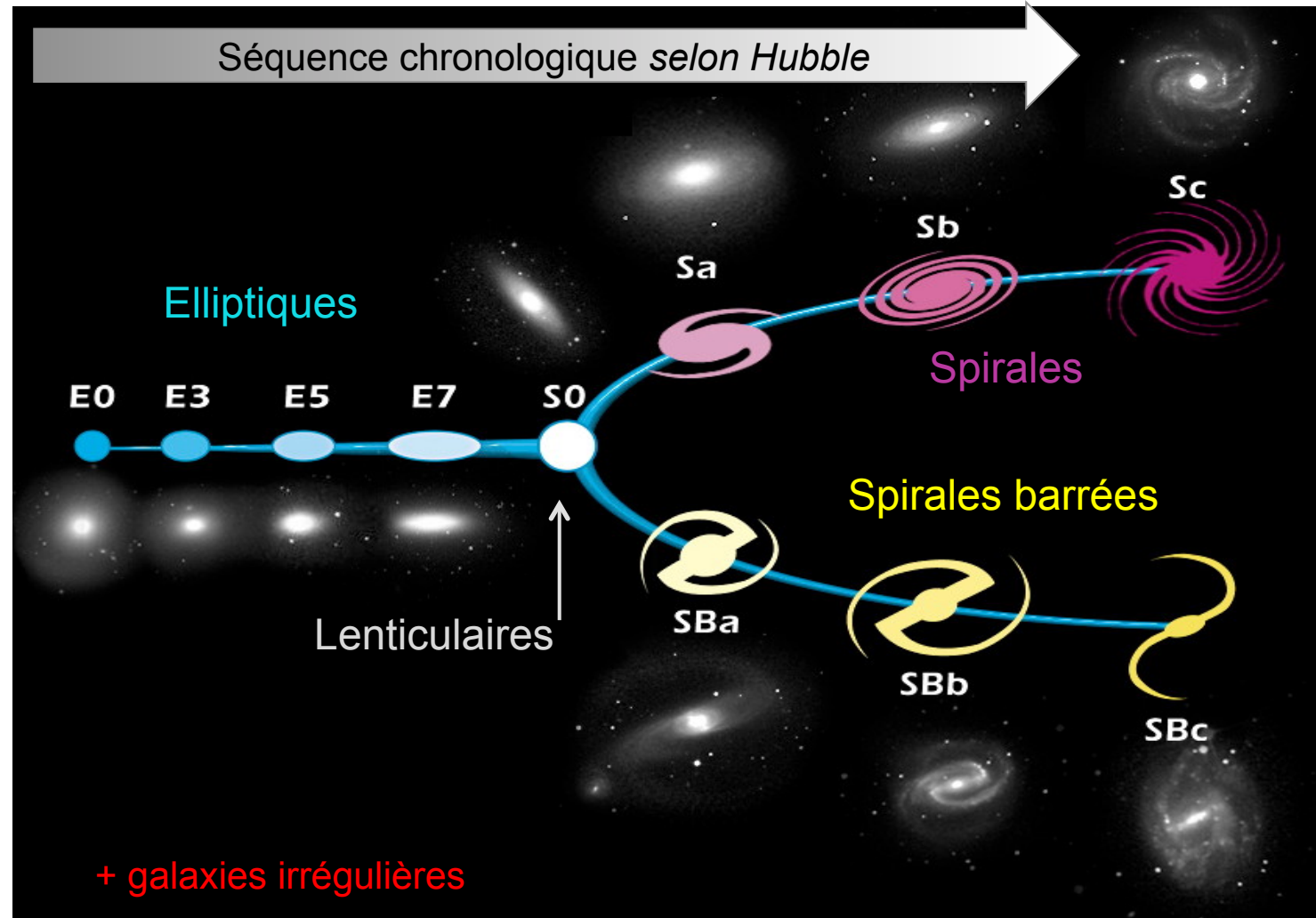
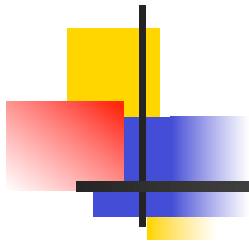


Diagramme Vitesse-Distance pour les galaxies, établi par Hubble en 1929



# Le diapason de Hubble





# POPULATIONS STELLAIRES

## Populations I, II (et III ?)

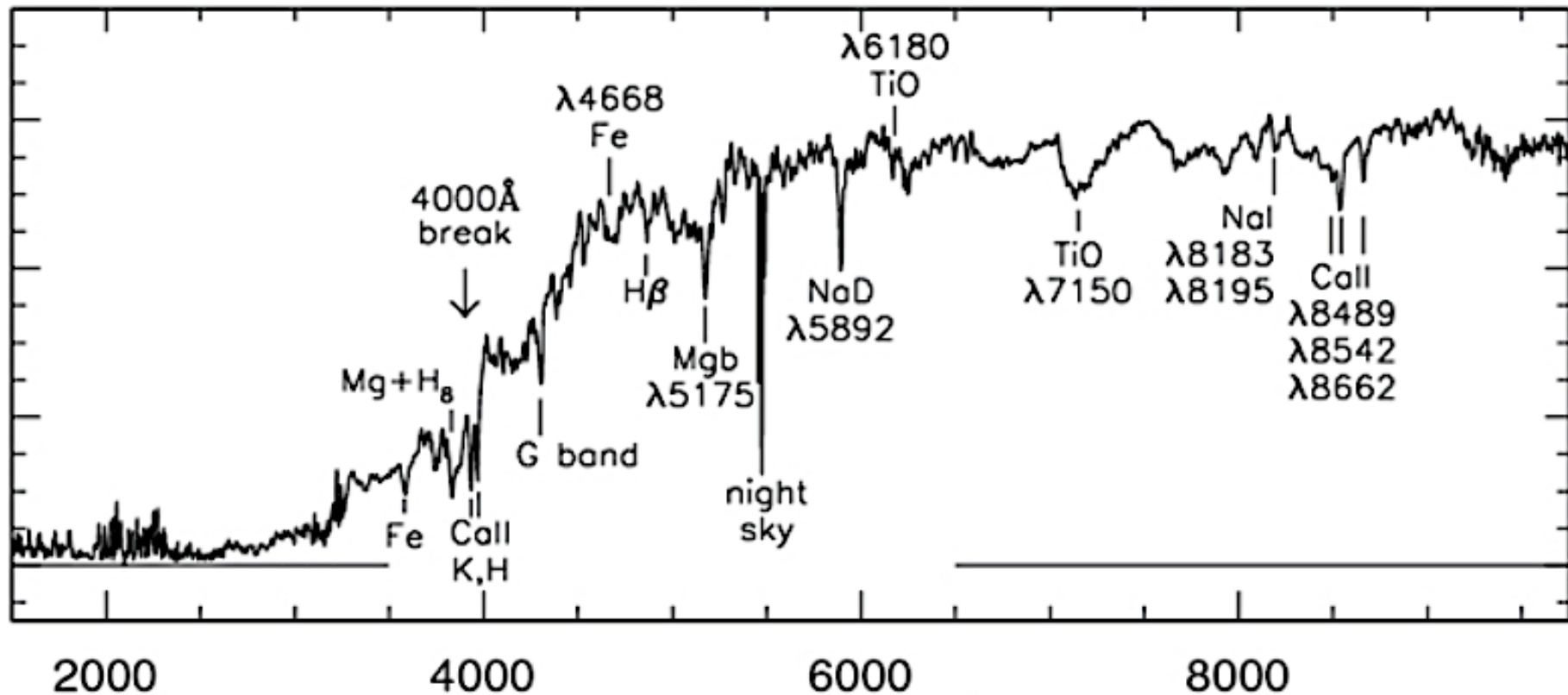


- 1944 : Walter Baade profita du *black-out* à Los Angeles pour résoudre en étoiles le centre de M31 et les galaxies du Groupe Local
- Il découvrit des différences systématiques
  - dans les bras des spirales : étoiles bleues, jeunes et de forte métallicité  
⇒ Population I
  - dans le bulbe des spirales 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**

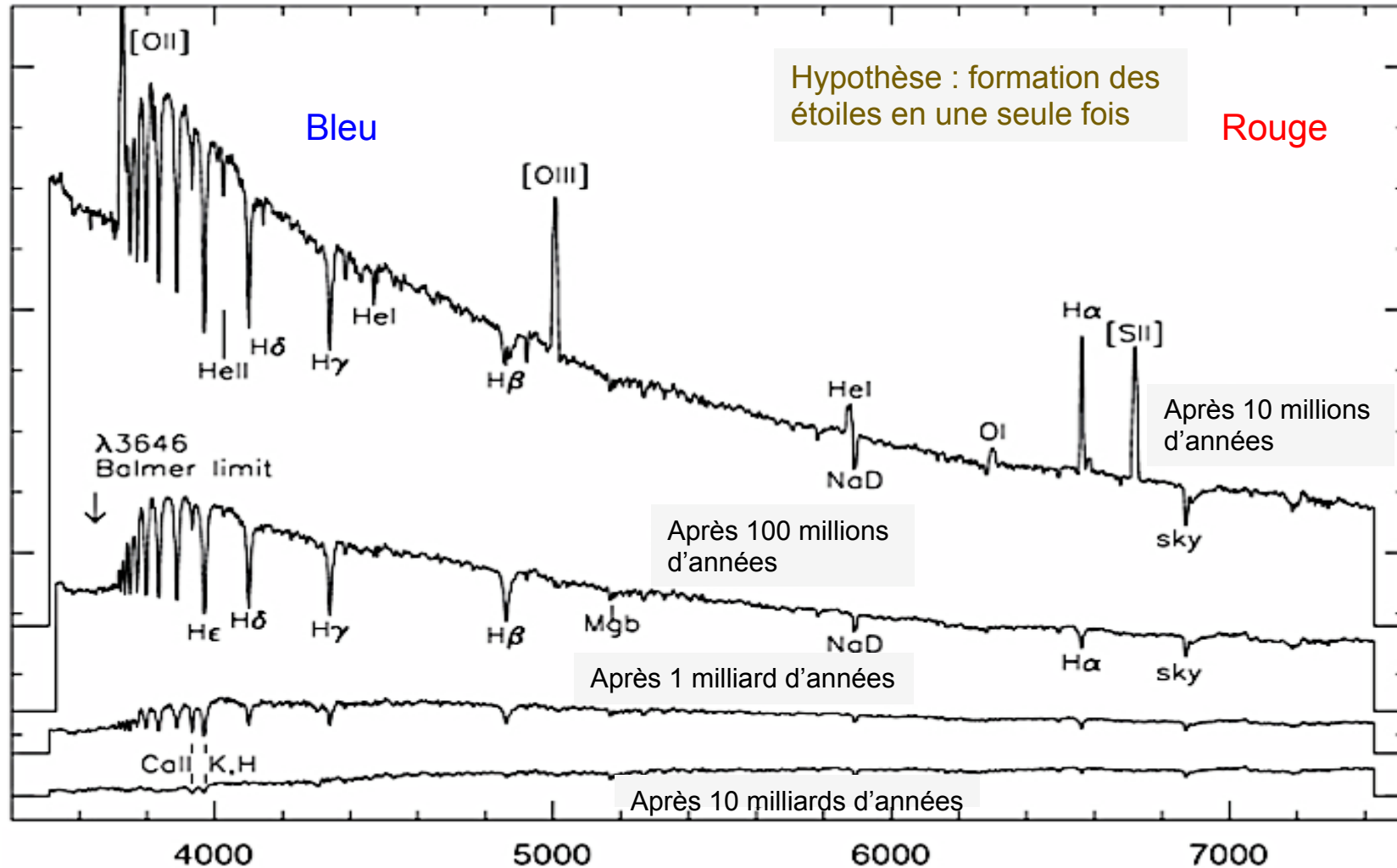
- En *première* approximation
- Elliptiques
  - formation d'étoiles rapide (bouffée initiale) consommant tout le gaz
  - ⇒ étoiles anciennes
  - ⇒ étoiles de faible métallicité
  - ⇒ étoiles rouges (naines et géantes)
- Spirales
  - formation continue d'étoiles
  - ⇒ présence d'étoiles jeunes
  - ⇒ étoiles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

# Spectre de galaxie

- Superposition des spectres de toutes les étoiles
- Spectre plutôt rouge  $\Leftrightarrow$  galaxie elliptique



# Évolution au cours du temps

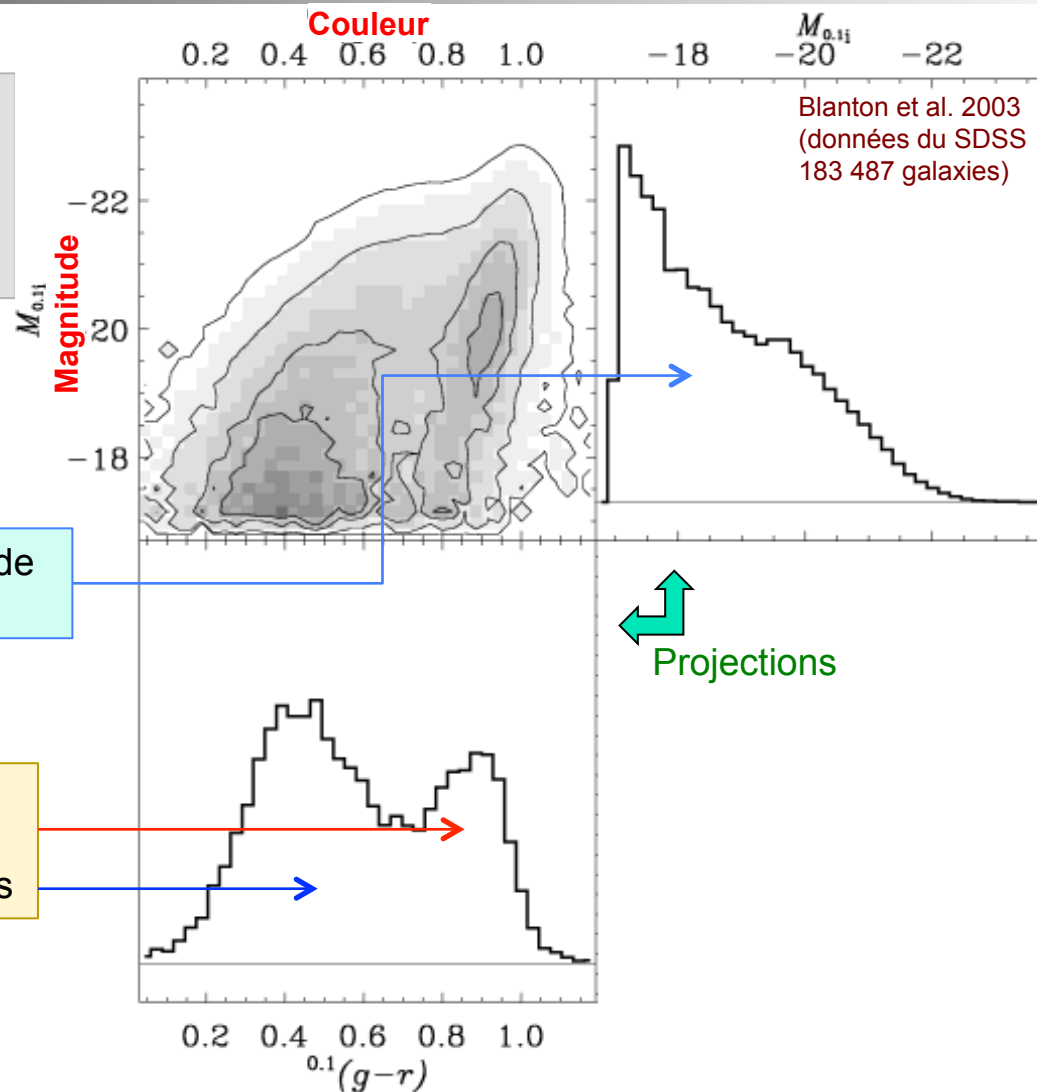


# Couleurs et luminosité des galaxies

- Schématiquement
  - elliptiques  $\Rightarrow$  plutôt rouges
  - spirales  $\Rightarrow$  plutôt bleues

Décroissance exponentielle du nombre de galaxies pour une luminosité croissante

- Distribution bimodale
- Galaxies rouges *et* lumineuses
  - Galaxies bleues *et* moins lumineuses

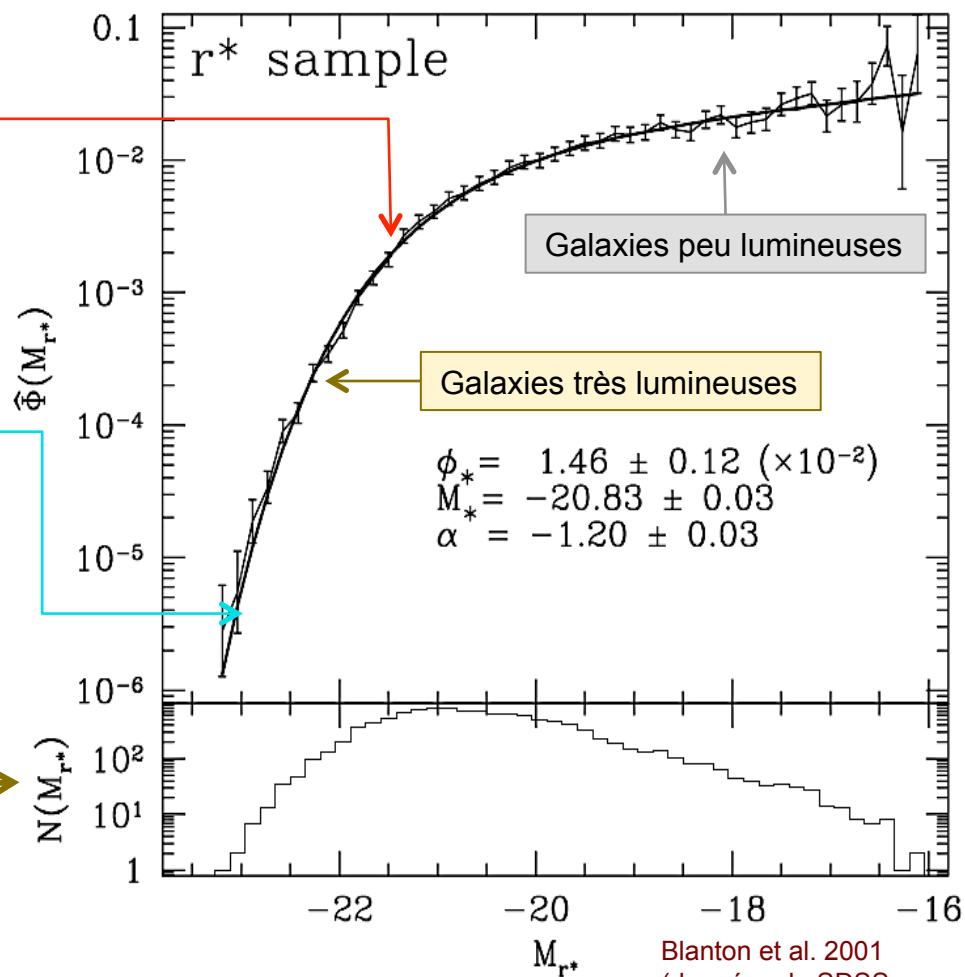


# Luminosité des galaxies

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

- Fonction de luminosité de Schechter
 
$$\Phi(L) = \Phi^* (L/L^*)^{\alpha} \exp\{-L/L^*\}$$
- Justification théorique : modèle de formation de galaxies de Press et Schechter

Nombre de galaxies de l'échantillon

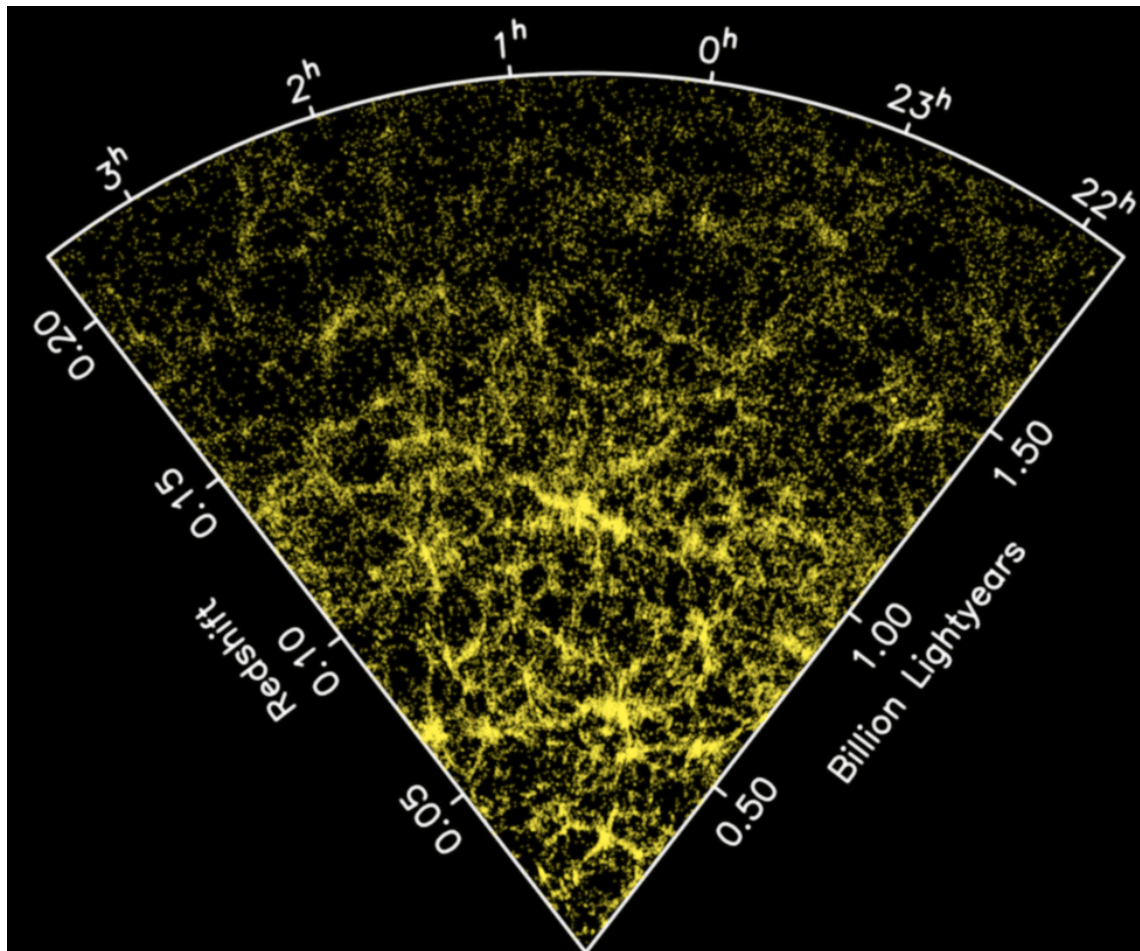


Blanton et al. 2001  
(données du SDSS  
11 275 galaxies)

# Distribution spatiale des galaxies

## ■ Amas de galaxies

## ■ Galaxies « de champ »



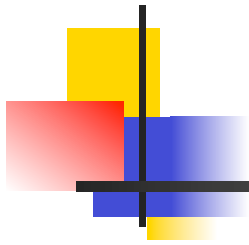
En gros :

- 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  $z > 0,2$



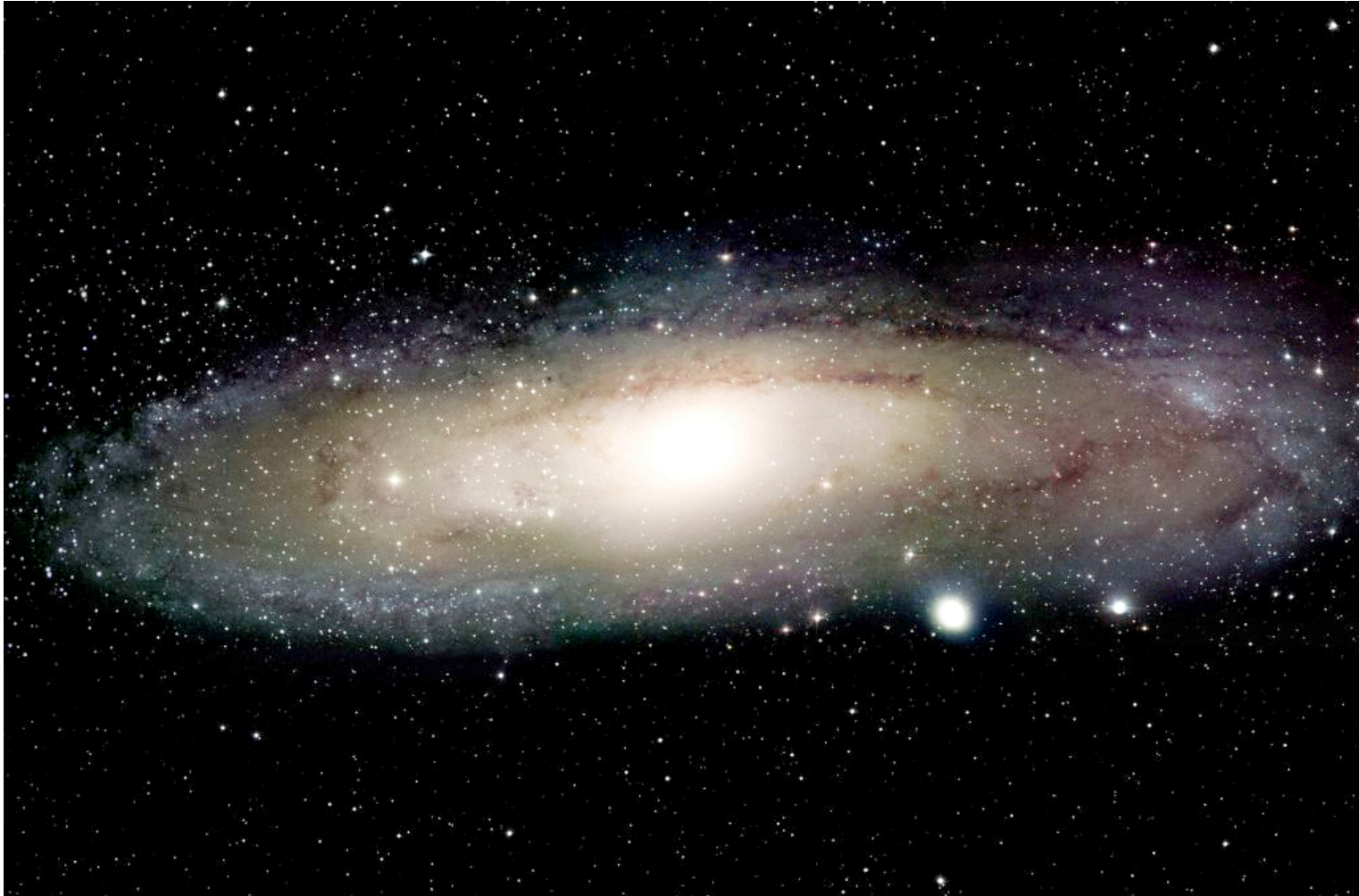


# **GALAXIES SPIRALES**



## La galaxie M31 (NGC224) dans Andromède

---





## La galaxie M31 en ultraviolet

---



NASA / Wise



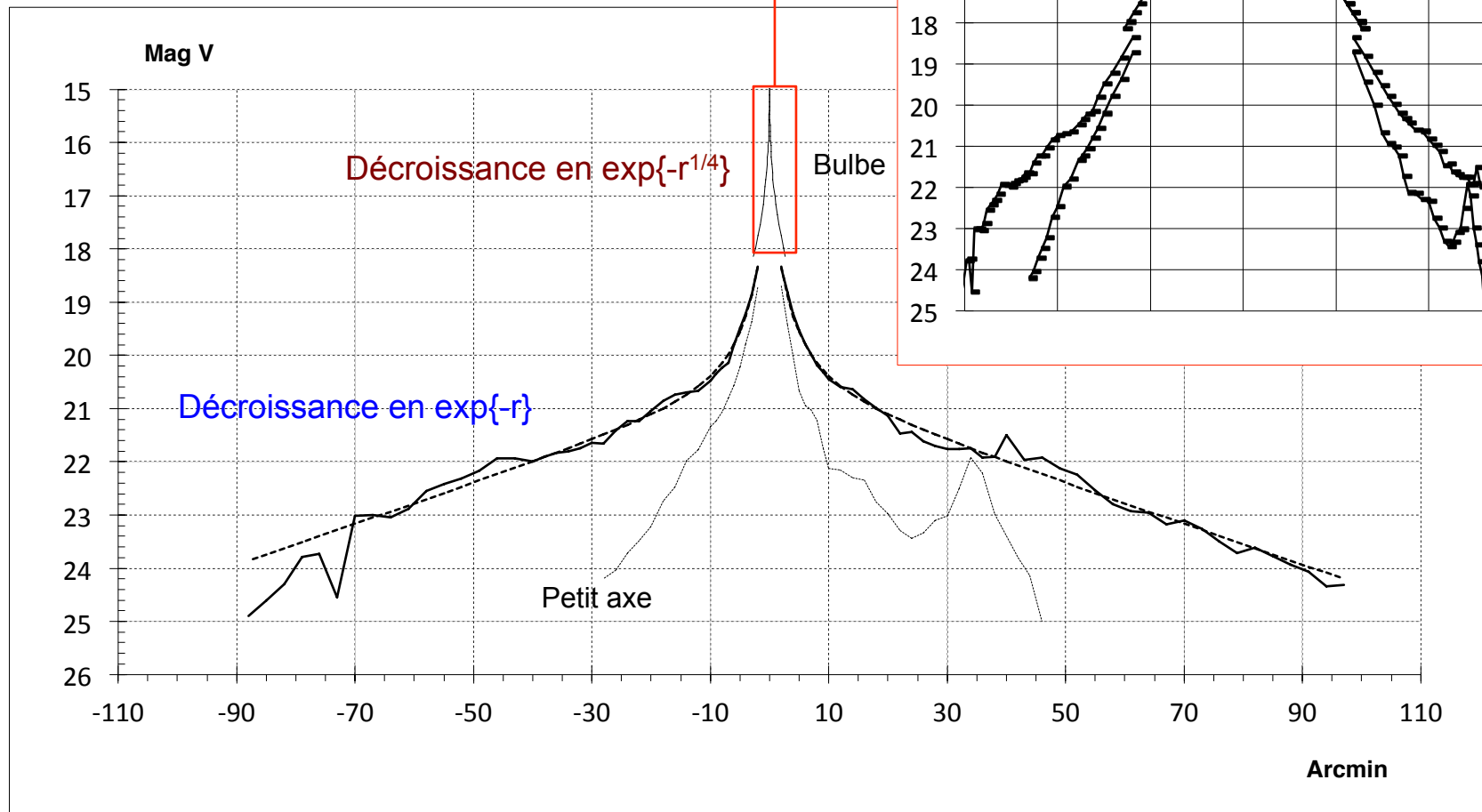
## La galaxie M31 en infrarouge (24 $\mu\text{m}$ )

---



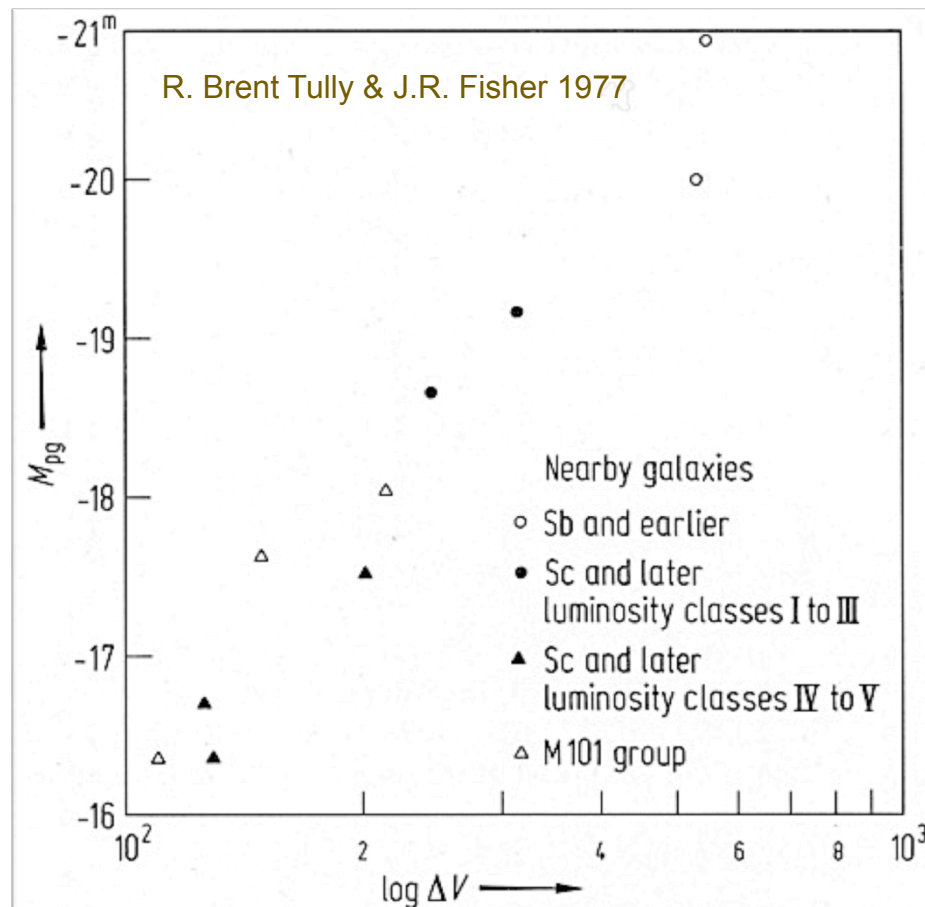
NASA / Spitzer

# Profil de luminosité de M31



# Relation de Tully-Fisher (1977)

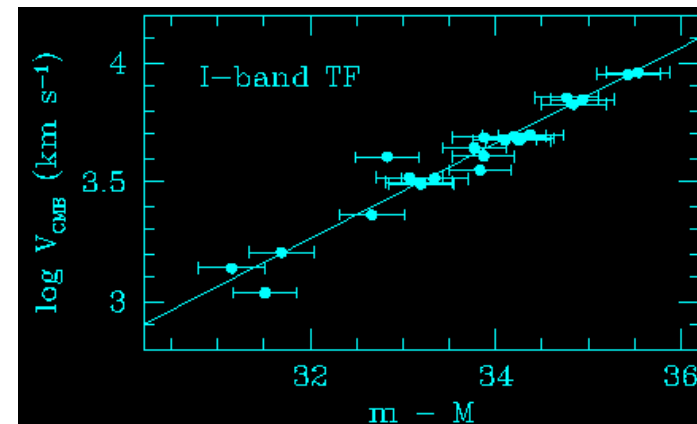
- Relation **empirique** entre vitesse de rotation et luminosité **absolue** des spirales
- Logique : luminosité **et** vitesse de rotation augmentent avec la masse de la galaxie



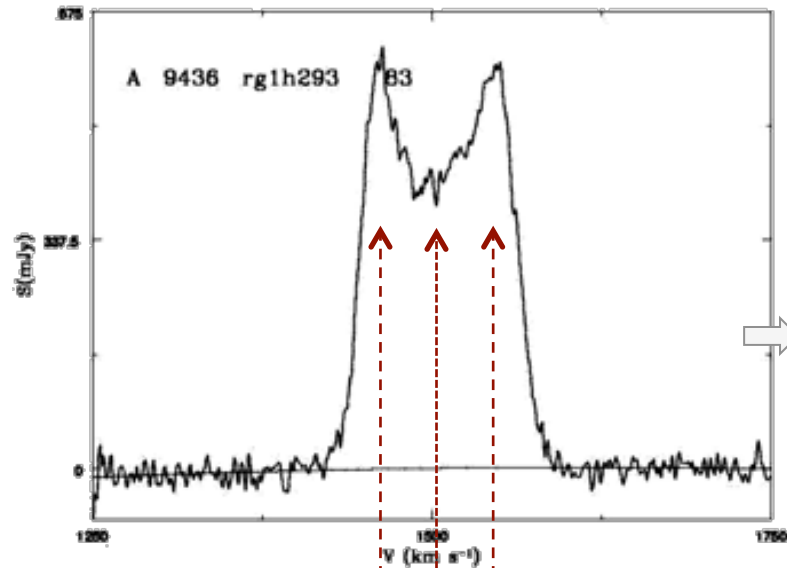
$$L \propto V^4$$

## Relation vérifiée

- dans toutes les bandes spectrales
- pour tous les types de spirales (mais la relation est légèrement différente pour les Sa, Sb et Sc)



# Relation de Tully-Fisher : un étalon de distance

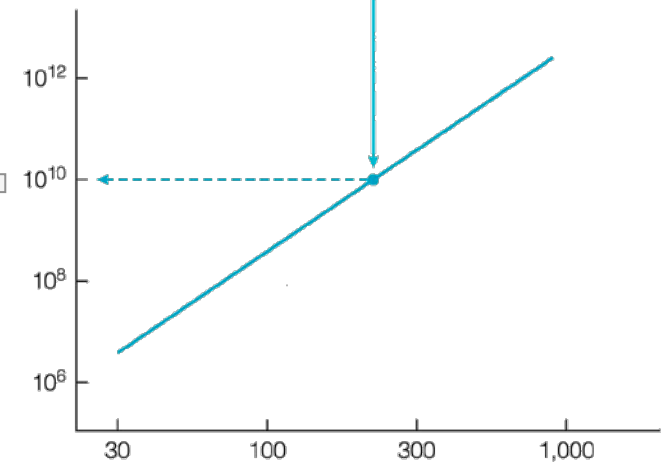


Bord « avançant »  
 Centre de la galaxie  
 Bord « reculant »

Largeur de la raie HI  
 ⇔ vitesse de rotation

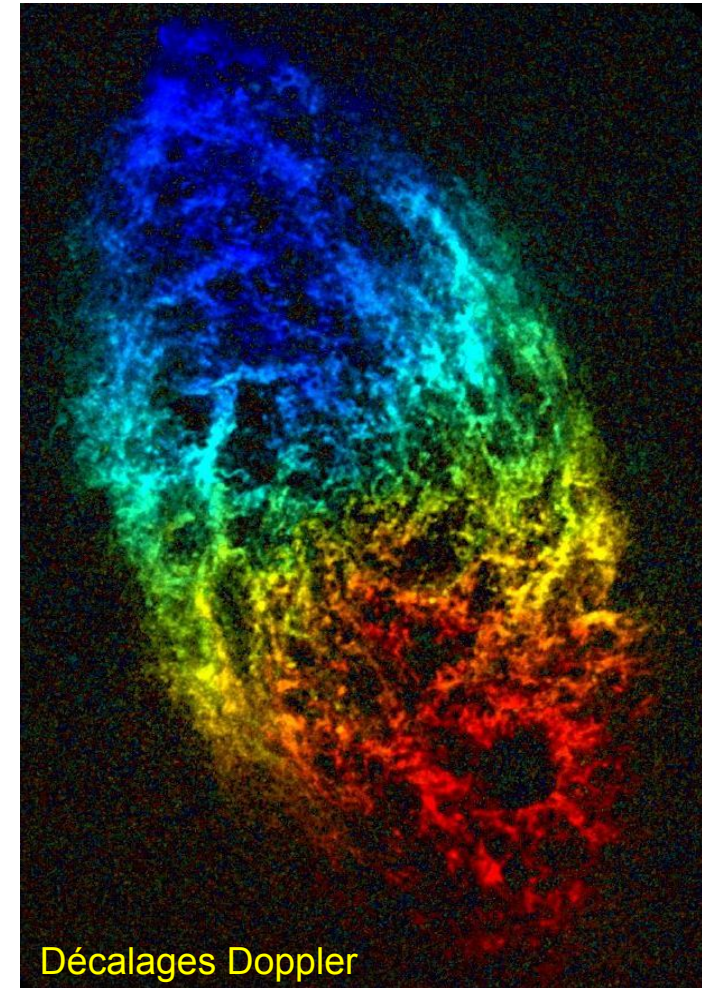


Luminosité absolue ⇔  
 distance de la galaxie



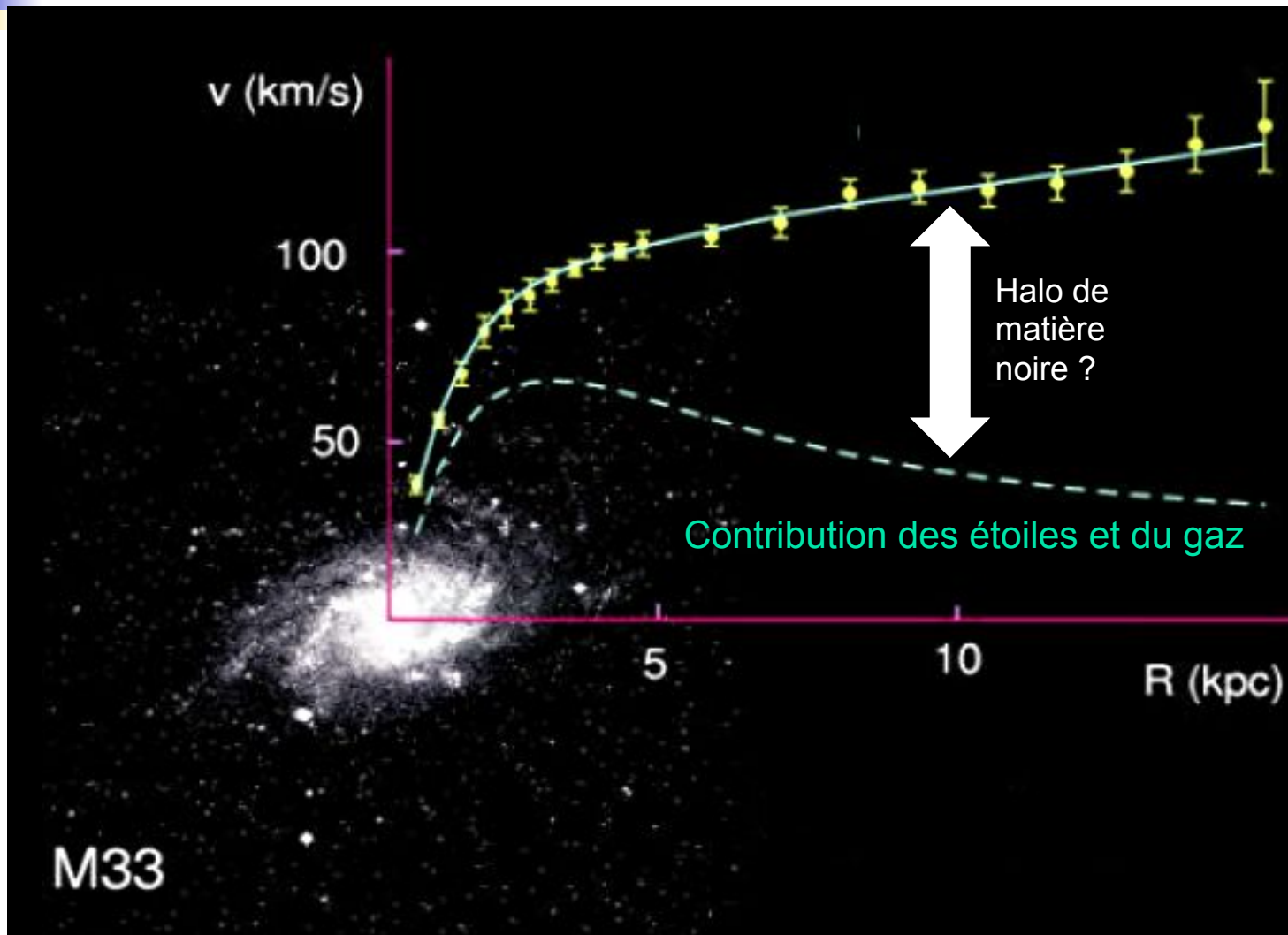
# La matière noire dans les galaxies

- 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**



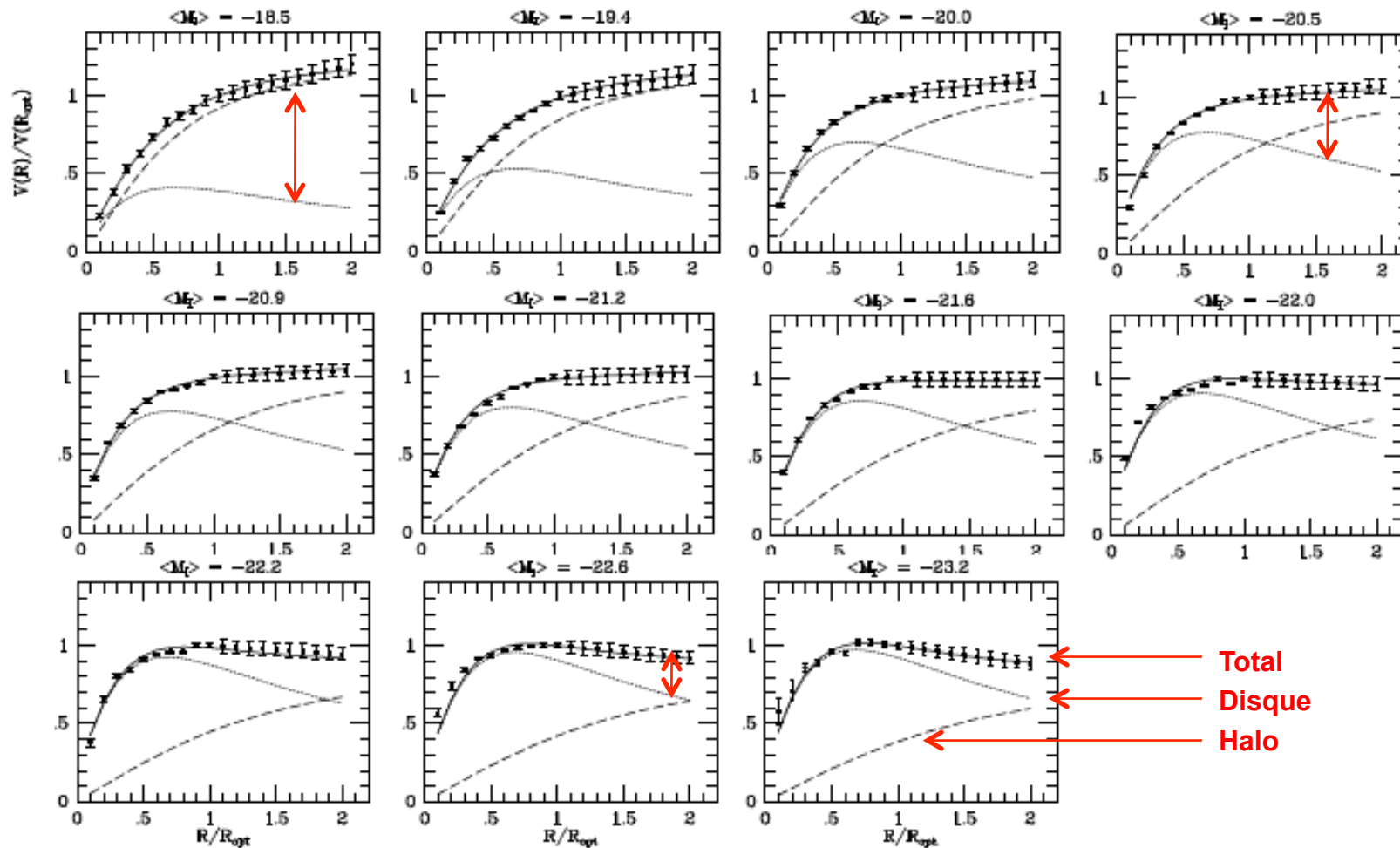


→ Courbe de rotation



# Un effet systématique, plus marqué pour les naines

Galaxie naine

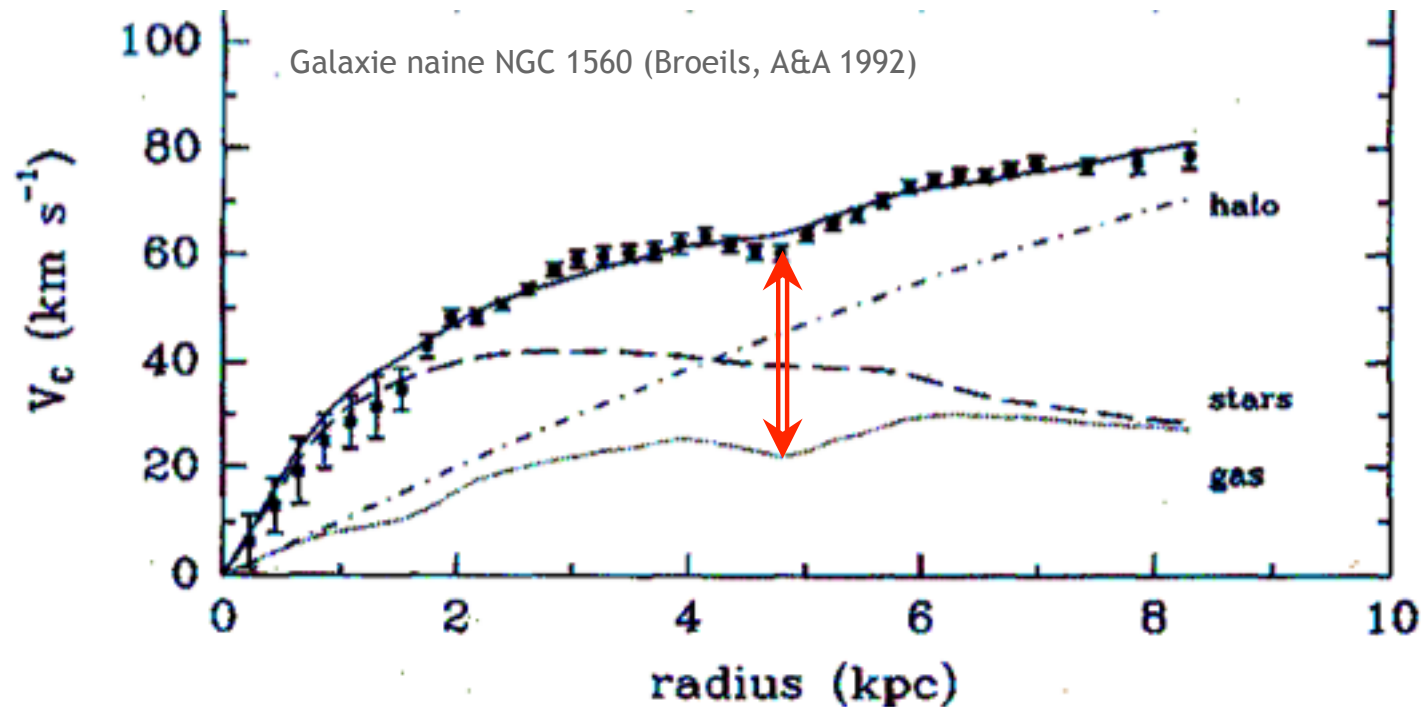


Galaxie géante

# Conspiration



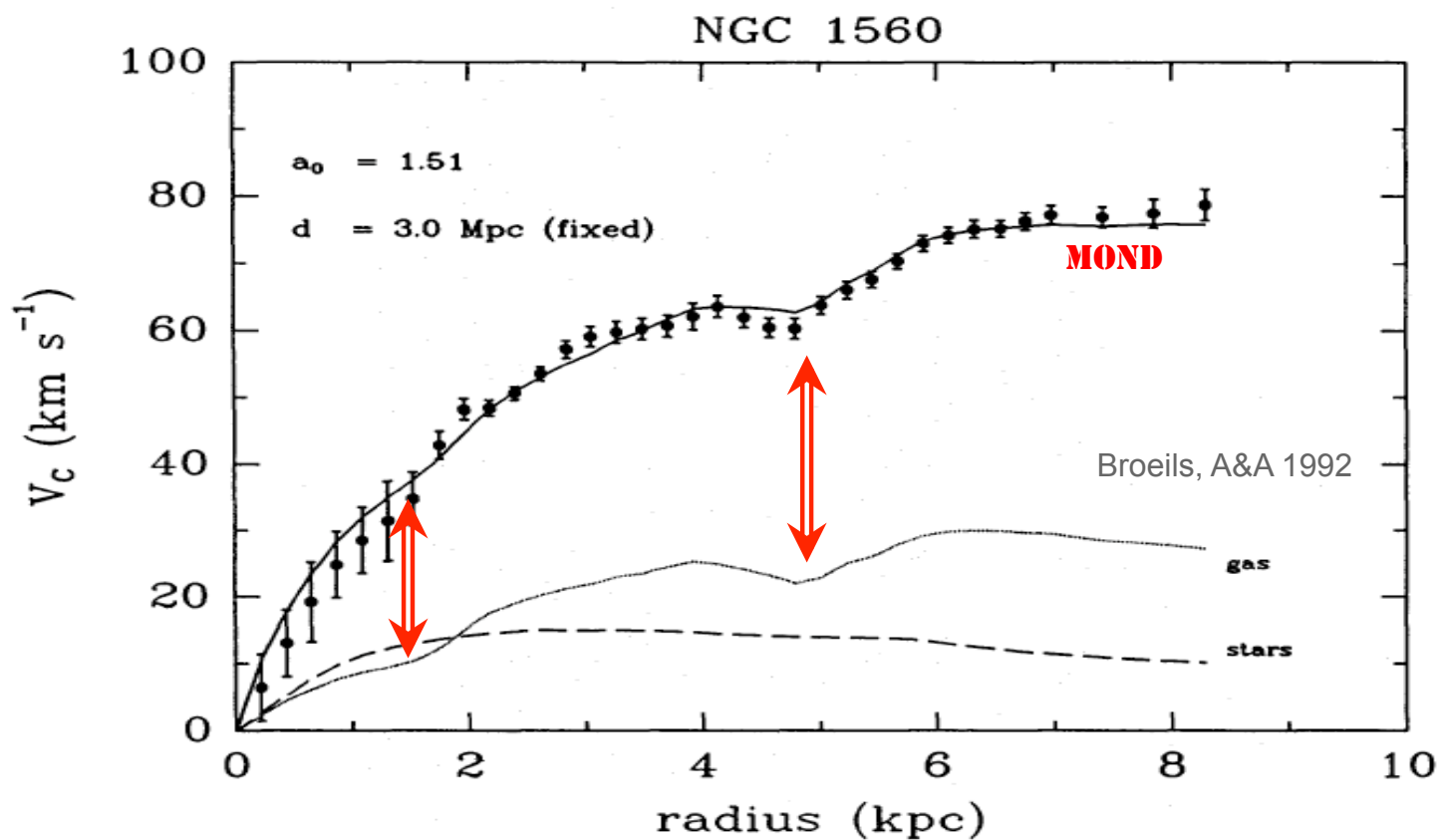
- Corrélation entre le profil requis pour le halo et la distribution de matière lumineuse
  - → le halo est-il formé de matière ordinaire, mais non lumineuse ?
  - comme des étoiles peu lumineuses (naines brunes, naines blanches ou noires) ?
  - ou du gaz ne rayonnant pas en radio, comme l'hydrogène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

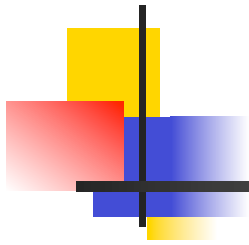
- Désaccord entre :
  - quantité de matière lumineuse
  - quantité calculée en appliquant les lois de Newton aux mouvements de la matière lumineuse
- Rien ne garantit que les lois de Newton (de la dynamique *ou* de la gravitation) soient correctes en dehors du domaine où elles sont bien vérifiées: le 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  $\gamma_0 \sim 1,2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$





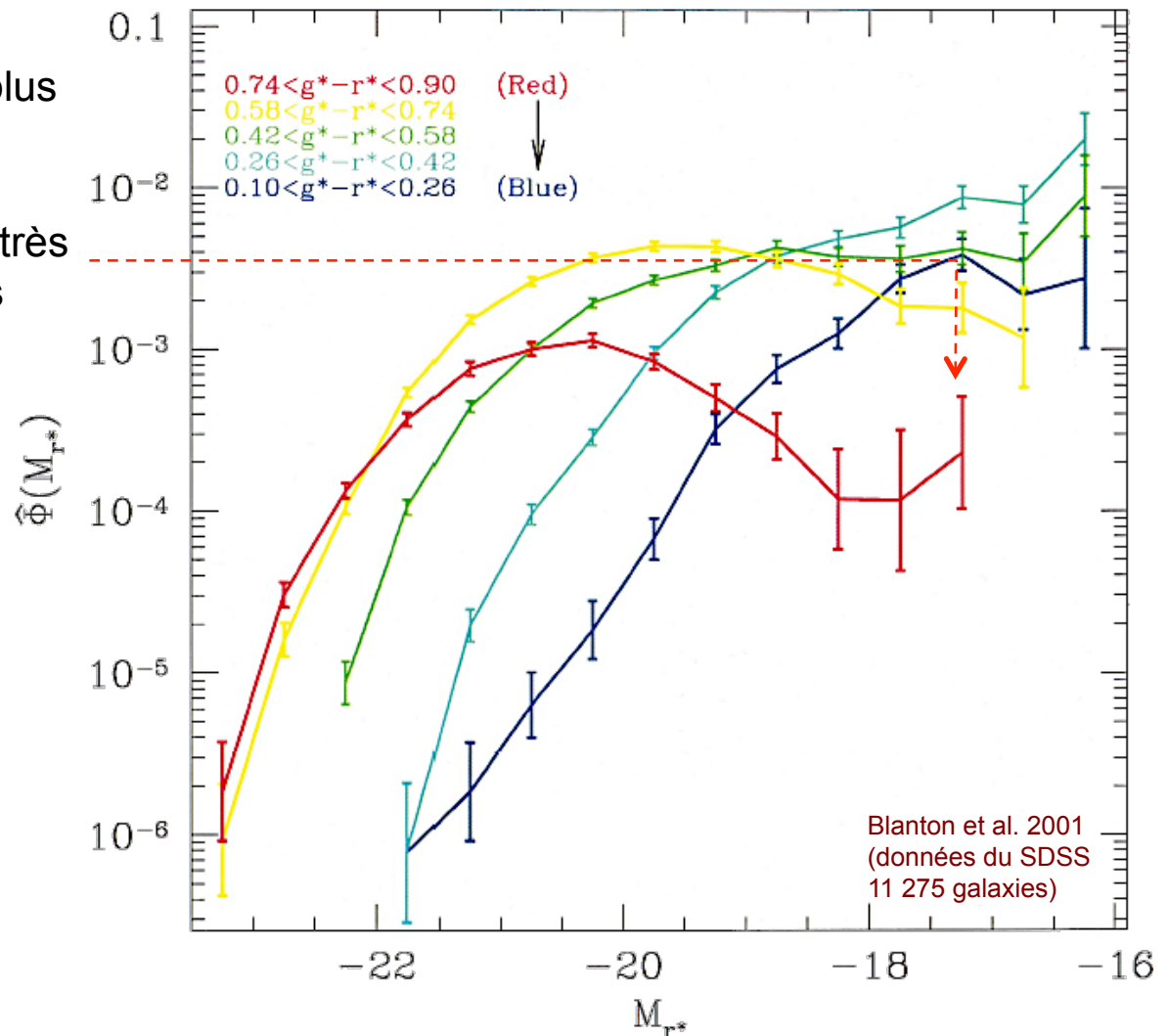
# **GALAXIES ELLIPTIQUES**

## La galaxie M87 au centre de l'amas de Virgo



# Luminosité des galaxies

- Les galaxies elliptiques sont plus brillantes que les spirales
- **MAIS** il existe une population très importante de galaxies naines sphéroïdales (DSph), aux propriétés très différentes

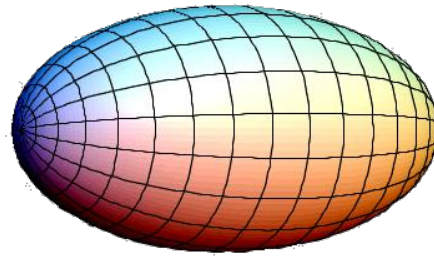
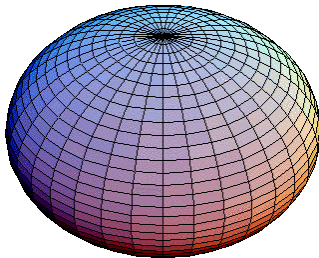




# Caractéristiques des galaxies elliptiques

## ■ Formes

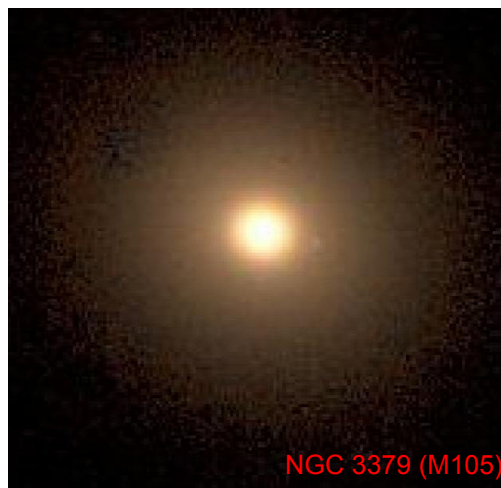
- Aplaties en coussin (oblate)
- Oblongues en ballon de rugby (prolate)



## ■ Masses

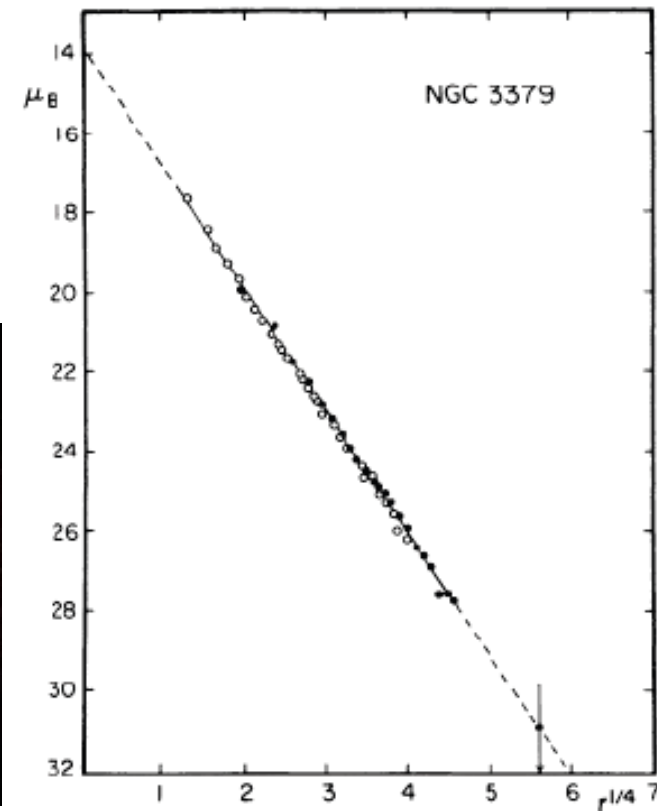
- $10^7 - 10^{14} M_{\odot}$ 
  - ↑ Elliptiques naines
  - ↑ Géantes cD

- Spirales
- $10^9 - 10^{12} M_{\odot}$



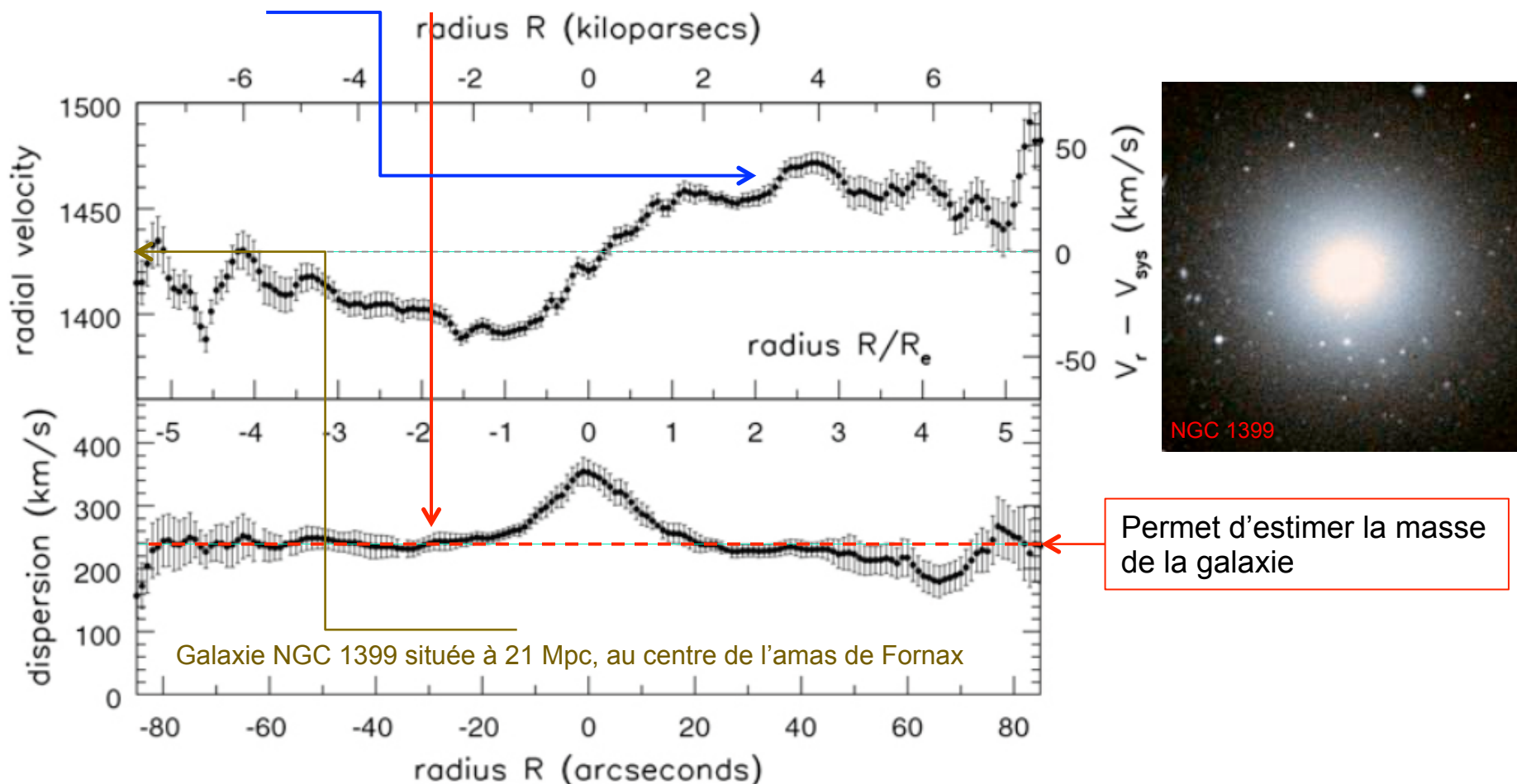
## ■ Profils de luminosité

- De Vaucouleurs en  $r^{1/4}$



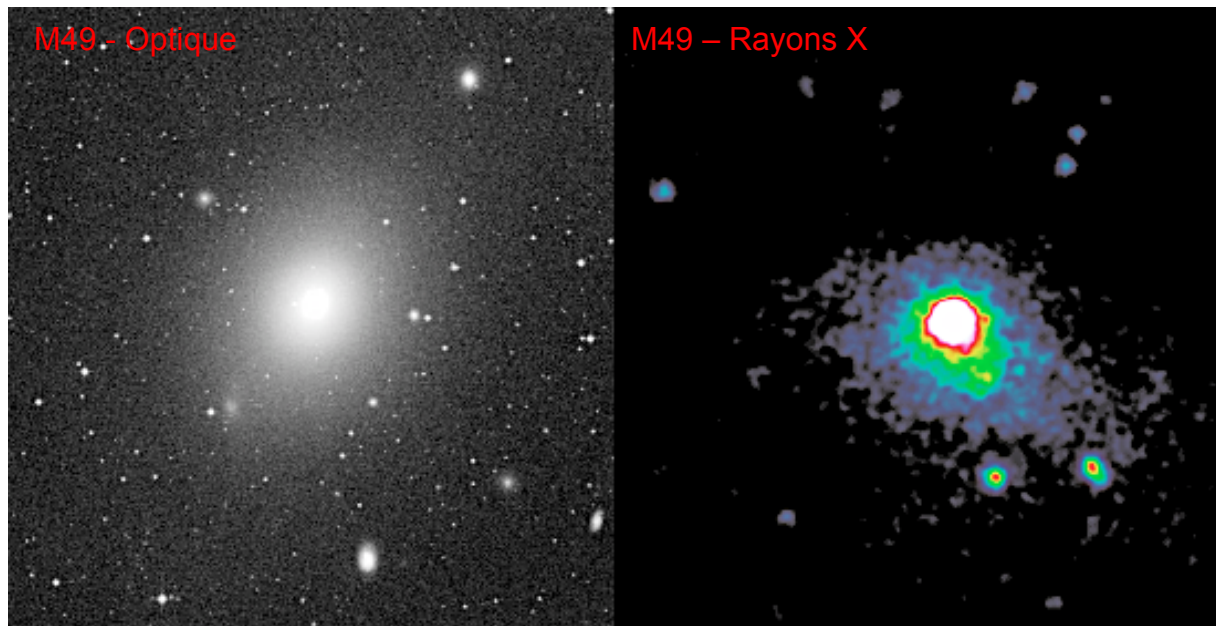
# Dynamique des elliptiques

- **Rotation lente** et **dispersion** maxwellienne des vitesses  $\Rightarrow$  **équilibre dû à la pression**



# Matière noire et gaz

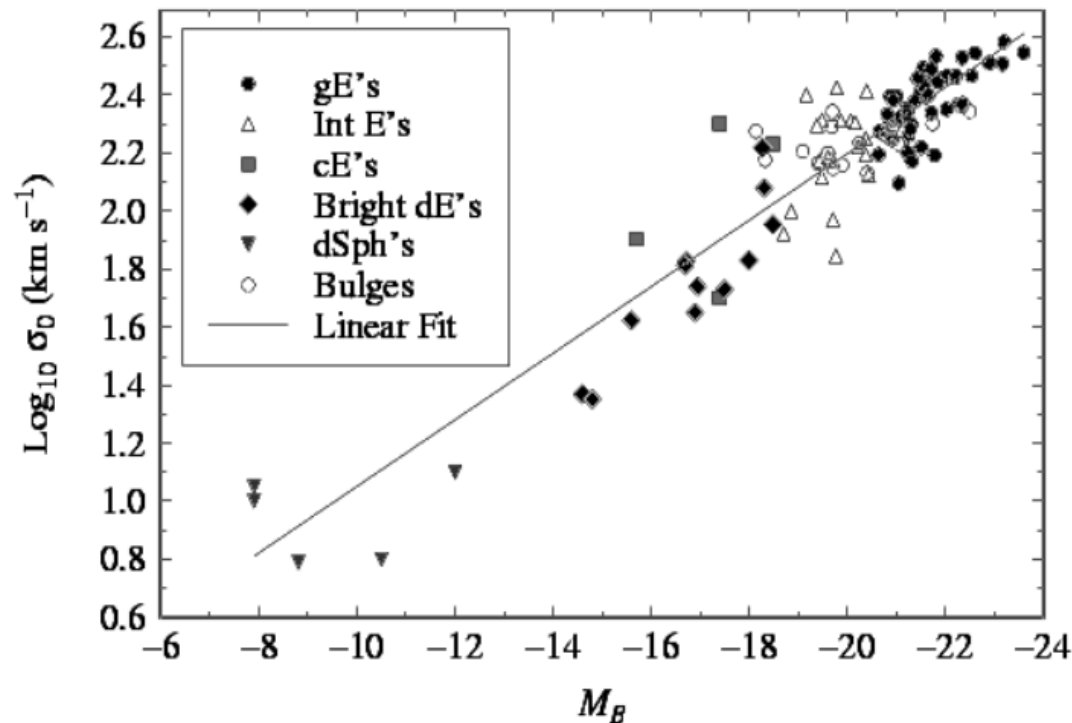
- Les galaxies elliptiques sont pauvres en gaz
- Mais il y en a !
- Émetteur X
  - vitesse  $V \approx 300 \text{ km/s}$  ( $10^{-3} c$ )
  - $\Leftrightarrow$  température  $T \approx m_H V^2 / 3k \approx 1 \text{ keV} = 10^7 \text{ K}$
- Matière noire ?
  - étoiles  $\Rightarrow M/L \approx 3$
  - observations  $\Rightarrow M/L \approx 10$  à  $20$
  - voire parfois  $M/L \approx 100$
  - masse de gaz chaud  $\approx 10^8$  à  $10^9 M_\odot$
  - $\Rightarrow$  **autre composante**



## Relation de Faber-Jackson (1976)

- Relation *empirique* entre luminosité  $L$  et dispersion de vitesse  $\sigma$
- $\Rightarrow$  méthode de mesure des distances (similaire à Tully-Fisher)

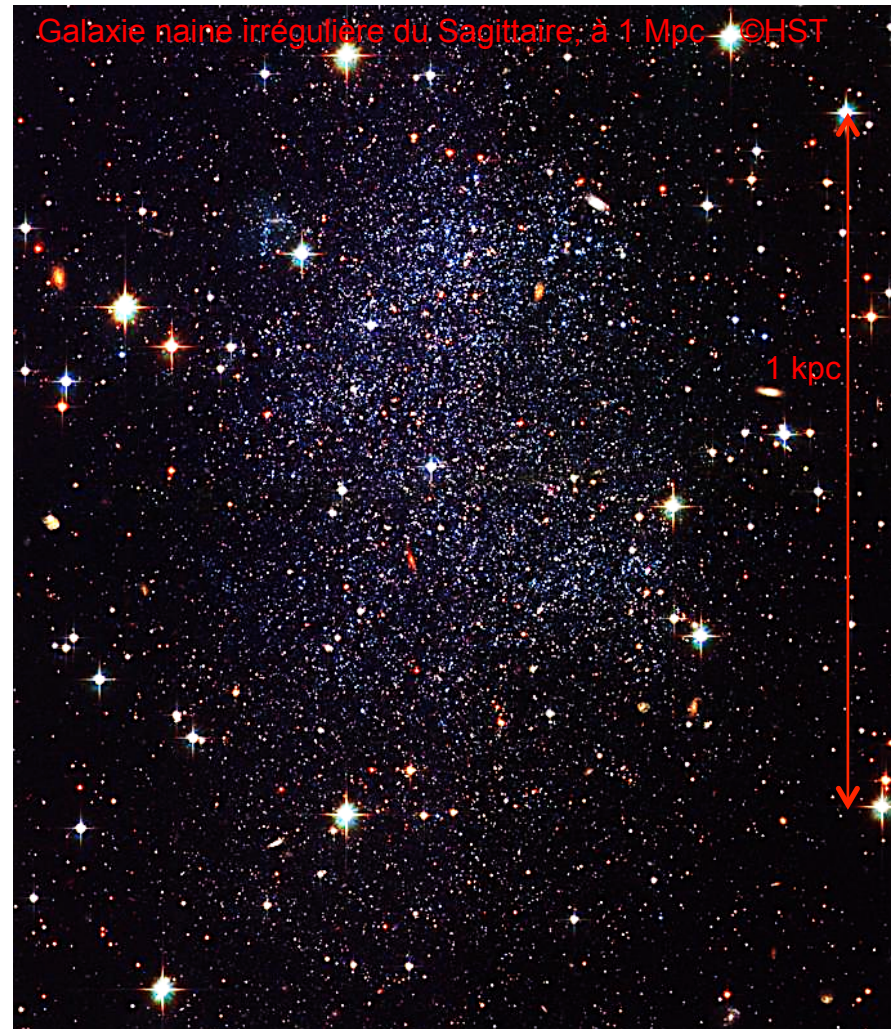
$$L \propto \sigma^4$$

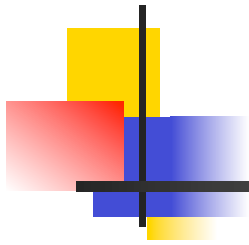


- « Plan fondamental »
  - Second paramètre : le diamètre (isophotal ou celui qui contient la moitié de la lumière totale)
  - Ou – de manière équivalente – la luminosité de surface moyenne  $\mu$
  - $\Rightarrow$  relation **plus précise** entre  $L$ ,  $\sigma$  et  $\mu$

## Les galaxies, c'est plus compliqué qu'on le pense...

- Galaxies de faible brillance de surface
  - i.e. *moins* brillantes que le fond du ciel nocturne ( $\mu \sim 22$ )
  - rapport M/L très élevé ( $>25$ )
  - $\Rightarrow$  beaucoup de gaz et/ou de matière noire ?
  - étoiles jeunes mais de faible métallicité
- Galaxies actives
  - Galaxies de Seyfert
  - Quasars
  - Noyaux actifs de galaxies
- Interactions entre galaxies





Merci de votre attention !

