

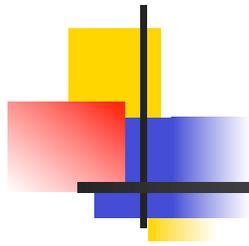
Astrophysique

17 – Les galaxies



Alain Bouquet

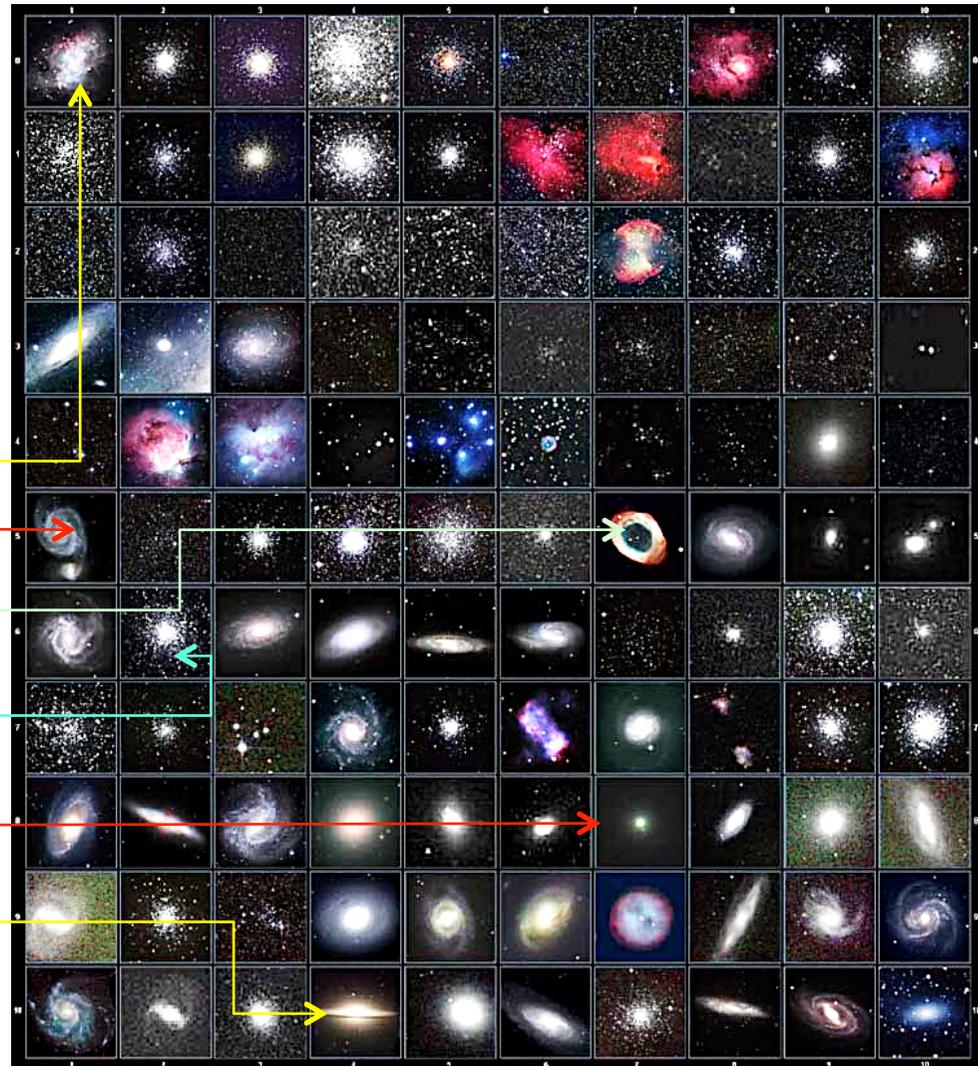
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



LE ROYAUMES DES NÉBULEUSES

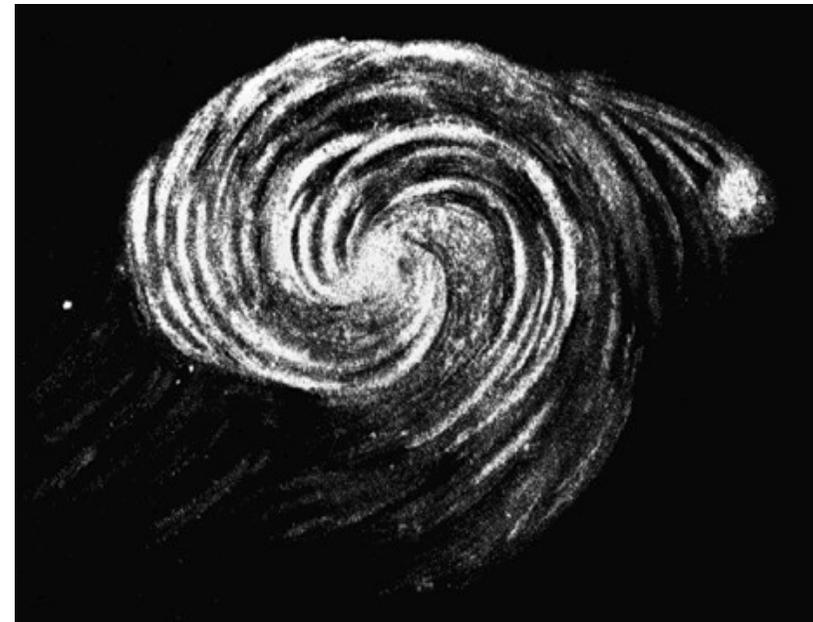
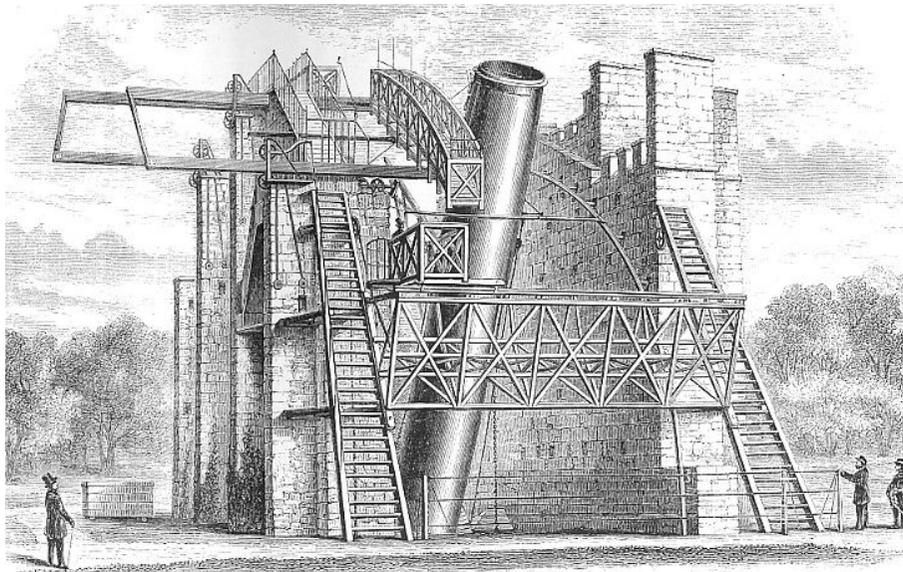
Le catalogue Messier

- 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

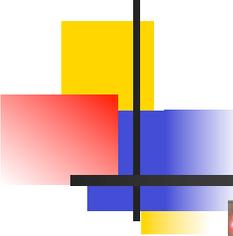


Spirales

- William Parsons, 3^o 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



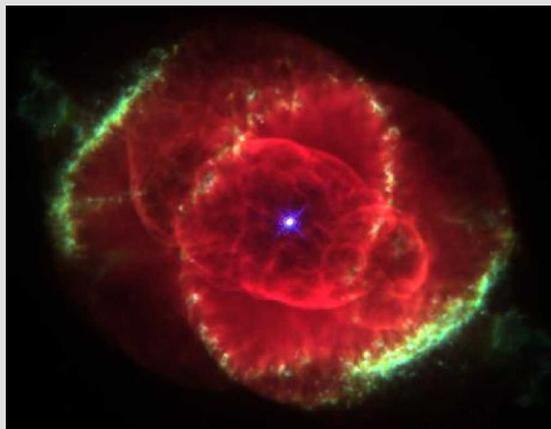
M 51 (par le HST)



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)



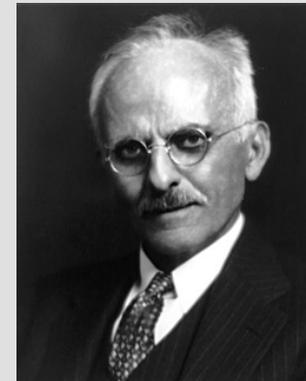
- Distribution des amas globulaires \Rightarrow diamètre de la Voie lactée ≈ 100 kpc
- La nébuleuse d'Andromède M31 a une taille angulaire de plusieurs degrés \Rightarrow elle ne peut pas être en dehors de la Voie lactée

- 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 ≈ 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^o 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)

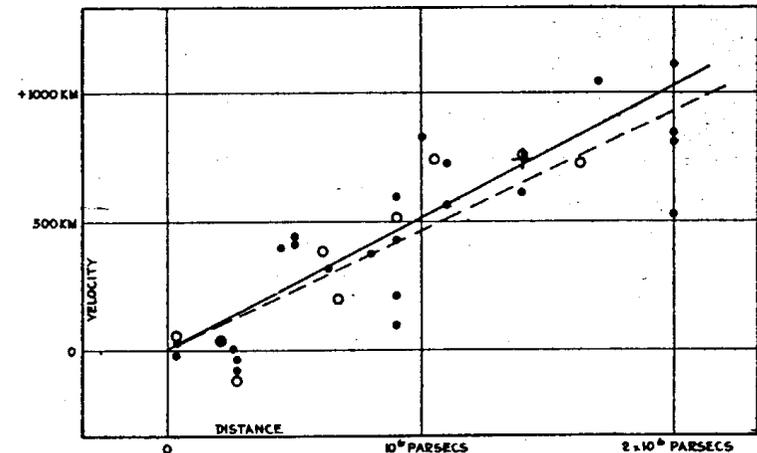
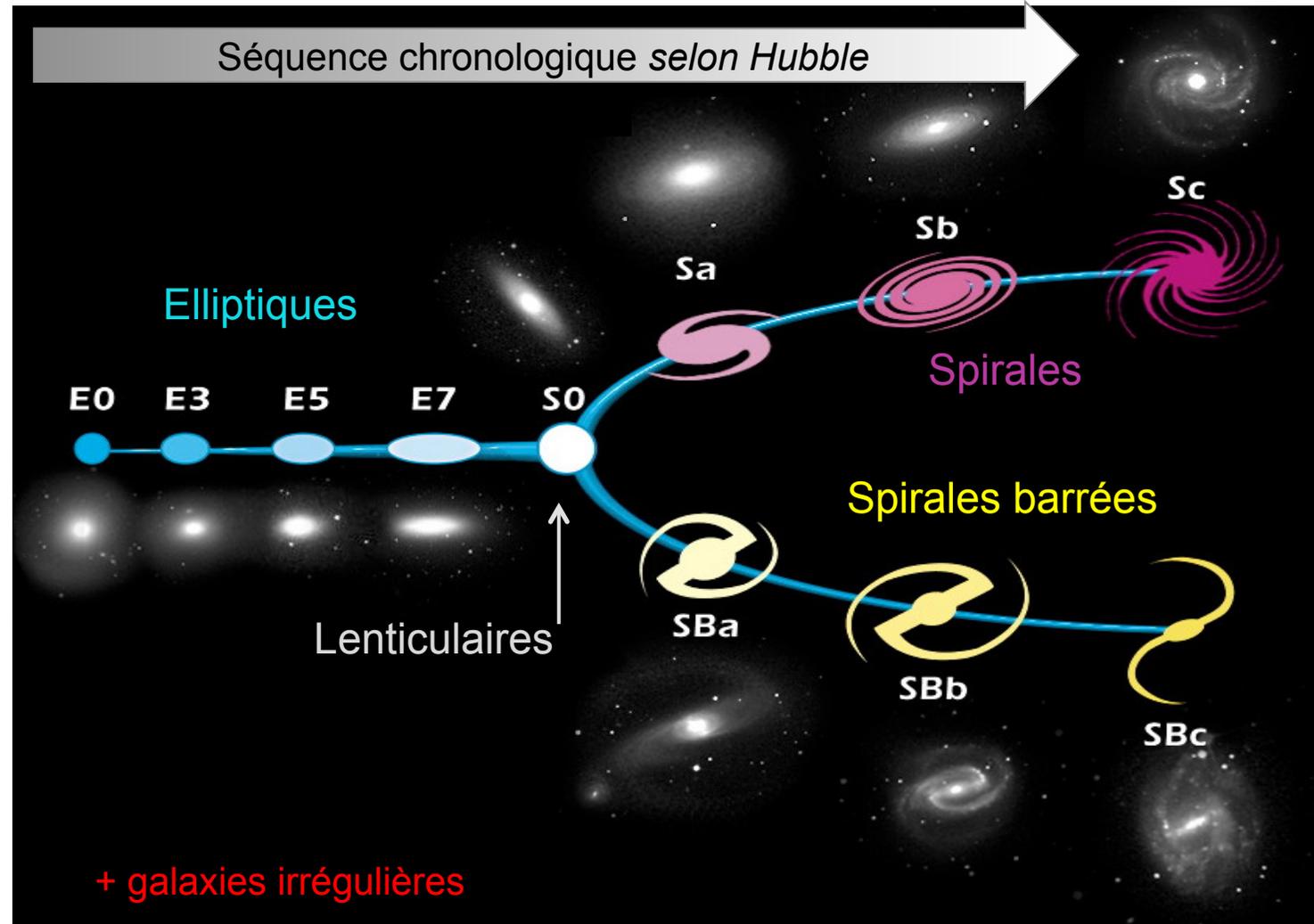
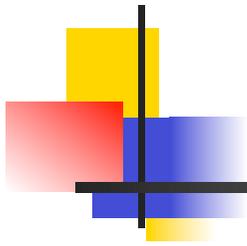


Diagramme Vitesse-Distance pour les galaxies, établi par Hubble en 1929

Le diapason de Hubble





POPULATIONS STELLAIRES

Populations I, II (et III ?)

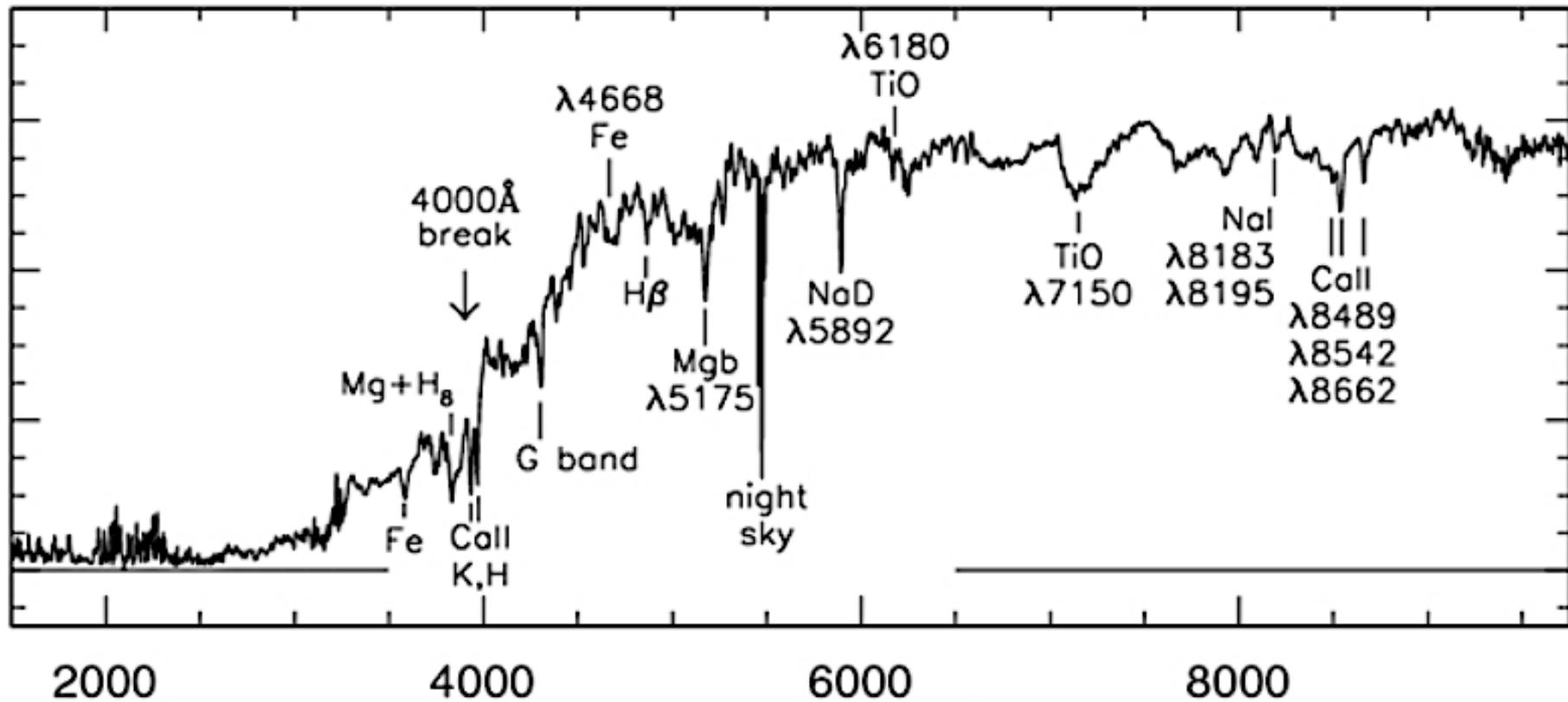


- 1944 : Walter Baade profita du *black-out* à Los Angeles pour résoudre en étoiles le centre de M31 et les galaxies du Groupe Local
- Il découvrit des différences systématiques
 - dans les bras des spirales : étoiles bleues, jeunes et de forte métallicité
⇒ Population I
 - dans le bulbe des spirales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

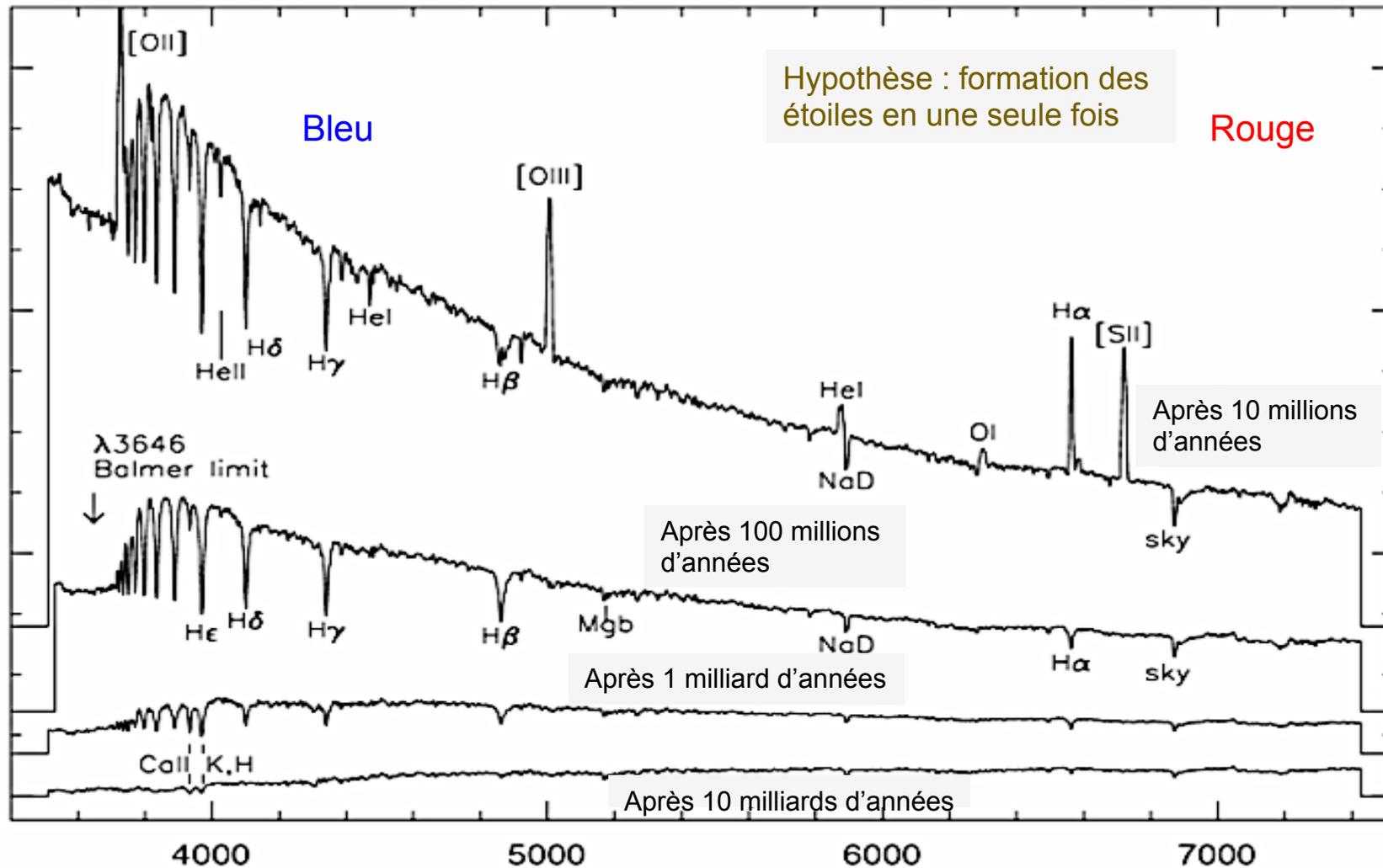
- En *première* approximation
- Elliptiques
 - formation d'étoiles rapide (bouffée initiale) consommant tout le gaz
 - ⇒ étoiles anciennes
 - ⇒ étoiles de faible métallicité
 - ⇒ étoiles rouges (naines et géantes)
- Spirales
 - formation continue d'étoiles
 - ⇒ présence d'étoiles jeunes
 - ⇒ étoiles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

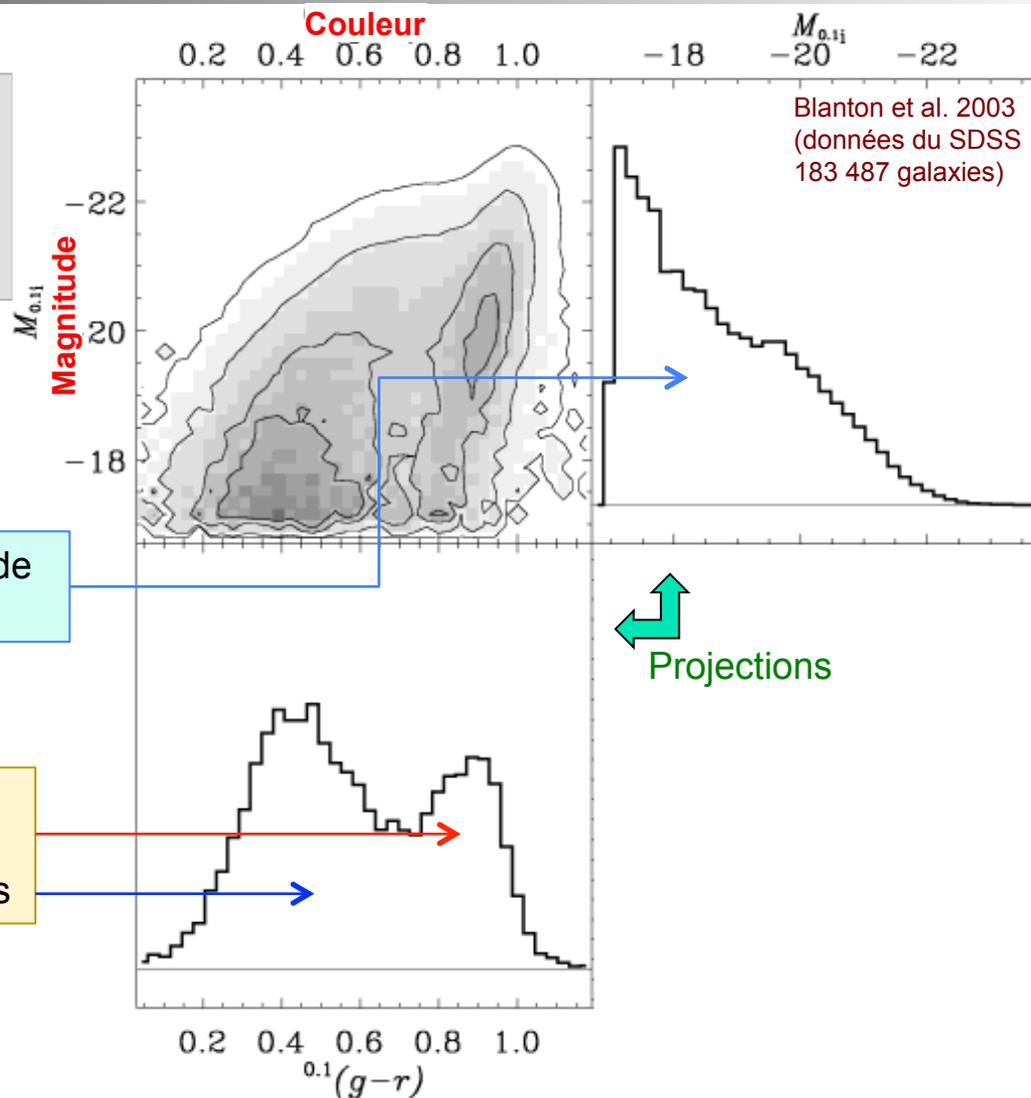


Couleurs et luminosité des galaxies

- 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



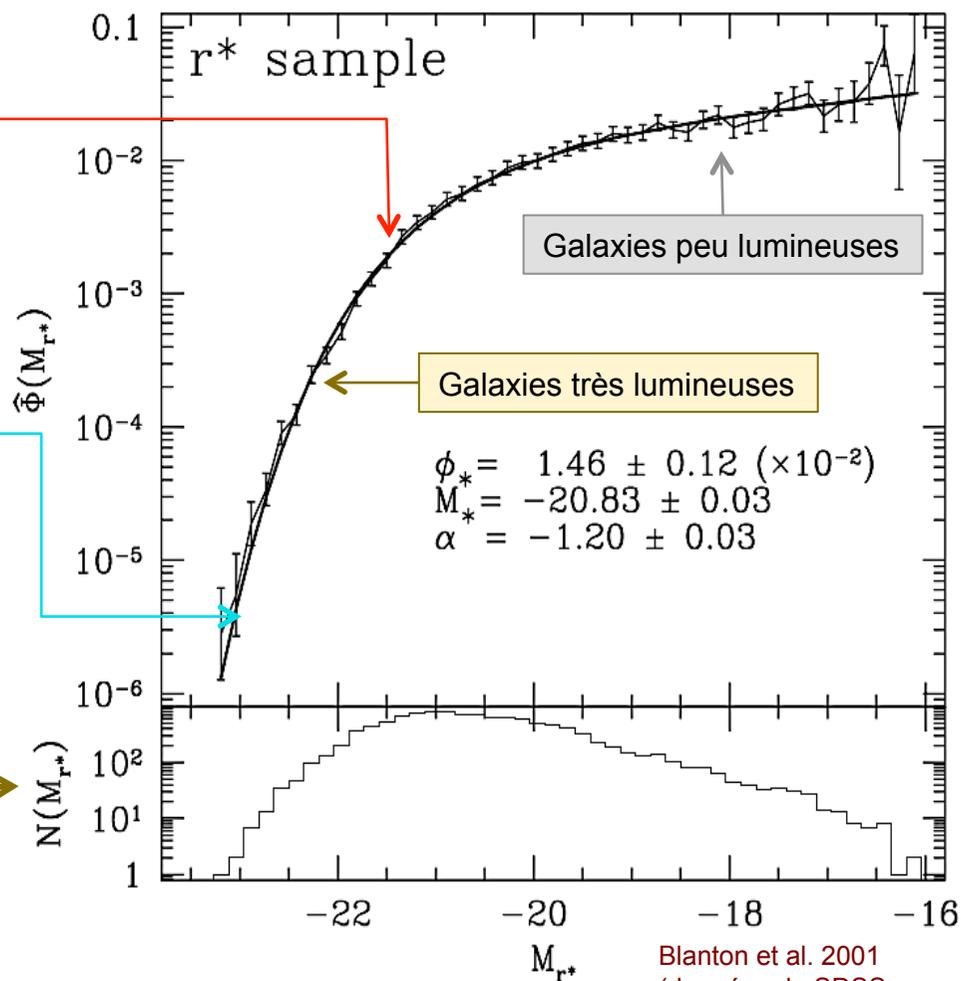
Luminosité des galaxies

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

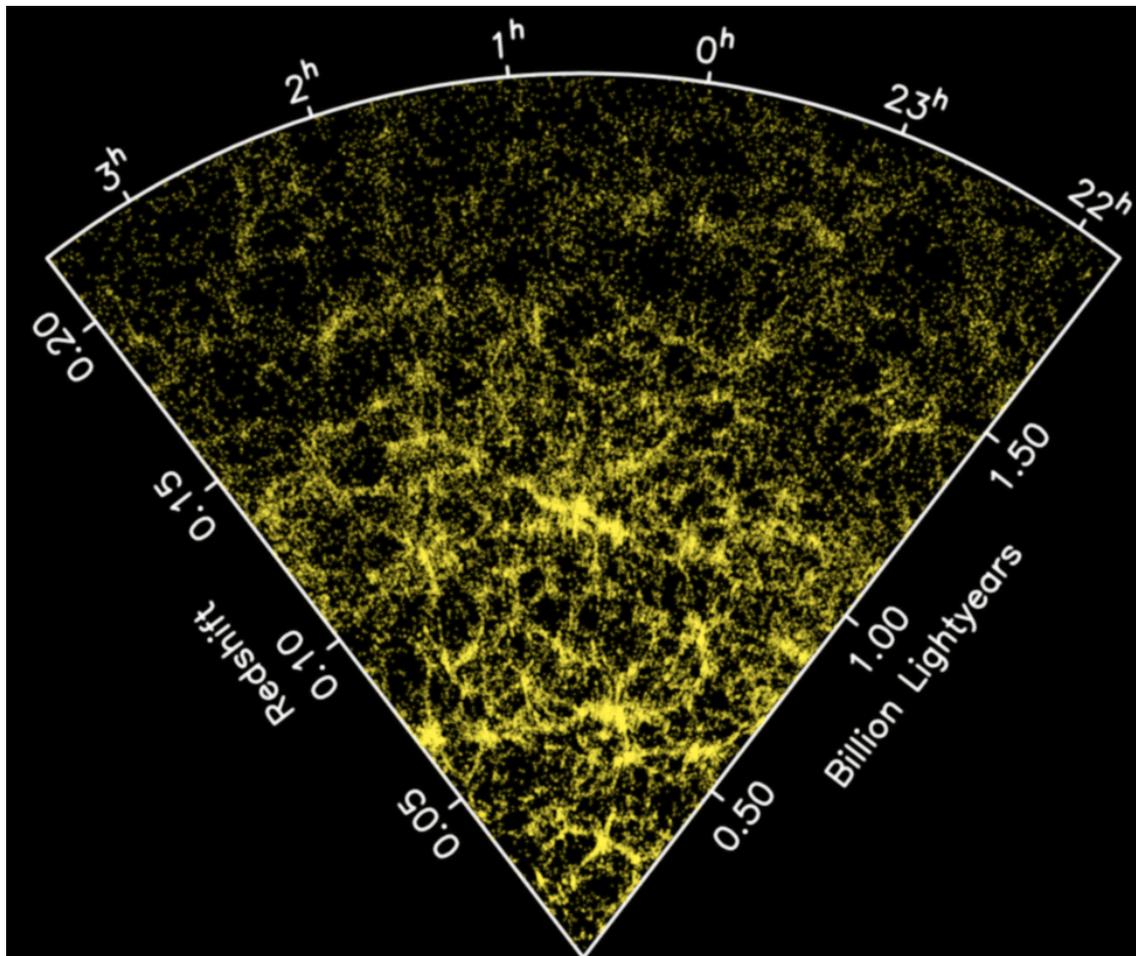
Nombre de galaxies de l'échantillon



Distribution spatiale des galaxies

■ Amas de galaxies

■ Galaxies « de champ »

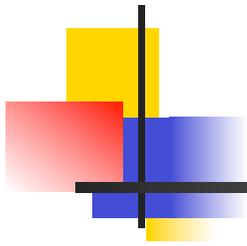


En gros :

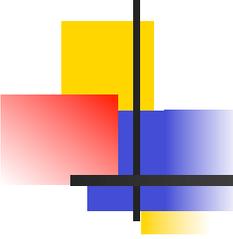
- La moitié des galaxies se trouvent dans des amas
- 80% des galaxies « de champ » sont des spirales

2dF Galaxy Redshift Survey

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

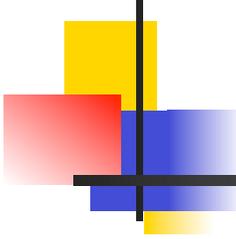


GALAXIES SPIRALES



La galaxie M31 (NGC224) dans Andromède

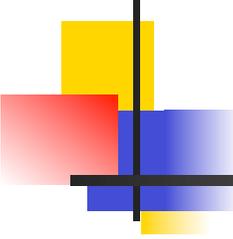




La galaxie M31 en ultraviolet



NASA / Wise

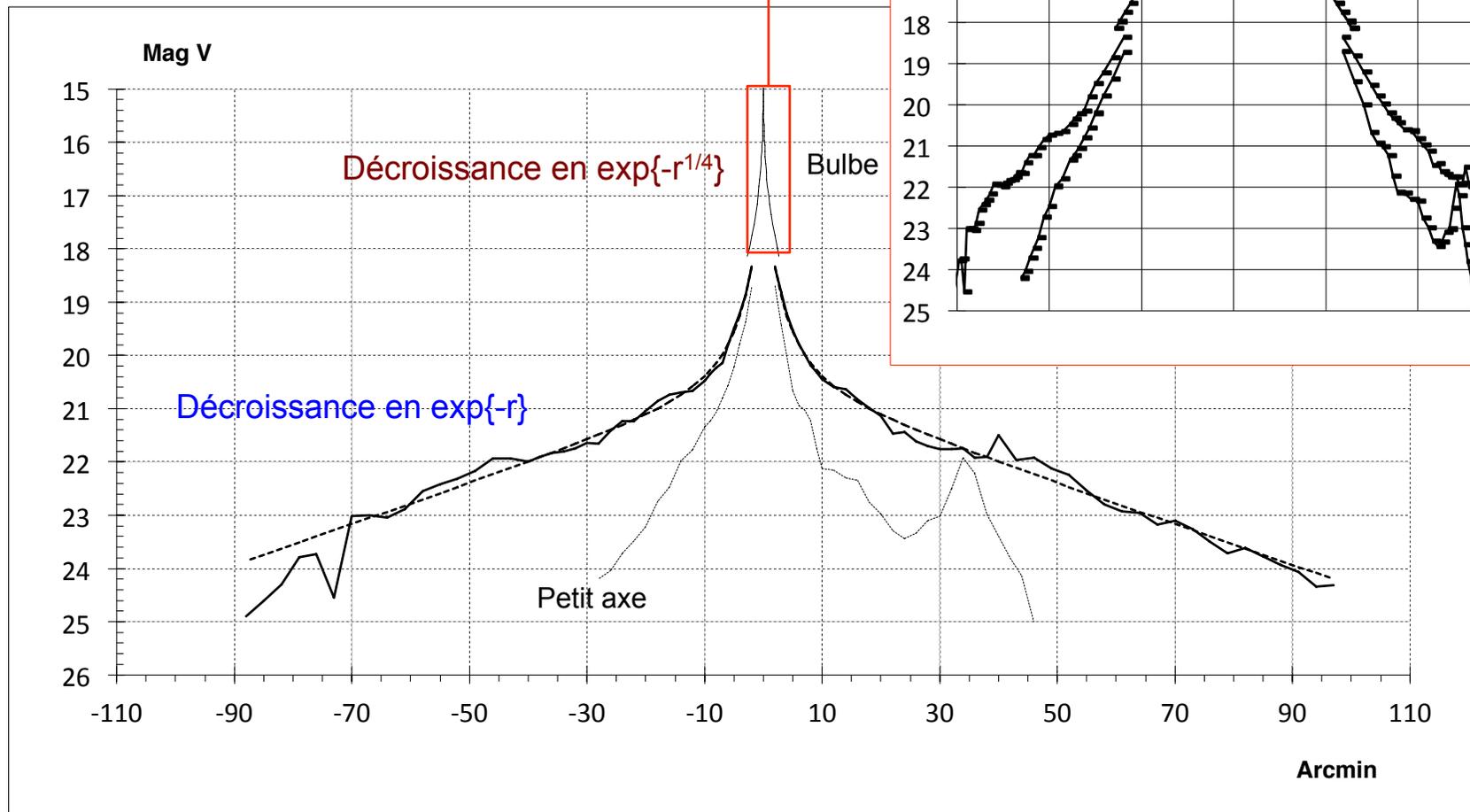


La galaxie M31 en infrarouge (24 μm)



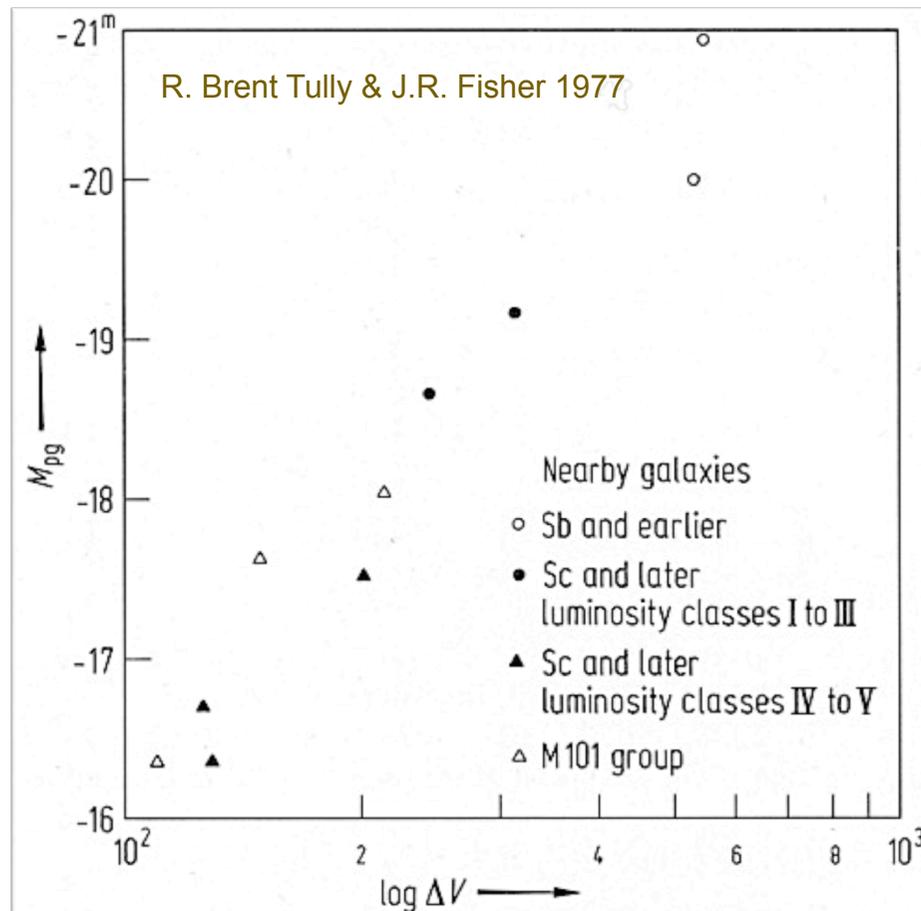
NASA / Spitzer

Profil de luminosité de M31



Relation de Tully-Fisher (1977)

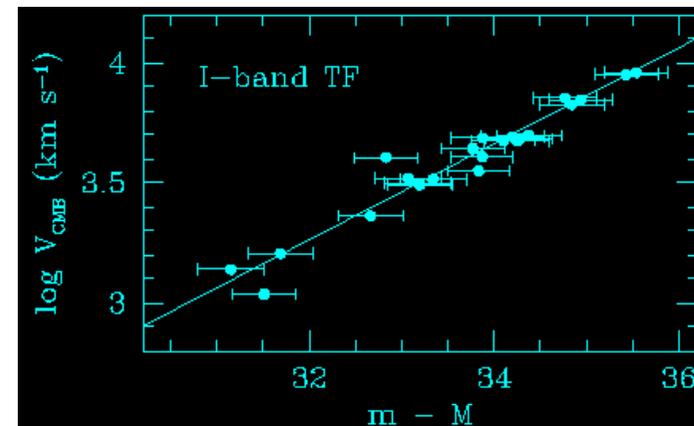
- Relation **empirique** entre vitesse de rotation et luminosité **absolue** des spirales
- Logique : luminosité **et** vitesse de rotation augmentent avec la masse de la galaxie



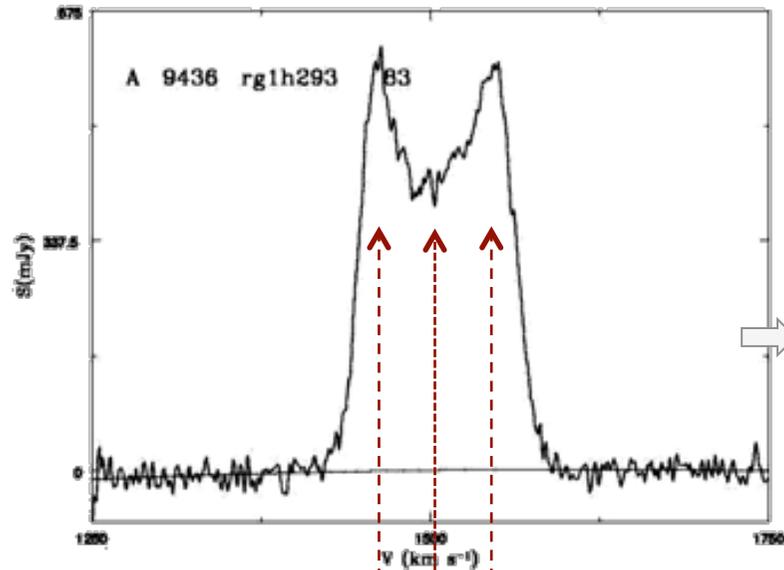
$$L \propto V^4$$

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

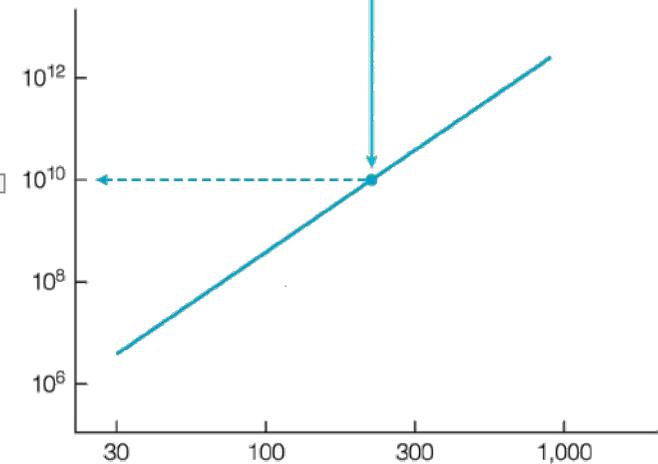


Bord « avançant »
 Centre de la galaxie
 Bord « reculant »

Largeur de la raie HI
 ⇔ vitesse de rotation

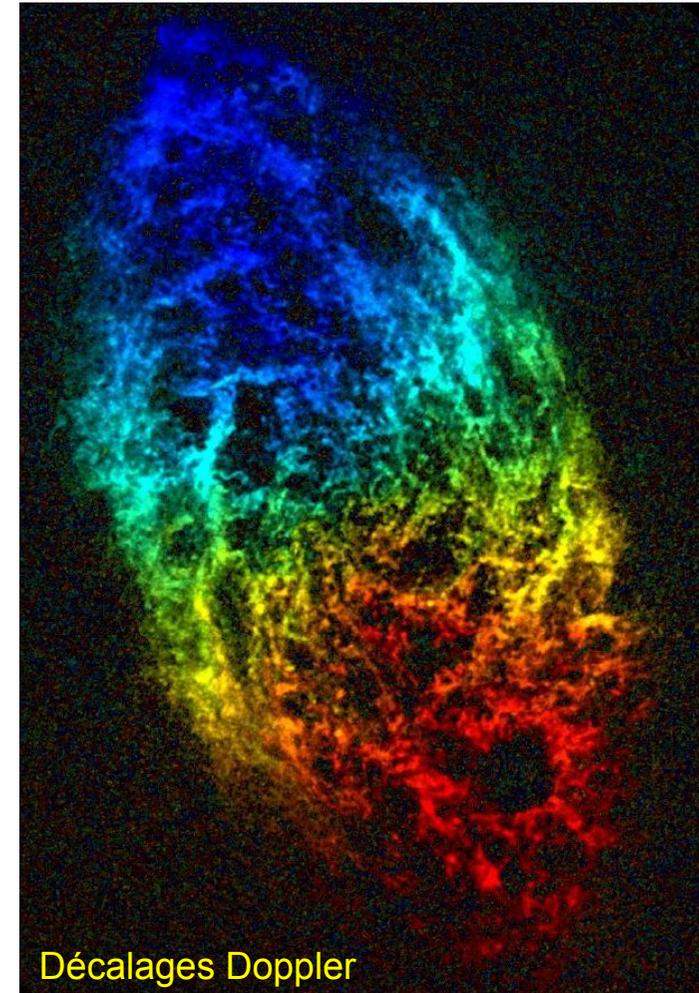


Luminosité absolue ⇔
 distance de la galaxie

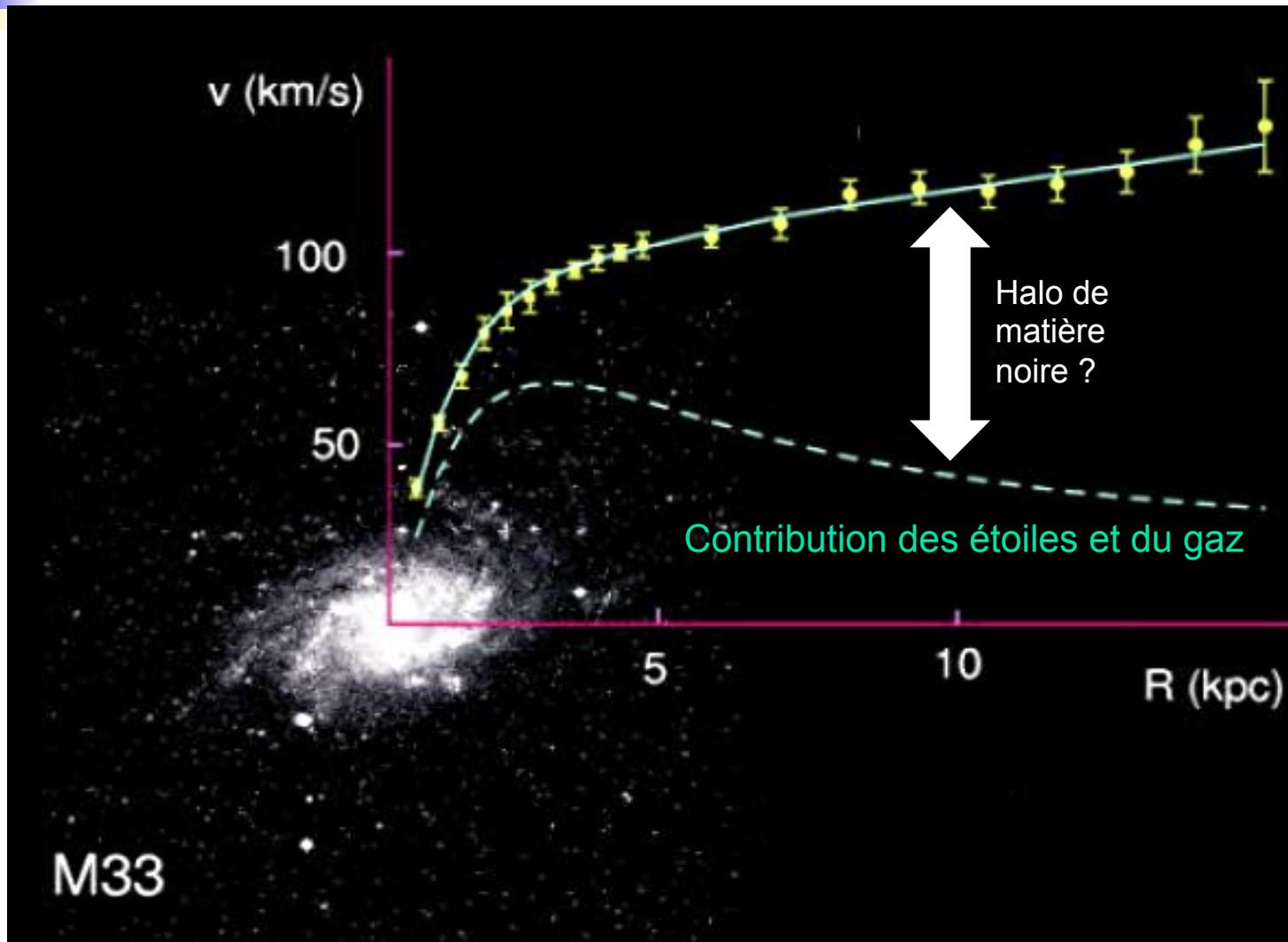


La matière noire dans les galaxies

- 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**

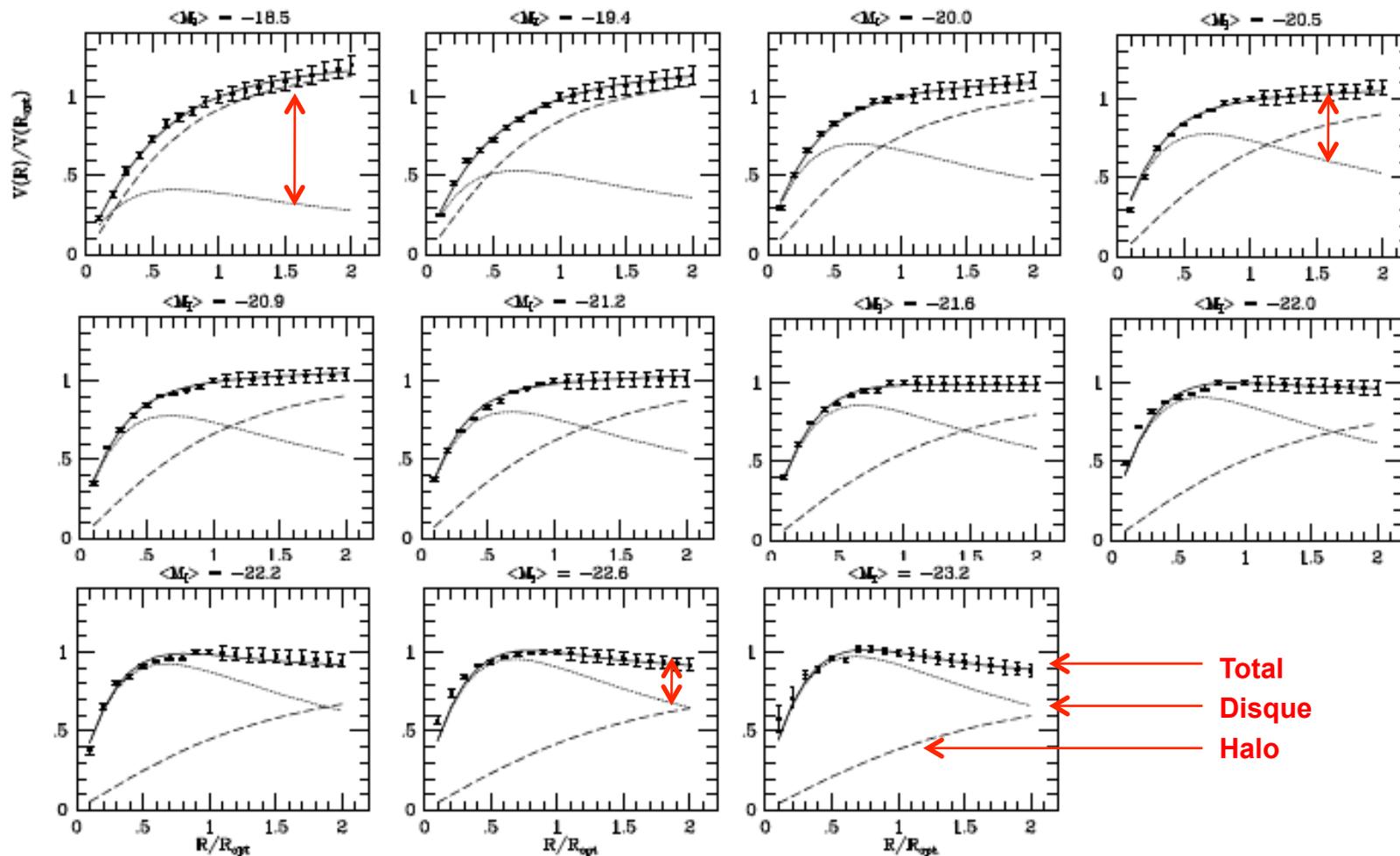


→ Courbe de rotation



Un effet systématique, plus marqué pour les naines

Galaxie naine

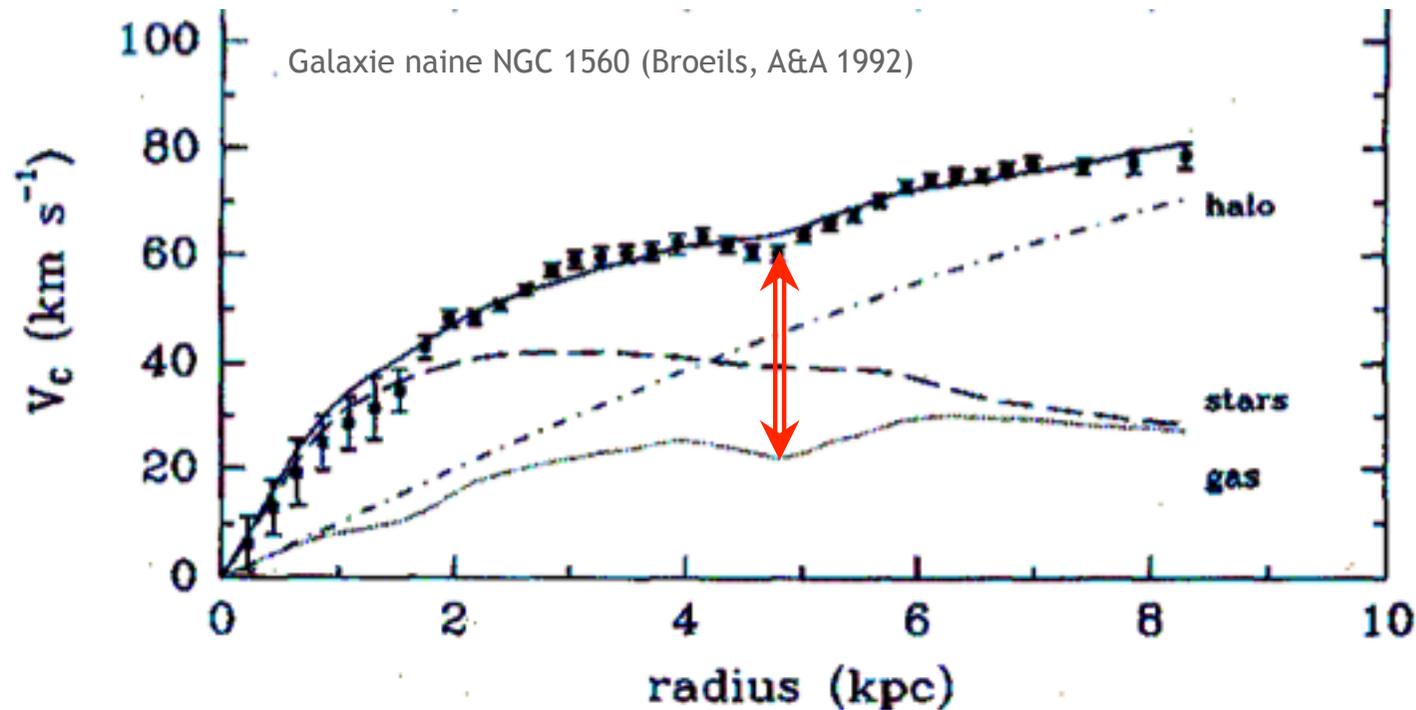


Galaxie géante

Conspiration



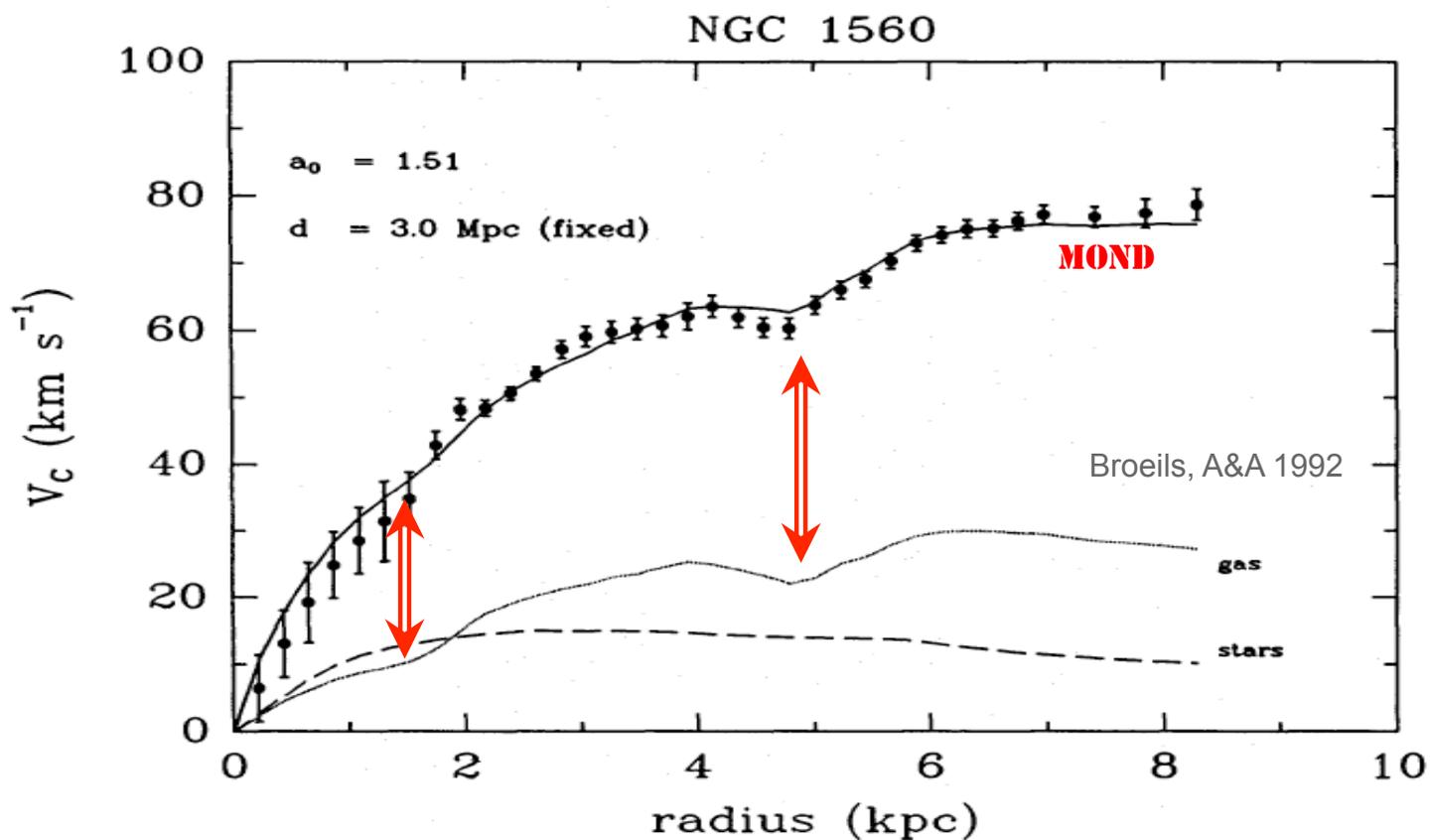
- Corrélation entre le profil requis pour le halo et la distribution de matière lumineuse
 - → le halo est-il formé de matière ordinaire, mais non lumineuse ?
 - comme des étoiles peu lumineuses (naines brunes, naines blanches ou noires) ?
 - ou du gaz ne rayonnant pas en radio, comme l'hydrogène moléculaire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

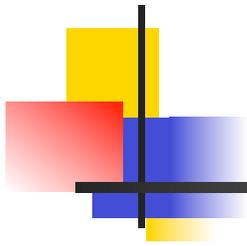
- Désaccord entre :
 - quantité de matière lumineuse
 - quantité calculée en appliquant les lois de Newton aux mouvements de la matière lumineuse
- Rien ne garantit que les lois de Newton (de la dynamique *ou* de la gravitation) soient correctes en dehors du domaine où elles sont bien vérifiées: le système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

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

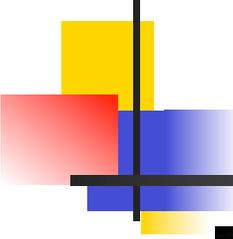
(et bien entendu $F = m\gamma$ quand $\gamma > \gamma_0$)

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





GALAXIES ELLIPTIQUES

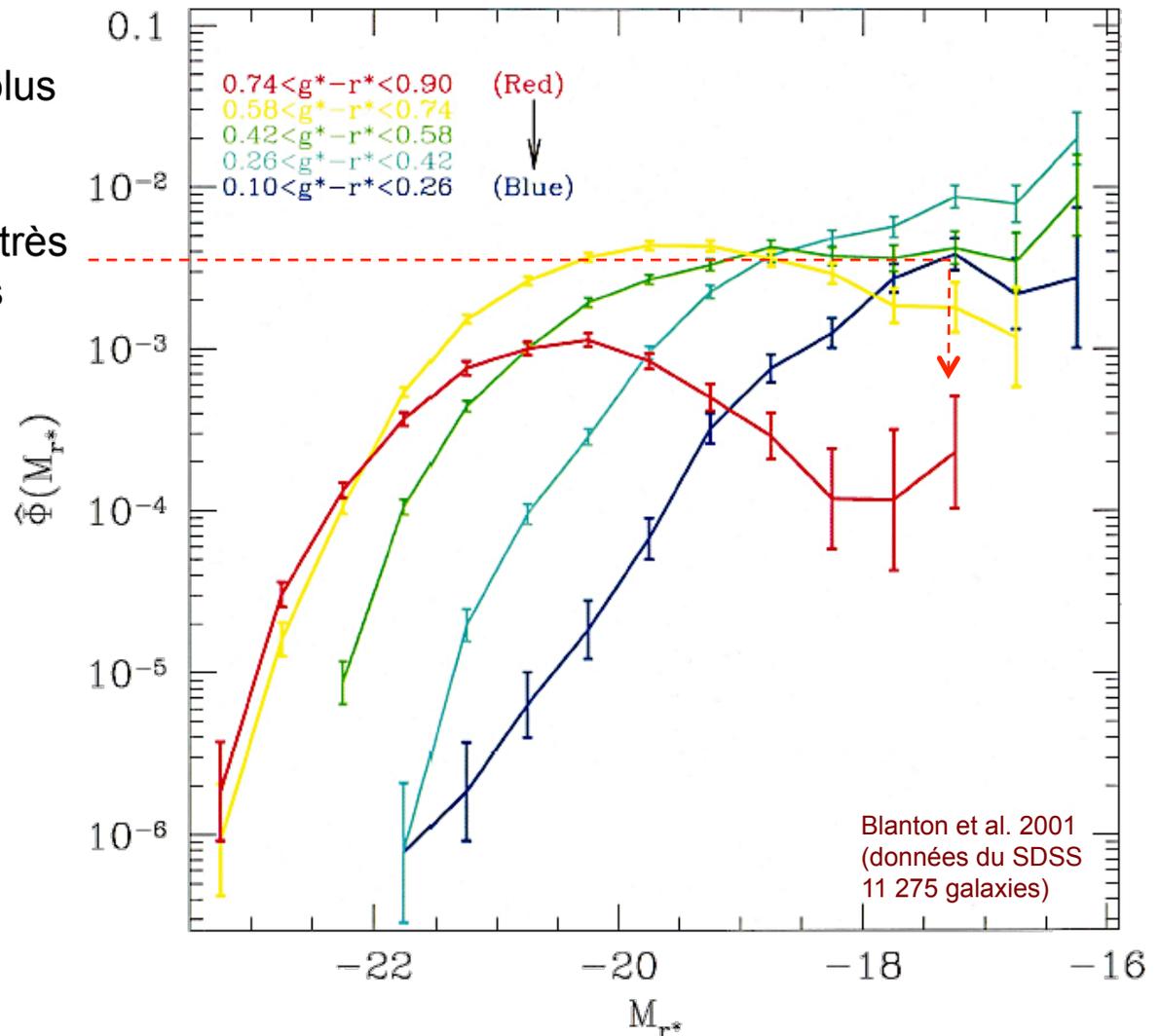


La galaxie M87 au centre de l'amas de Virgo



Luminosité des galaxies

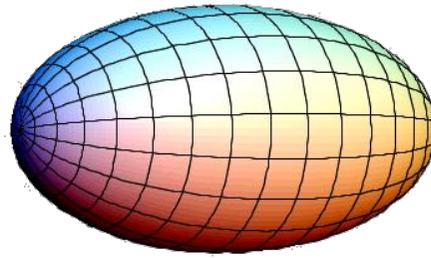
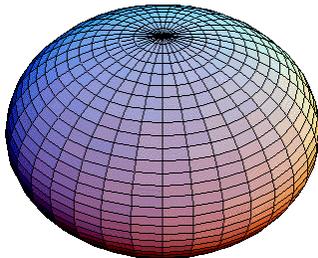
- Les galaxies elliptiques sont plus brillantes que les spirales
- **MAIS** il existe une population très importante de galaxies naines sphéroïdales (DSph), aux propriétés très différentes



Caractéristiques des galaxies elliptiques

■ Formes

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



■ Masses

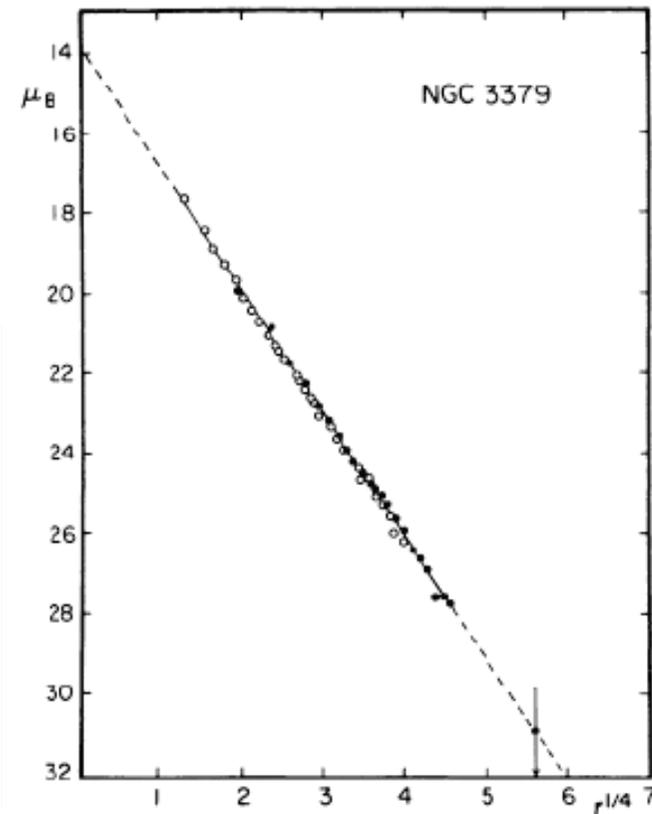
- $10^7 - 10^{14} M_{\odot}$
 - ↑ Elliptiques naines
 - ↑ Géantes cD

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



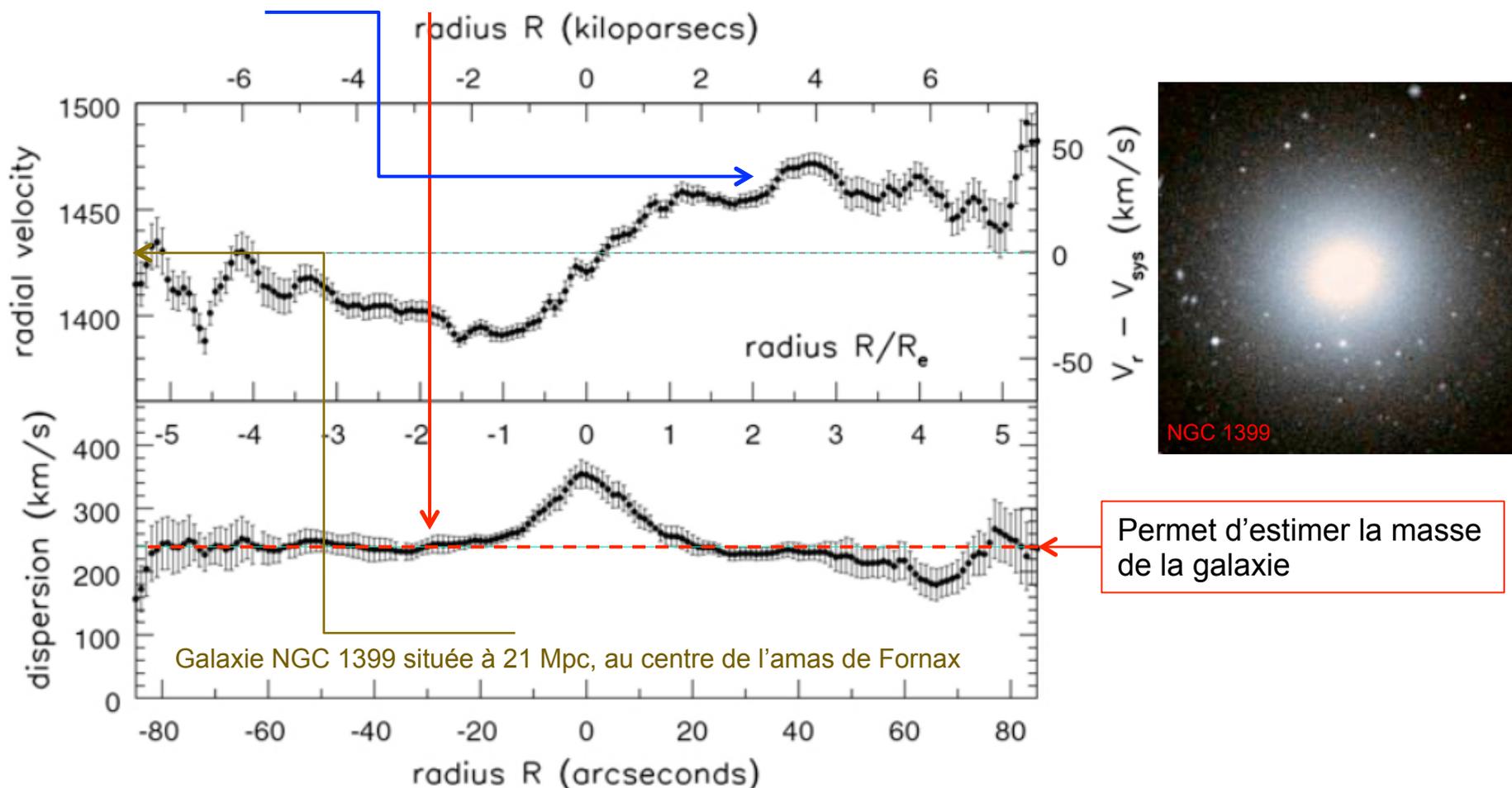
■ Profils de luminosité

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



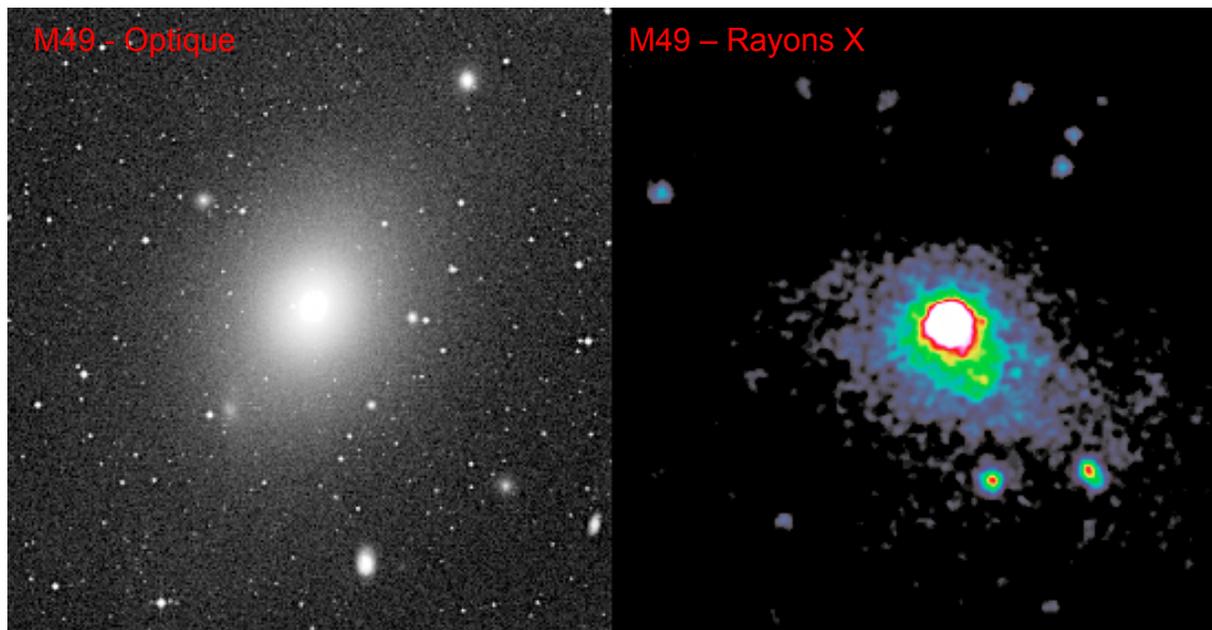
Dynamique des elliptiques

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



Matière noire et gaz

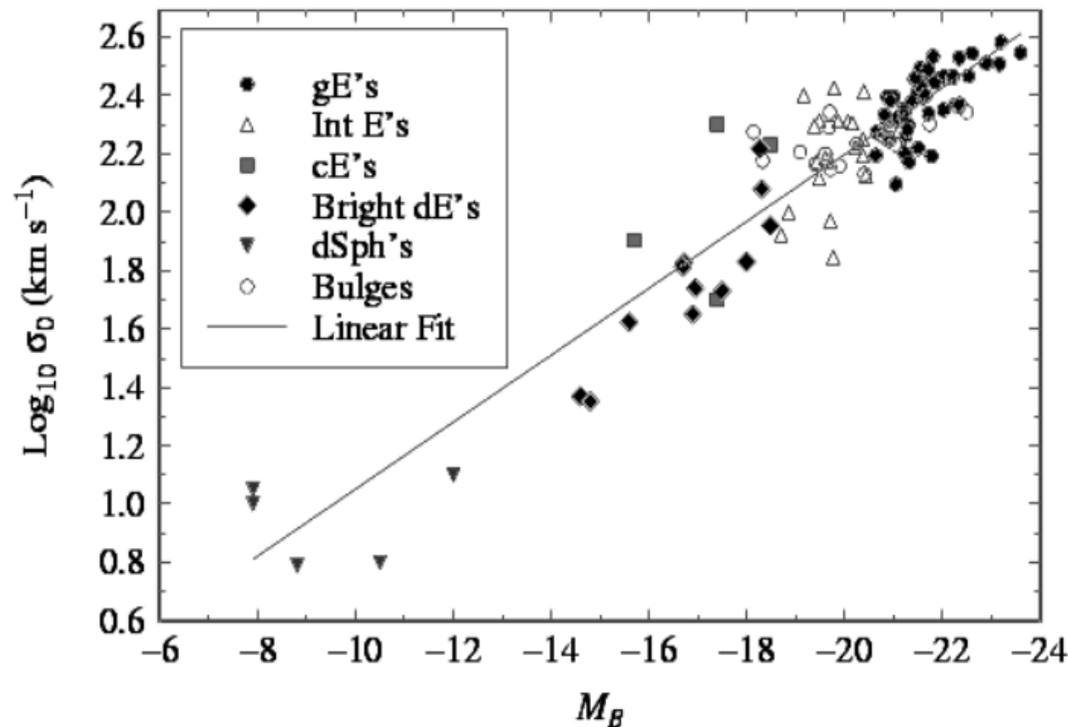
- Les galaxies elliptiques sont pauvres en gaz
- Mais il y en a !
- Émetteur X
 - vitesse $V \approx 300 \text{ km/s}$ ($10^{-3} c$)
 - \Leftrightarrow température $T \approx m_H V^2 / 3k \approx 1 \text{ keV} = 10^7 \text{ K}$
- Matière noire ?
 - étoiles $\Rightarrow M/L \approx 3$
 - observations $\Rightarrow M/L \approx 10$ 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 σ
- \Rightarrow méthode de mesure des distances (similaire à Tully-Fisher)

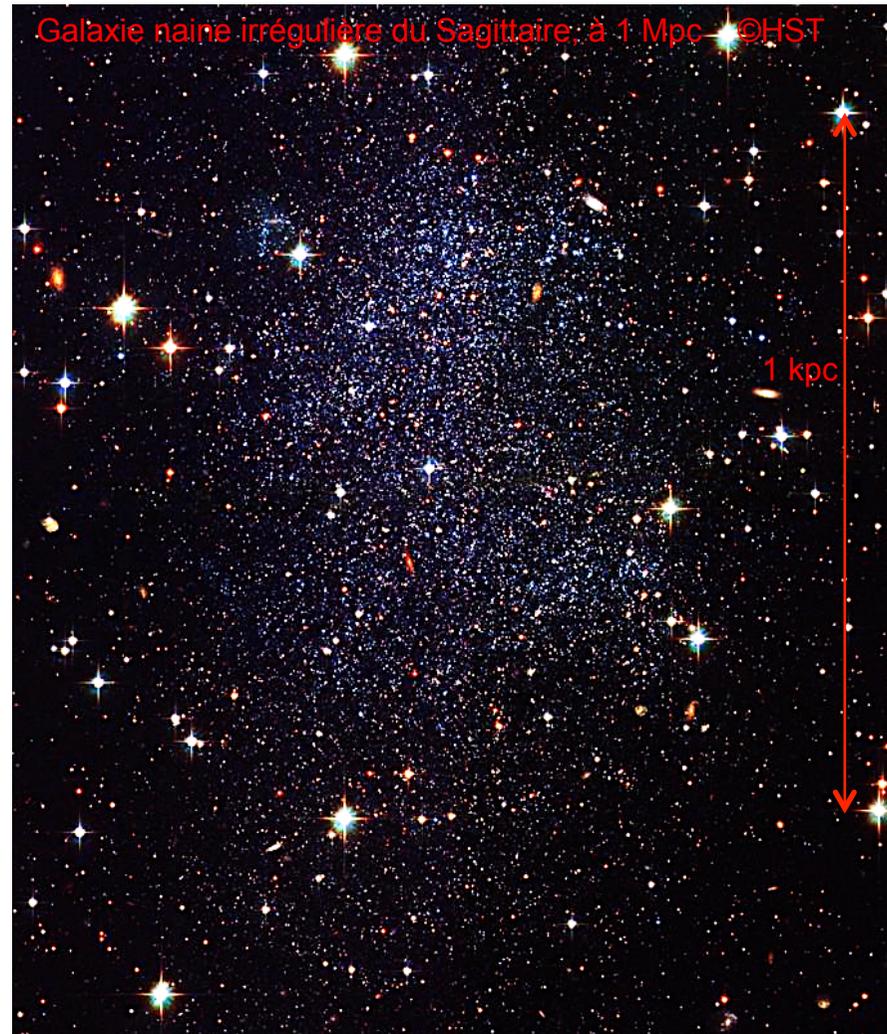
$$L \propto \sigma^4$$

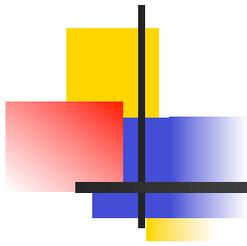


- « Plan fondamental »
 - Second paramètre : le diamètre (isophotal ou celui qui contient la moitié de la lumière totale)
 - Ou – de manière équivalente – la luminosité de surface moyenne μ
 - \Rightarrow relation **plus précise** entre L , σ et μ

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 !

