

Physique des galaxies

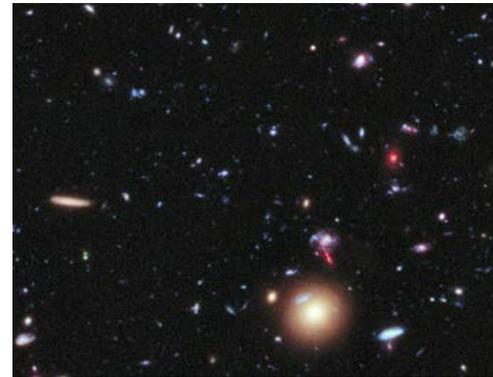
Cours Labex OCEVU

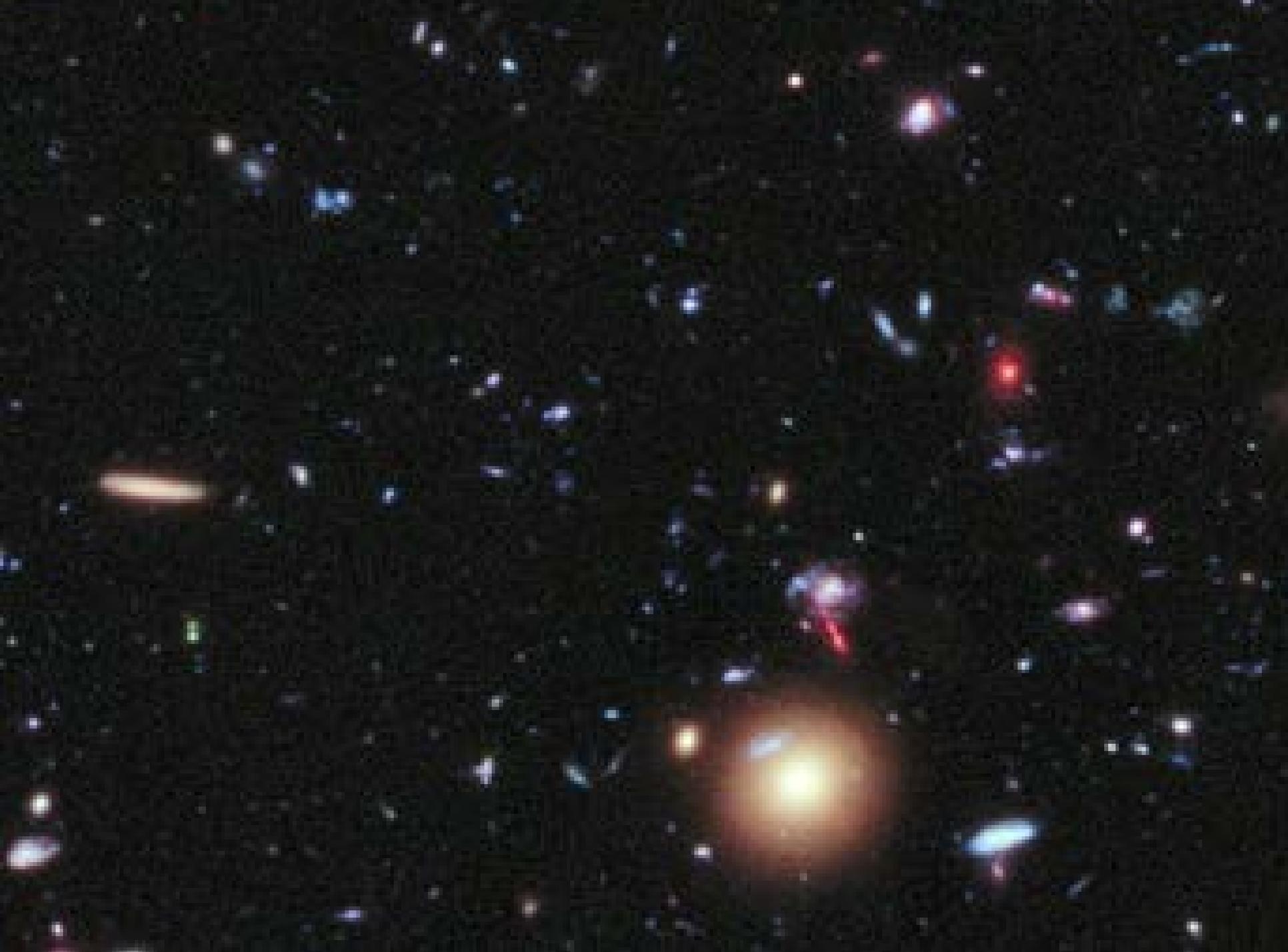
Plan

1. Qu'est-ce qu'une galaxie ?
 - En tant qu'objet
 - En tant que collection d'objets
2. Propriétés gravitationnelles
3. Recyclage de la matière et milieu interstellaire
4. Coupler l'évolution « chimique » et l'évolution dynamique = chemodynamique...

Hubble eXtreme Deep Field (HST)







1. Une collection d'objets astrophysiques étant chacun objet d'études



Éléments constitutants

Gaz neutre atomique

Gaz moléculaire

Étoiles vieilles et âges intermédiaires

Étoiles jeunes,
Région de formation
d'étoiles

Gaz atomique
ionisé

Poussière

Phénomènes collectifs

Jets

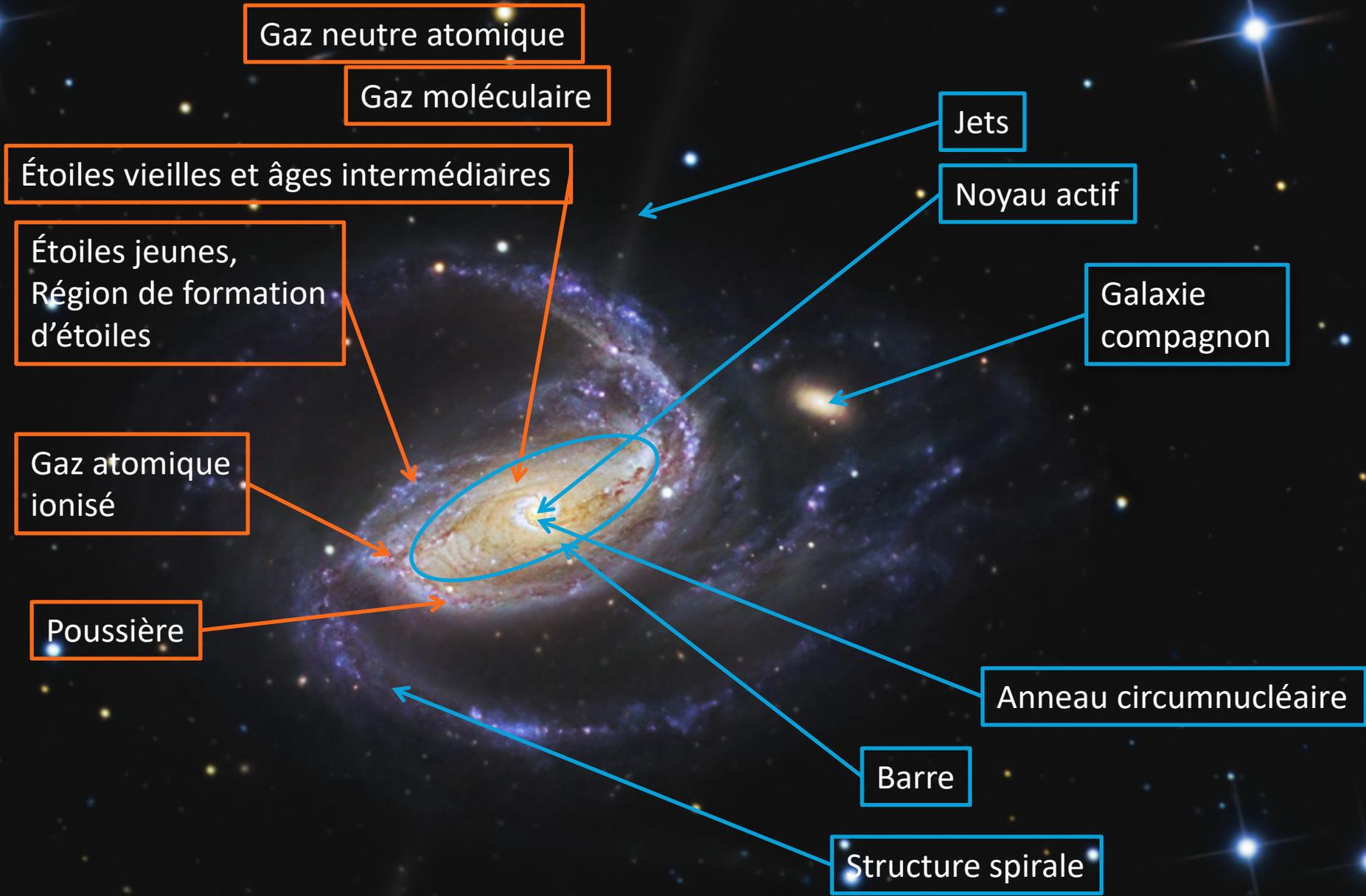
Noyau actif

Galaxie
compagnon

Anneau circumnucléaire

Barre

Structure spirale



1. Les galaxies vues comme des systèmes « complexes »

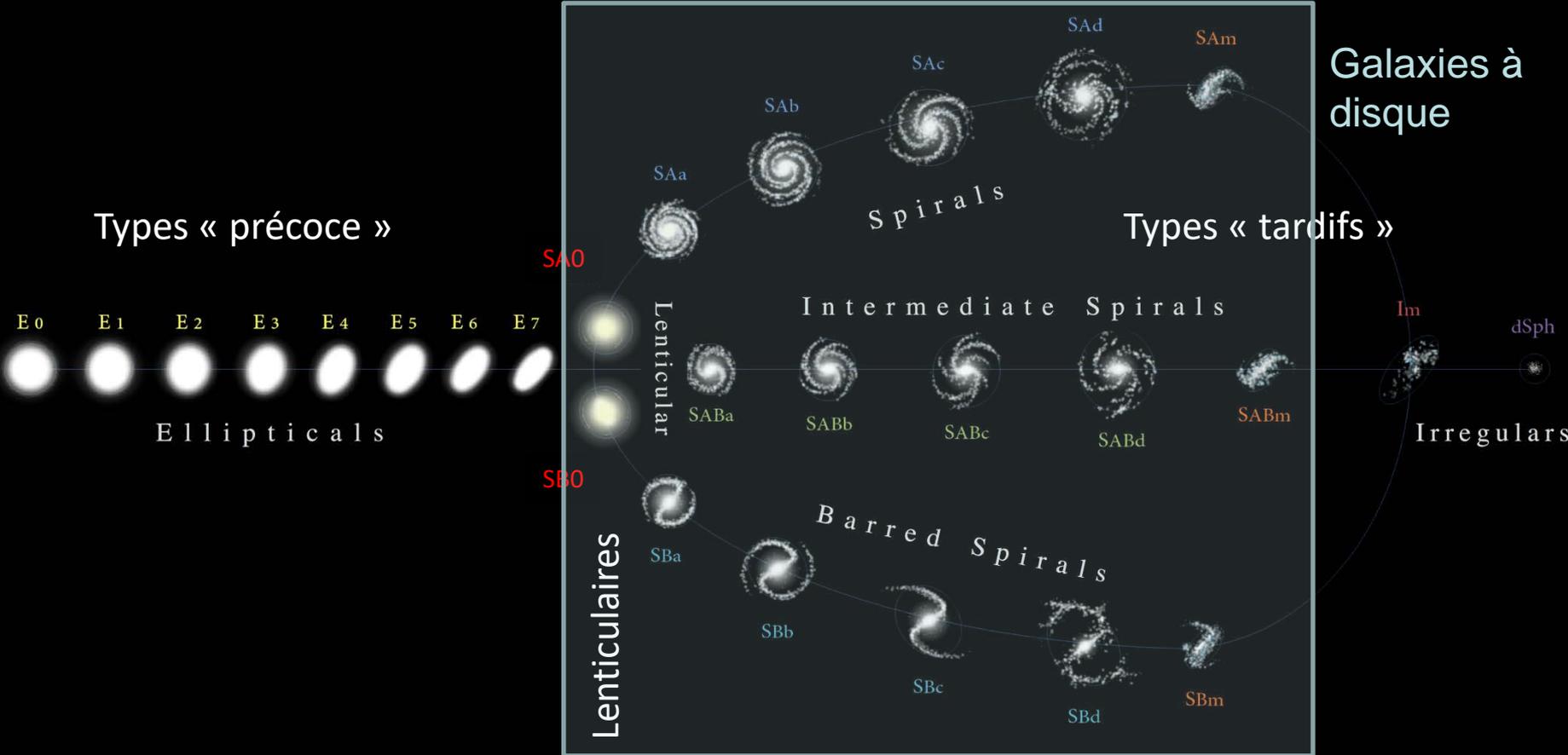
- « des systèmes auto-organisés, composés de plusieurs éléments et possédant des aspects caractéristiques variés, montrant de nombreuses structures à diverses échelles, subissant des processus à différentes vitesses et ayant une capacité à changer rapidement pour s'adapter à l'environnement » [ma traduction]

Sunny Y. Auyang in Foundations of Complex-System Theories

- La description des systèmes complexes en Physique fait appel à la physique statistique (Boltzmann, Gibbs, Maxwell...), et formalismes dérivés (mécanique des fluides, thermodynamique, ...)
- Les propriétés des systèmes complexes sont dues aux :
 - Propriétés héritées des éléments individuels (étoiles, nuages de gaz, etc.)
 - Propriétés développées par l'interaction entre éléments individuels (formation des étoiles à partir de nuages de gaz, etc.)
 - Propriétés « collectives » (dynamique stellaire, hydrodynamique du milieu interstellaire, instabilités, oscillateurs couplés, etc.)
- D'où un besoin (non-exprimé début XX^e) de classifier les galaxies pour trouver un point de départ de l'étude...

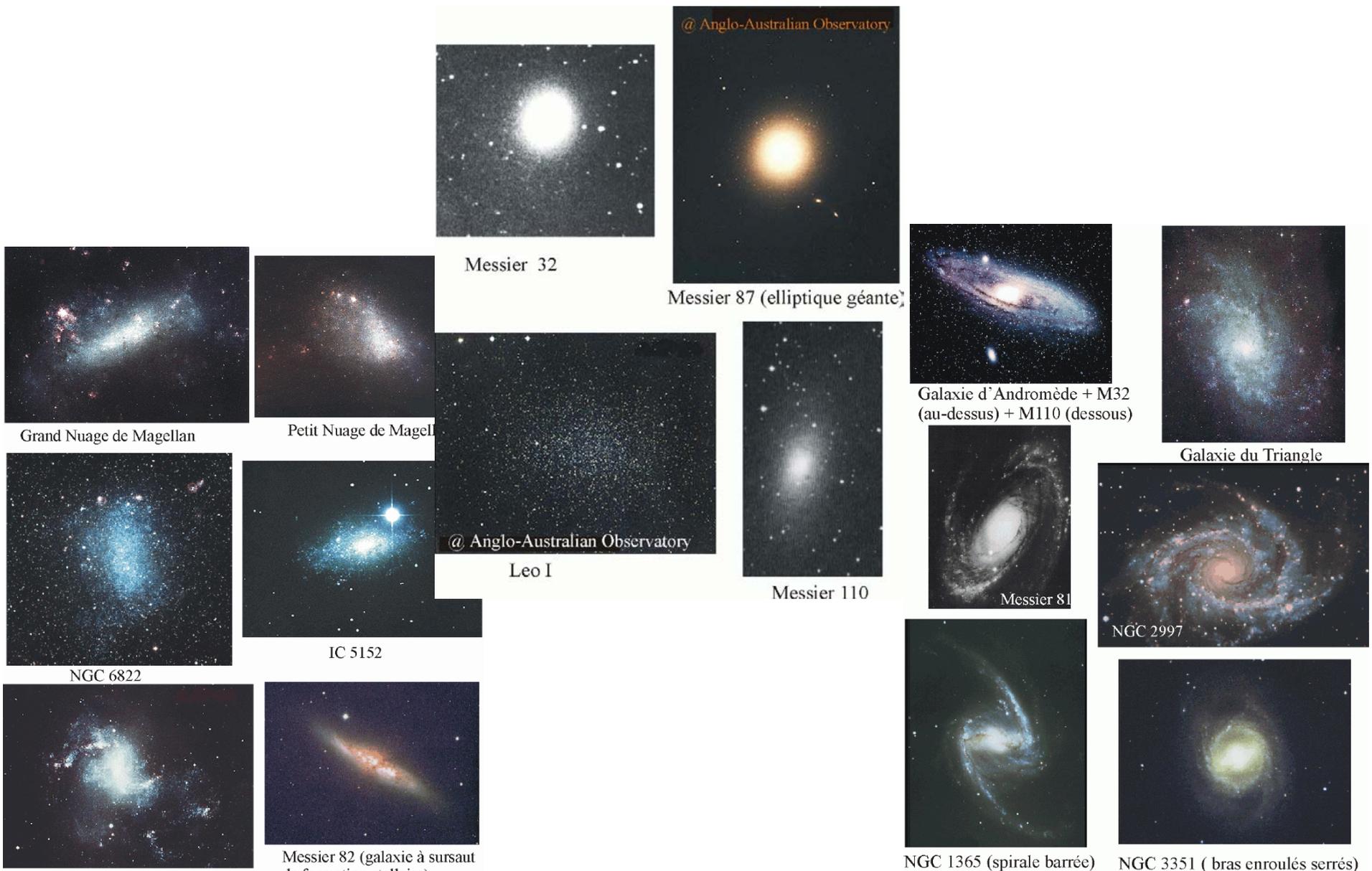
1. Classification simplifiée

HUBBLE-DE VAUCOULEURS DIAGRAM



Pour s'amuser un peu : <https://www.galaxyzoo.org/?lang=fr>

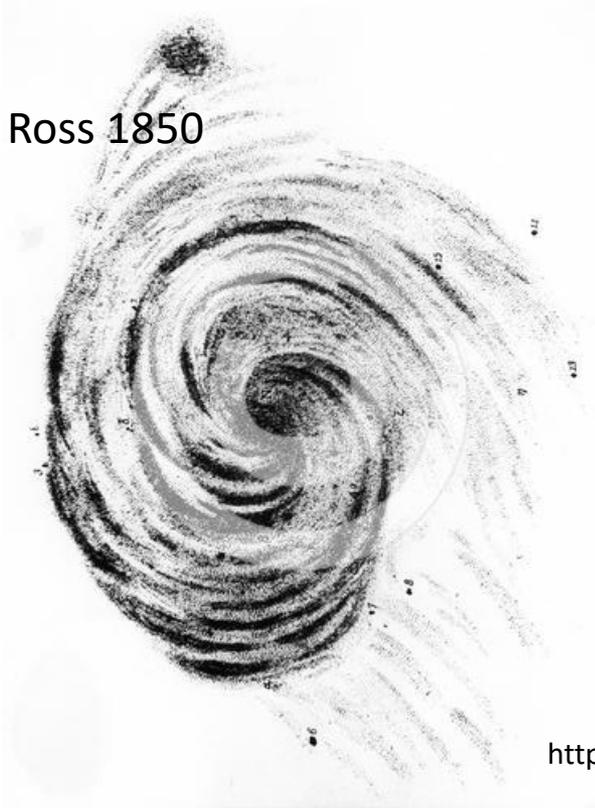
1. Une grande diversité dans chacune des classes



1. La morphologie dépend (un peu) de l'observateur ☺

Un problème très humain : conserver la trace de ce que voit l'œil...

Lord Ross 1850

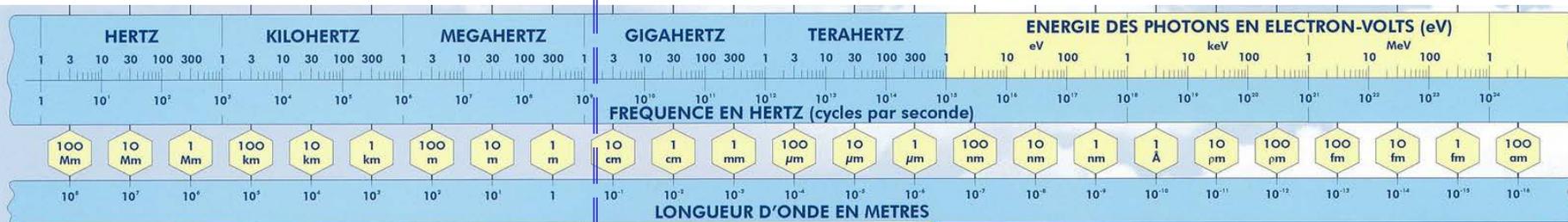
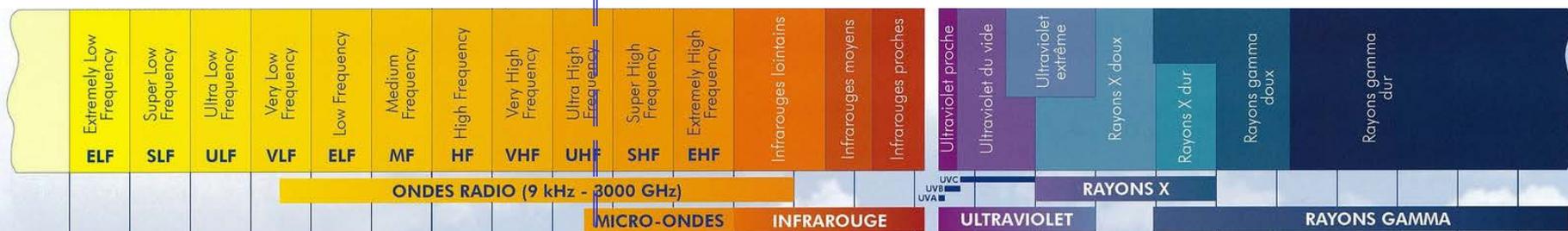


<http://www.spacetelescope.org/images/heic0506a/>

Zwicky 1959

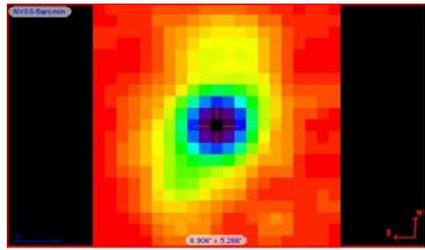


SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE

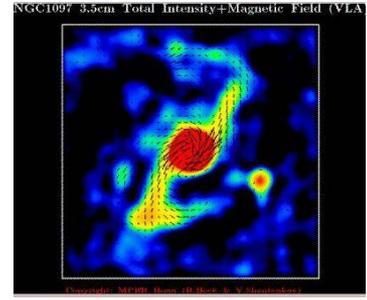


1. L'aspect des galaxies dépend du domaine de longueur d'onde

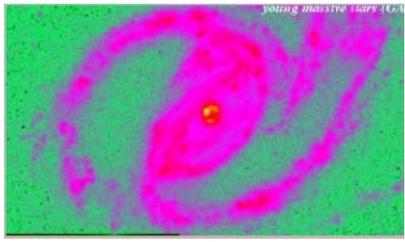
Visible
trichromie



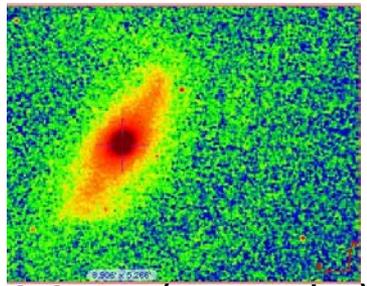
20 cm (radio)



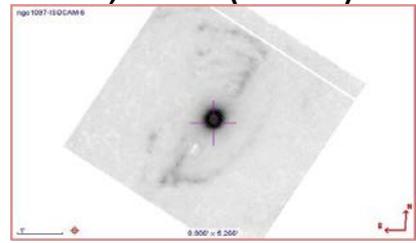
3,5 cm (radio)



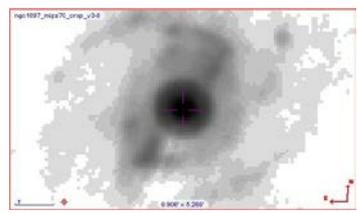
0,86 mm (submm)



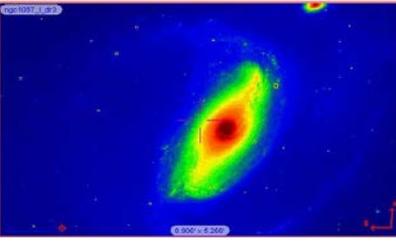
2,2 μm (IR proche)



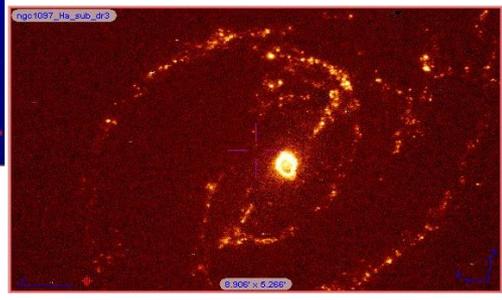
6,7 μm (IR moyen)



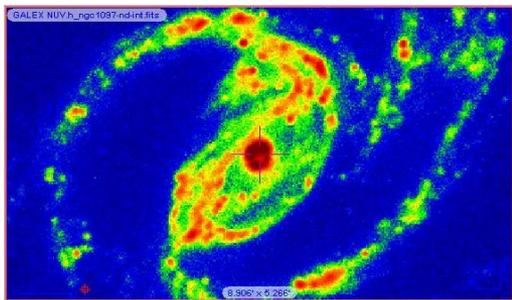
70 μm (IR)



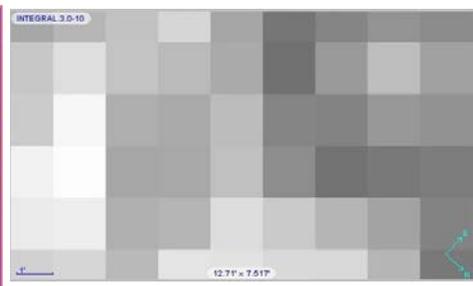
800 nm (opt)



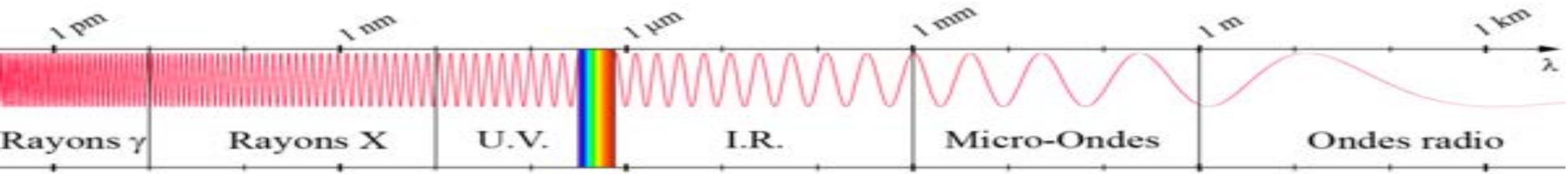
656 nm (H α)



230 nm (UV)



0,1 à 0,4 nm (X)



1. Trois grandes catégories sont à retenir car elles présentent des propriétés physiques différentes

	Elliptiques	Galaxies à disque	Irrégulières et naines	Physique en jeu
Forme et structure (morphologie)	Ellipsoïde plus ou moins aplati (sphérique = E0, aplati = E7)	Disque mince, bulbe enflé au centre (Sa = bulge large, Sd = pas de bulbe) ; Barre centrale (SB) et/ou spirales (2 bras ou plus)	Pas de structure pour les Irrégulières, disque ou elliptique pour les naines	Dynamique gravitationnelle N-corps (newtonienne), hydrodynamique
Contenu en étoiles (émission, couleurs)	Vieilles (rouges) en général	Plus jeunes (bleues) dans le disque et plus vieilles (rouges) dans le bulbe	Jeunes (bleues) en général	Evolution stellaire = physique nucléaire, atomique, hydrodynamique
Contenu en gaz et poussière (absorption, émission)	Peu ou pas du tout	Gaz et poussière en abondance (Sd) ou pas (S0)	Très abondants	Physique atomique et moléculaire (chimie), hydrodynamique, thermodynamique
Formation stellaire (régions HII)	Non ou très peu au centre	Principalement dans le centre, le long de la barre et des bras spiraux (si présents) Sd = formation stellaire intense ; Sa = peu de formation stellaire	Intense	Phénomène complexe = magnéto-hydrodynamique, thermodynamique
Mouvements (cinématique interne)	Mouvements aléatoires 3D dominants, un peu de rotation parfois	Rotation des étoiles et du gaz autour d'un axe qui passe par le centre	Parfois comme les spirales, parfois comme les elliptiques, parfois les deux !	Dynamique gravitationnelle N-corps (newtonienne), hydrodynamique

1. Fréquences des classes morphologiques

Type de galaxies	Fréquence
Elliptiques	20%
Spirales	77%
Irrégulières et naines	3%

Mais si on se limite à une distance de 10 à 15 fois Andromède-Voie Lactée :

Type de galaxies	Fréquence
Elliptiques	13%
Spirales	34%
Irrégulières et naines	54%

Les objets faibles et/ou lointains sont difficiles à classier/détecter

1. Classifier sert à préparer les modèles physiques

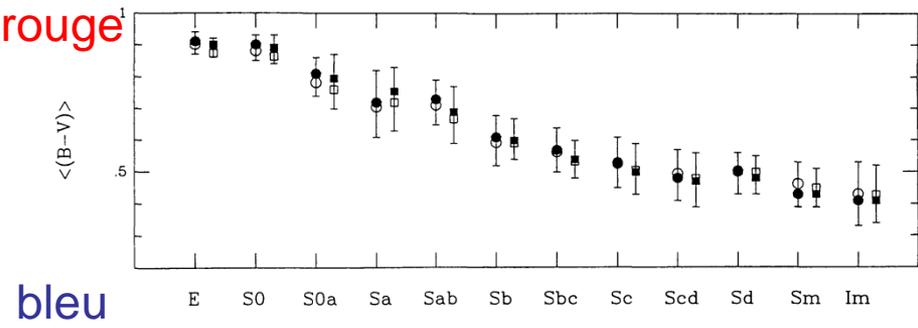
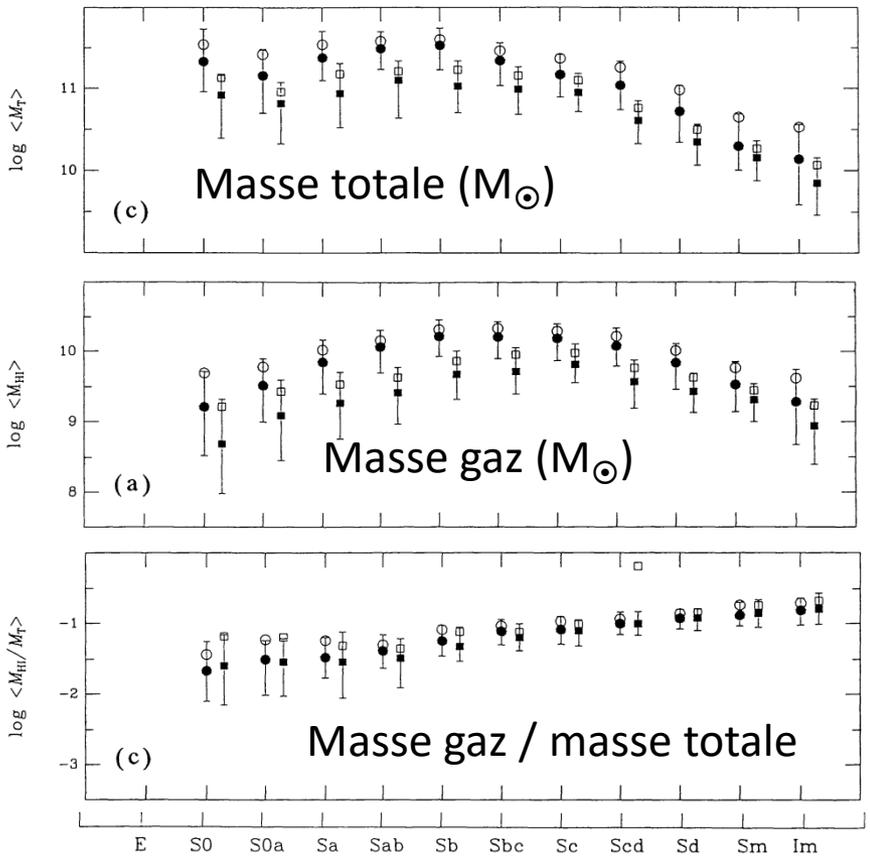


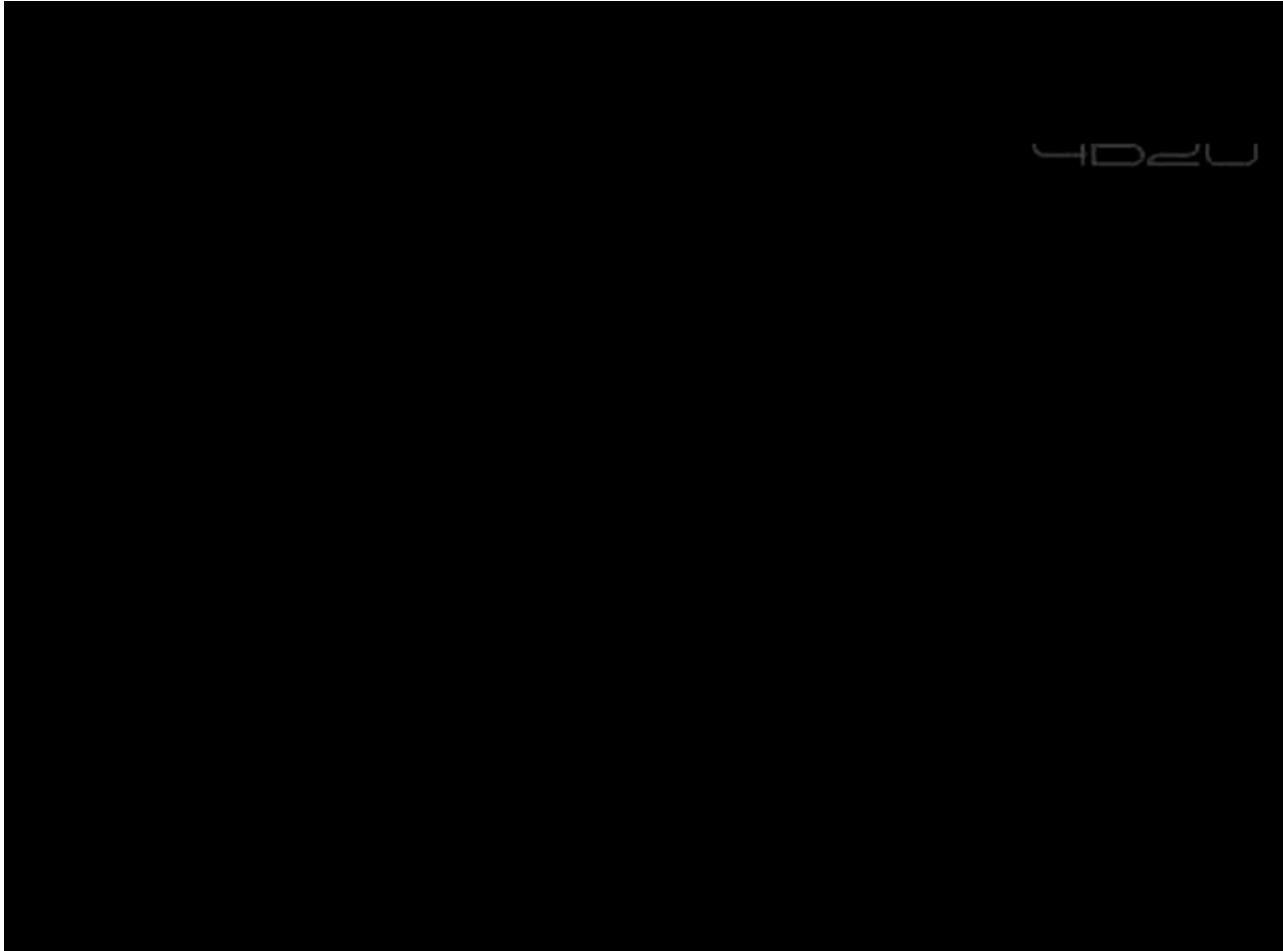
Figure 5 (B - V) color vs morphological type. (Same symbols as in Figure 2.)

$$B - V \propto \frac{L_V}{L_B} \sim L_{550nm} / L_{440nm}$$

- Les E sont plus rouges que les S ; le contenu stellaire des E est dominé par des étoiles vieilles (rouge)
- Plus les S sont « tardives » plus elles sont riches en gaz



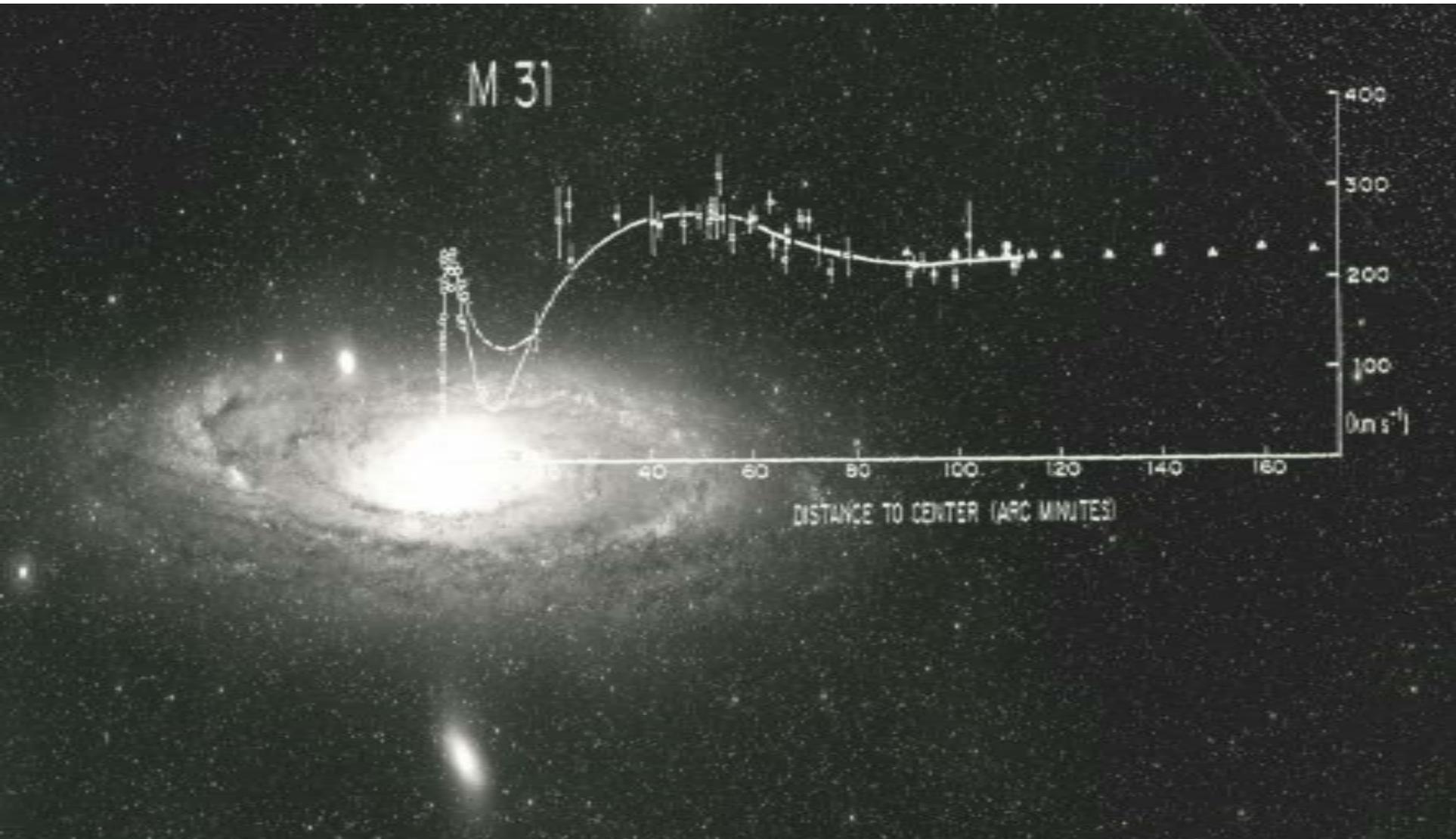
2. Propriétés dynamiques : formation hiérarchique des galaxies



2. Propriétés dynamiques : une complexité dynamique maîtrisée ?

- Matière + Gravitation
 - Purs systèmes N-corps liés par une force simple : Newton
 - Fluides non-collisionnels (eq. Vlasov) et collisionnels (eq. Euler, Navier-Stokes)
 - Plusieurs siècles de mathématiques, de mécanique, de dynamique, de physique statistique (de Newton à Lindblad, en passant par Hamilton, Boltzman, Maxwell, Jeans etc...)
 - Théorie des barres : Lindblad (théorie perturbative), Oort...
 - Théorie structure spirale : Lin & Shu (66)...
 - Equilibre et relaxation: Gibbs (1890), Chandrasekhar (43), Lynden-Bell (67)...
 - Stabilité : Jeans (1902), Antonov (60), Toomre (64), Lynden-Bell, Kalnajs...
 - Chaos : Poincaré, Hénon (& Heiles 64), Contopoulos...
 - La 3^e intégrale du mouvement ?
- Plusieurs décennies de simulations N-corps et hydrodynamiques

2. Propriétés dynamiques : vitesse de rotation



2. Propriétés dynamiques : loi d'attraction universelle (Newton)

- D'après la loi de Newton, une masse m à une distance r d'un point massif M ressent une force d'attraction \vec{F} dont l'intensité est :

$$F = GmM/r^2$$

- G = constante de gravitation = constante de Newton
= $6,67384 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2 \text{ kg}^{-2}$

- Pour un ensemble de particules massives : $\vec{F}_j = -G \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{m_i m_j (\vec{r}_i - \vec{r}_j)}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3}$

- Cette loi, semblable à celle de Coulomb en électrostatique, est un postulat

- \vec{F} dérive d'un potentiel gravitationnel ϕ : $\vec{F} = -m\vec{\nabla}\phi = m \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \vec{k} \right)$

2. Propriétés dynamiques : cas des potentiels sphériques, ellipsoïdaux et disques minces

Premier théorème de Newton

Une coquille sphérique de rayon R et de masse M n'exerce aucune force gravitationnelle sur les points de son intérieur. ϕ est constant à l'intérieur de la coquille sphérique et vaut $-GM/R$.

Second théorème de Newton

Une coquille sphérique de masse M exerce sur un point de son extérieur la même force gravitationnelle qu'un point massif de masse M situé en son centre.

- Vitesse circulaire = vitesse tangentielle d'une orbite circulaire (donc $m = 1$) dans un potentiel dépendant uniquement du rayon, $v_c = r\Omega$

$$\begin{aligned} |\vec{F}_{centripète}| &= |\vec{F}_{centrifuge}| = r \Omega^2 = \frac{v_c^2}{r} = \frac{d\phi}{dr} \\ v_c(r) &= \sqrt{r \frac{d\phi}{dr}} = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} = r\Omega(r) = r \frac{2\pi}{T(r)} \end{aligned}$$

- Cas d'une sphère homogène ($\rho = C^{te}$):

$$v_c(r) = r \sqrt{\frac{4\pi G\rho}{3}} \Rightarrow T = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} = C^{te} = T_{oscillateur\ harmonique}$$

2. Propriétés dynamiques : vitesse de rotation

- La vitesse circulaire ou vitesse de rotation ($v_c = V_{rot}$) peut être déterminée en fonction du rayon par la mesure du décalage Doppler des raies d'émission du gaz contenu dans le disque :
 - Les étoiles chaudes ionisent le gaz, en particulier l'hydrogène (émission $H\alpha$ dans le domaine optique) ; mais les étoiles chaudes sont absentes très loin du centre
 - La transition hyperfine de l'hydrogène neutre ($\uparrow_p \uparrow_e \rightarrow \uparrow_p \downarrow_e$) émet un photon à $\lambda = 21$ cm (domaine radio) ; le gaz s'étend jusqu'à 4-5 fois la taille du disque optique
- La masse « dynamique » d'une galaxie spirale à l'intérieur d'un rayon R est déduit de :

$$v_c(R) = \sqrt{GM(r \leq R)/R} \Rightarrow M(r \leq R) \equiv \frac{\alpha R v_c^2(R)}{G}$$

Où α est un facteur géométrique entre 0,8 et 1,2, selon l'aplatissement du disque

2. Propriétés dynamiques : vitesse de rotation

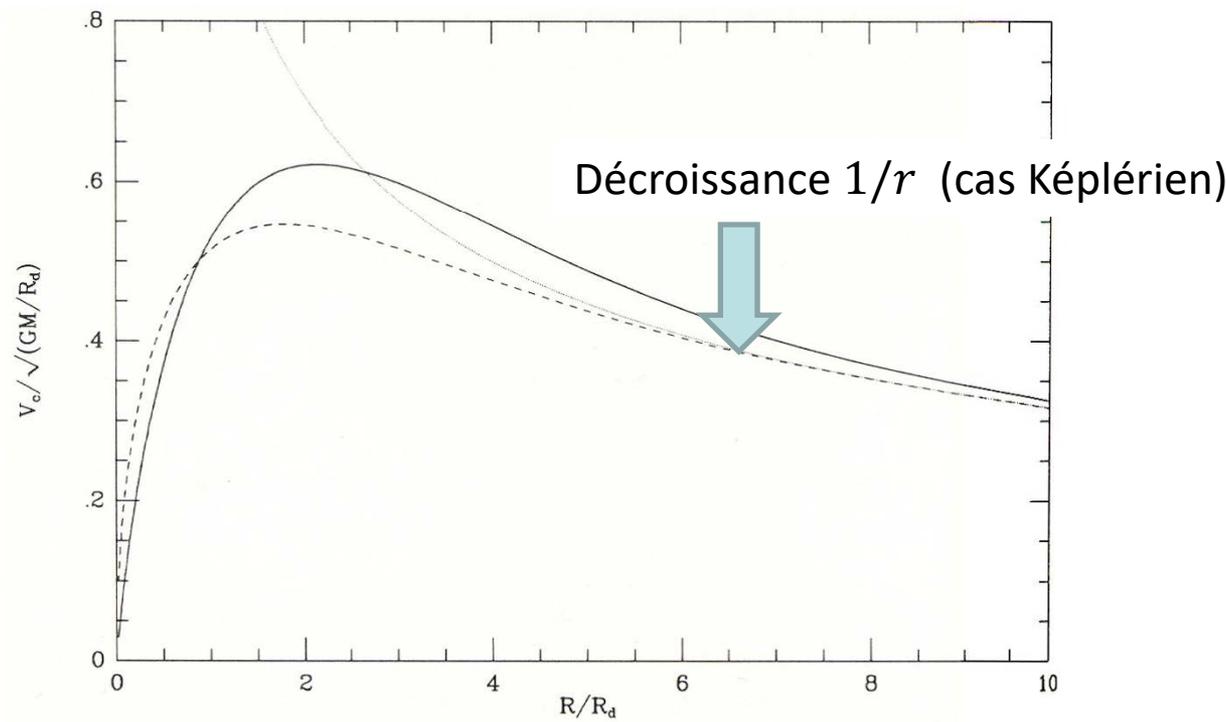


Figure 2-17. The circular-speed curves of: an exponential disk (full curve); a point with the same total mass (dotted curve); the spherical body for which $M(r)$ is given by equation (2-170) (dashed curve).

2. Propriétés dynamiques : vitesse de rotation

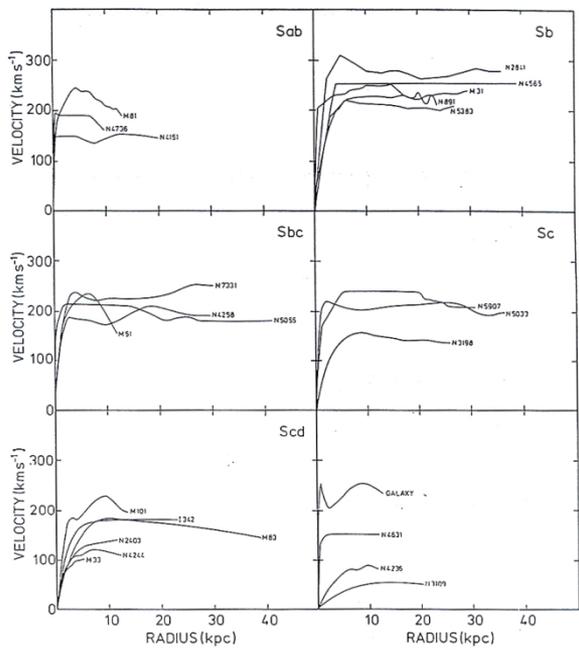


FIGURE 1. Rotation curves of 25 galaxies of various Hubble types.

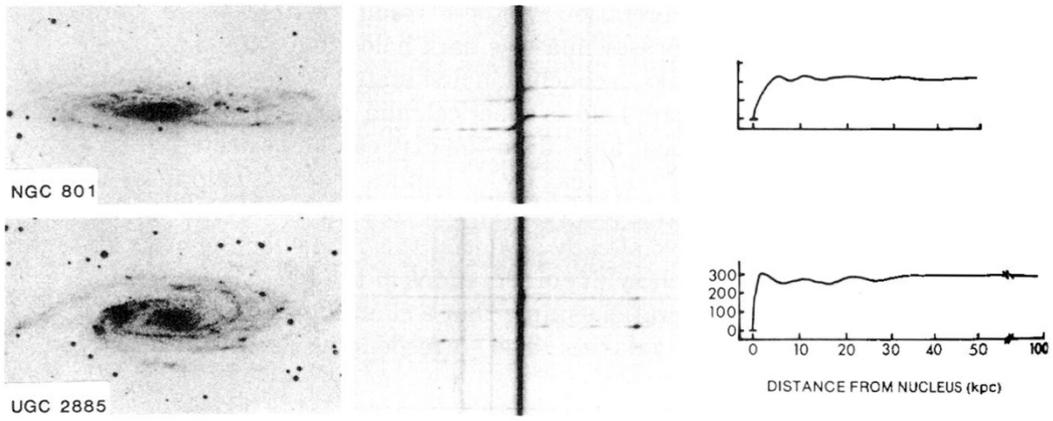
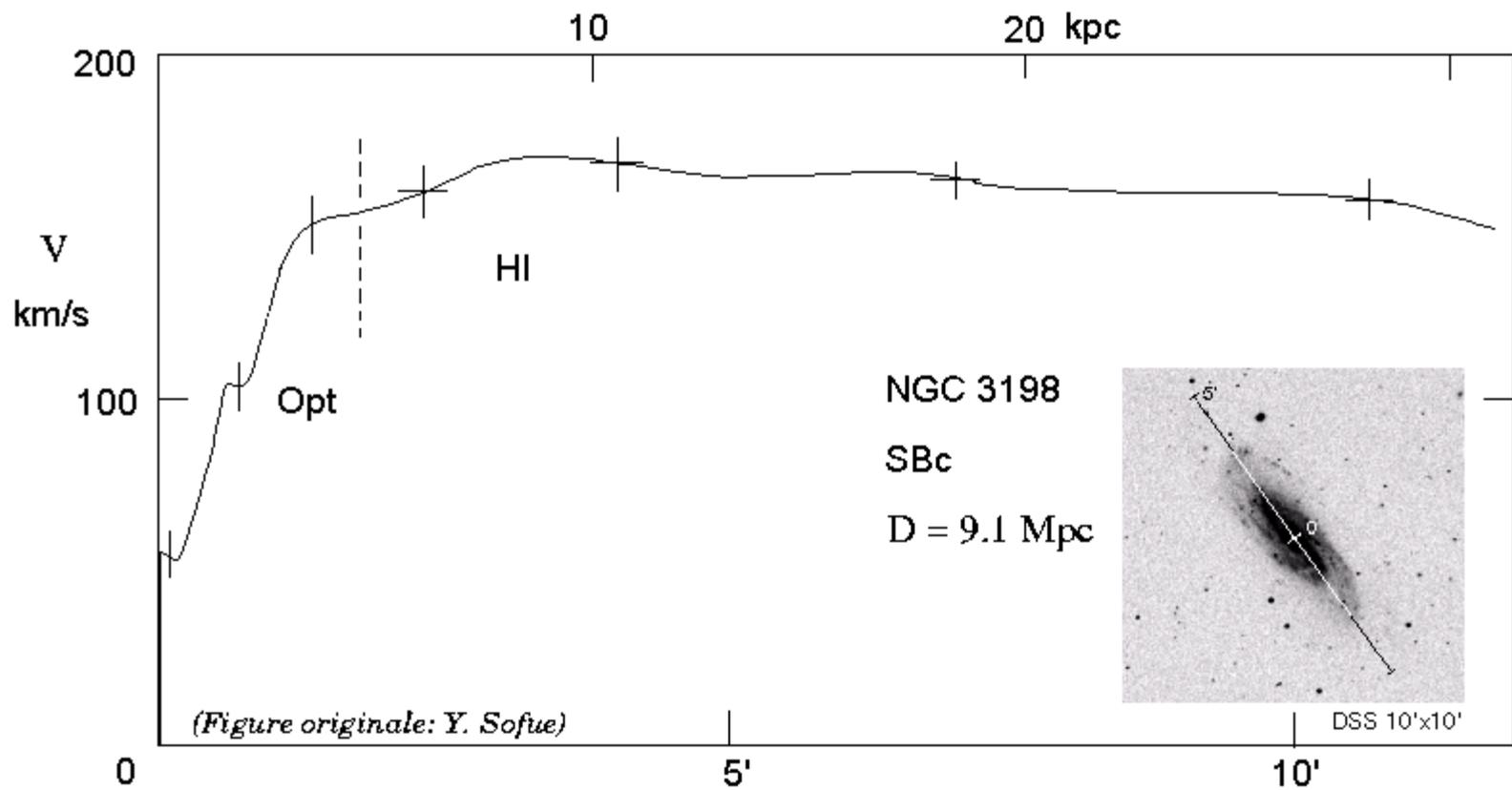


Figure 10-1. Photographs, spectra, and rotation curves for five Sc galaxies, arranged in order of increasing luminosity from top to bottom. The top three images are television pictures, in which the spectrograph slit appears as a dark line crossing the center of the galaxy. The vertical line in each spectrum is continuum emission from the nucleus. The distance scales are based on a Hubble constant $h = 0.5$. Reproduced from Rubin (1983), by permission of *Science*.

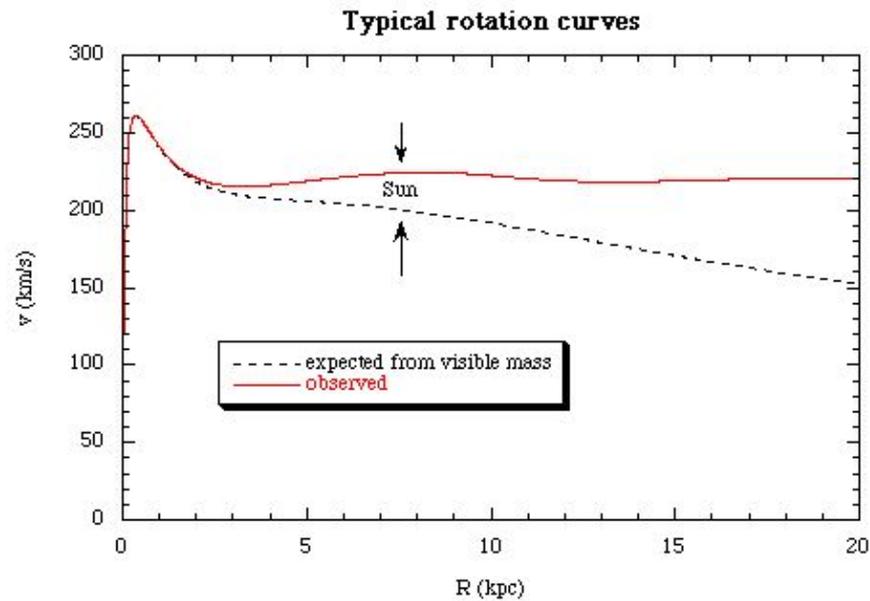
H α rotation curves (from Binney/Tremaine p.600)

HI(21cm)-rotation curves of spiral galaxies from Bosma, Phd thesis (1979)

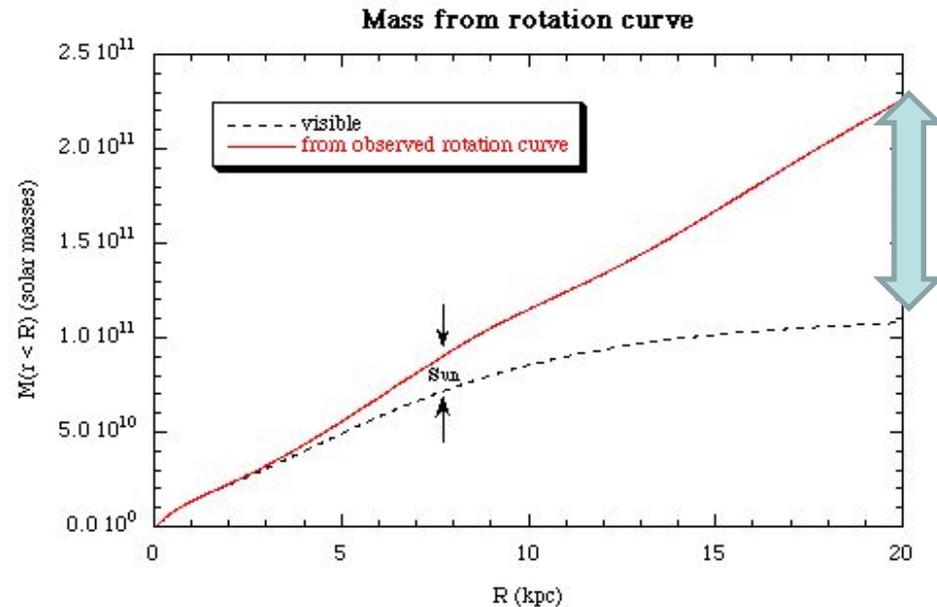
2. Propriétés dynamiques : vitesse de rotation



$$v_c(R) = \sqrt{GM(r \leq R)/R}$$



$$M(r < R) \equiv \frac{\alpha R v_c^2(R)}{G}$$



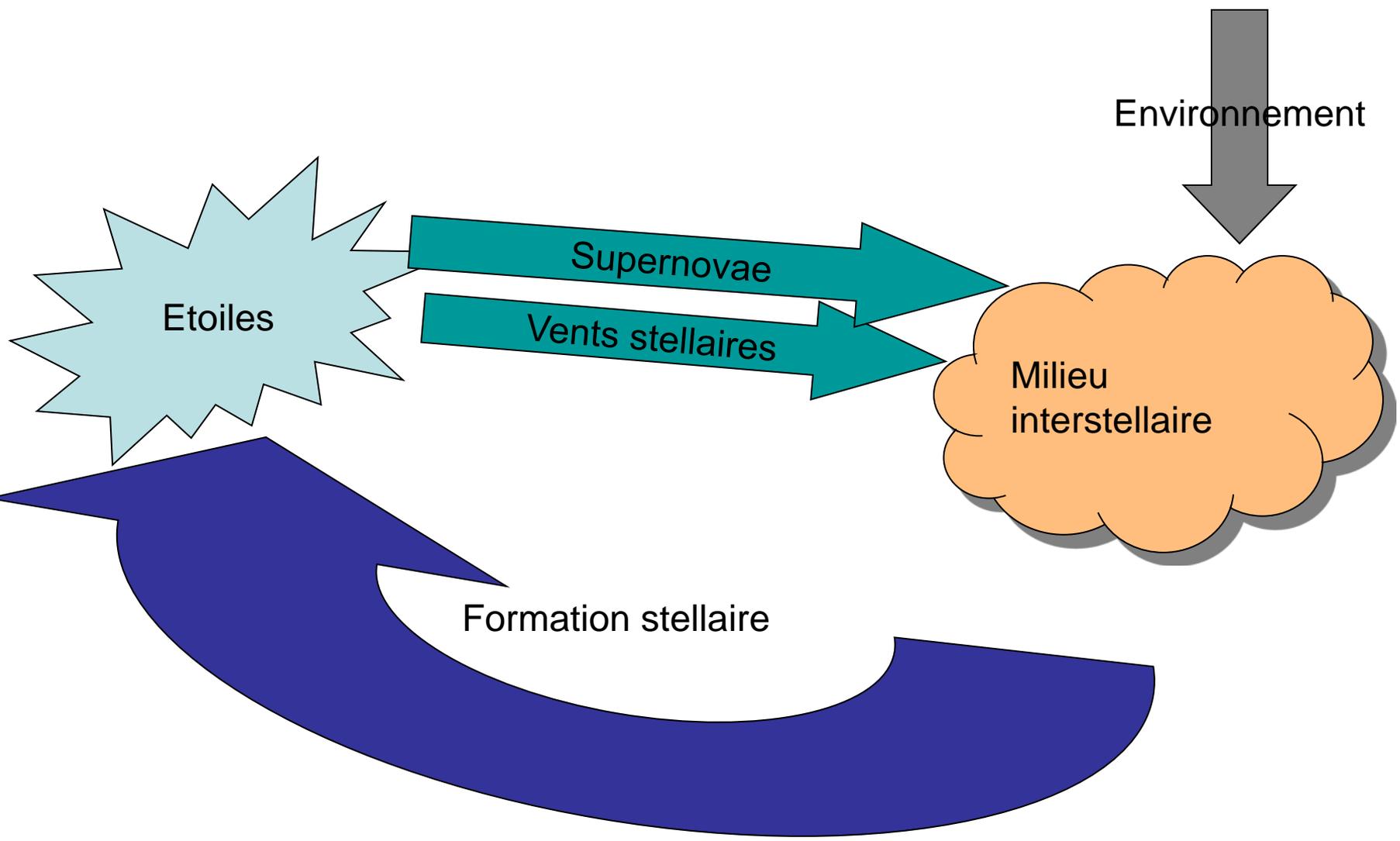
2. Recensement de la masse manquante

Object type	Dimension	Mass-to-Light ratio	Fraction of DM
Système solaire	100 pc	3 - 5	20 – 33 %
Spirales	30-50 kpc	10 – 20	50 – 90 %
Paires de spirales	50-100 kpc	20 – 30	90 %
Groupes de galaxies	0.5 – 1.5 Mpc	50 – 150	95 %
Amas de galaxies	1 – 5 Mpc	200 - 500	99 %

Masse manquante =

- De la matière non encore détectée
- De la matière indétectable
- Une modification des lois de la gravitation

3. Interaction entre les éléments : recyclage de la matière, changements de phases...



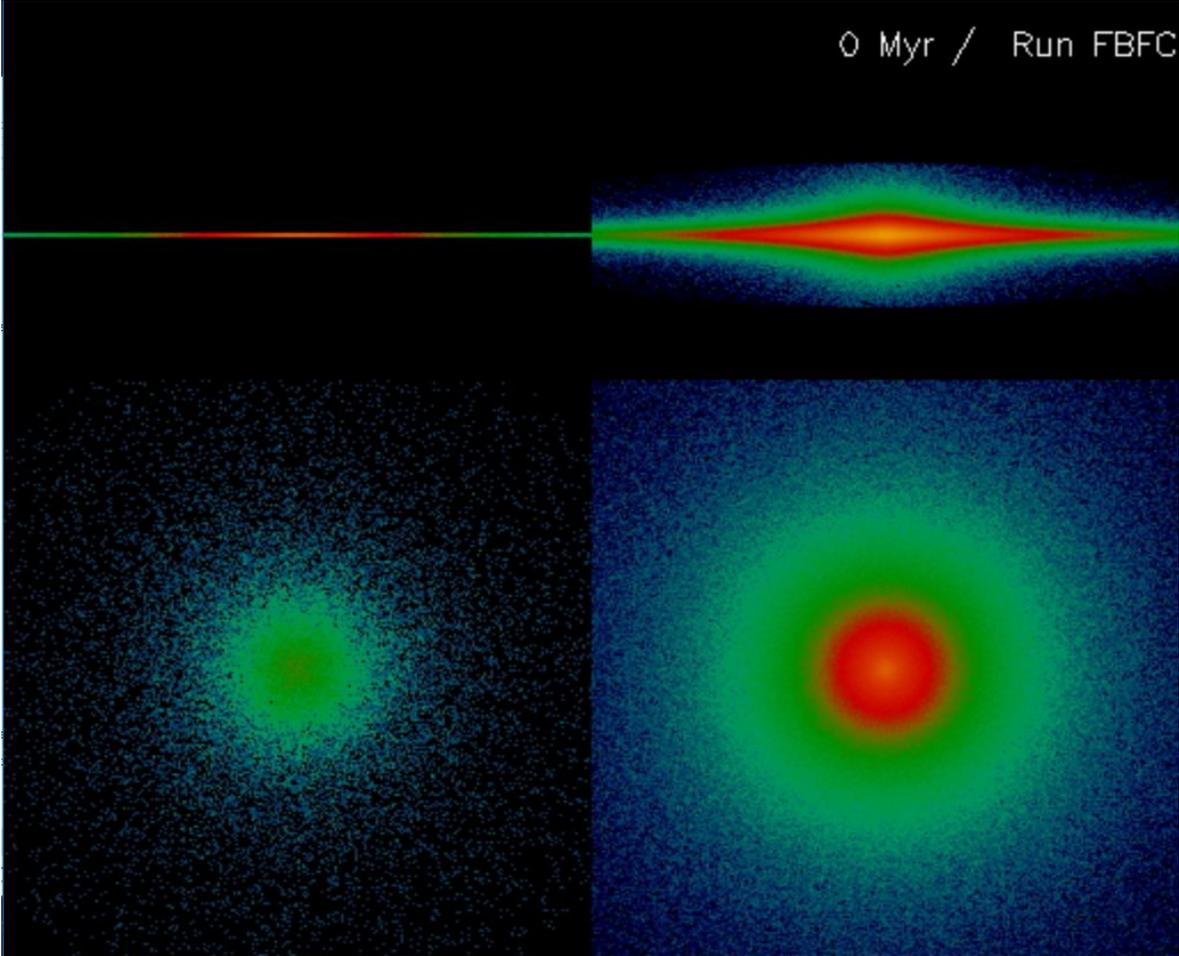
3. Evolution d'une galaxie avec étoiles, gaz, formation stellaire et SNe seulement

Distribution de la masse du gaz

Distribution de la masse des étoiles

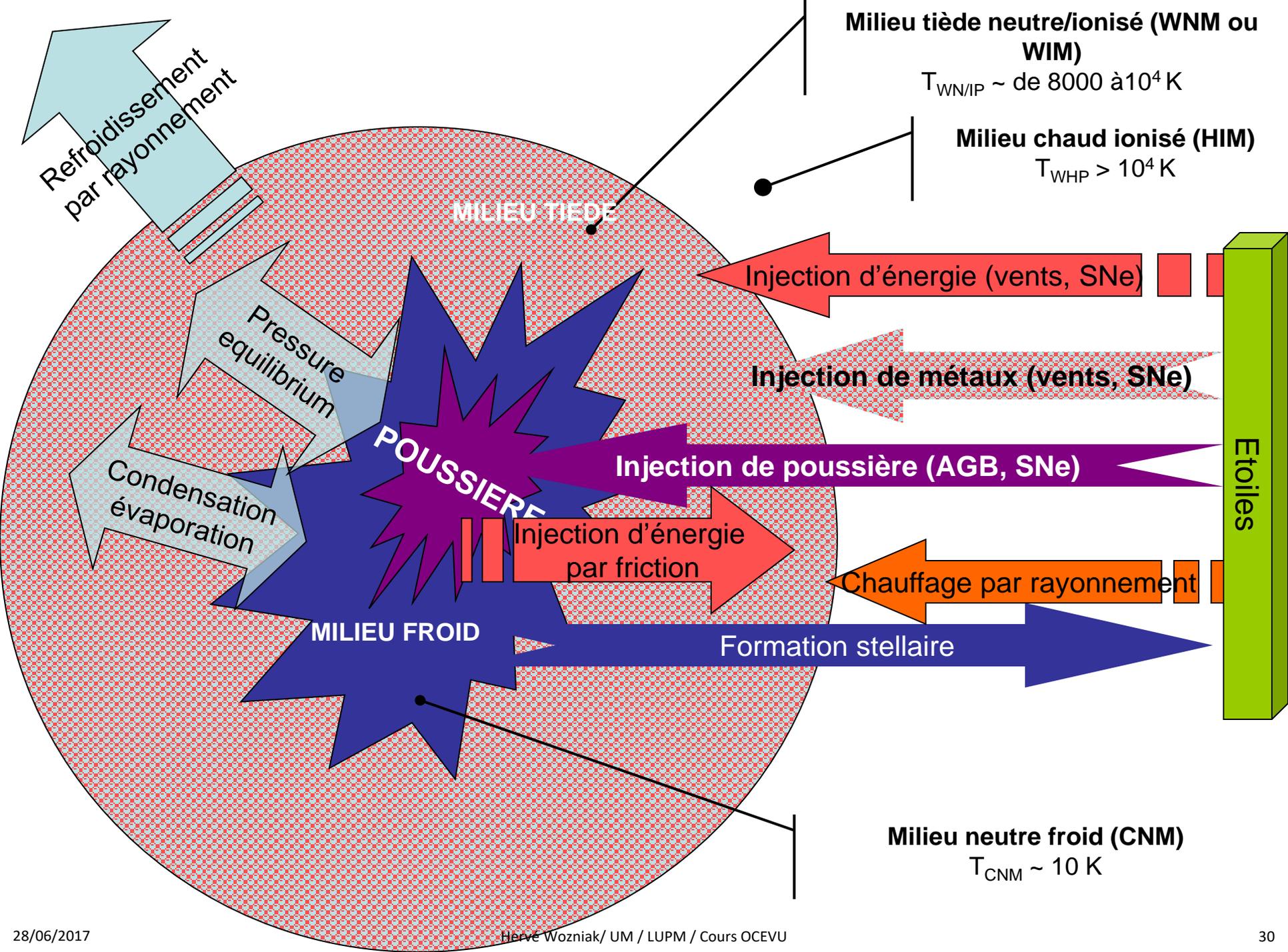
Vue par la tranche

Vue de face-on

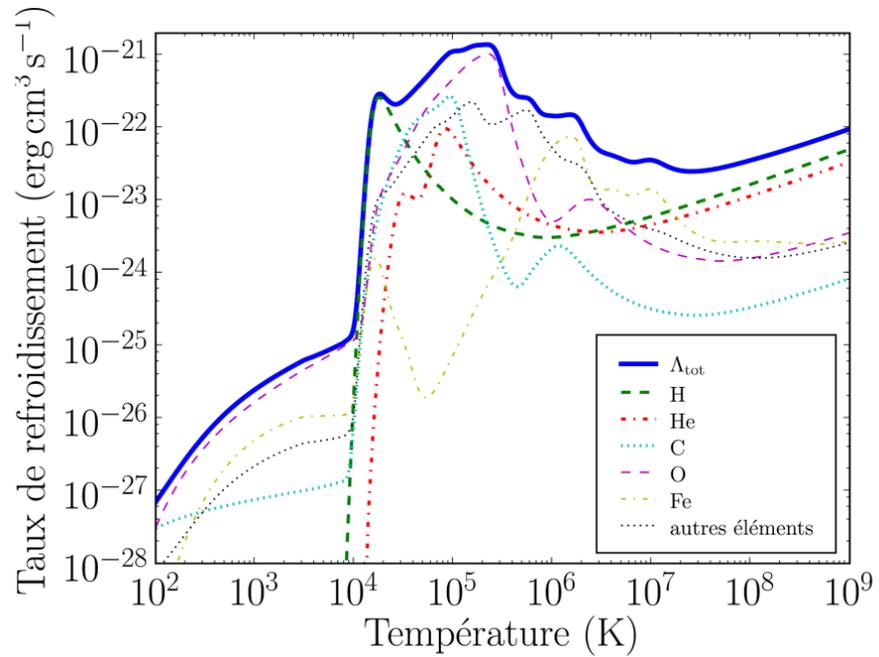
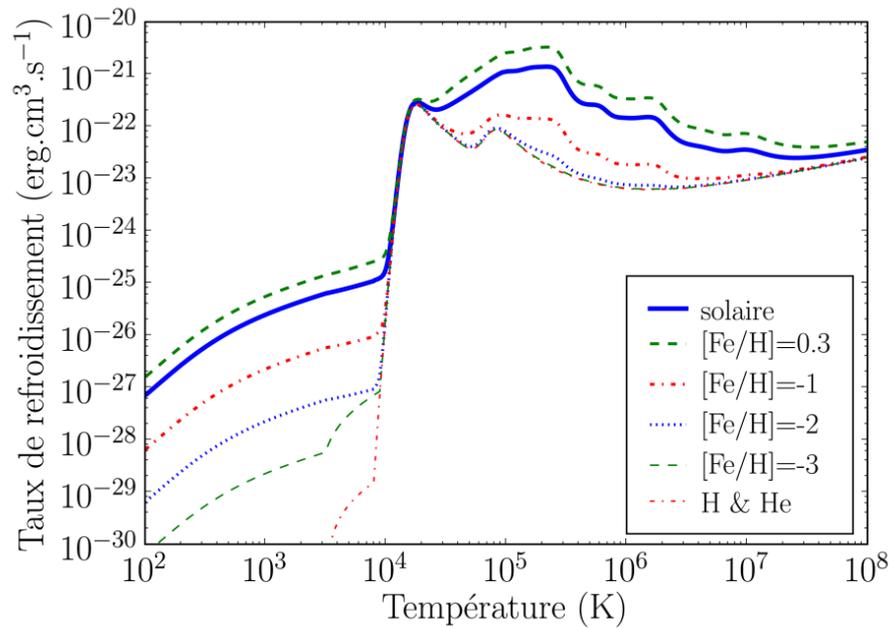


40 kpc

40 kpc



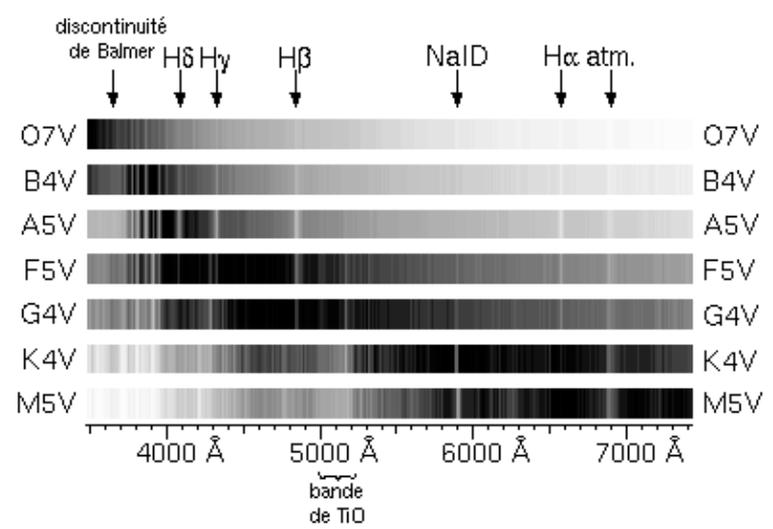
3. Le refroidissement du milieu interstellaire contribue aux raies d'émission



$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10}(\text{Fe}/\text{H}) / \log_{10}(\text{Fe}/\text{H})_{\odot}$$

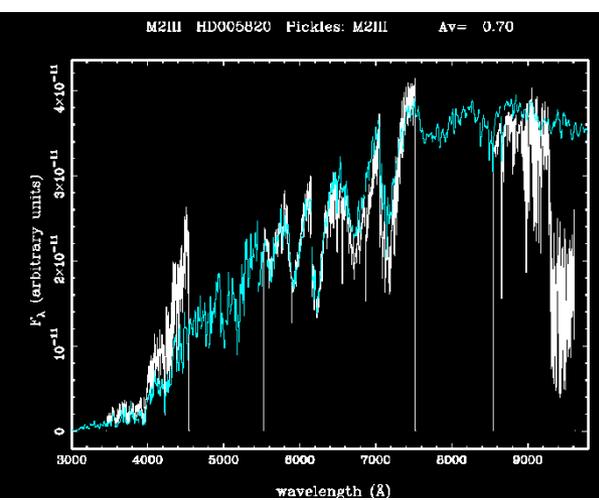
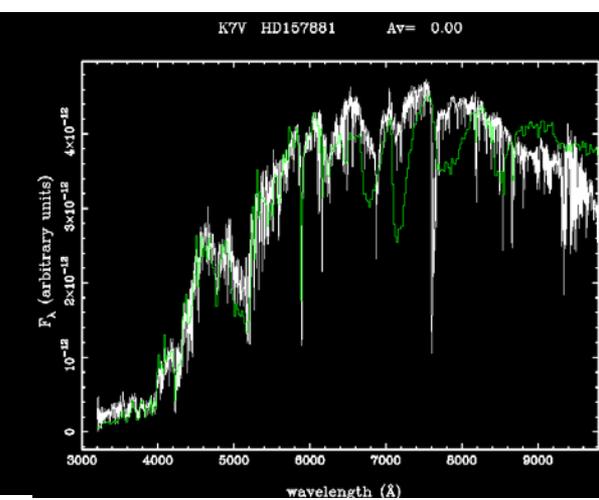
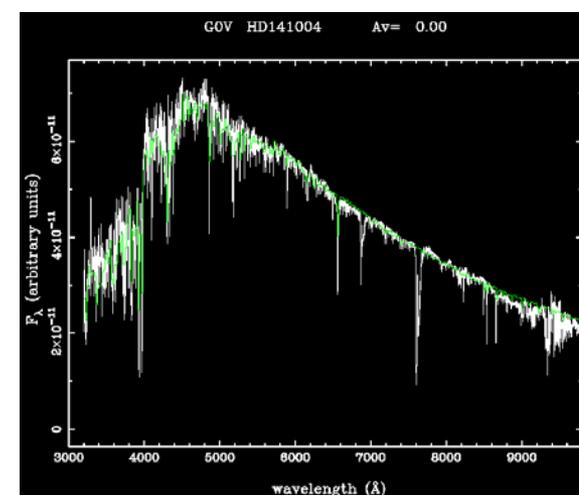
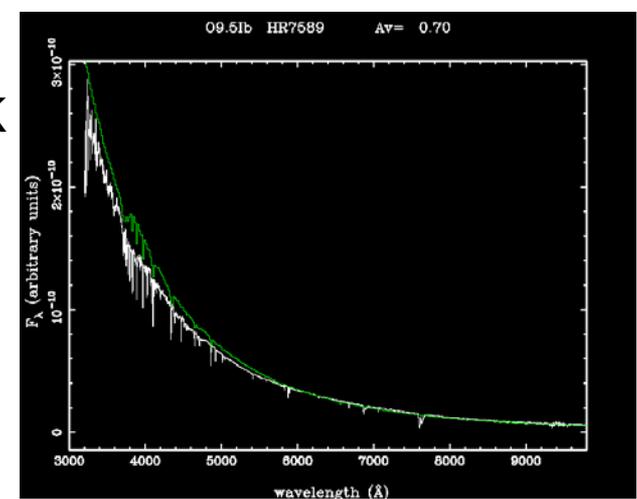
Champavert 07 (PhD)

3. La contribution des étoiles à l'aspect d'une galaxie : populations stellaires

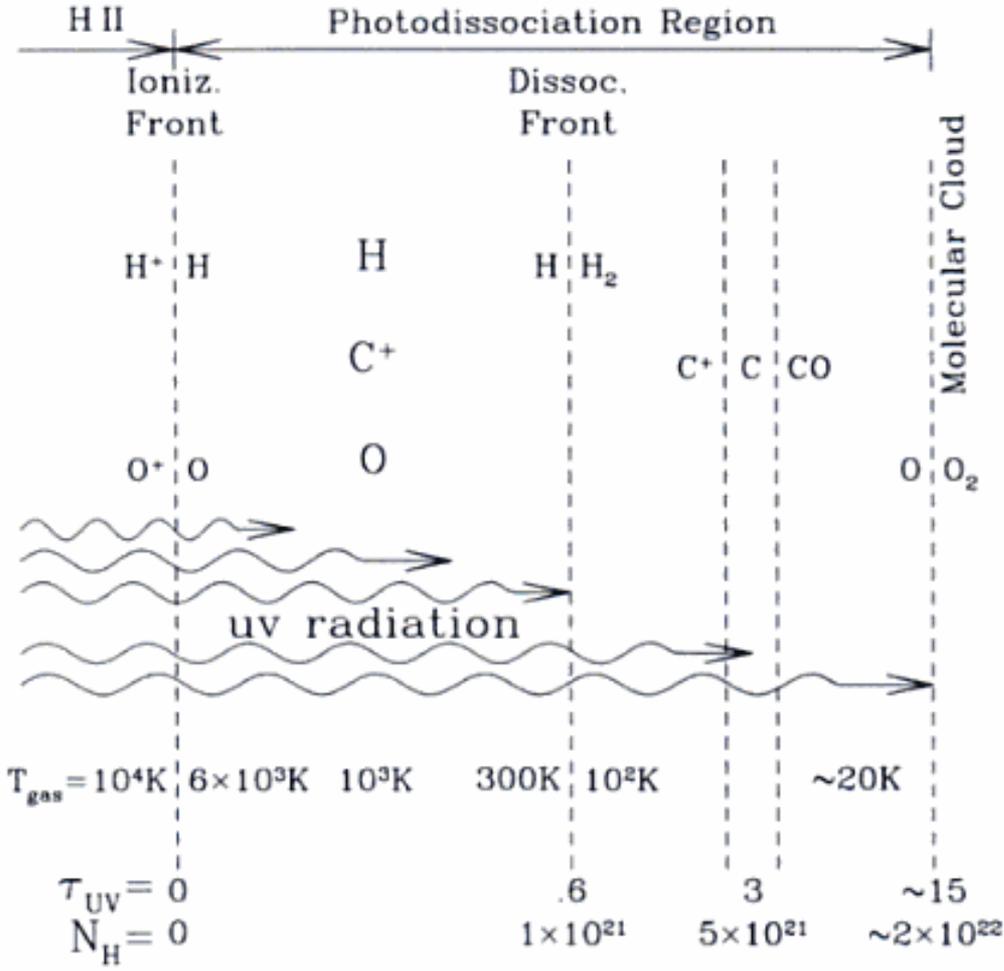


50 000 K

3 000 K

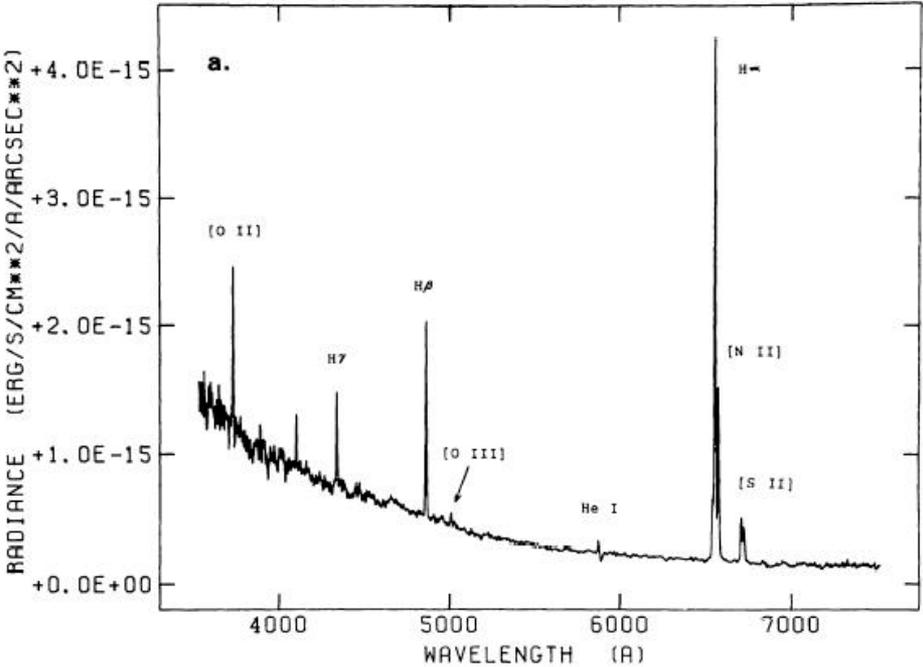


3. Contribution des régions HII (formation des étoiles)

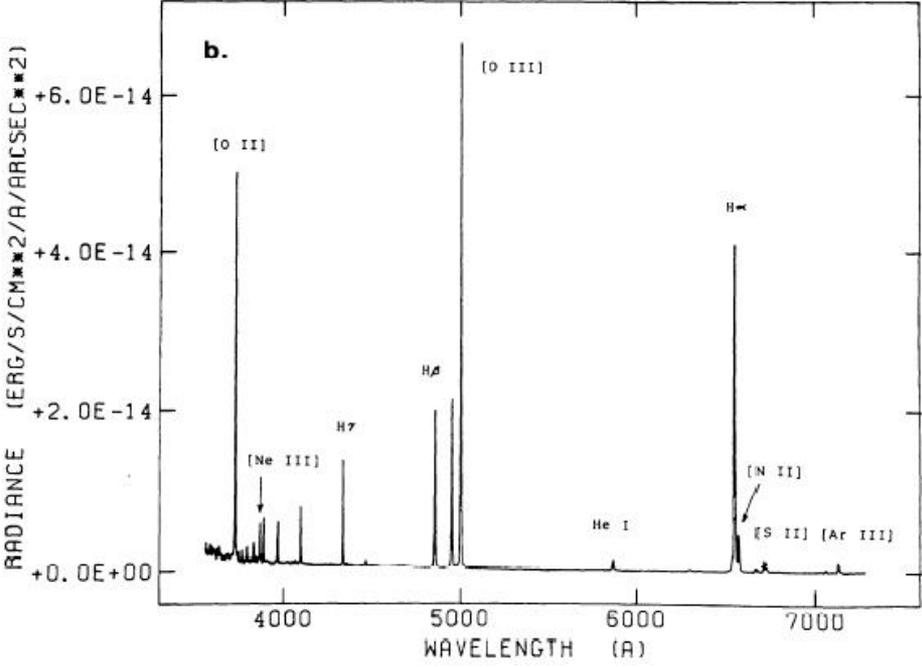


3. Contribution des régions HII (formation des étoiles)

McCALL ET AL.



Faible excitation



Forte excitation

3. Spectre intégré d'une galaxie = émission stellaire + émission du milieu interstellaire + émission/absorption des poussières + ...

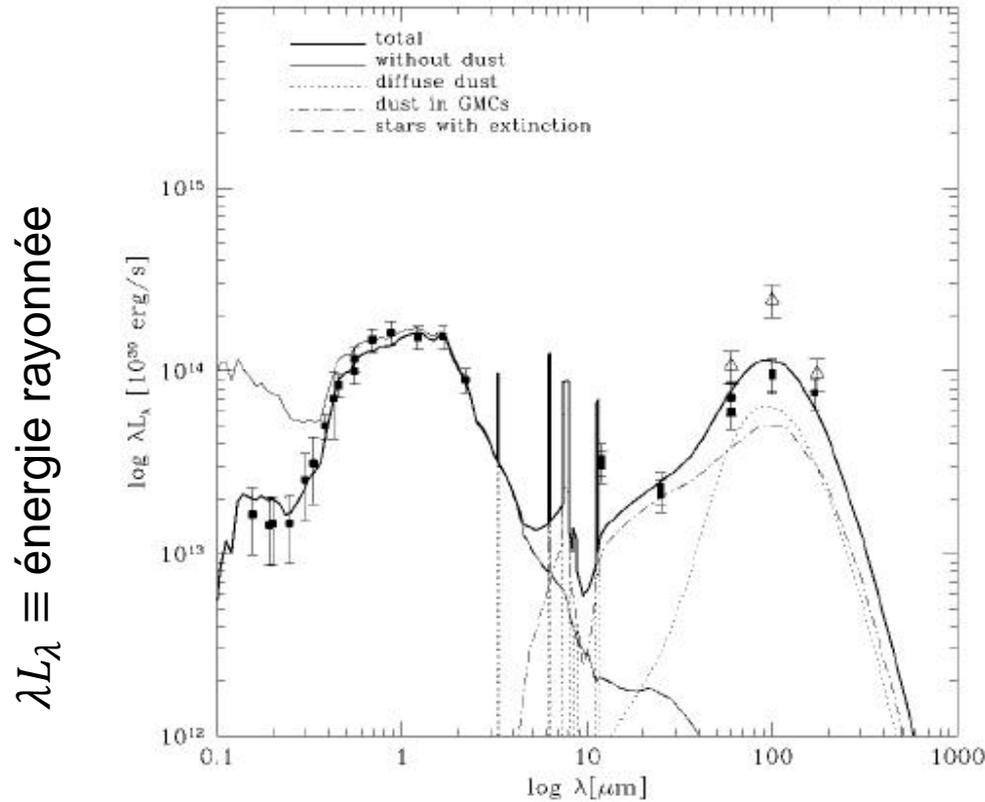
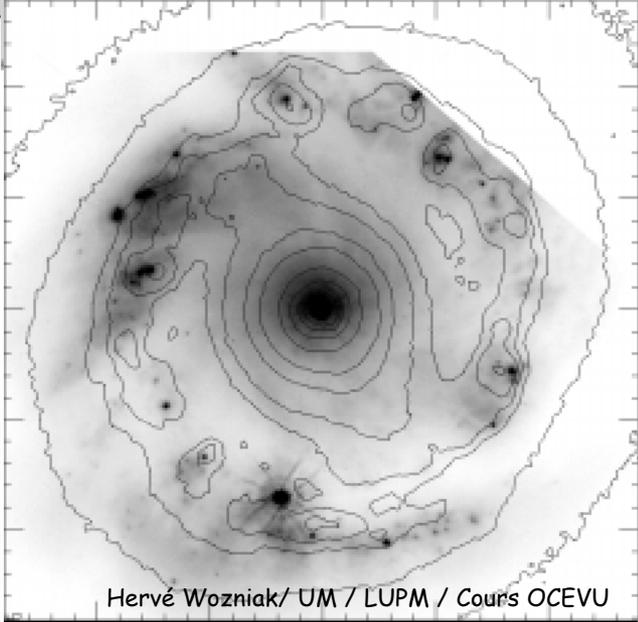
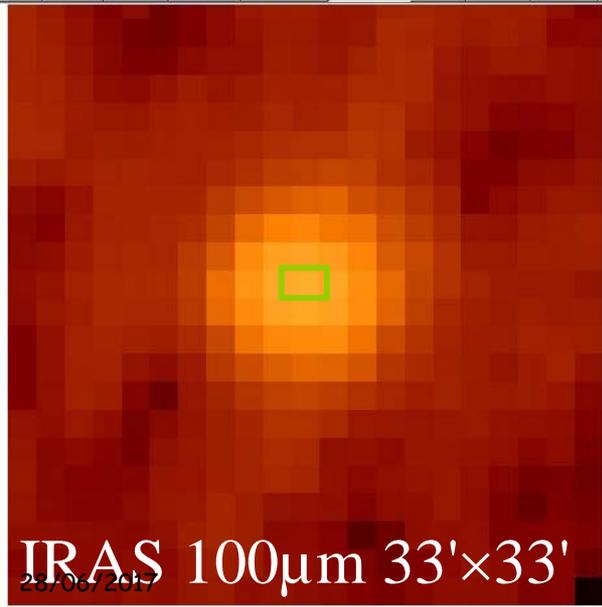
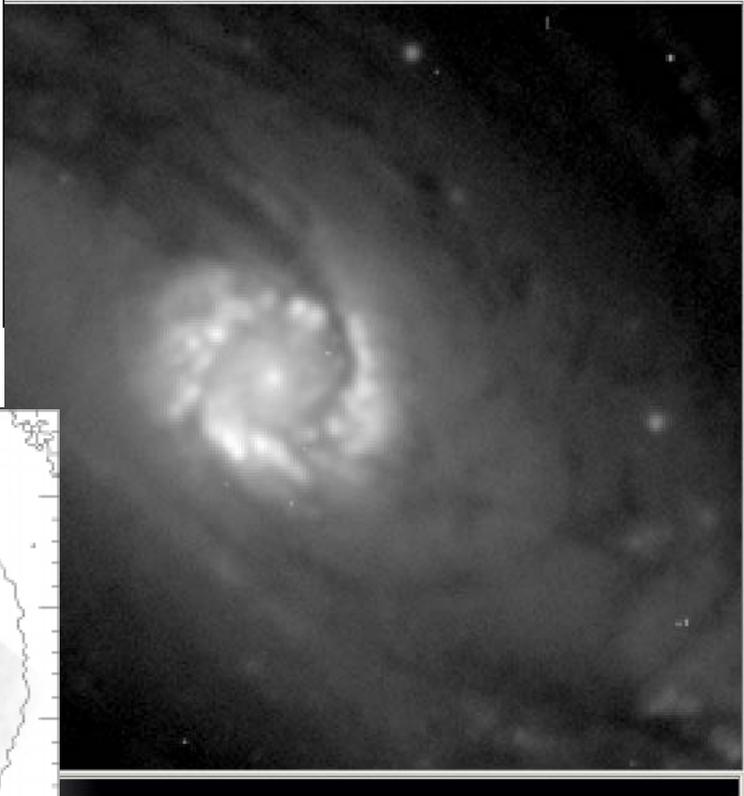
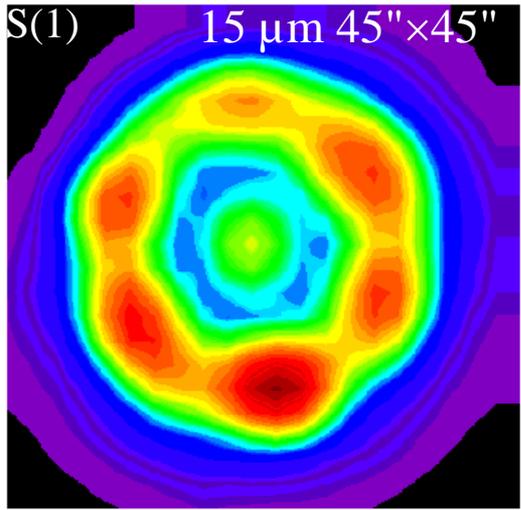
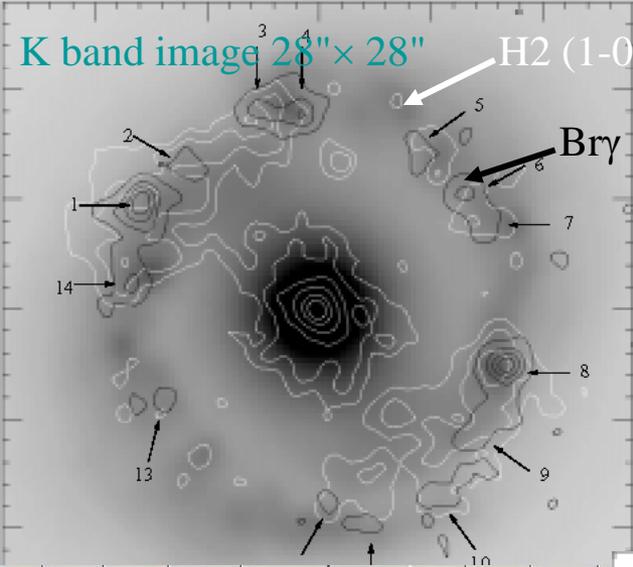


FIG. 10.—Fit to the SED of the Sbc galaxy M51. Data are from Buat, Deharveng, & Donas (1989), Evans (1995), de Vaucouleurs et al. (1991) Third Reference Catalog of Bright Galaxies (RC3), Code & Welch (1982), Young et al. (1989), Rice et al. (1988), Devereux & Young (1990, 1992), Smith (1982), Hippelein et al. (1996) (*ISO*, triangles).

3. Retour sur les observations multi-longueurs d'onde



4. Chemodynamique

- La chemodynamique est l'étude « écologique » des galaxies
 - Interaction entre phases du milieu interstellaire, populations stellaires, la dynamique gravitationnelle (hydrodynamique, matière noire, etc.)
 - Evolution de l'équilibre dynamique (fragile ?) entre les différentes formes de matière
- Permet de séparer l'histoire de l'évolution du *contenu* de celle du *contenant*
- Outil privilégié pour étudier un système complexe

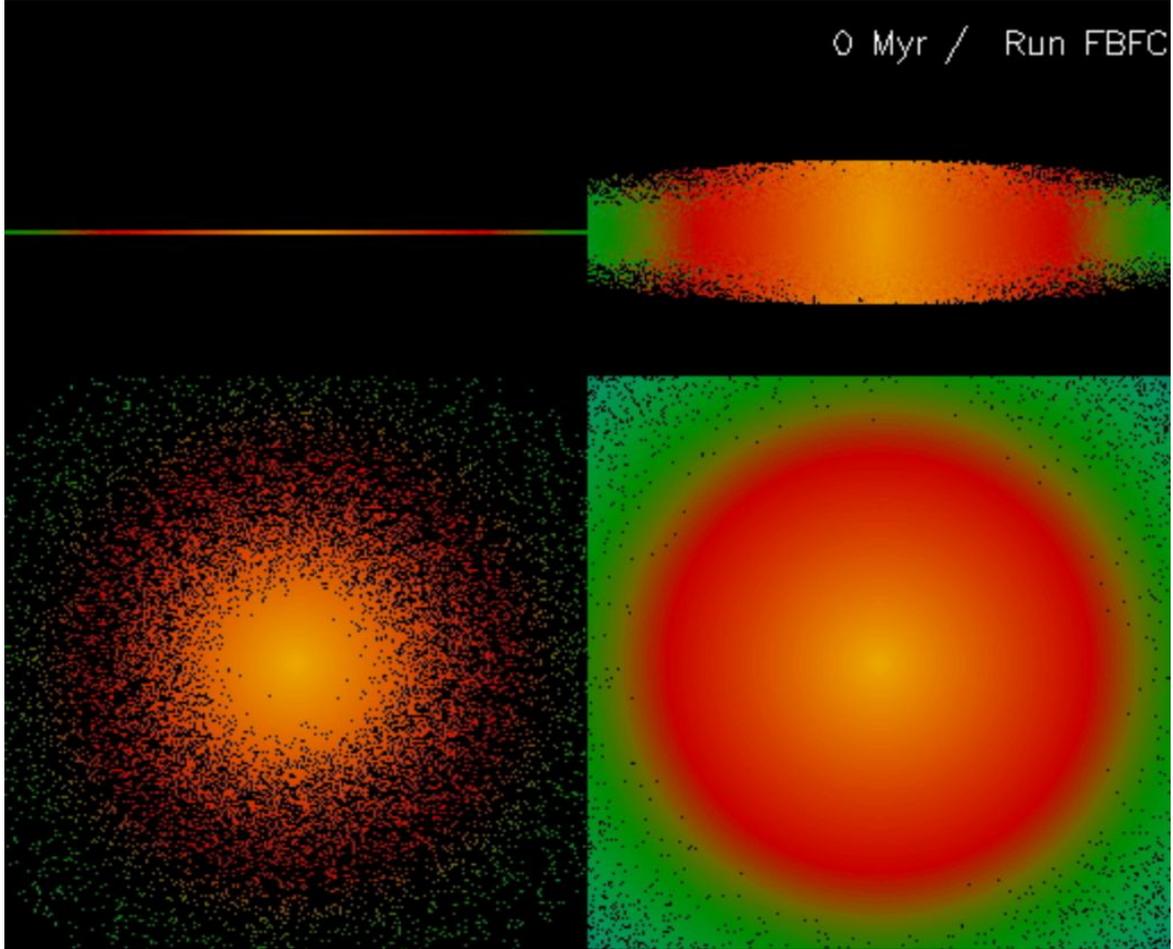
4. Coupler l'évolution chimique et l'évolution dynamique

Distribution de métallicité du gaz

Distribution de métallicité des étoiles

Vue par la tranche

Vue de face-on



40 kpc

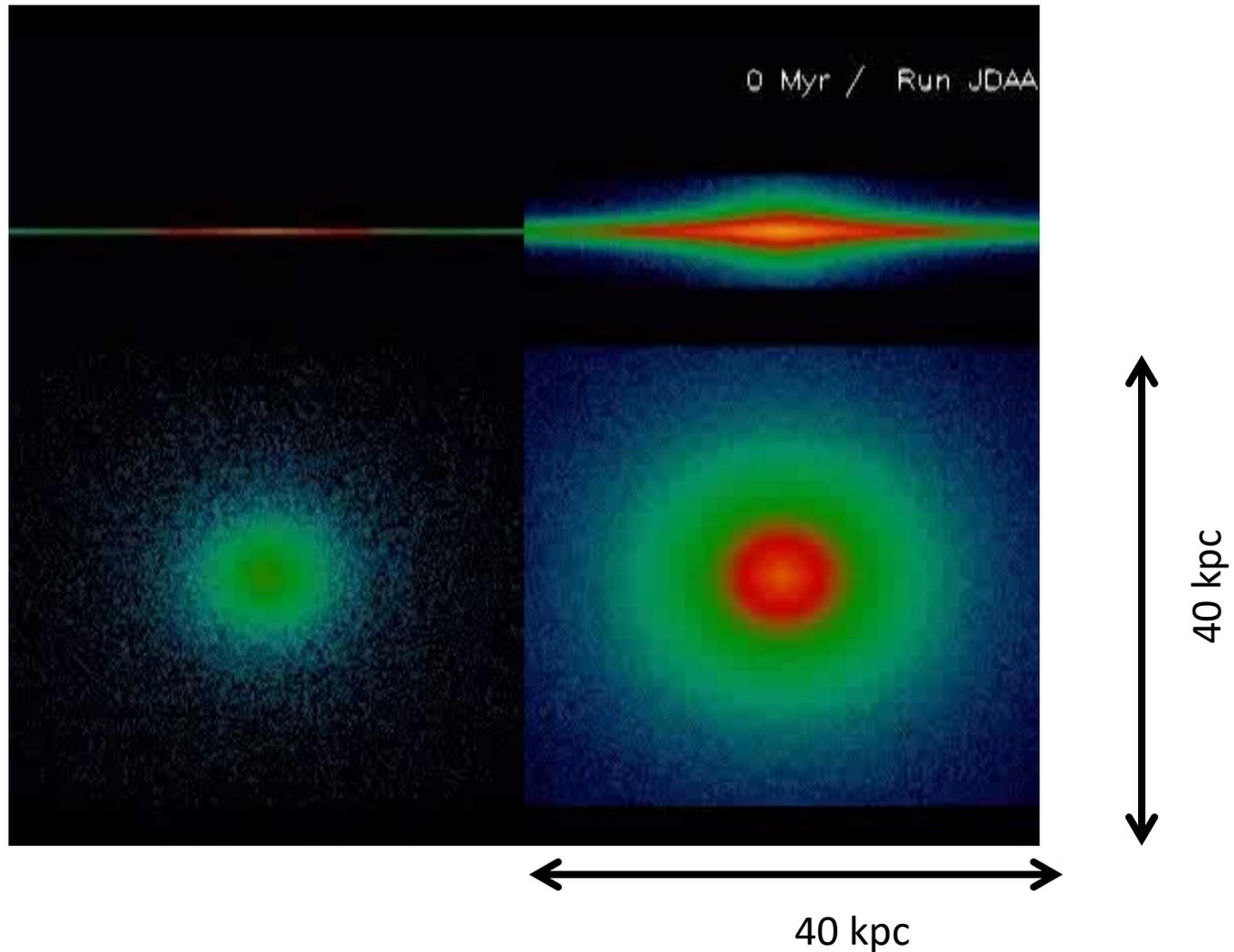
40 kpc

Distribution de métallicité du gaz

Distribution de métallicité des étoiles

Vue par la tranche

Vue de face-on



Que reste-t-il à comprendre ?

- Il existe des modèles simples (parfois analytiques) pour décrire l'évolution chimiques globales galaxies mais il est nécessaire de coupler à l'évolution dynamique pour comprendre les caractéristiques spatiales (distribution des métaux, couleurs des bras, formation des poussières, etc.) accessibles avec les grands instruments (ALMA, JWST, ELT,...)
- Champ de recherche compliqué à cause de l'interdisciplinarité :
 - Evolution stellaire (formation, vents, supernovae, etc.)
 - Propriétés du milieu interstellaire multiphasique
 - Propriétés statistiques de la formation des galaxies
 - Interactions avec l'environnement des galaxies
 - Dynamique interne (instabilités,...)
 - Transfert radiatif (commence à peine à être étudiier correctement)
 - ...