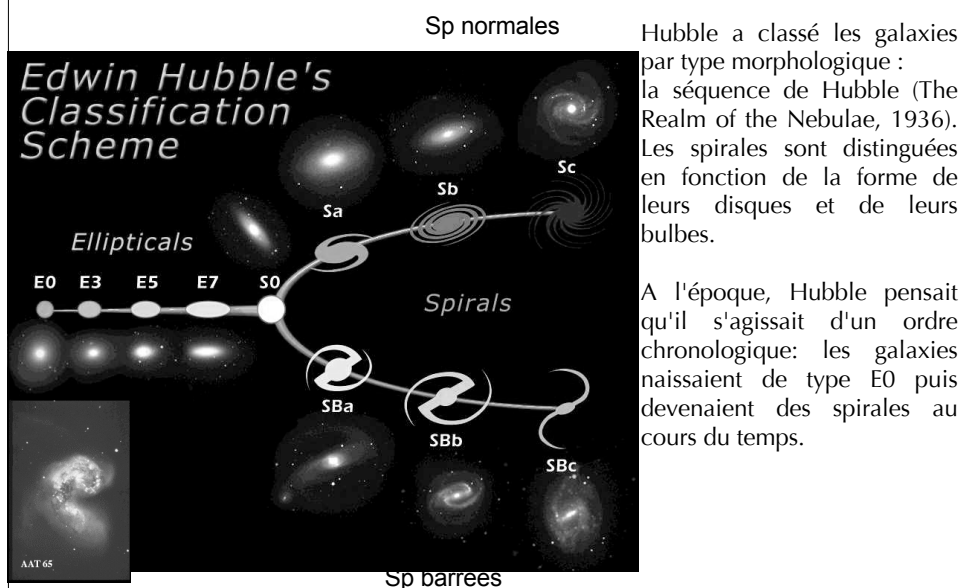


1. Historique sur la découverte des galaxies
2. La Voie Lactée
3. **Classification morphologique des galaxies**
 - 3.1 La séquence de Hubble
 - 3.2 Quelques cas illustratifs: elliptiques (E), lenticulaires (S0) & spirales (Sp)
 - 3.3 La structure spirale
 - 3.4 Les galaxies irrégulières (Irr)
 - 3.5 Les galaxies particulières (peculiar, Pec) et les galaxies en interaction
 - 3.6 Distributions en nombre et en masse stellaire
 - 3.7 Evolution morphologique
 - 3.8 Caractériser les galaxies par leur type spectro-photométrique
 - 3.9 La classification morphologique CAS (Concentration, Assymétrie, Smoothness)
 - 3.10 Dépendance de la morphologie avec la longueur d'onde
 - 3.11 Les galaxies absentes de la séquence de Hubble-Sandage
 - 3.12 Evolution morphologique en fonction de l'environnement
4. Distribution des galaxies aux grandes échelles
5. ...

3.1 La séquence de Hubble



Classification de Hubble - Sandage

Références bibliographiques:

- Hubble 1926, Ap.J., 64, 321
- Hubble 1936, Realm of the Nebulae, Yale University Press
- Sandage 1961, the Hubble Atlas of Galaxies, Carnegie Institution of Washington
- Sandage 1975, in Stars and Stellar Systems IX. Galaxies and the Universe, University of Chicago Press
- Sandage & Tammann 1981, A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies, Carnegie Institution of Washington

Classification de Hubble: Elliptiques, Lenticulaires & Spirales

Elliptiques:

Pas de structure dans leur distribution de brillance. Ressemblent à des ellipsoïdes de révolution. En magnitude absolue, elles vont des galaxies les plus lumineuses aux moins lumineuses (dE= dwarf ellipticals, naines du Groupe Local). Les E0 sont circulaires et les E7 présentent les ellipticités les plus allongées (cf diagramme ci-après).

Les galaxies plus plates que les E7 possèdent un disque, elles sont donc séparées dans la catégorie des galaxies **lenticulaires (S0 ou L)** (ellipticité: $b/a < 0.3$).

Spirales:

Sa/SBa: bras spiraux rapprochés, sans discontinuités dues aux regroupements stellaires. Le bulbe central ou la barre (SBa) domine la lumière et ne présente aucune structure.

Sb/SBb: bras spiraux + ouverts, résolus en étoiles. Bulbe central ou barre plus petit que Sa.

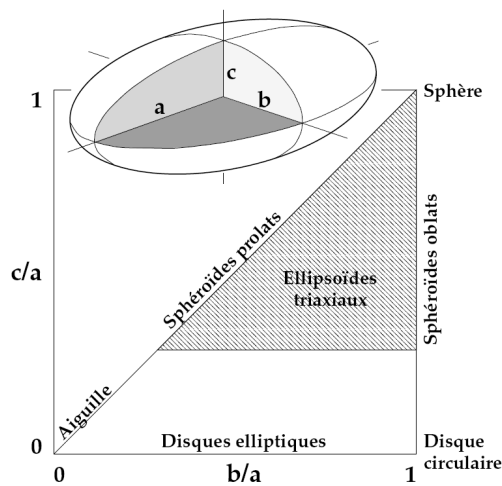
Sc/SBc: bras spiraux très ouverts, présentant des "grumeaux" dûs aux amas d'étoiles et régions HII (régions de formation d'étoiles). Sphéroïde très petit. Pour les galaxies barrées, la barre est résolue en amas stellaires et régions HII. Sandage subdivisa les Sc en: Sc, Scd, Sd, Sdm et Im (spirales à la structure plus chaotique, irrégulière).

Etapas intermédiaires: Sab, Sbc et Scd.

Classification de de Vaucouleurs: Sa - Sab - Sb - Sbc - Sc - Scd - Sd - Sdm - Sm - Im - I0

+ symbole complémentaire: "r" indiquant la présence d'un anneau à l'intérieur des gal et "R" pour un anneau à l'extérieur.

Ellipticité des galaxies elliptiques et nomenclature



$q=b/a=$ petit/grand axe

Classification de Hubble: En où $n=10(1-q)$

Donc une galaxie E1 est pratiquement circulaire. Il n'existe aucune galaxie connue plus aplatie que E7.

3 géométries reconnues:

- "oblat": sphéroïde aplati, en forme de galette ($a \approx b$)
- "prolat": sphéroïde allongé, en forme de cigare ($c \approx b$)
- ellipsoïde triaxial ($a > b > c$)

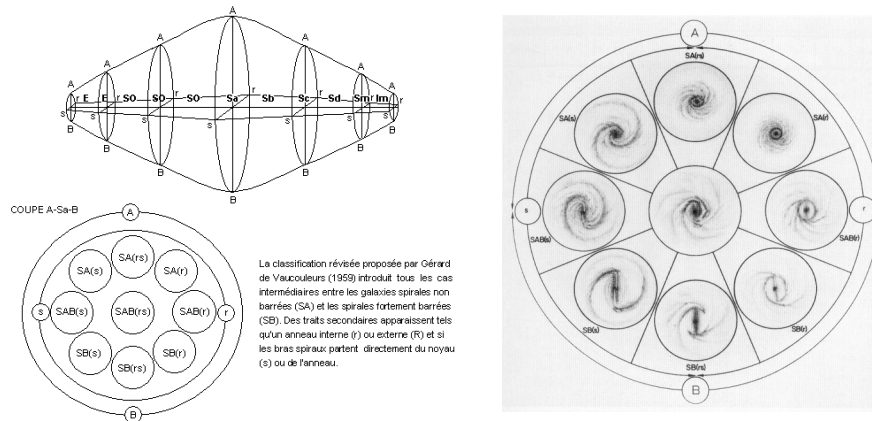
Galaxies de type "précoce" (early-type galaxies= elliptiques et lenticulaires) ou de type "tardif" (late-type galaxies= spirales)

On parle des galaxies de type "précoce" (early-type galaxies) car selon la séquence de Hubble elles correspondraient à la phase qui précède la croissance du disque des spirales qui sont dites de type "tardif" (late-type galaxies).

En réalité, les spirales ne sont probablement pas nées à partir des elliptiques (qui sont en moyenne plus massives et dont les étoiles sont plus vieilles). On pense au contraire qu'une fraction importante des elliptiques massives sont nées de la fusion de deux galaxies spirales qui ont perdu leur disque au cours de la fusion. Toutes les galaxies naîtraient sous la forme de spirales et deviendraient elliptiques sous l'effet de leur environnement. La séquence est donc inversée. La morphologie d'une galaxie serait donc un indicateur de l'environnement des galaxies: les elliptiques signalent des environnements denses.

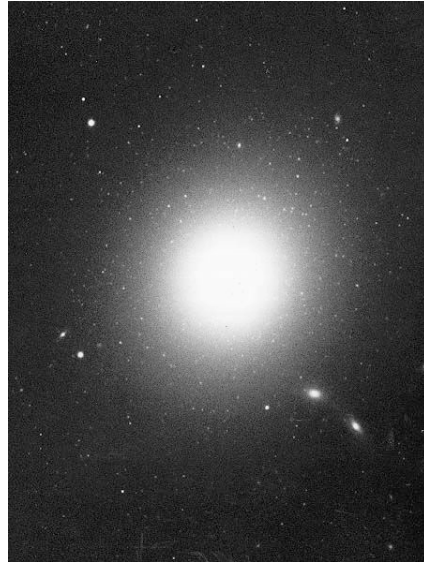
Les galaxies E/S0 possèdent très peu de gaz interstellaire et de formation stellaire (pas de réservoir de gaz). On peut dire qu'elles sont précoces dans le sens où elles ont très tôt formé leurs étoiles alors que les spirales continuent de former des étoiles à un rythme lent mais relativement régulier.

Classification de de Vaucouleurs (1959)

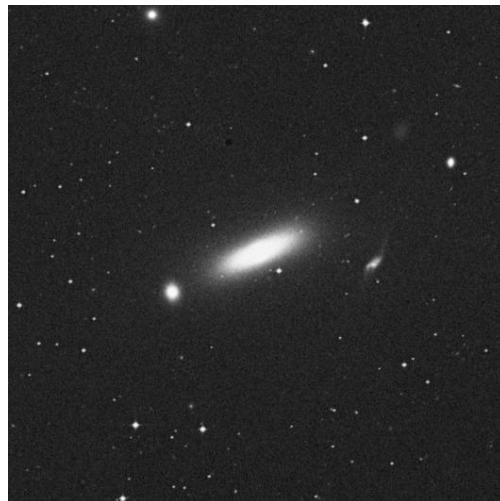


3.2 Quelques cas illustratifs: elliptiques (E), lenticulaires (S0) & spirales (Sp)

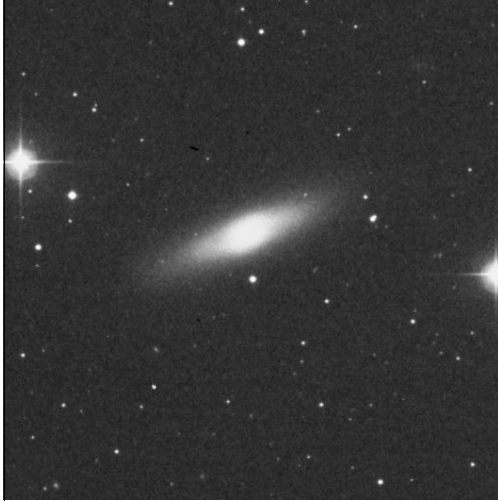
M87 (NGC 4486) : une galaxie de type E0 (ellipticité nulle)



NGC 1332 : une galaxie de type E7 (ellipticité=0.7, $b=0.3 \times a$)



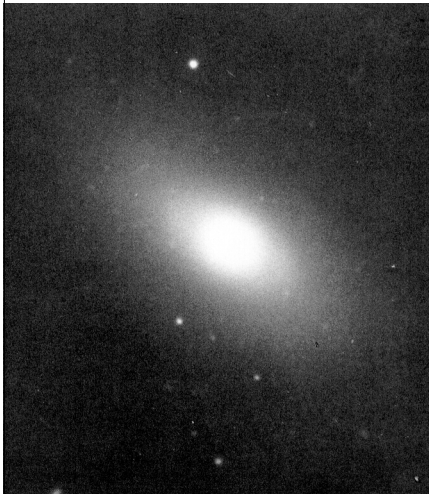
NGC 4526 : une galaxie de type S0 (ellipticité >0.7 , $b < 0.3 \times a$)



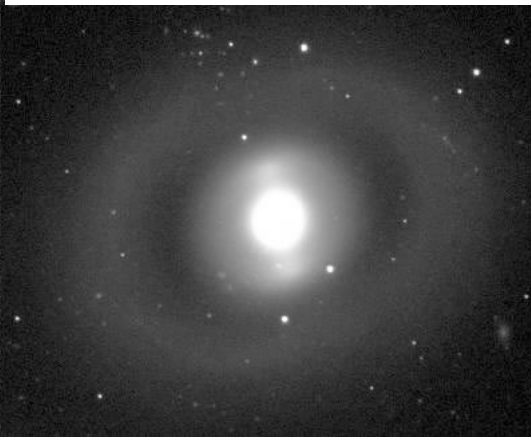
Cette galaxie est vue "edge-on", de côté.

Notez le contraste entre le bulbe et le disque, en comparaison à NGC 1332 (E7)

Galaxies lenticulaires S0 et SB0 (ellipticité >0.7 , $b < 0.3 \times a$)



NGC 1201 (S0)



NGC 2859 (SB0)
une galaxie lenticulaire barrée

M74 (NGC 628): une spirale de type Sc



1. bulbe petit
2. structure en spirale marquée, bras bien ouverts
3. couleur bleue des bras, indiquant la présence d'étoiles chaudes, donc massives et donc jeunes.
4. marques sombres dues à la présence de poussière, donc indiquant la présence d'un réservoir de matière interstellaire nécessaire à la naissance de nouvelles générations d'étoiles.

This image was obtained by the 8.1-meter Gemini North Telescope on Mauna Kea, Hawaii using the newly commissioned Gemini Multi-Object Spectrograph. To make the color image, three images were combined to make this red, green and blue composite. These are false colors: Blue represents filter *g'* (wavelengths 398-552 nm - green and blue; 4 x 240 sec exposures, sharpness 0.53 arc sec), Green, *r'* (562-698nm, red and yellow; 4 x 120 sec exposures, sharpness 0.55 arc sec) and Red, *i'* (706-850nm, far red to near infrared; 4 x 120 sec, sharpness 0.57 arc sec). The field of view of the composite image is 5.7 x 5.4 arc min and roughly 13.76 pixels/arc sec.

Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 13

M33 (NGC 598): une autre spirale de type Sc



Notez la structure spirale diffuse, en comparaison avec M74.

M33 © IAC/RGO/Malin
Photo from Isaac Newton Telescope plates by David Malin

Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 14

NGC 1288: une spirale de type Sb



Les galaxies de type Sb se distinguent des Sc par une structure spirale moins ouverte et un bulbe plus proéminent.

Image composite BVI (téléscope de 8.2 m Antu du VLT avec la camera FORS1)

M65 (NGC 3623): une spirale de type Sa



Les galaxies de type Sa présentent une structure spirale encore moins ouverte et un bulbe encore plus proéminent.

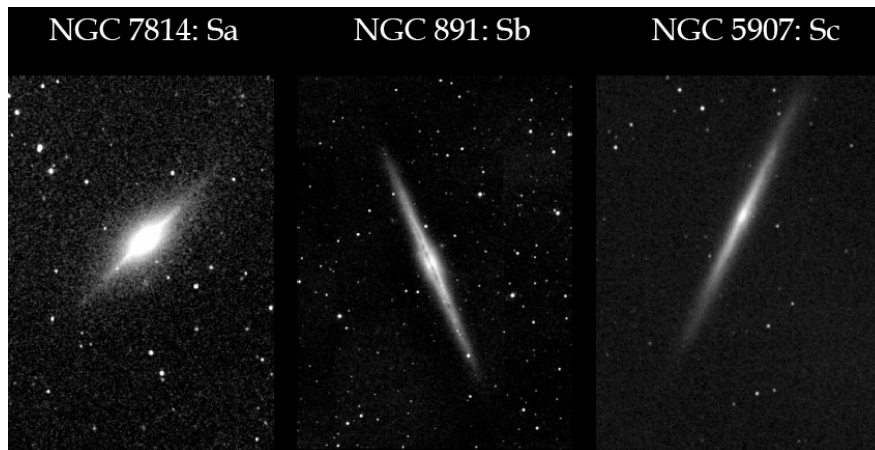
Image composite 3 couleurs (vert-bleu-rouge à l'Anglo-Australian Telescope de 3.8 m)

M65 © Anglo-Australian Observatory
Photo by David Malin

Le rapport bulbe/disque dans les spirales de profil ("edge-on")

Images en infrarouge proche de 2MASS en fausses couleurs combinant 1.2, 1.6, 2.2 μm

Bras plus ouverts, bulbe moins proéminent des Sa \rightarrow Sb \rightarrow Sc \rightarrow

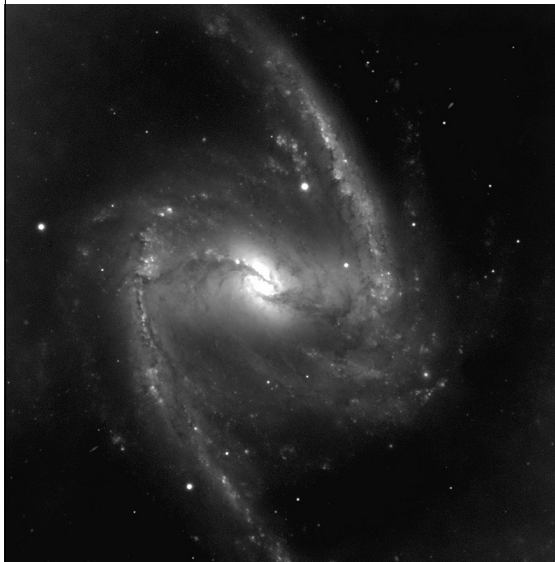


Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 17

NGC 1365: une galaxie barrée de type SBc



Présence d'une barre (SB) et de bras ouverts avec un bulbe peu marqué (SBc).

Image composite BRI (télescope de 8.2 m Antu du VLT avec la camera FORS1).

Barred Galaxy NGC 1365
(VLT UT1 + FORS1)
ESO PR Photo 08a/99 (27 February 1999)

© European Southern Observatory

Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 18

M95 (NGC 3351): une galaxie barrée de type SBb



Une galaxie qui ressemble à l'image que l'on aurait de la Voie Lactée vue du dessus du côté du pôle Nord galactique.

Image composite 3 couleurs (vert-bleu-rouge à l'Anglo-Australian Telescope de 3.8 m)

M95 © Anglo-Australian Observatory
Photo by David Malin

Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 19

3.4 Les galaxies Irrégulières (Irr)

A l'époque de Hubble, les irrégulières étaient des galaxies ne possédant ni un noyau dominant ni une symétrie rotationnelle et incluaient toutes les galaxies qui ne rentraient pas dans la séquence de Hubble.

Beaucoup d'irrégulières ressemblaient aux Nuages de Magellan et furent classées: Irr I ou irrégulières magellaniques. De Vaucouleurs découvrira une structure faible de type spirale dans le Grand Nuage de Magellan (LMC: Large Magellanic Cloud) et les Irr I se placent donc dans sa classification à la suite naturelle des spirales= Im (Irrégulières de type Magellan).

Les Irr II, que de Vaucouleurs appelle I0, ne s'inscrivent pas naturellement dans la séquence, car elles ne possèdent aucune structure particulière, mais leur caractéristique est d'être riches en gaz interstellaire et de posséder des régions actives de formation d'étoiles.

Attention ! l'archétype de la galaxie de type Irr II est M82, mais ceci n'est qu'apparence due à une forte extinction par la poussière. Masquée derrière celle-ci se trouve une galaxie spirale...

Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 20

Le Grand Nuage de Magellan (Irr I)

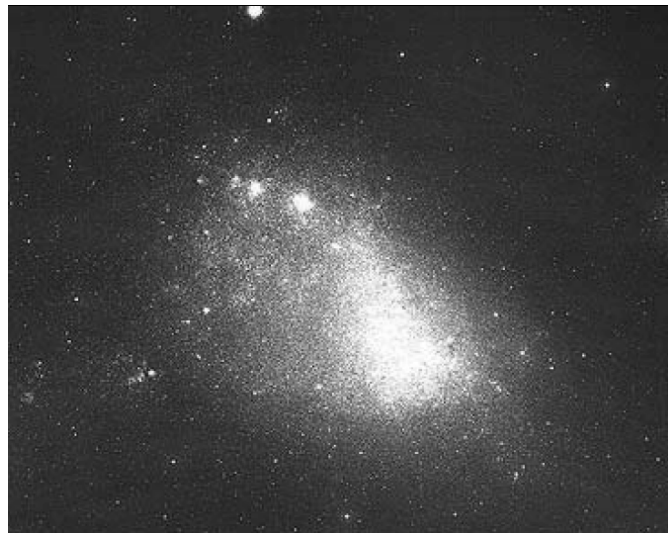


Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 21

Le Petit Nuage de Magellan (Irr I)



Galaxies J1 - David Elbaz

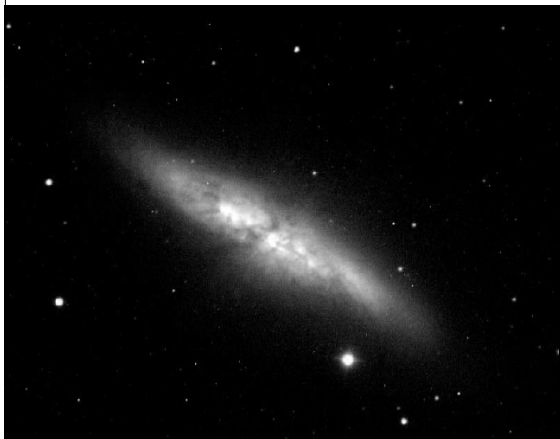
3. Classification des galaxies

Page 22

NGC 1313 (Irr I)



M 82 (NGC 3034): Irr II en apparence, mais spirale en réalité



La courbe de rotation de M82 indique qu'il s'agit d'une galaxie spirale vue sur la tranche et subissant une forte extinction par la poussière.

*Image composite B,V,R et H α
(Calar Alto, 1.2m)*

3.5 Les galaxies Particulières (Pec)

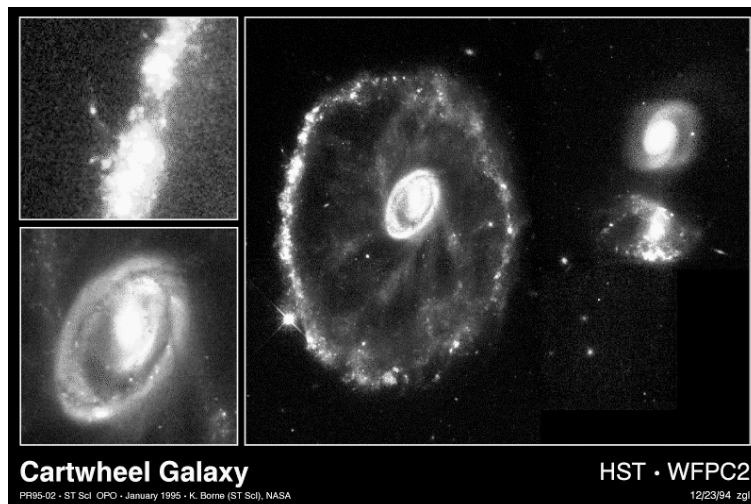
Certaines galaxies présentent des structures particulièrement étranges, ce sont en général deux galaxies en interaction l'un avec l'autre (collisions ou effets de marée), on les appelle pour cela "peculiar". Parmi elles se trouvent les galaxies à anneau (ring galaxies) comme la galaxie de la roue de charriot, Cartwheel.

En 1973, Toomre & Toomre ont réalisé des simulations numériques reproduisant ce type de morphologies en faisant interagir deux galaxies spirales. Les interactions gravitationnelles peuvent produire des bras de marées et de nouvelles étoiles naissent parfois dans ces bras, au sein de sur-densités qui se séparent par la suite: ce sont les galaxies naines de marée (cf <http://galaxydynamics.org/>)

Grâce au satellite IRAS (1983), qui a observé l'univers dans l'infrarouge moyen et lointain où rayonne la poussière interstellaire chauffée par les étoiles massives dans les régions de formation d'étoiles (régions HII), il a été constaté que ces galaxies produisaient les plus forts taux de formation d'étoiles jamais rencontrés, on parle de **flambées de formation d'étoiles, ou starbursts**, en anglais.

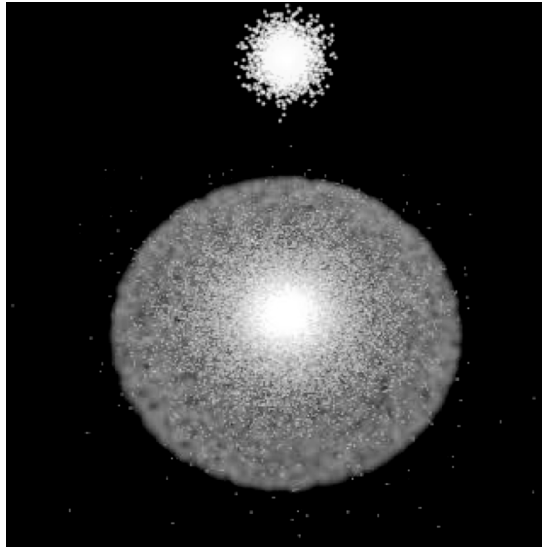
Dans le paradigme actuel où les premières hétérogénéités à se former sont issues de l'amplification de fluctuations quantiques au cours de l'inflation, les galaxies se forment de manière hiérarchique, i.e. par fusions successives, et les starbursts associés à des morphologies particulières, rares aujourd'hui, étaient prédominants dans le passé, ce que l'on observe effectivement.

La galaxie de Cartwheel

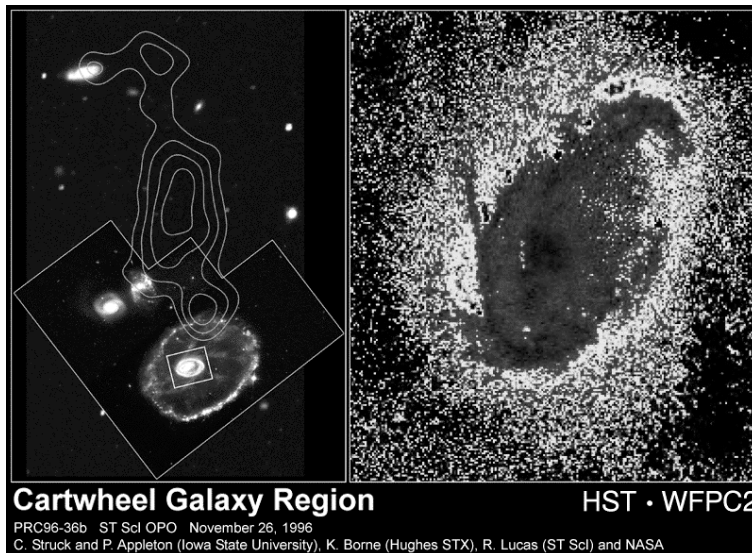


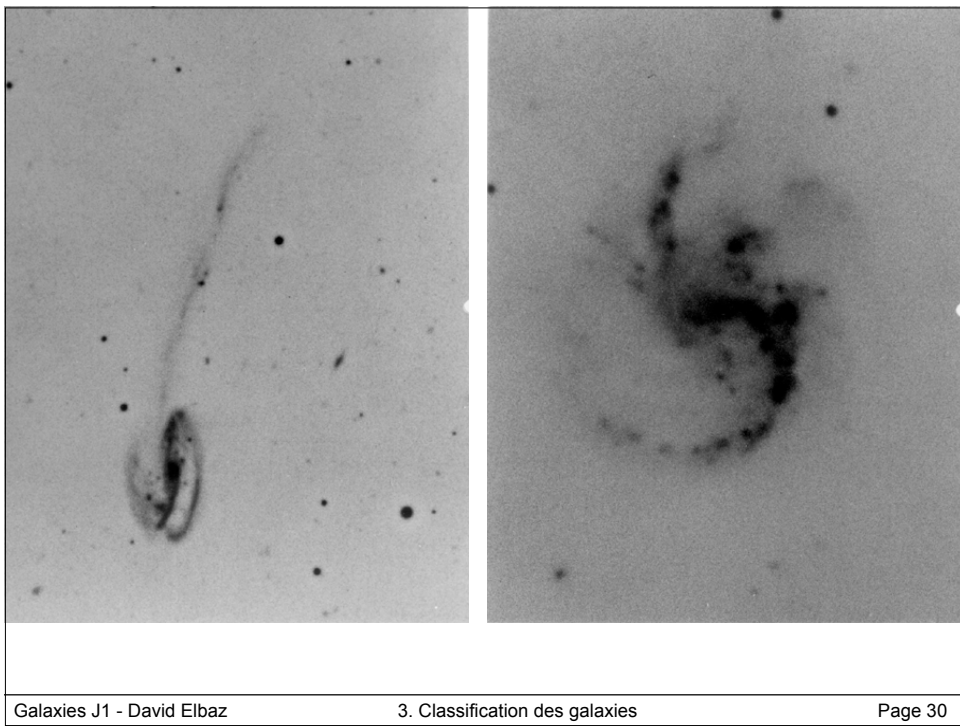
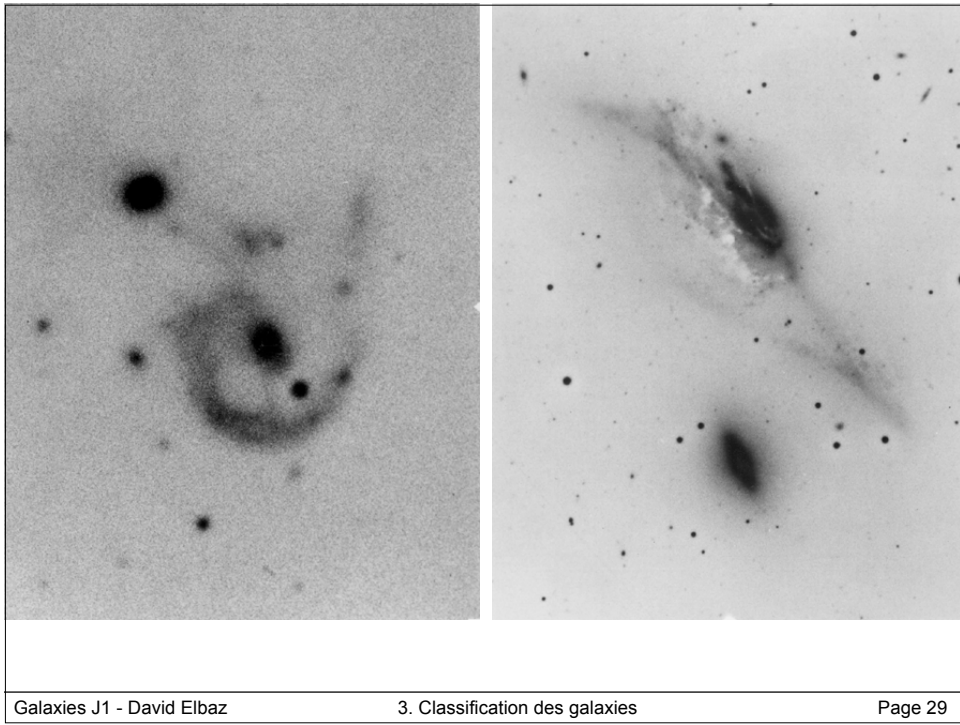
La galaxie de Cartwheel

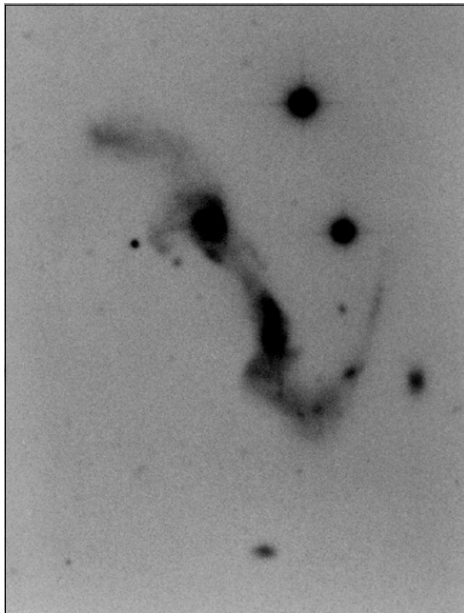
(simulation numérique par Chris Mihos (jaune= étoiles, bleu= gaz))



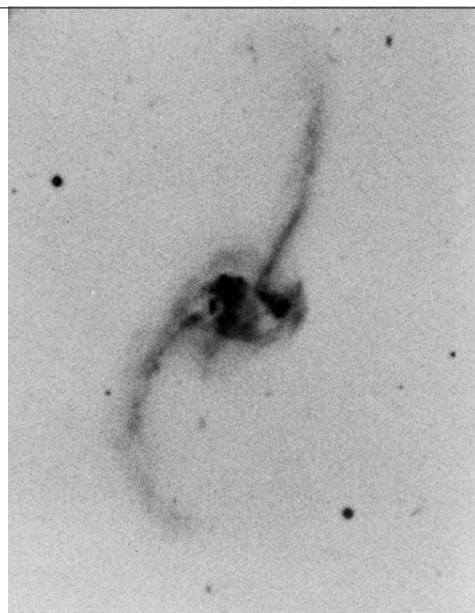
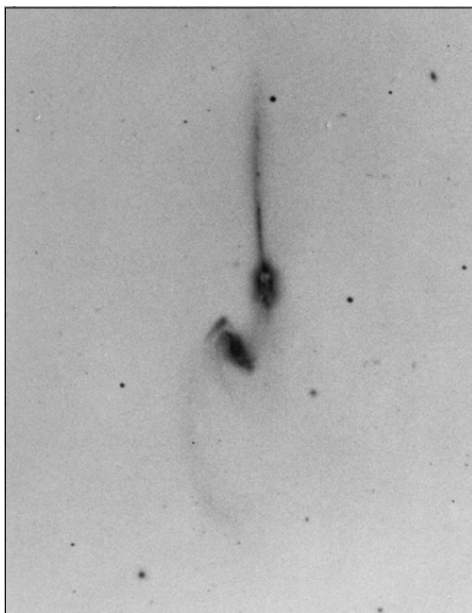
La galaxie de Cartwheel





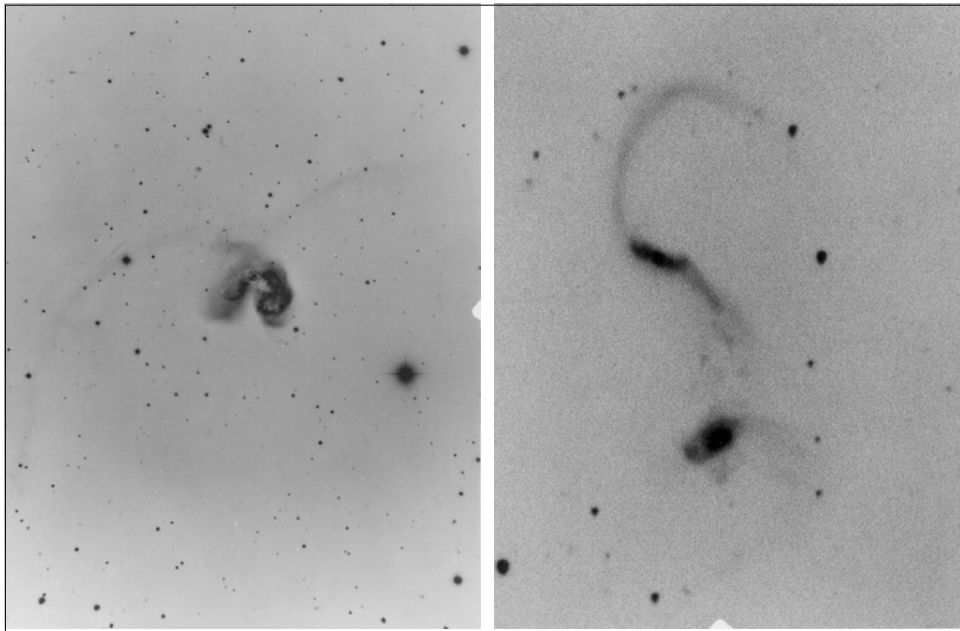


Galaxies J1 - David Elbaz



La Souris

Galaxies J1 - David Elbaz

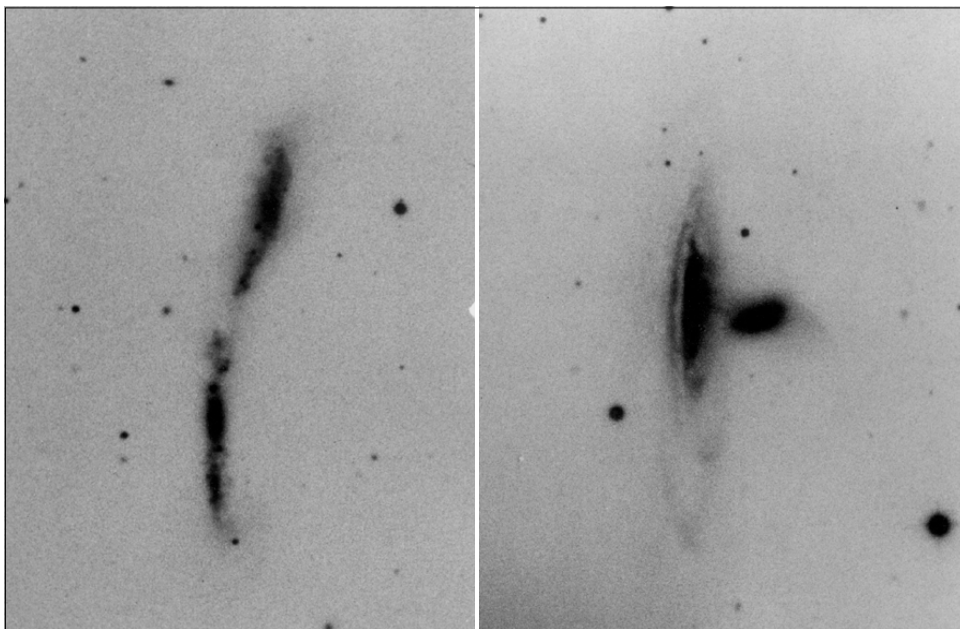


Les Antennes

Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

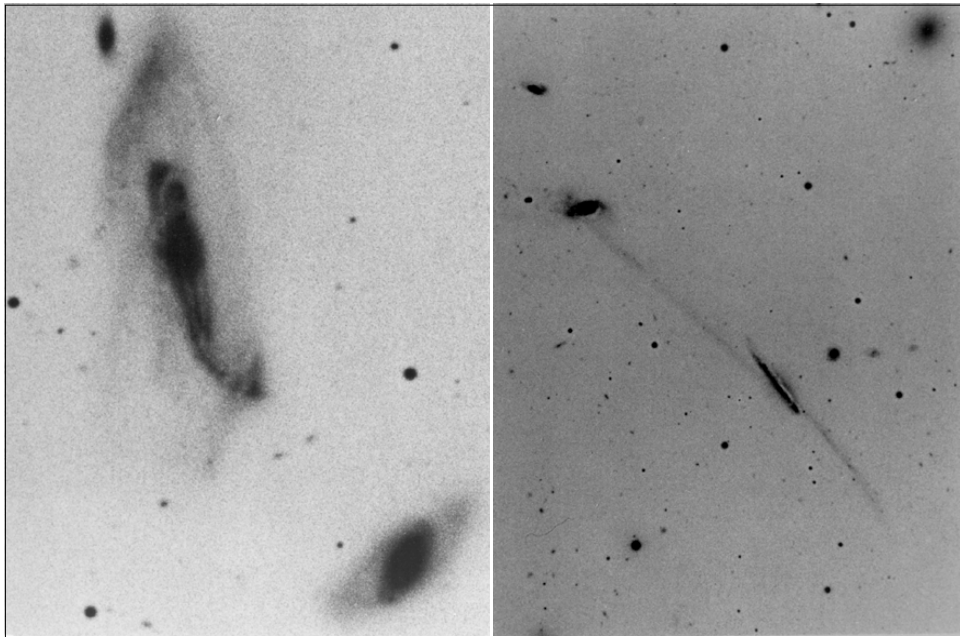
Page 33



Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

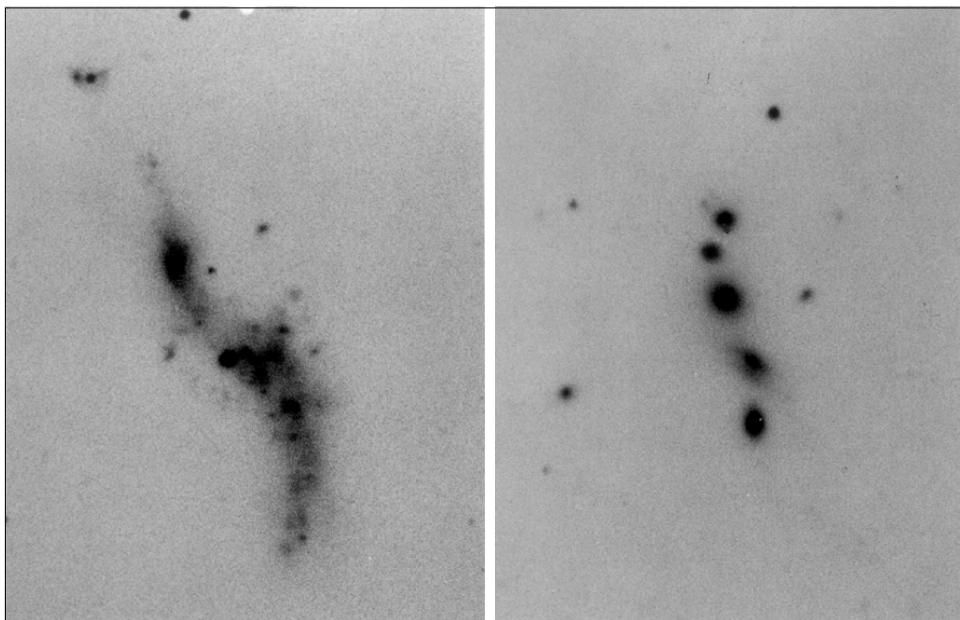
Page 34



Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

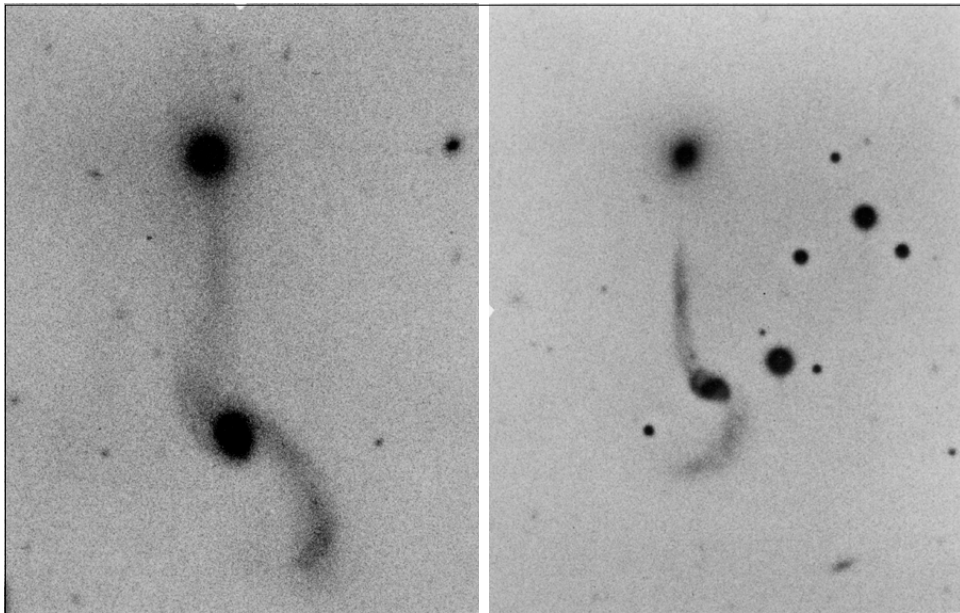
Page 35



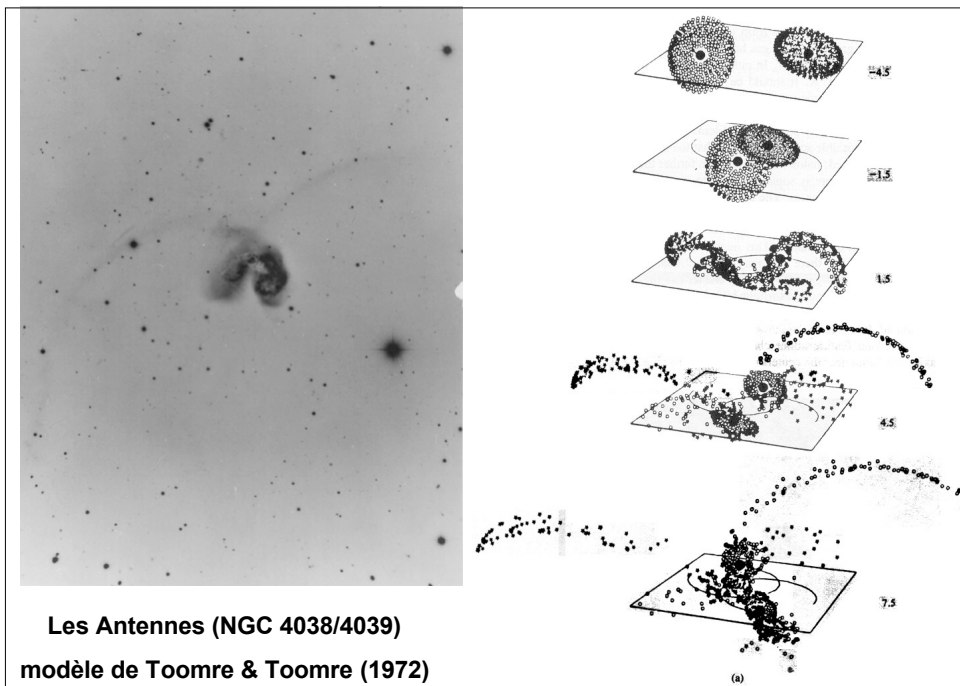
Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 36



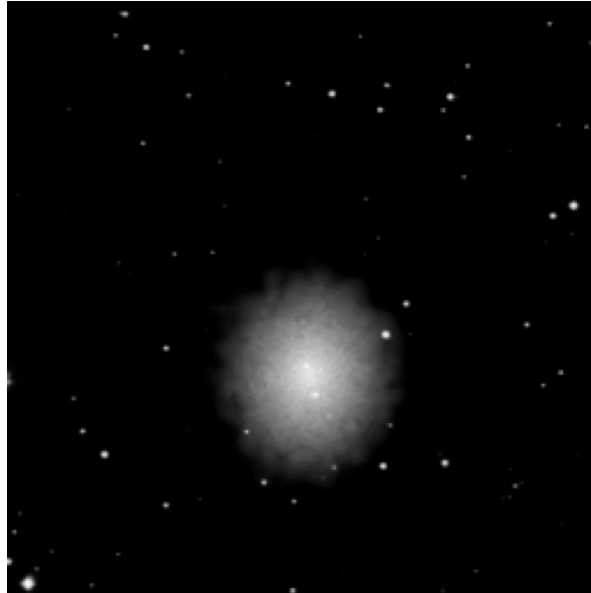
Galaxies J1 - David Elbaz



Les Antennes (NGC 4038/4039)
modèle de Toomre & Toomre (1972)

Galaxies J1 - David Elbaz

Simulation de la collision entre deux spirales massives
(code gadget de Volker Springel: <http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/right.html>)



Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 39

3.6 Distributions en nombre et en masse stellaire

Distribution en nombre:

(de Vaucouleurs, 1963)

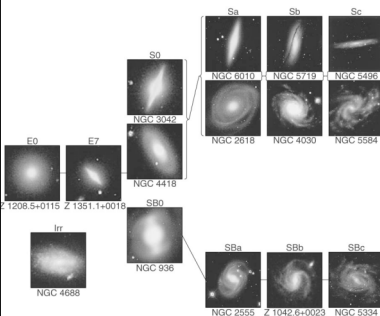
Spirales (Sp)	61%
Lenticulaires (L)	21%
Elliptiques (E)	13%
Irrégulières (Irr)	4%
Particulières (Pec)	1%

Distribution en masse stellaire:

(Fukugita, Hogan & Peebles 98)

Disques	25%
Sphéroïdes	73%
Irrégulières	2%

Ici les sphéroïdes comprennent les étoiles des E, S0 et des bulbes de Sp.



Attention !

(i) Les E sont moins nombreuses que les Sp mais plus massives !

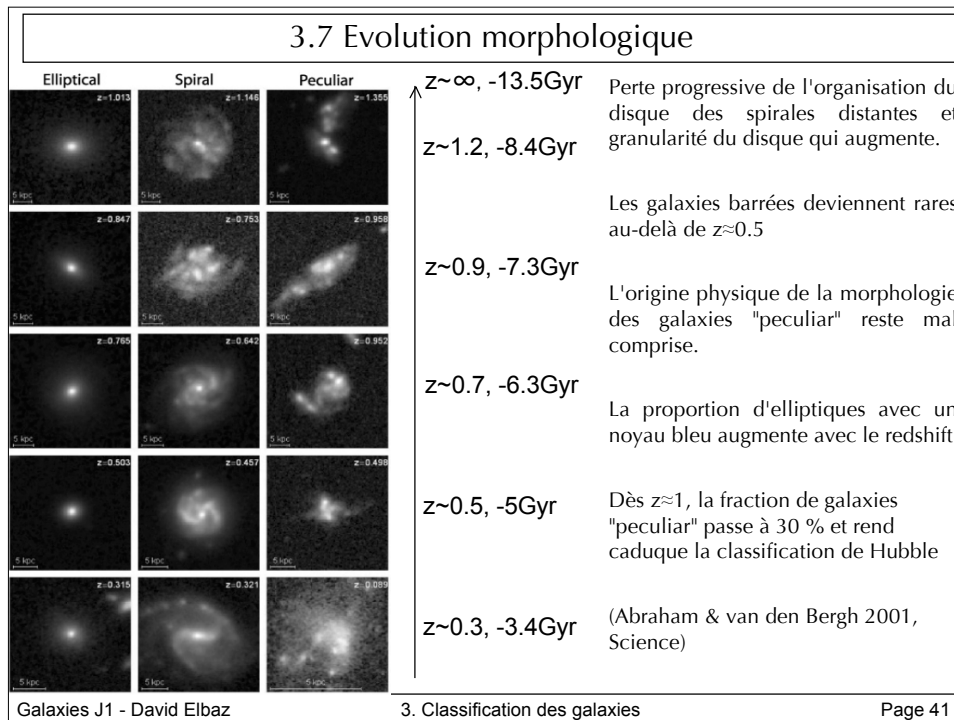
La majorité des étoiles locales ne sont pas dans des disques mais dans des E/S0 et bulbes de Sp !

(ii) à $z \approx 1$ ($-7.7 \text{ Gyr} = -7.7 \times 10^9 \text{ ans}$):
Particulières (Pec) **>30%**

Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

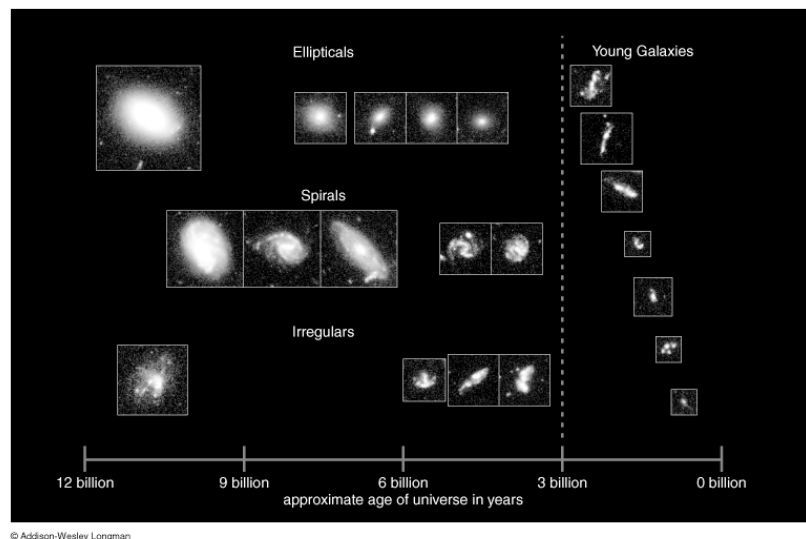
Page 40



3. Classification des galaxies

Page 41

En remontant dans le passé: les galaxies Sp/E/S0 représentent une fraction de plus en plus petite des galaxies et la classification de Hubble n'est plus utilisable. Il faut utiliser d'autres techniques. On utilise une technique d'analyse automatique de profil de brillance des galaxies, mais celle-ci reste imparfaite et beaucoup d'études sont réalisées à l'œil par 3 observateurs indépendants...



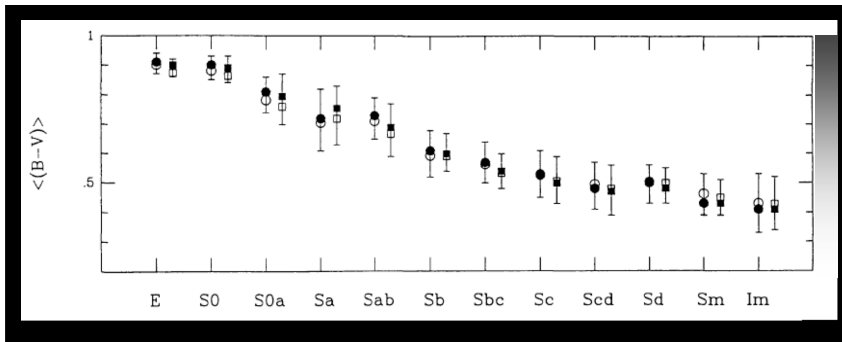
Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 42

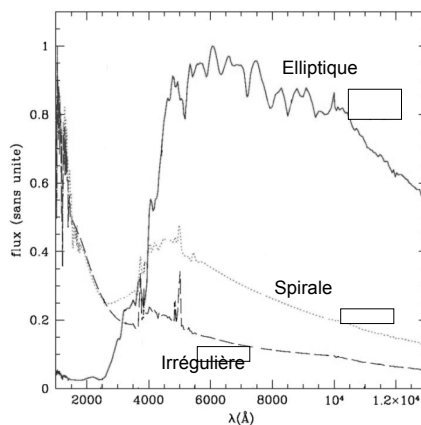
3.8 Caractériser les galaxies par leur type spectro-photométrique

Robert & Haynes (1994)



Dans l'univers local : les galaxies bleuissent lorsqu'on se déplace des elliptiques vers les irrégulières

3.8 Caractériser les galaxies par leur type spectro-photométrique



Elliptiques: émission dominée par les étoiles vieilles, de petite masse.

Spirales: forte contribution des étoiles jeunes dans les bandes visibles

Irrégulières: forte émission dans l'UV

Propriétés des galaxies par types morphologiques

	<i>Elliptiques</i>	<i>Spirales</i>			<i>Irrégulières</i>
<i>Composition</i>		Bulbe	Disque	* et Gaz	
	Population II * rouges	Population II * rouges	Pop. I vieille * rouges	Pop. I jeune * bleues	Pop. I jeune * bleues
	$T_f \gg 10^9$ a.	$T_f \gg 10^9$ a.	$T_f > 10^9$ a.	$T_f < 10^9$ a.	$T_f < 10^9$ a.
	pas de gaz	pas de gaz	$M_{\text{gaz}}/M_* = 1-10\%$	$M_{\text{gaz}}/M_* = 1-10\%$	$M_{\text{gaz}}/M_* > 10\%$
<i>Dimension (kpc)</i>	1 – 150 ⁺	5 - 50			1 - 10
<i>Luminosité (L_{sol})</i>	$10^6 - 10^{11}$	$10^8 - 10^{10}$			$10^6 - 10^9$

Propriétés des galaxies par types morphologiques

Les paramètres physiques des galaxies varient le long de la séquence de Hubble:

1. la masse stellaire augmente des irrégulières ($10^8 M_{\odot}$) aux elliptiques ($10^{11} M_{\odot}$)
2. le moment angulaire spécifique $J/M (=r\mathbf{x}\mathbf{p}/M)$ augmente des E aux Sp
3. l'âge moyen augmente des irrégulières aux E en passant par les Sp (B-V augmente de 0.3 à 1.0, le rapport M/L_B augmente de 2 à 10)
4. la densité stellaire moyenne des sphéroïdes croît quand la luminosité décroît
5. la brillance de surface moyenne des disques croît avec la luminosité
6. le contenu en gaz froid augmente le long de la séquence de Hubble (la fraction de gaz passe de ≈ 0 dans les E/S0, à 10-30% dans les Sa-Sc, jusqu'à 90% dans certaines Irr)
7. le contenu en gaz chaud n'est conséquent que dans les E massives (qq %, visible grâce à son émission X)

2.2 Distribution de la lumière dans les galaxies spirales

D'une manière générale, la distribution de lumière des **galaxies spirales** décroît de manière exponentielle:

$$I(r)=I_0\exp(-r/h)$$

h : est la "longueur d'échelle" du disque (disk scale length), **$h=3$ kpc pour la VL**

La luminosité totale du disque= $L_{tot}=2\pi I_0 h^2$

Freeman (1970) a découvert une grande similitude entre les grandes galaxies spirales: elles possèdent toutes une brillance de surface centrale proche de la valeur moyenne calculée dans la bande B:

$$I_0=21.67\pm0.3 \text{ magnitudes B arcsec}^{-2}$$

Ce résultat a été longuement débattu, car il pourrait s'agir d'un effet de sélection: seules des galaxies très lumineuses et larges permettent de calculer leur distribution de brillance... Cependant ce résultat a été ultérieurement confirmé par Van der Kruit (1989), en dehors des galaxies de faible luminosité.

2.3 Distribution de lumière et masse des galaxies elliptiques

- La distribution de lumière des **galaxies elliptiques** suit généralement une loi dite en $r^{1/4}$ ou loi de de Vaucouleurs (1953):

$$I(r)=I_e\exp\{-7.67[(r/r_e)^{1/4}-1]\}$$

où r_e est le rayon efficace ou "half-light radius" à l'intérieur duquel se trouve la moitié de la lumière rayonnée par la galaxie. I_e est la brillance de surface en r_e , c'est un flux par arcsec²

- La luminosité totale est: $L_{tot}=7.215 \pi I_e r_e^2$
- La loi de de Vaucouleurs peut se généraliser grâce à la formule:

$$I(r)=I_e 10^{\{-b_n[(r/re)^{1/n}-1]\}}$$

Loi de de Vaucouleurs

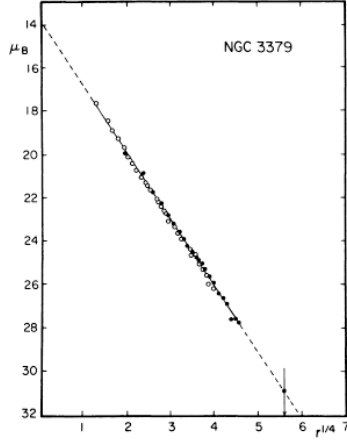


FIG. 2.—Mean E-W luminosity profile of NGC 3379 derived from McDonald photoelectric data. ●, Pe 4 data with 90 cm reflector; ○, Pe 1 data (M + P) with 2 m reflector. Note close agreement with $r^{1/4}$ law.

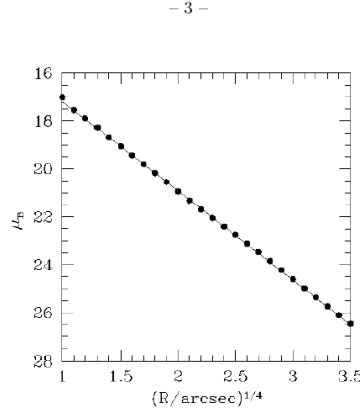


Fig. 3.— Surface photometry for NGC 1700. The solid line is the best $r^{1/4}$ -law fit to the data (indicated as solid points). The B -band surface brightness μ_B is in units of magnitude per square arcsecond (a larger value of μ_B indicates a fainter surface brightness).

2.3 Distribution de lumière et masse des galaxies elliptiques

The de Vaucouleurs profile cannot fit the inner-most (core) light profiles. Using the Hubble Space Telescope photometry, Faber et al. (1997) find that their light profiles are well approximated by the so-called “nuker” profile:

$$I(R) = I(R_b) 2^{(\beta-\gamma)/\alpha} (R/R_b)^{-\gamma} [1 + (R/R_b)^\alpha]^{(\gamma-\beta)/\alpha} \quad (2)$$

- This is a five parameter, $\alpha, \beta, \gamma, R_b$ and $I(R_b)$, fit to the data.
- For $R \gg R_b$, $I(R) \propto R^{-\beta}$, and for $R \ll R_b$, $I(R) \propto R^{-\gamma}$. So γ and β are the inner and outer power-law slopes, respectively.
- R_b is the break radius where the transition between the two power-laws roughly occurs..
- α determines how fast the transition between the two slopes occurs.

Faber et al. find that the inner light profiles can be divided into two types:

- power-law inner profiles. The surface brightness profile keeps on rising steeply in the inner part. Such profiles are found in lower-luminosity ellipticals and spiral bulges.
- cored-profiles. The surface brightness profile rises much more slowly in the inner part. Such profiles are found in more luminous ellipticals.

Fig. 4 shows one example for each of these profiles.

2.3 Distribution de lumière et masse des galaxies elliptiques

4.1.2. Cores of elliptical galaxies

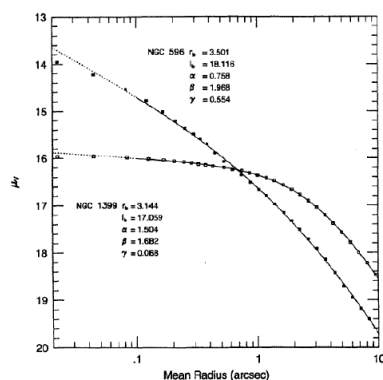
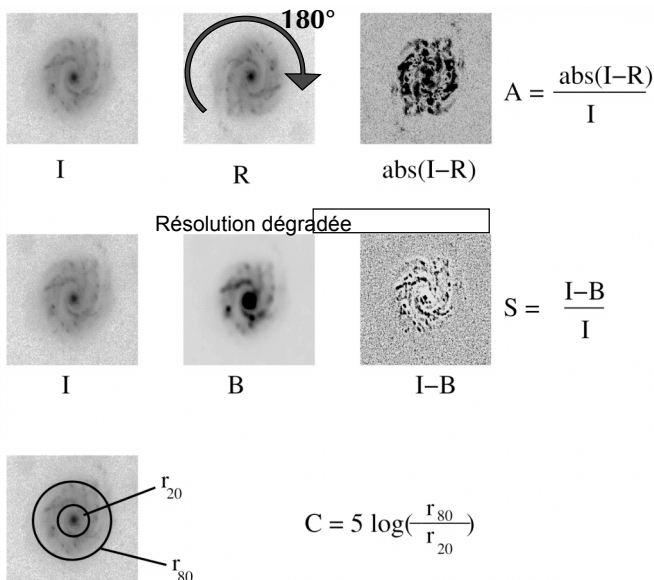


Fig. 4.— Surface brightness profiles for the central light distribution in two elliptical galaxies: NGC 596 (power-law profile) and NGC1399 (cored profile). The V-band surface brightness μ_V is in units of magnitude per square arcsecond (a larger value of μ_V indicates a fainter surface brightness).

3.9 La classification morphologique CAS (Conselice 2003):

Concentration (C), Assymetry (A), Smoothness (S, granularité)

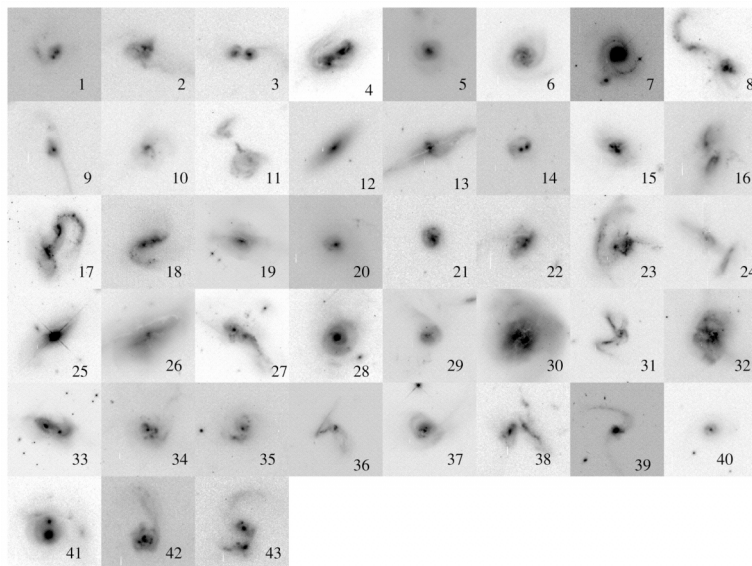


Cette technique reste insatisfaisante

La difficulté vient aussi de la nécessité de classer les galaxies distantes tout en gardant la continuité avec les galaxies locales...

Beaucoup d'études sont encore réalisées à l'œil par 3 observateurs indépendants...

Application aux ULIRGs = Ultra-Luminous InfraRed Galaxies
détectées par le satellite infrarouge IRAS (images HST de Borne et al. 2000)



Galaxies J1 - David Elbaz

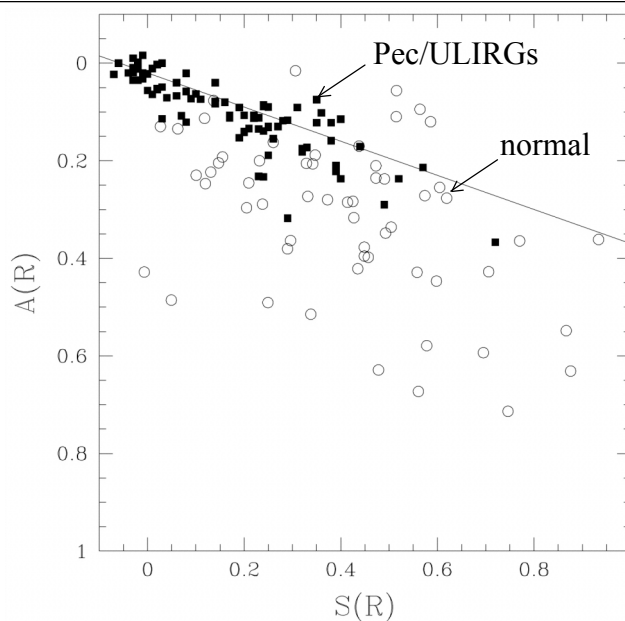
3. Classification des galaxies

Page 53

Assymetrie (A) versus Smoothness (S) (Conselice 2003)

La technique CAS marche assez bien pour séparer les cas extrêmes dans l'univers local où ils sont rares.

Mais dans l'univers distant, les morphologies sont moins bien définies et les différentes classes morphologiques se mélangent de manière continue...

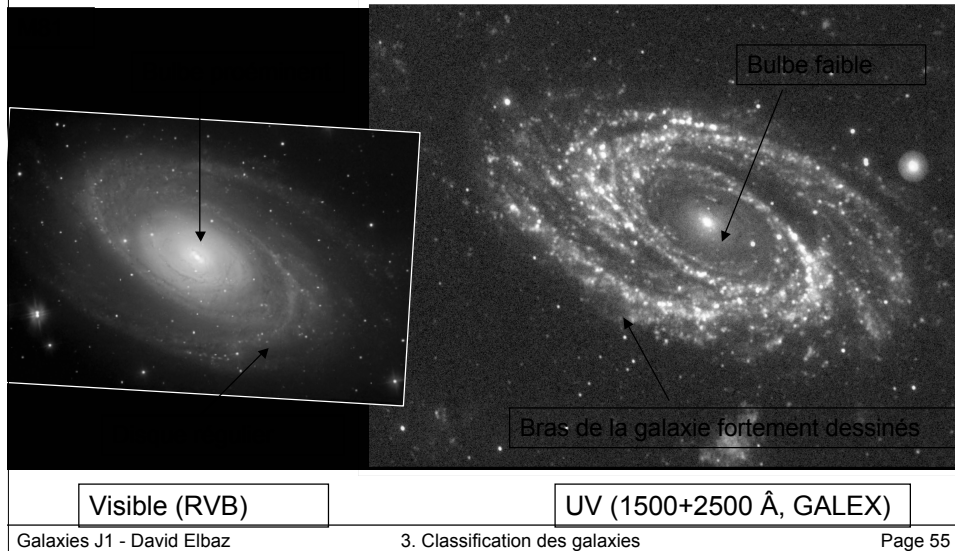


Galaxies J1 - David Elbaz

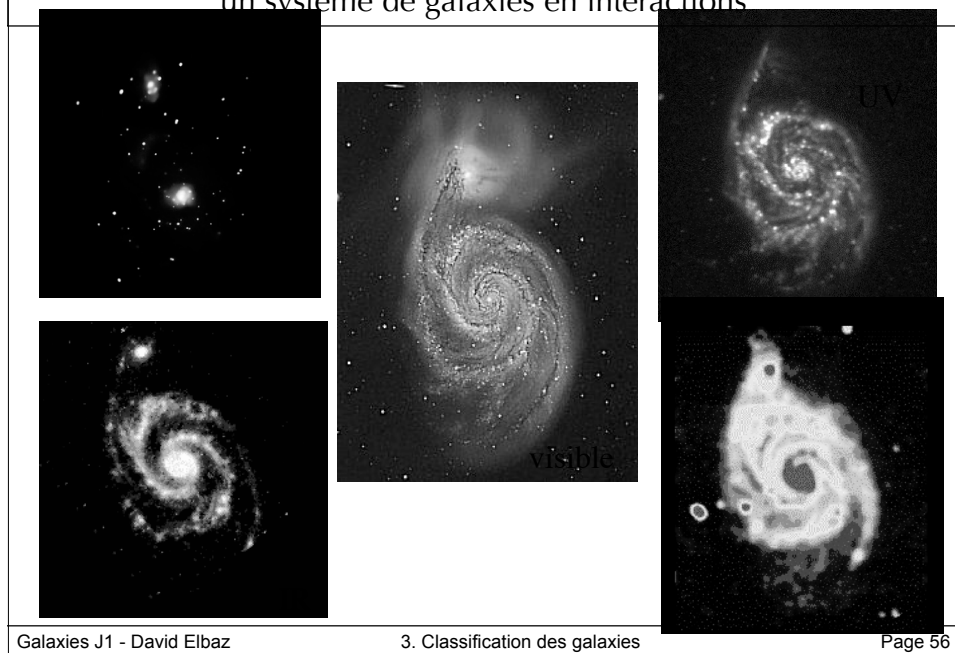
3. Classification des galaxies

Page 54

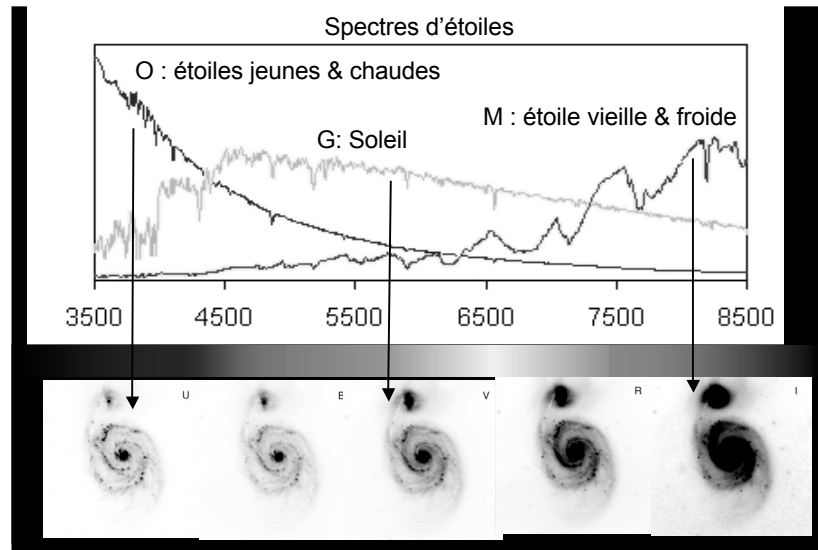
3.10 Dépendance de la morphologie avec la longueur d'onde



M51: la galaxie des Chiens de Chasse un système de galaxies en interactions



Les populations stellaires à l'origine de la morphologie multi-longueur d'onde de M51



Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

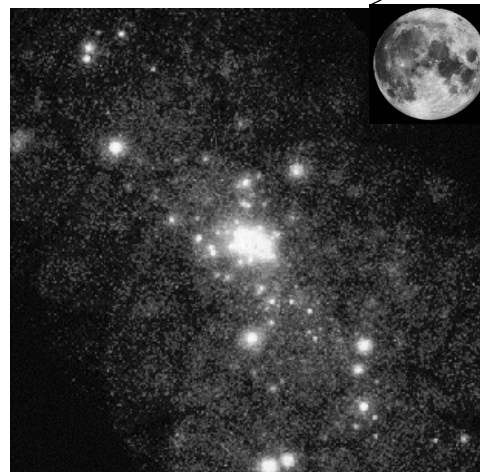
Page 57

illustration des faces multi-couleurs des galaxies:
M31 (Andromède) en rayons X

2 degrés

30'

- Les galaxies "normales" (comme M31 et la Voie Lactée) rayonnent très peu dans le domaine des X.
- L'émission X dans le disque provient de systèmes binaires (étoiles/ trous noirs) en interaction ou de galaxies lointaines derrière M31



Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 58

M31 en ultraviolet

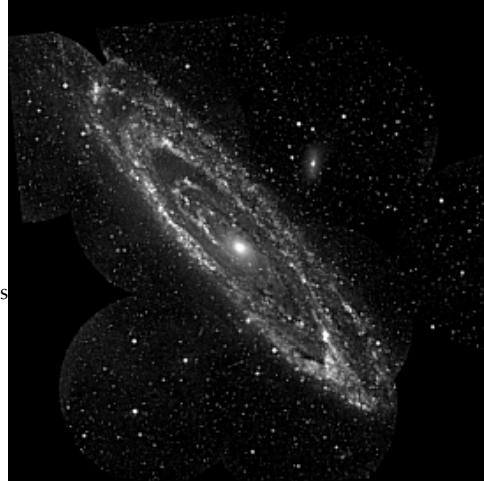
- Dans l'ultraviolet, on observe les jeunes étoiles chaudes (O,B) qui se trouvent dans les bras des galaxies spirales où a lieu la formation stellaire récente:

loi de Wien: $\lambda_{\text{max}}(\mu\text{m}) = 2900/T(\text{K})$

T(étoiles O) > 30,000 K $\Rightarrow \lambda_{\text{max}}(\mu\text{m}) < 0.1 \mu\text{m}$

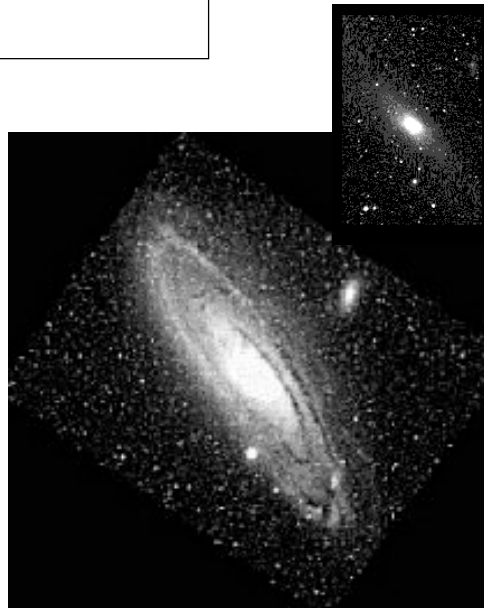
T(étoiles B) > 10,000 K $\Rightarrow \lambda_{\text{max}}(\mu\text{m}) < 0.3 \mu\text{m}$

- Le bulbe contient des étoiles plus vieilles et plus froides qui sont invisibles en UV
- L'UV suit la formation stellaire récente:
durée vie (étoiles O) < 10 Myr (millions)
durée vie (étoiles B) < 400 Myr = 0.4 Gyr
1 Myr = 10^6 years (ans), 1 Gyr = 10^9 years



M31 en visible

- Dans le domaine visible, nous observons essentiellement des étoiles « froides » vers 10000K (c'est à dire à peu près comme le Soleil !)
- Le disque et le bulbe de M31 sont très lumineux à ces longueurs d'onde



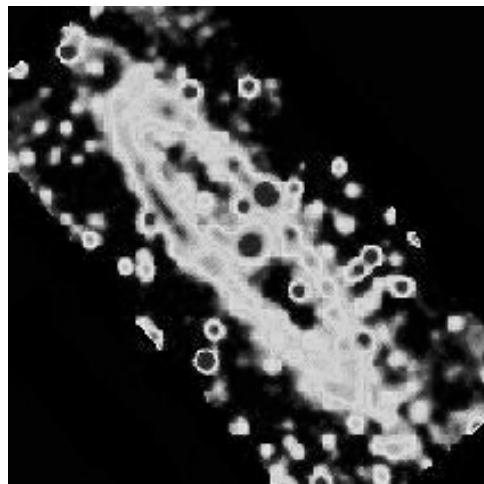
M31 en infrarouge

- Cette image prise par le satellite ISO à 175 microns fait apparaître les zones de poussière chauffées par les étoiles jeunes
- Ce sont donc les bras de M31 que nous voyons ici (un peu comme en UV)
- UV et IR (100 μ m) sont des indicateurs de formation stellaire



M31 en continu radio

- Le cœur et l'anneau de M31 sont encore les plus lumineux.
- Origine de l'émission radio: rayonnement synchrotron des électrons accélérés par les chocs produits lors de l'explosion de supernovae et traversant le champ magnétique ambiant.



La galaxie d'Andromède : M 31



Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 63

3.11 Les galaxies absentes de la séquence de Hubble-Sandage

D'autres types de galaxies ne sont pas contenues dans la séquence:

1. les galaxies naines:
 dE: "dwarf ellipticals", similaires aux E mais de faible luminosité et brillance de surface
 BCD: Blue Compact Dwarfs, starbursts concentrés avec une composante d'étoiles vieilles.
2. les galaxies cD, central Dominant, sont des galaxies géantes qui s'apparentent aux elliptiques et se trouvent au centre des amas de galaxies
3. les galaxies LSB, low surface brightness: disques lumineux mais de faible brillance de surface.
4. les galaxies actives: galaxies radio; possédant des noyaux avec des raies en émission particulières ou une luminosité extrême (quasars, Seyferts) et/ou avec une émission radio non thermique très puissante (quasars, galaxies radio)
5. les galaxies en interaction et en phase de starbursts (e.g. ULIRGs)

Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 64

La galaxie naine Leo 1 ($M_v=-12$), dE (dwarf elliptical)
voisine de la Voie Lactée



Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 65

La galaxie naine NGC 205 ($M_v=-16.3$), dE (dwarf elliptical)
voisine de Andromède (M31)

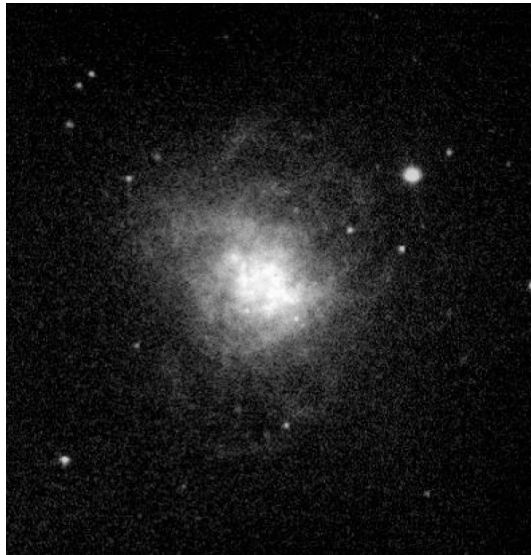


Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 66

La galaxie naine NGC 1705 : Blue Compact Dwarf (BCD)
 3 couleurs: bleu=continu bleu, vert= continu rouge, rouge= H α

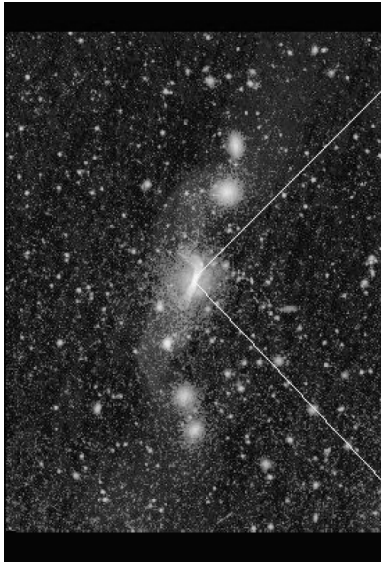


Galaxies J1 - David Elbaz

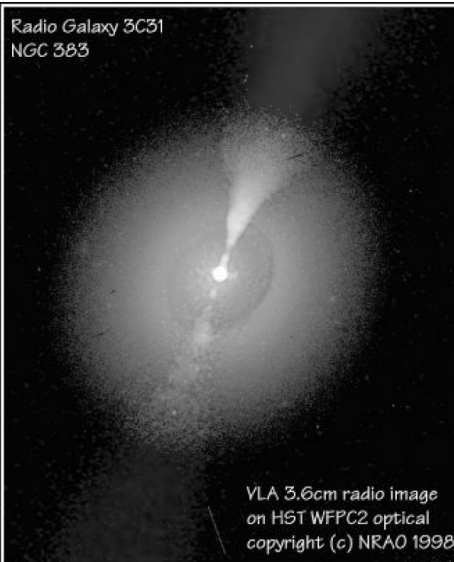
3. Classification des galaxies

Page 67

La galaxie radio NGC 383 (=3C31)
 2 couleurs: bleu=continu optique, rouge= continu radio



Radio Galaxy 3C31
 NGC 383



VLA 3.6cm radio image
 on HST WFPC2 optical
 copyright (c) NRAO 1998

Galaxies J1 - David Elbaz

3. Classification des galaxies

Page 68

La galaxie radio NGC 383 (=3C31):
interprétation = le modèle unifié des noyaux actifs

