

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

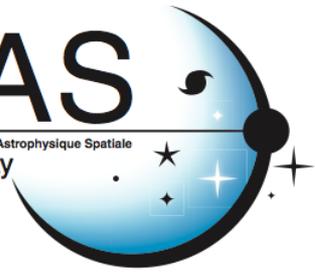
Festival de Fleurance

07/08/2013

Fleurance

IAS

Institut d'Astrophysique Spatiale
Orsay



Comment les astrophysiciens déterminent-ils les caractéristiques de galaxies lointaines?

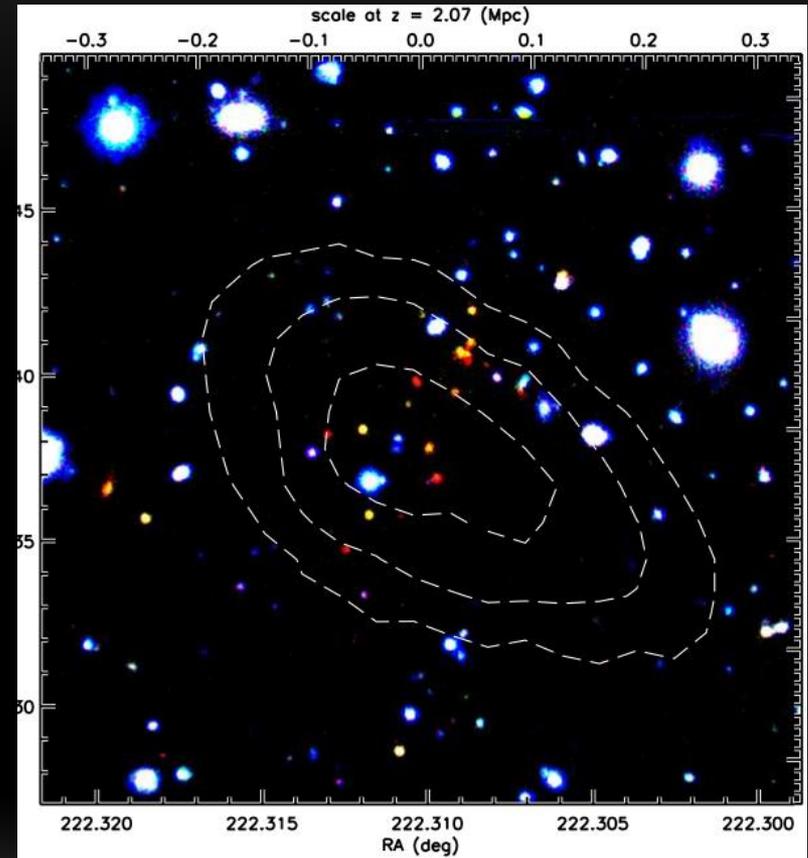
Matthieu Béthermin
Postdoc au CEA Saclay

Morgane Cousin
Doctorant à l'IAS

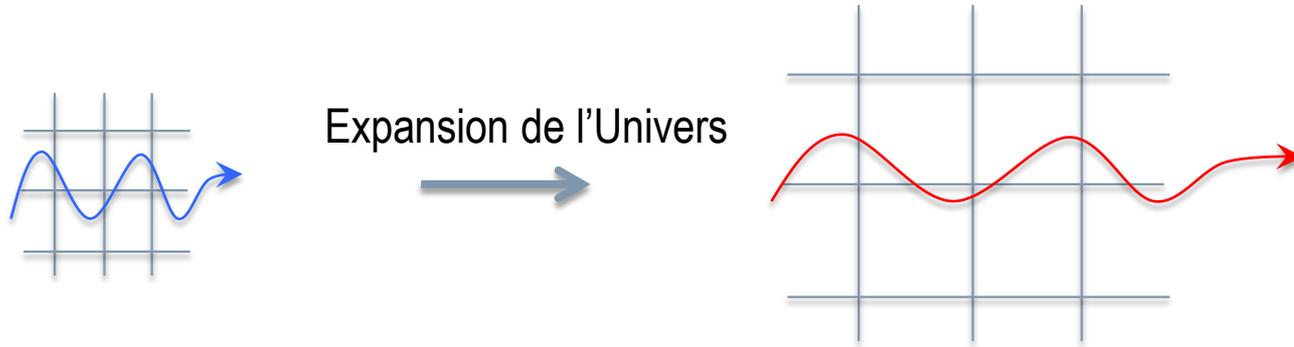
En cas de questions: matthieu.bethermin@laposte.net

PRÉSENTATION DE LA GALAXIE X

- Galaxie située proche de l'amas Cl J1449+0856, plus lointain amas de galaxies mature découvert à ce jour ($z=1.99$).
- Cette région du ciel a fait l'objet de nombreuses observations des rayons X jusqu'à la radio (*Chandra*, *XMM*, *VLT*, *Hubble*, *Subaru*, *Spitzer*, *Herschel*, *JVLA*, *eMERLIN*, et *GMRT*)
- La galaxie X, que nous allons étudier ne se situe pas dans l'amas, mais dans la région bien observée par les différents télescopes ayant pointé l'amas.



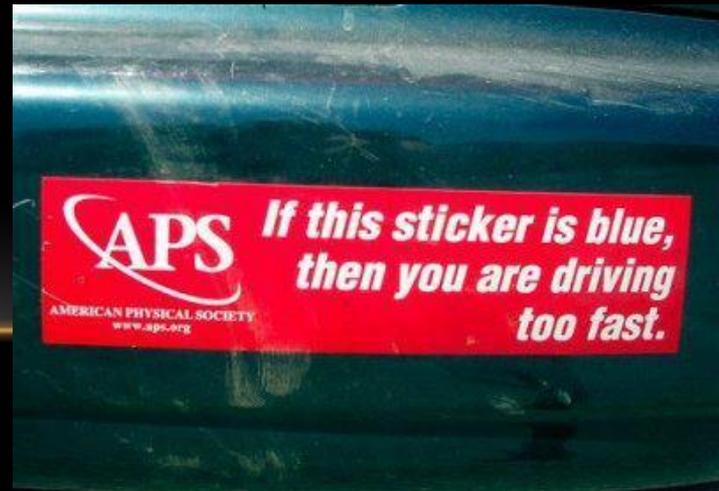
NOTION DE DÉCALAGE VERS LE ROUGE



L'effet décalage vers le rouge

$$1 + z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}} = \frac{a(t_0)}{a(t_{em})}$$

Attention: ce n'est pas équivalent à l'effet Doppler-Fizeau



MESURE DU DÉCALAGE VERS LE ROUGE DE LA GALAXIE X PAR SPECTROSCOPIE

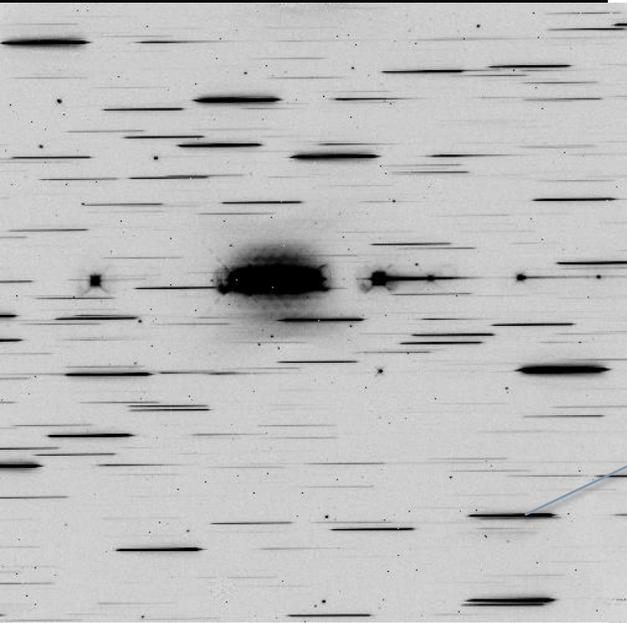
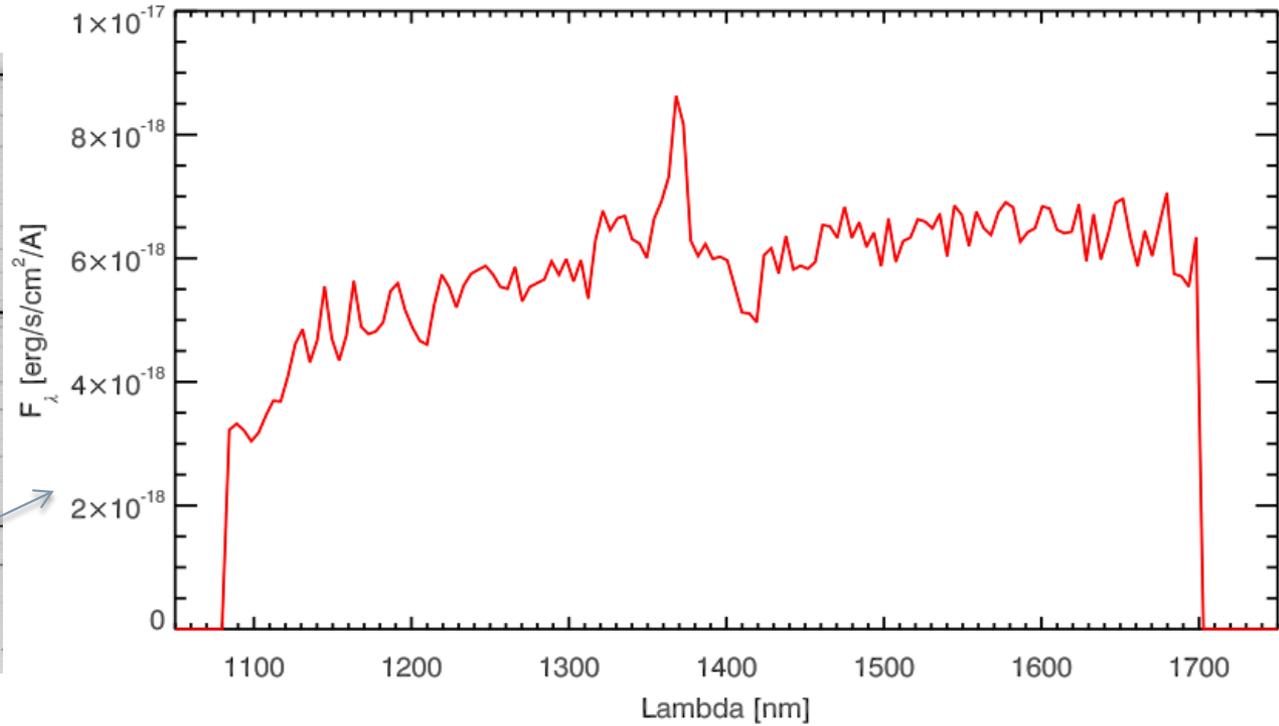
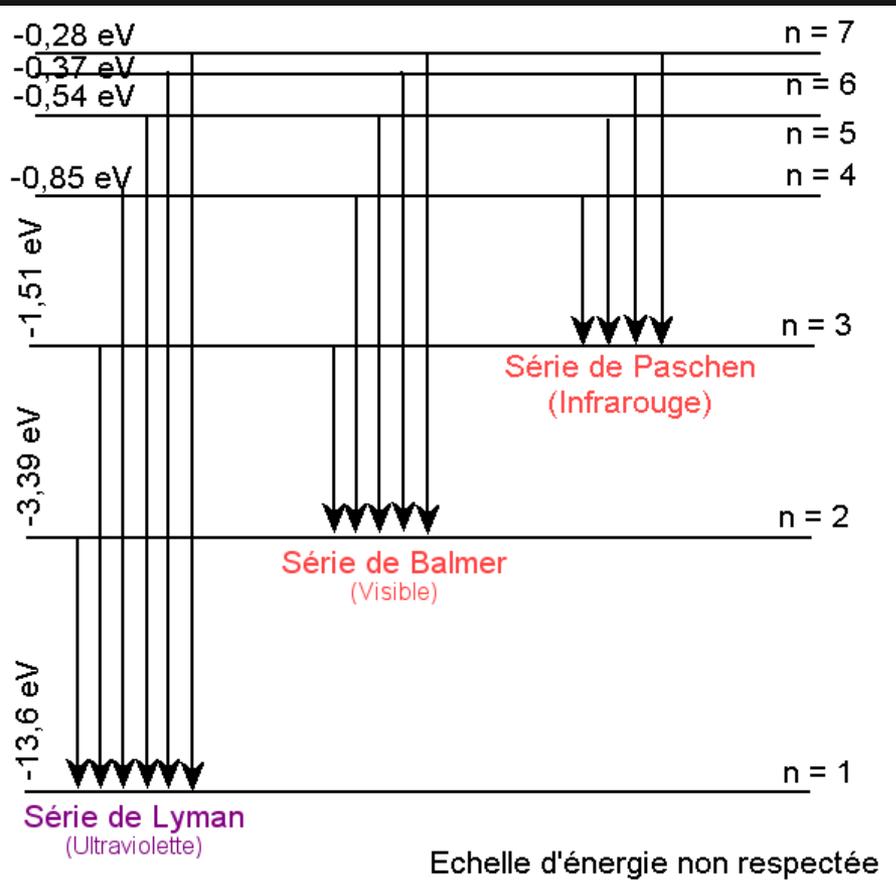


Image de galaxies vue au travers d'un GRISM



Spectre infrarouge proche de la galaxie X

MESURE DU DÉCALAGE VERS LE ROUGE DE LA GALAXIE X PAR SPECTROSCOPIE

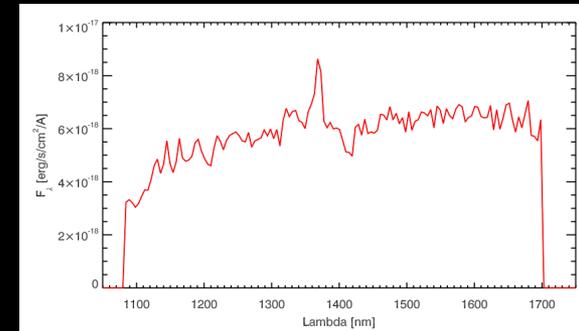


Quelques raies caractéristiques:

$\text{Ly}\alpha$ 121.5 nm

OIII 495 et surtout 500 nm

$\text{H}\alpha$ 656.2 nm

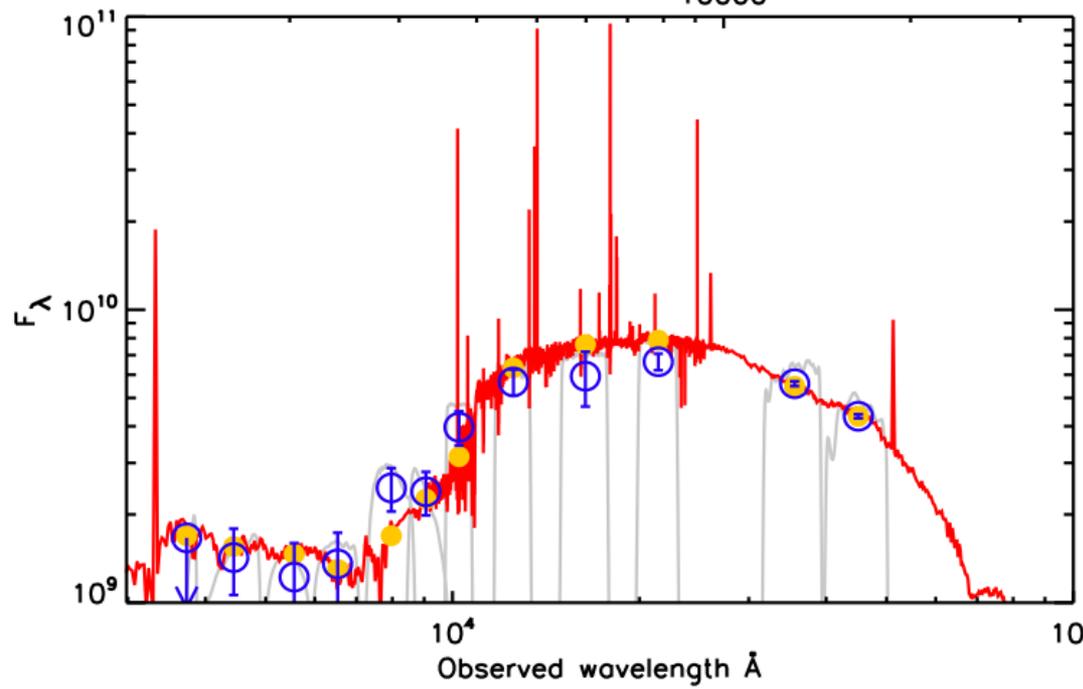
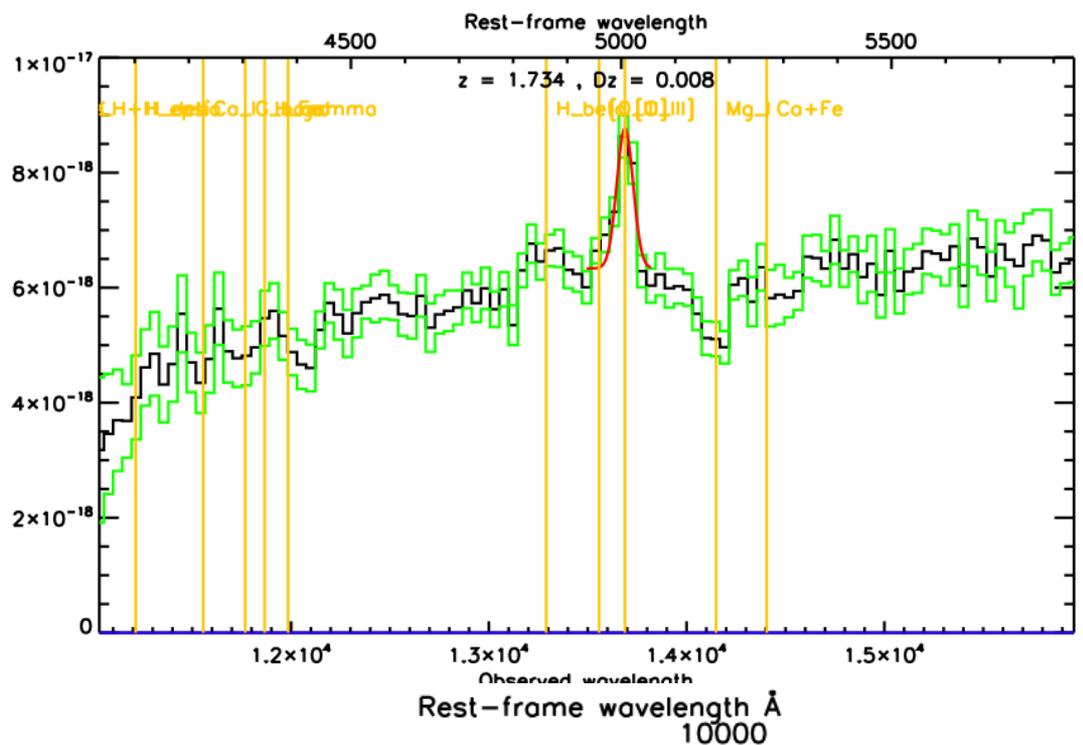


Quel est le décalage vers le rouge en supposant que la raie détectée est $\text{Ly}\alpha$, OIII , $\text{H}\alpha$?

Réponse: $z=10.26$ si $\text{Ly}\alpha$, $z = 1.734$ si OIII , $z=1.086$ si $\text{H}\alpha$

LEVER LES DÉGÉNÉRESCENCES ENTRE SOLUTIONS

- En utilisant les distances caractéristiques entre les raies mais aussi la forme de la distribution spectrale d'énergie (équivalent d'un spectre basse résolution), on peut lever les ambiguïtés sur le décalage vers le rouge.
- On trouve finalement que la raie qu'on l'a observée est OIII et que le décalage vers le rouge est $z=1.734 \pm 0.008$.



LIEN ENTRE DÉCALAGE VERS LE ROUGE ET DISTANCE

$$R_{\mu\nu} + \left(\Lambda - \frac{1}{2}R \right) g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2(\theta) d\phi^2 \right]$$

On supposera par la suite que $k=0$ (Univers à courbure nulle)

Rappel: $1 + z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}} = \frac{a(t_0)}{a(t_{em})}$

LIEN ENTRE DÉCALAGE VERS LE ROUGE ET DISTANCE

$$\left\{ \begin{array}{l} (1) \quad \ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho_m + \frac{3P}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3} a \\ (2) \quad \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_m + \frac{\Lambda c^2}{3} \end{array} \right.$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

$$\Omega_m = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{m,0} \quad \text{avec} \quad H_0 = \left[\frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)} \right]$$

LIEN ENTRE DÉCALAGE VERS LE ROUGE ET DISTANCE

$$\frac{\dot{a}}{a}(t) = H_0 \sqrt{\Omega_m \left[\frac{a(t_0)}{a(t)} \right]^3 + \Omega_\Lambda}$$

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{a(t_0)}{a(t)} \right)^3$$

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{a(t_0)\dot{a}(t)}{a^2(t)} = -H_0(1+z) \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}$$

LIEN ENTRE DÉCALAGE VERS LE ROUGE ET DISTANCE

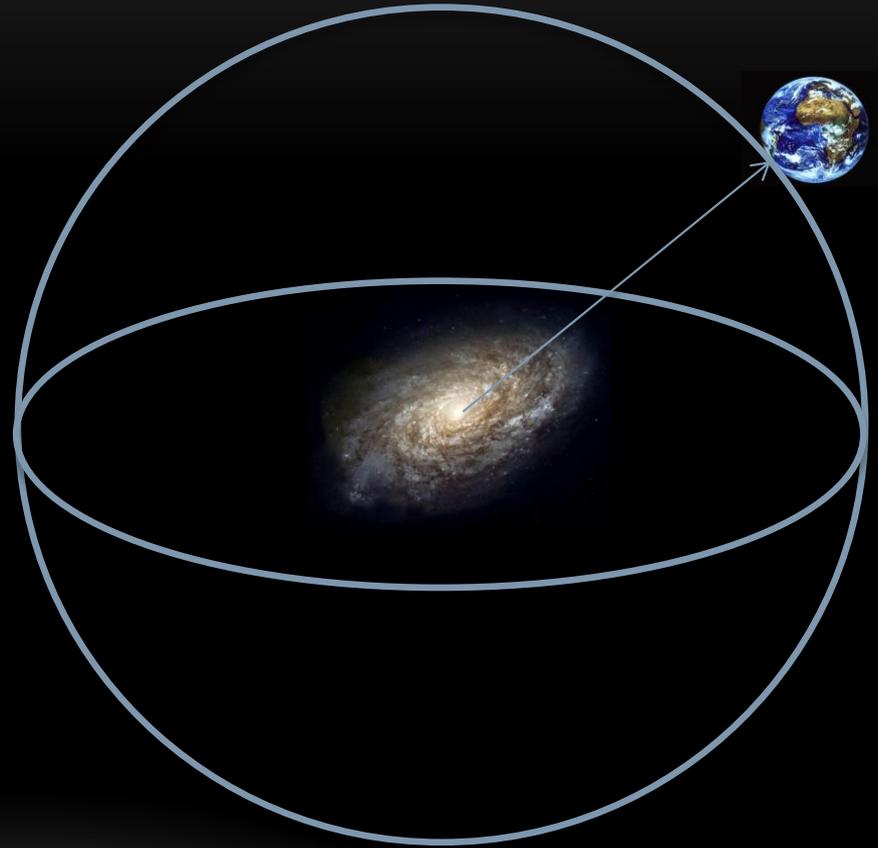
$$t_{lb} = \int_{t_e}^{t_0} dt = \int_0^{z_{obj}} \frac{1}{H_0(1+z) \sqrt{(1+z)^3 \Omega_m + \Omega_\Lambda}} dz$$

$$D_c(z) = \int_{t_{em}}^{t_0} c(1+z) dt = \int_0^z \frac{c}{H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} dz$$

NOTION DE DISTANCE LUMINEUSE

$$F = \frac{L}{4\pi D_L^2}$$

$$D_L = (1 + z)D_C$$



Rappel:

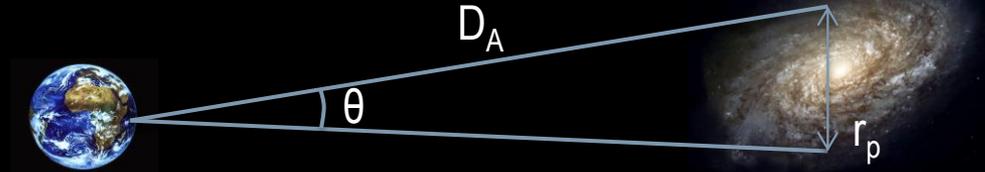
$$E = hc/\lambda$$

et donc

$$E_r = E_e/(1 + z)$$

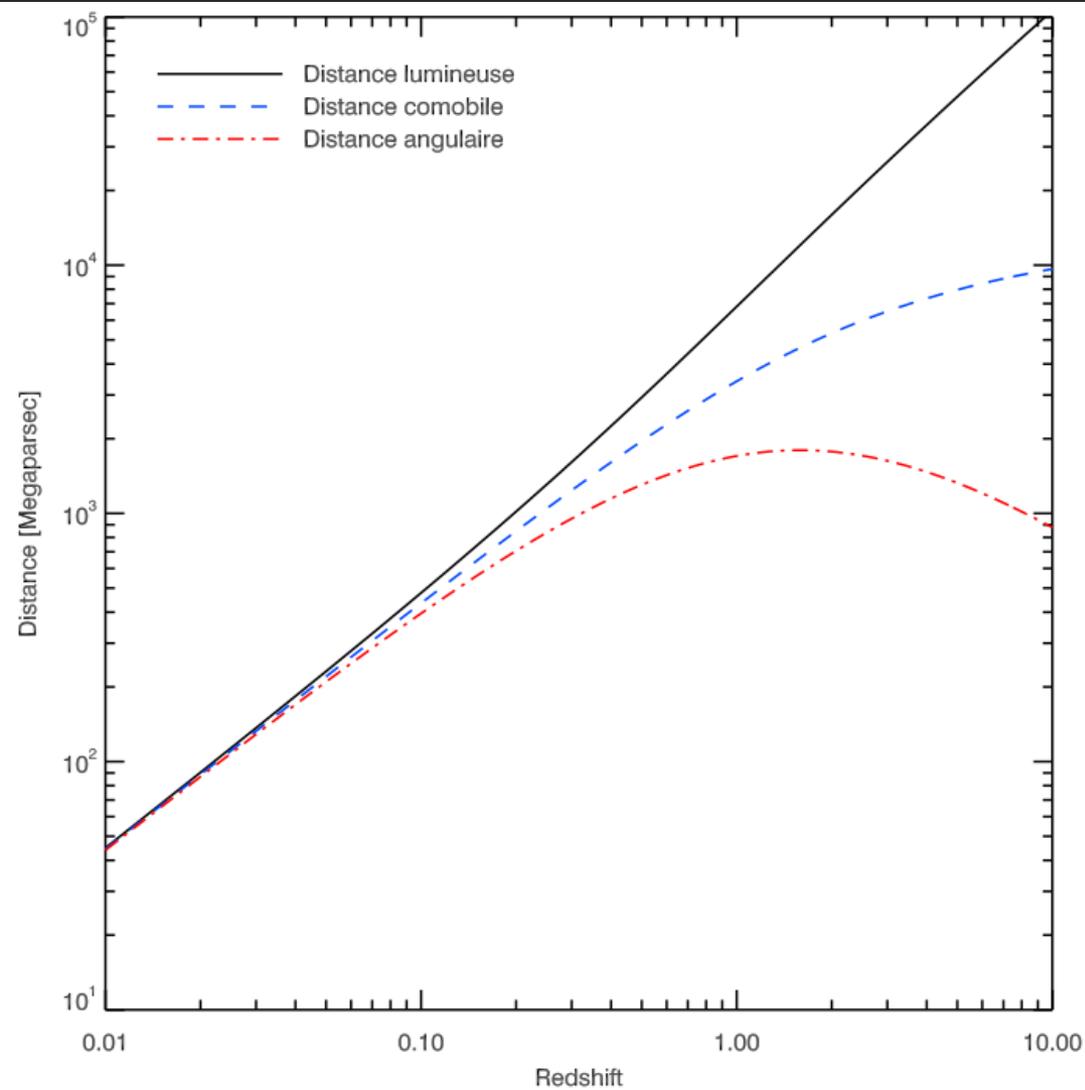
NOTION DE DISTANCE ANGULAIRE

$$D_A = \frac{r_p}{\theta}$$



$$D_A = \frac{D_C}{1 + z}$$

DISTANCE DE LA GALAXIE X



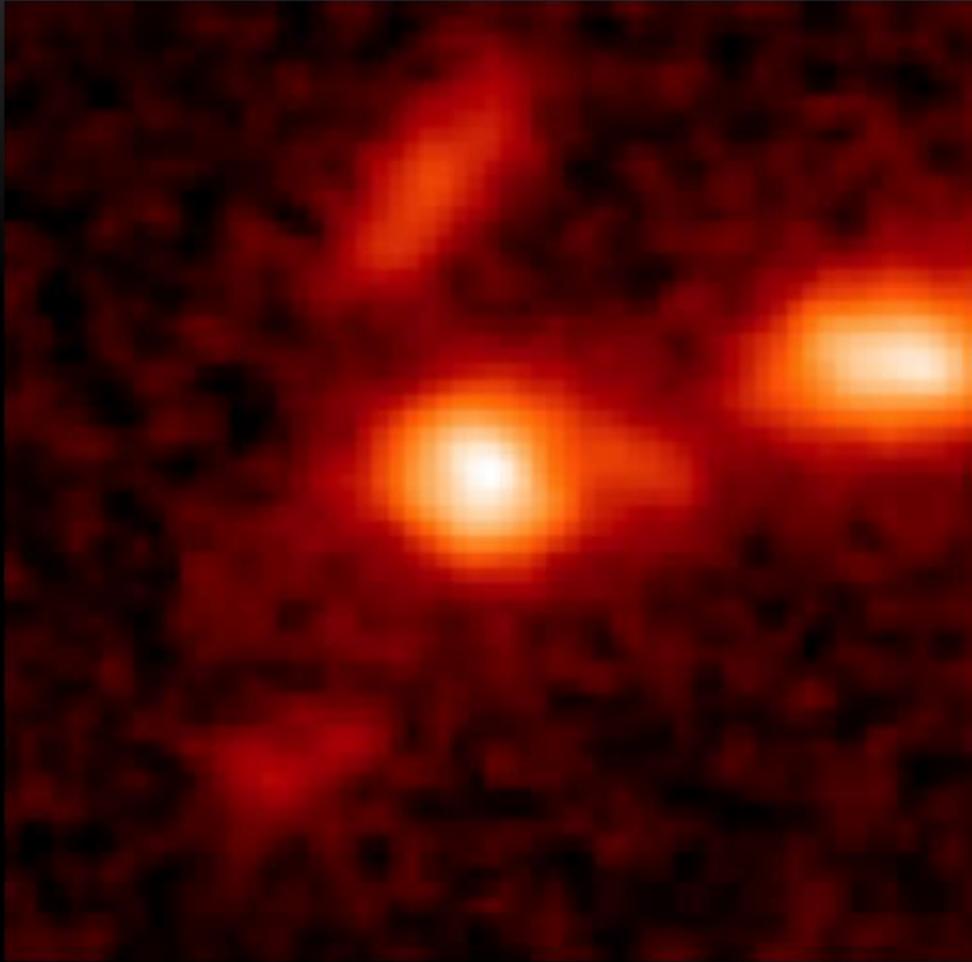
Quelle est la distance de la galaxie X (pour les 3 définitions) sachant que son décalage vers le rouge est 1.734?

Réponse: $D_L = 13405$ Mpc
 $D_c = 4903$ Mpc
 $D_A = 1793$ Mpc

$t_{lb} = 10\ 063\ 000\ 000$ années

1 parsec = 3.26 année lumière = $3.08567758 \times 10^{16}$ m

MESURE DE LA TAILLE DE LA GALAXIE X



Quelle est la taille de la galaxie X?

Comparer avec la Voie Lactée:
Rayon à demi-luminosité = 6 kpc
Distance Terre-Centre = 8 kpc
Diamètre du disque \sim 25 kpc

Réponse:

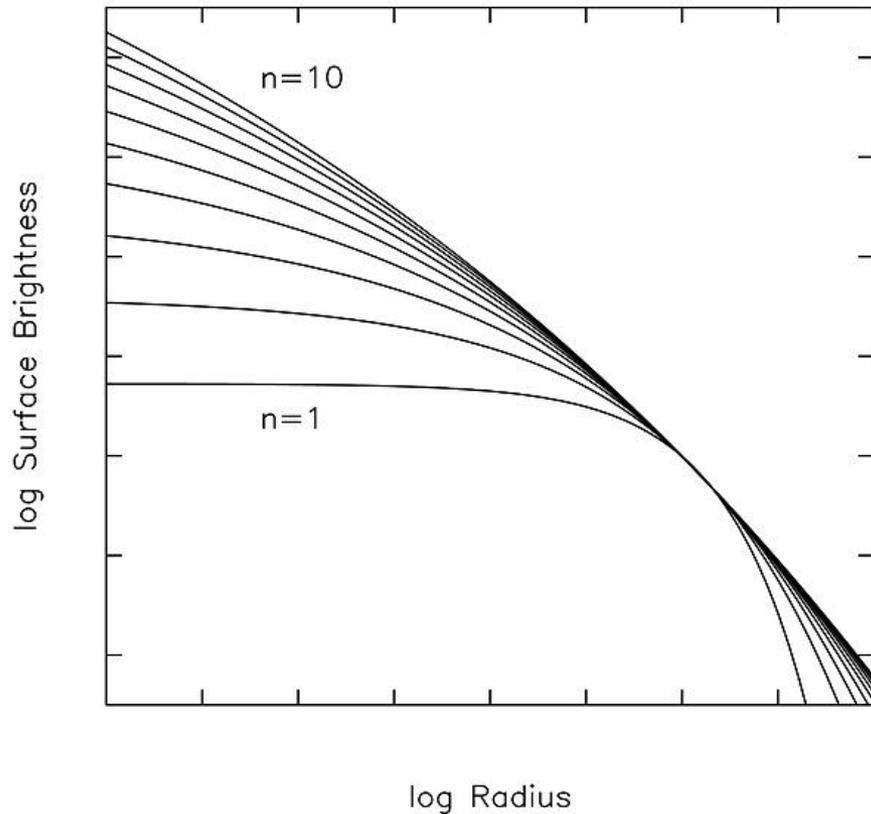
Rayon à demi-luminosité = 5.65 kpc
(5 pixels)

Diamètre du disque détecté = 28
kpc(25 pixels)

Très proche des tailles
caractéristiques de la Voie Lactée

Image *Hubble* de la galaxie X (taille du pixel: 0.13 arcsec)

DÉFINIR PROPREMENT LA NOTION DE TAILLE D'UNE GALAXIE



Définition du profil de Sercic:

$$\ln I(R) = \ln I_0 - kR^{1/n}$$

Pour une galaxie elliptique ou un bulbe, on a $n \sim 4$:

$$I(R) \propto e^{-kR^{1/4}}$$

Pour un disque, on a $n \sim 1$ et donc un profil exponentiel:

$$I(R) \propto e^{-kR}$$

Profil de brillance de surface pour différents indices de Sercic

MESURES PHOTOMÉTRIQUES

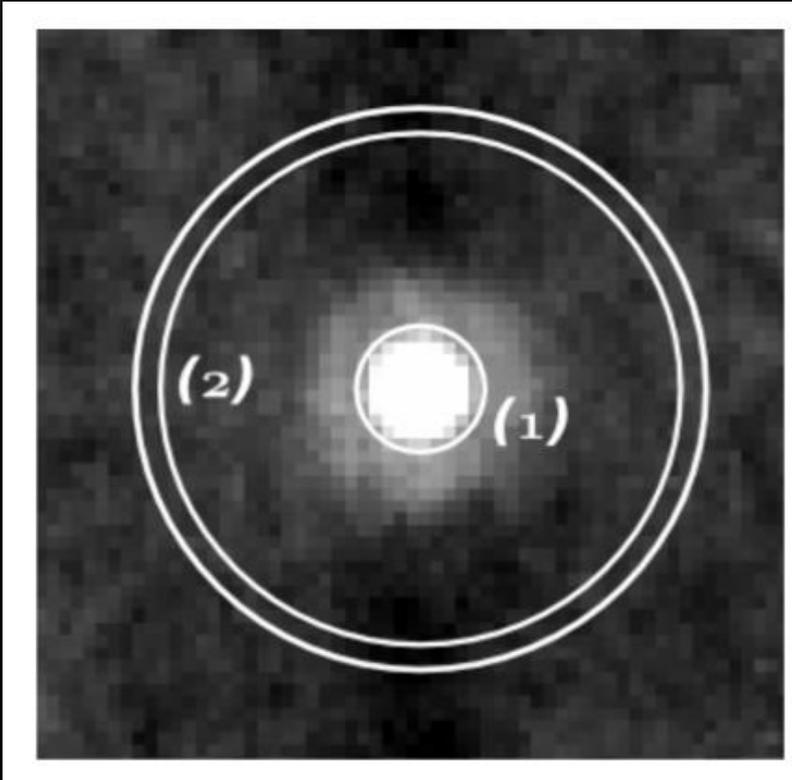
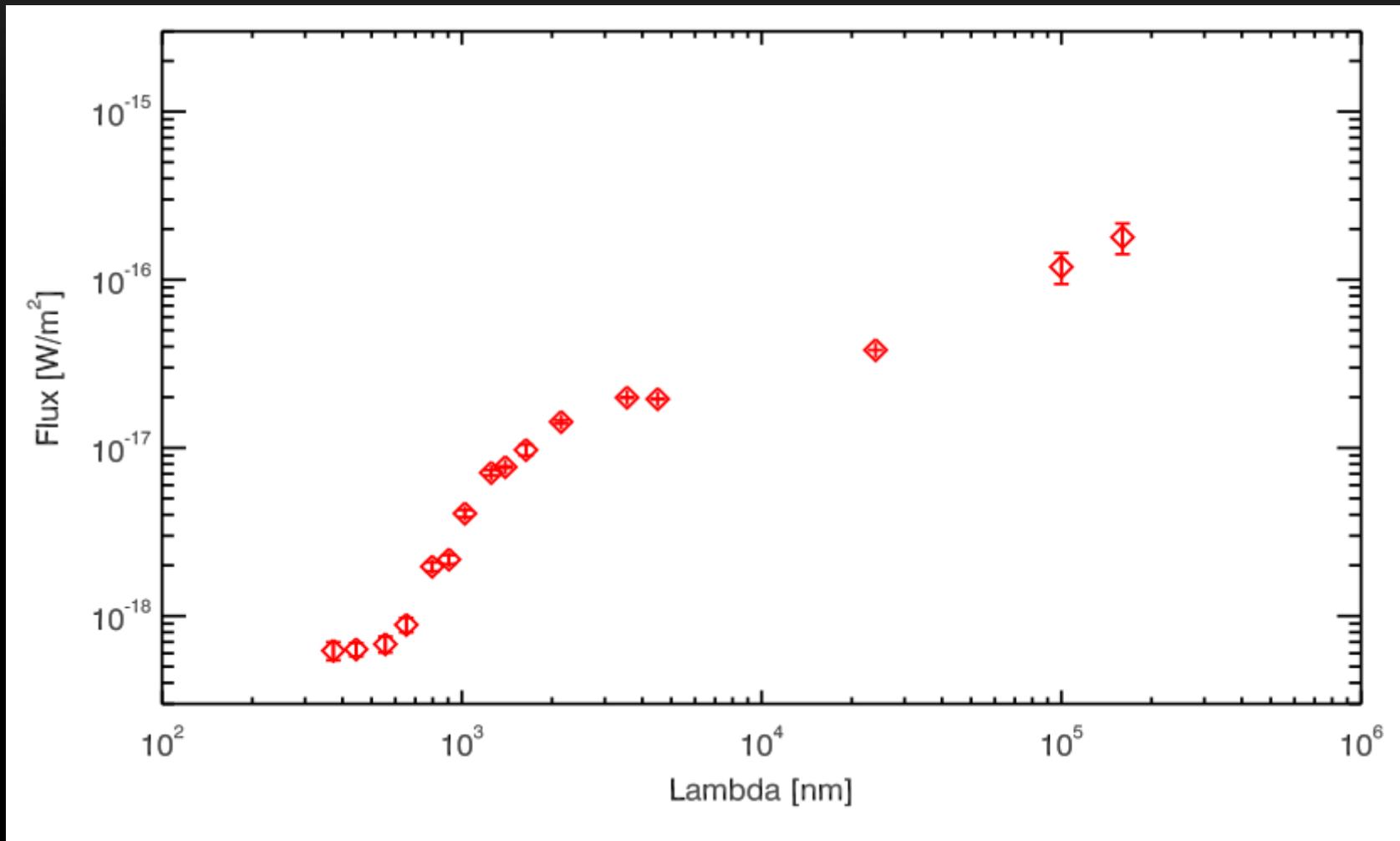


Illustration de la technique de photométrie d'ouverture

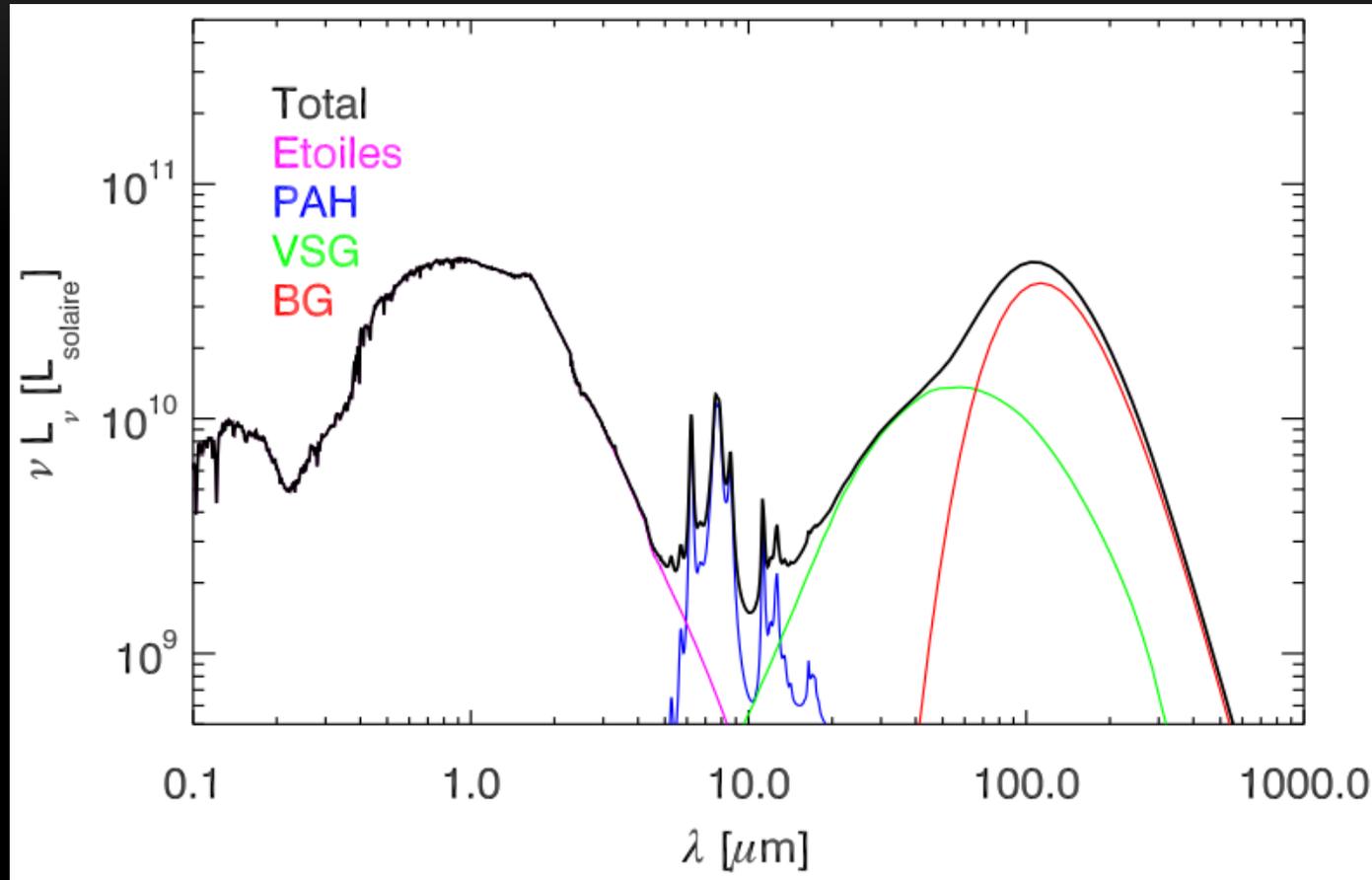
- La photométrie consiste à mesurer le flux (énergie reçue par unité de surface) reçu depuis une galaxie lointaine au travers d'un filtre dont les propriétés sont connues.
- On utilise en général plusieurs filtres, ayant différentes longueurs d'onde centrale et une bande passante de l'ordre de $\lambda/\Delta\lambda \sim 3-10$.
- Il existe différentes techniques pour mesurer ce flux (par exemple la photométrie d'ouverture).

DISTRIBUTION SPECTRALE D'ÉNERGIE



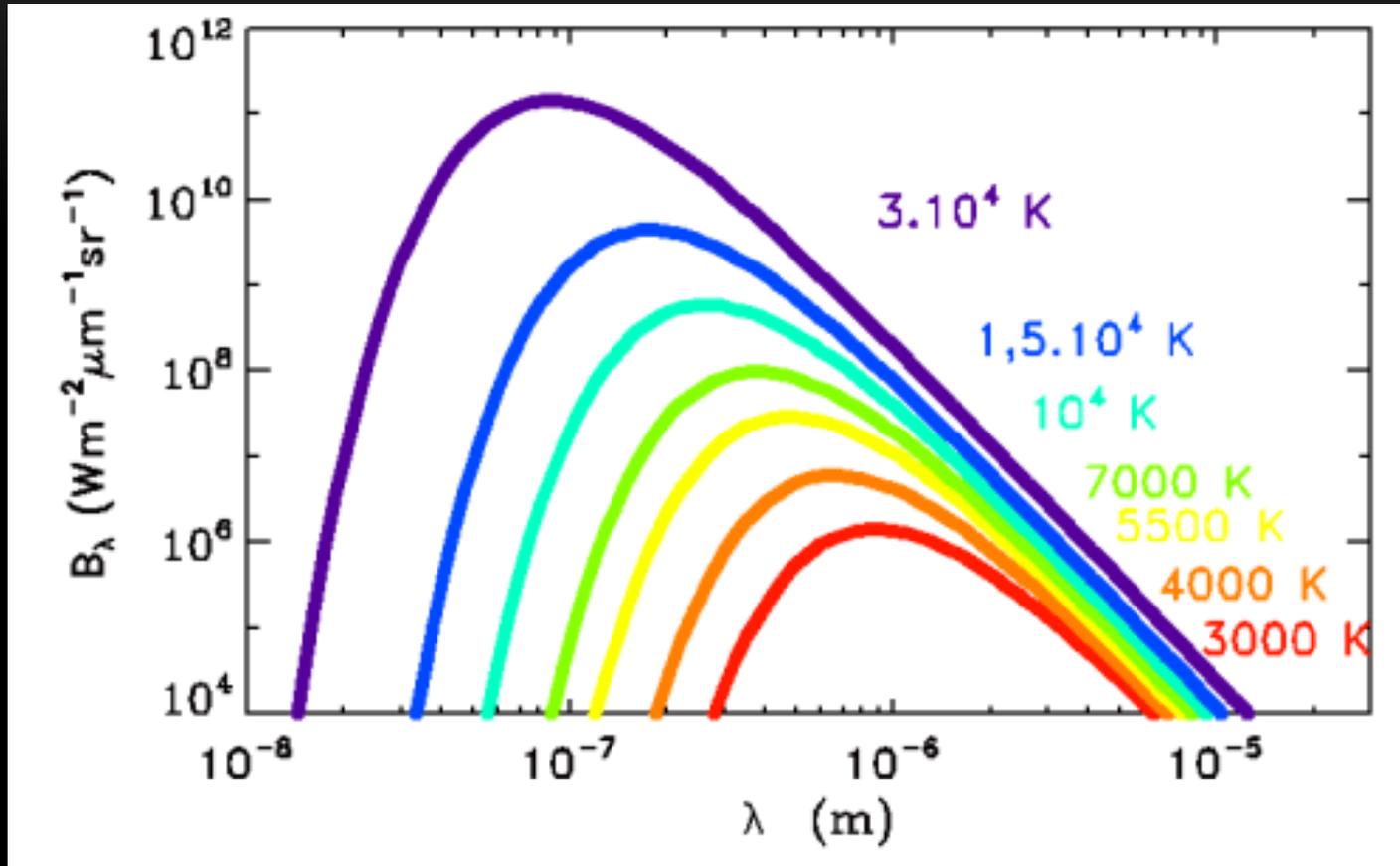
Flux reçu depuis la galaxie X en fonction de la longueur d'onde

INTERPRÉTERER UNE DISTRIBUTION SPECTRALE D'ÉNERGIE



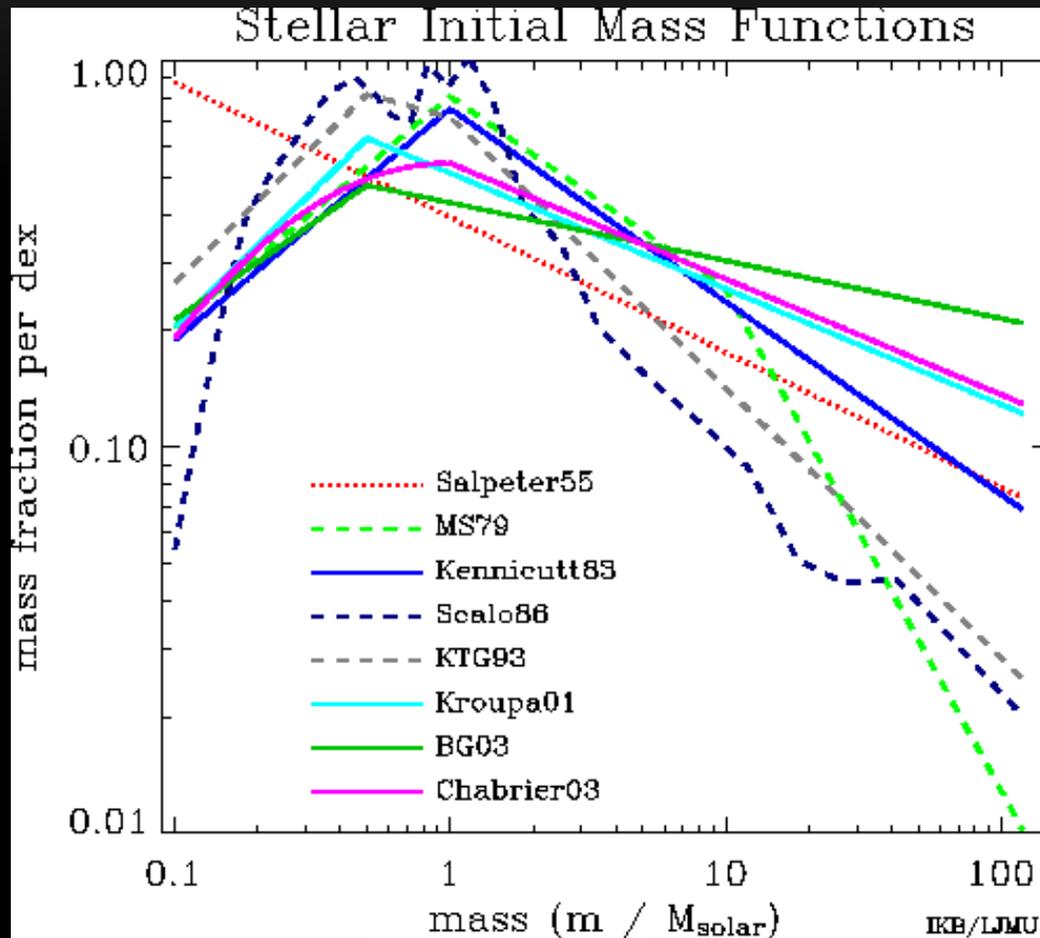
Distribution spectrale d'énergie d'une galaxie décomposée en différentes contributions

MESURER LA MASSE D'ÉTOILES DANS UNE GALAXIE: SPECTRE D'ÉMISSION DES ÉTOILES

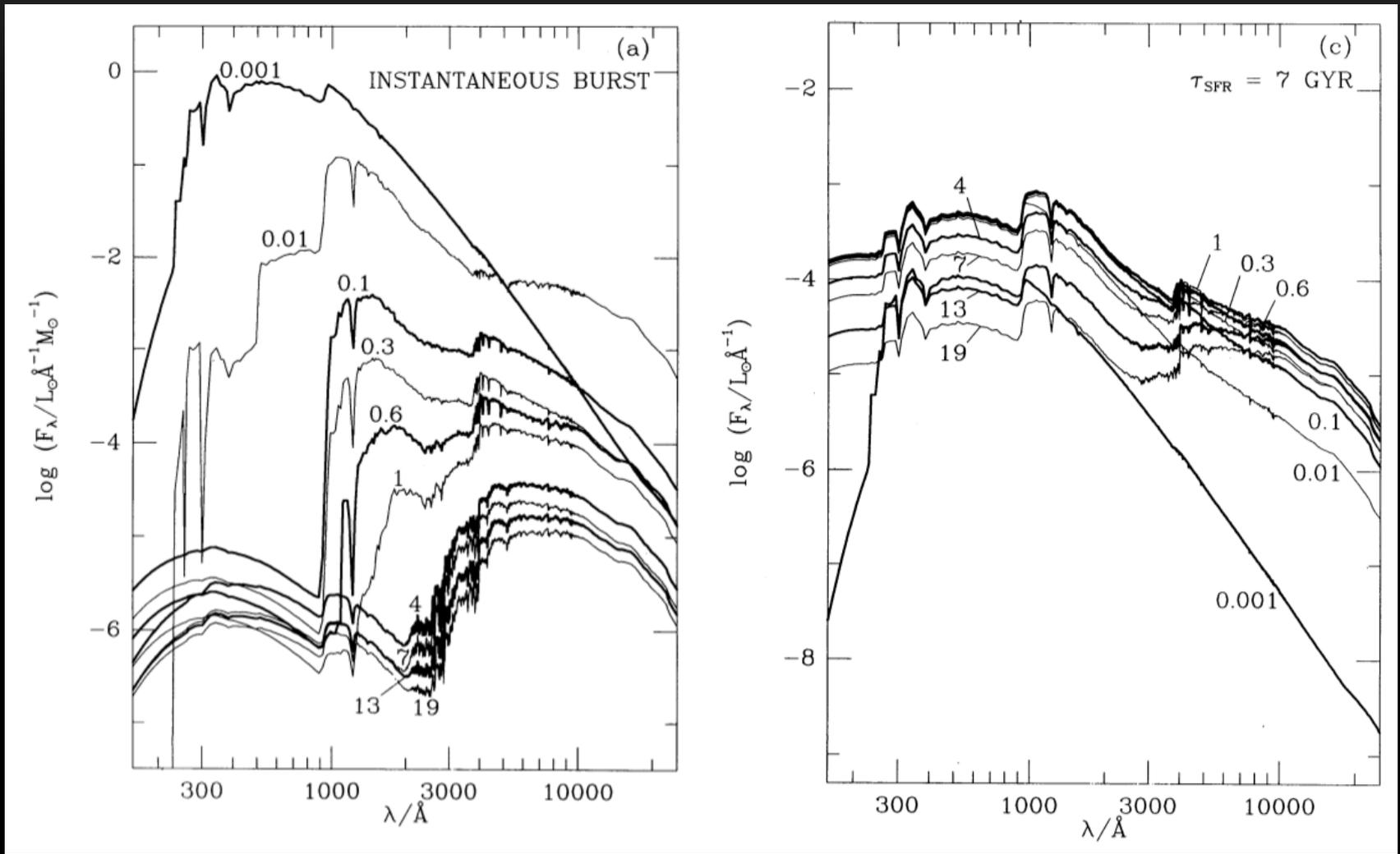


Corps noirs de différentes températures

MESURER LA MASSE D'ÉTOILES DANS UNE GALAXIE: FONCTION DE MASSE INITIALE



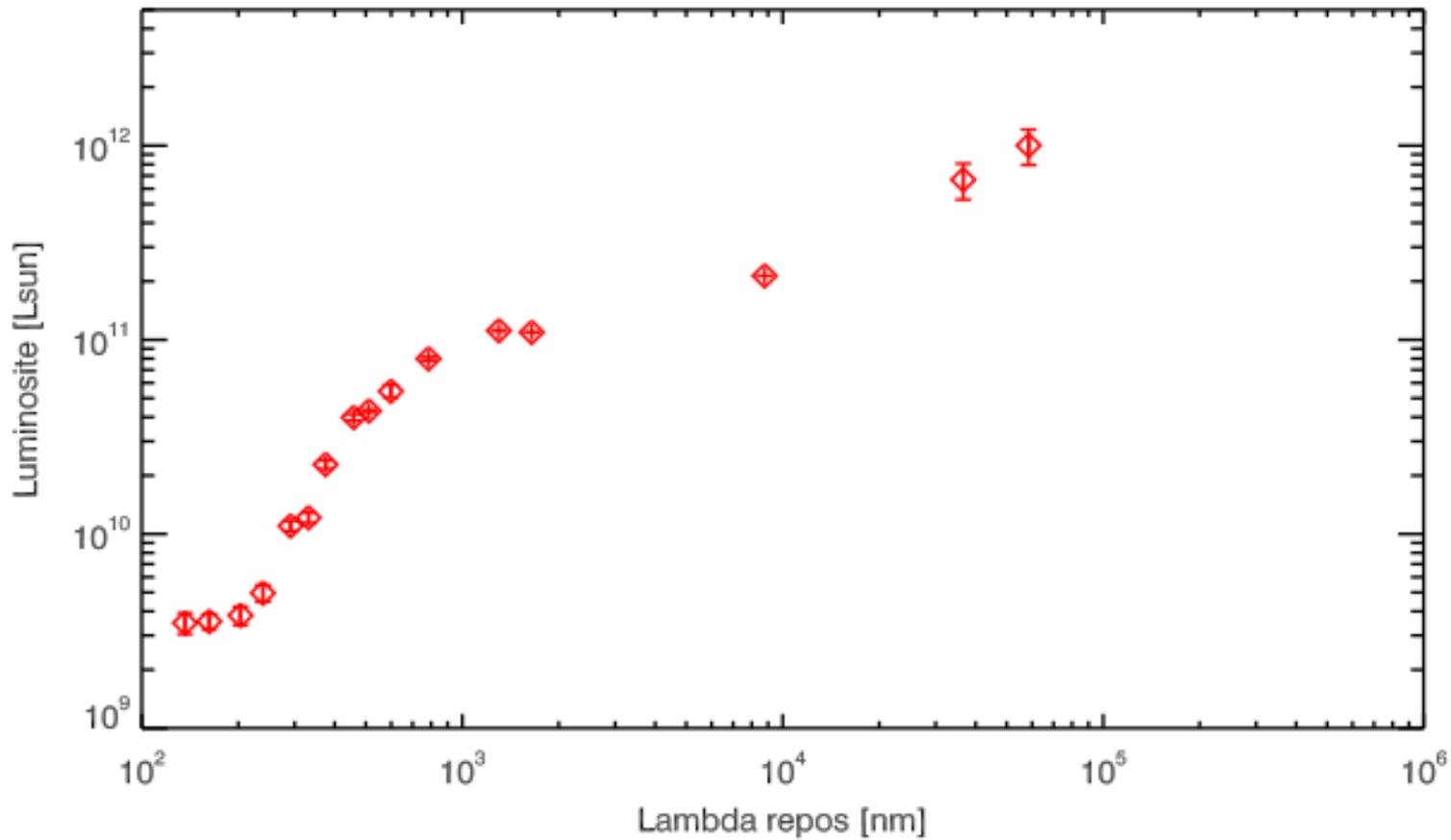
MESURER LA MASSE D'ÉTOILES: ÉMISSION D'UNE POPULATION D'ÉTOILES EN FONCTION DE SON ÂGE



Au premier ordre,
presque constante pour la
galaxie X.

Rapport masse

Quelle est la
Comparaison



Réponse:

Luminosité en bande K = $1.1 \times 10^{11} L_{\text{solaire}}$

Masse stellaire estimée = $5.9 \times 10^{10} M_{\text{solaire}}$

Masse estimée avec des outils puissants = $3.9 \times 10^{10} M_{\text{solaire}}$

ESTIMATION DU TAUX DE FORMATION D'ÉTOILES DANS LES GALAXIES DISTANTES

Le taux de formation d'étoiles (en masses solaires par an) peut se dériver à partir de la luminosité en UV sous l'hypothèse que tout le rayonnement UV sort de la galaxie:

$$\text{SFR}_{\text{FUV}} = 1.7 \times 10^{-10} \frac{L_{\text{FUV}}}{L_{\odot}}$$

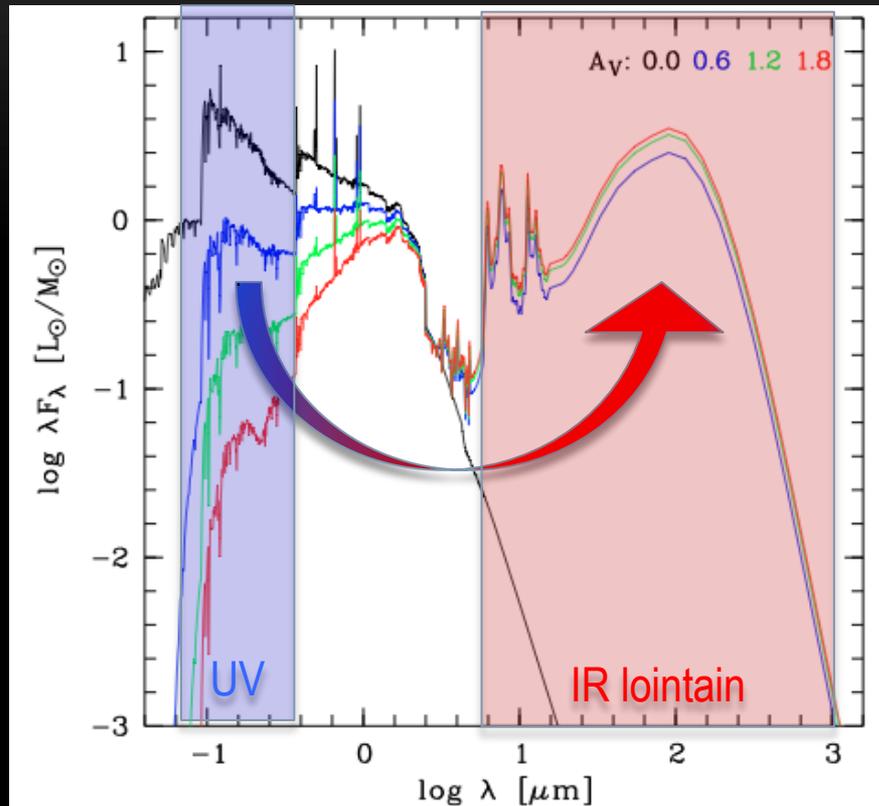
Quel est le taux de formation d'étoiles total dans la galaxie? Comparer à la Voie Lactée.

Réponse:

$$L(150 \text{ nm}) = 3.5 \times 10^9 L_{\text{solaire}}$$

$$\text{Taux de formation d'étoiles} = 0.6 M_{\text{solaire}}/\text{ans}$$

PROBLÈME DE L'ATTÉNUATION

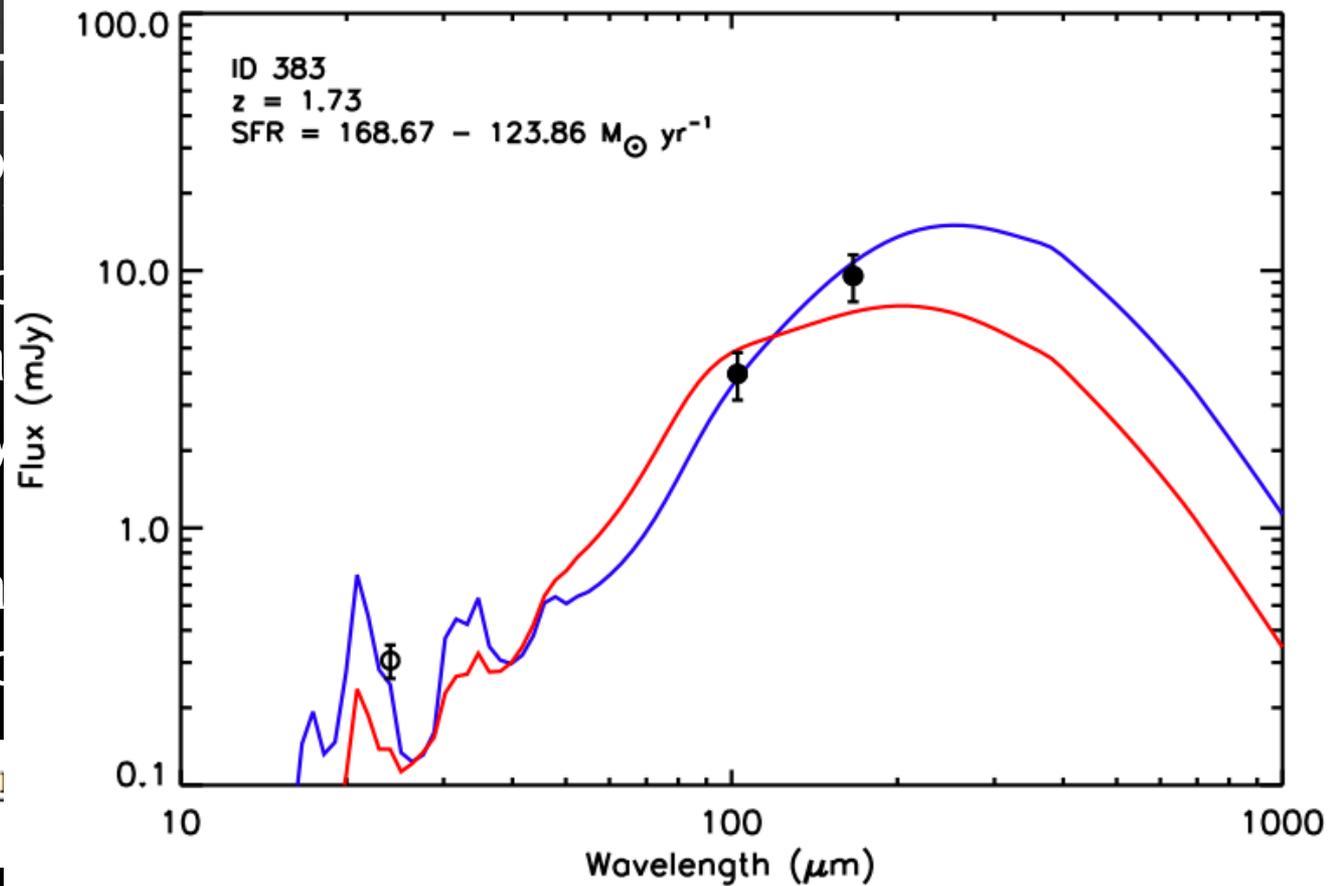


Spectre d'une galaxie de l'UV à l'infrarouge
issue du code CIGALE (Noll+09)

ESTIMATION DU TAUX DE FORMATION D'ÉTOILES À PARTIR DU RAYONNEMENT INFRAROUGE

Le taux de formation d'étoiles est calculé à partir du rayonnement infrarouge total d'une galaxie, sous l'hypothèse que la majeure partie de l'énergie lumineuse est absorbée par la poussière.

$$\text{SFR}_{\text{IR}} = 1.09 \times 10^{-10} \frac{L_{\text{IR}}}{L_{\odot}} \text{ yr}^{-1}$$



Quel est le taux de formation d'étoiles total dans la galaxie?

Réponse: $L(59 \mu\text{m}) = 1.0 \times 10^{12} L_{\text{sol}} \quad L(59 \mu\text{m})/L_{\text{IR}} = 0.55 \quad L_{\text{IR}} = 1.8 \times 10^{12} L_{\text{sol}}$

Taux de formation d'étoiles = $180 M_{\text{sol}}/\text{ans}$

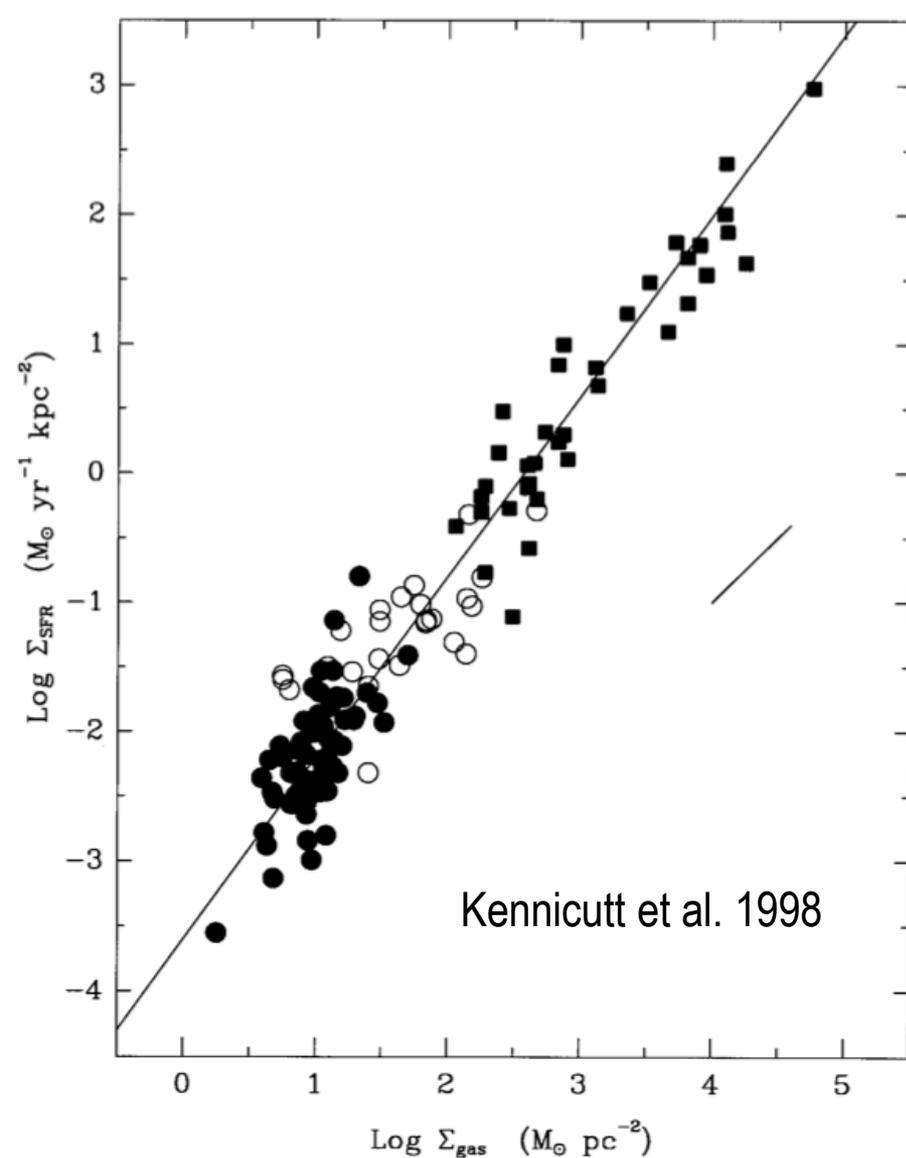
Atténuation très forte, UV presque totalement absorbé

ESTIMATION DE LA QUANTITÉ DE GAZ MOLÉCULAIRE CONTENUE DANS LA GALAXIE X

Calculer la quantité de gaz présente dans la galaxie X à partir de la relation empirique de Kennicutt

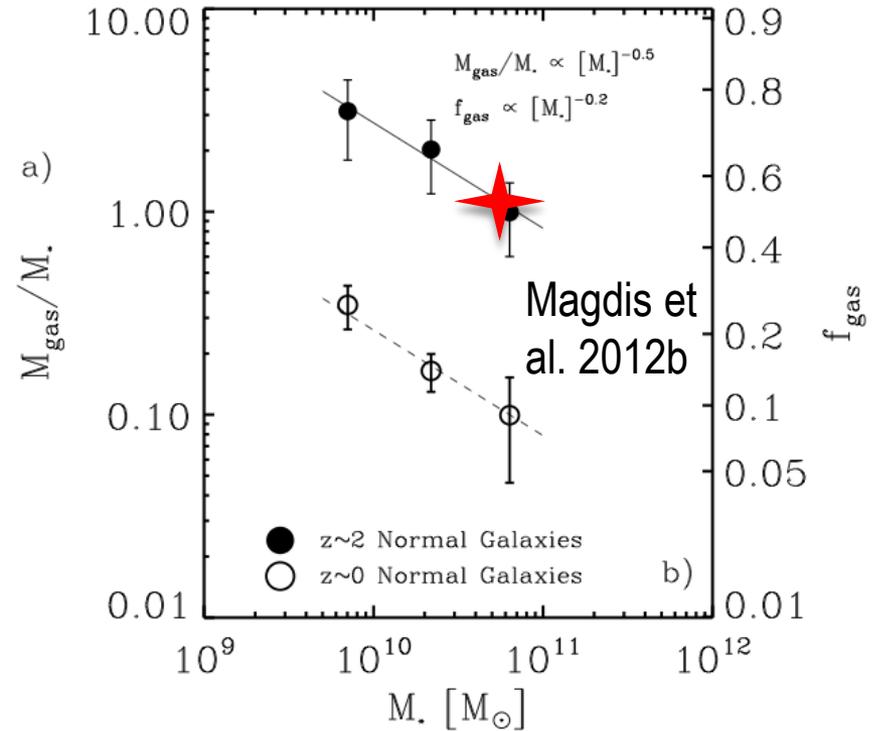
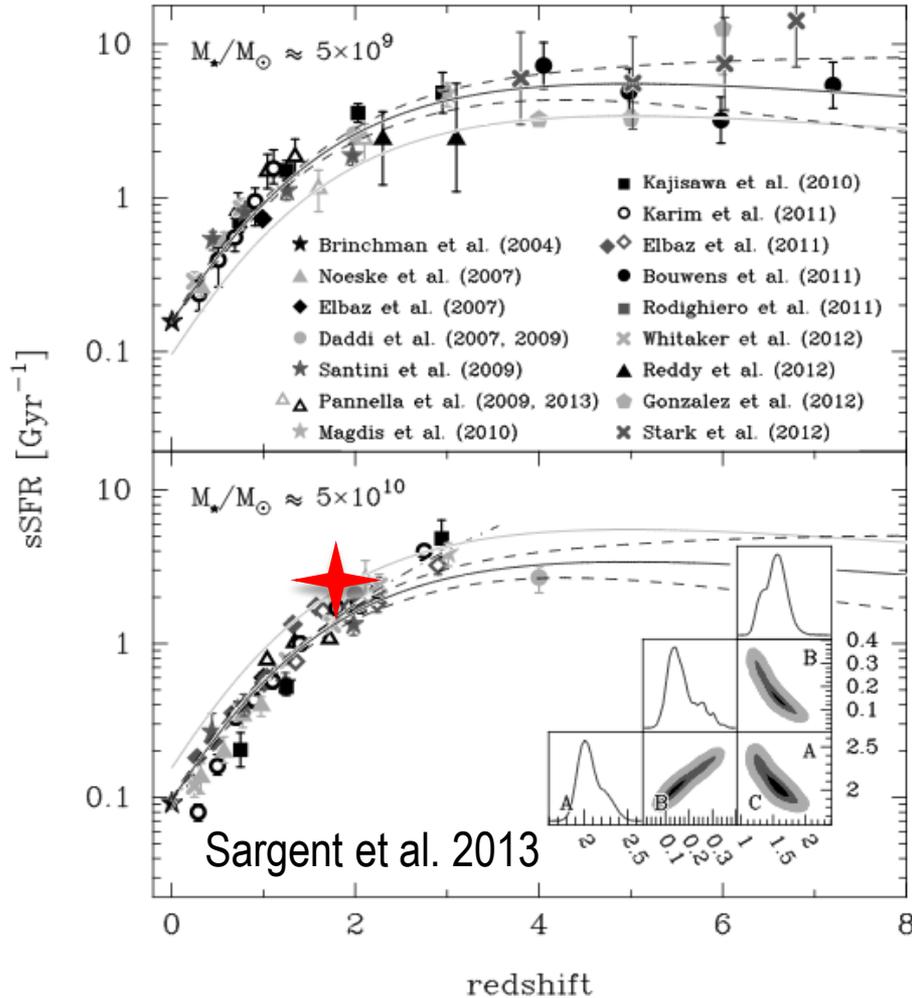
$$R_{1/2} = 5.65 \quad \text{SFR} = 180 M_{\text{solaire}}/\text{ans}$$

$$\text{Réponse: } M_{\text{gaz}} = 6.9 \times 10^{10} M_{\text{solaire}}$$



$$\Sigma_{\text{SFR}} = (2.5 \pm 0.7) \times 10^{-4} \left(\frac{\Sigma_g}{M_{\odot} \cdot \text{pc}^2} \right)^{1.4 \pm 0.15} [M_{\odot} \cdot \text{an}^{-1} \cdot \text{kpc}^2]$$

CETTE GALAXIE EST-ELLE «NORMALE»?



Où est-ce que se situe notre galaxie dans ces diagrammes?

Réponse: $\text{sSFR} = 3 \text{ Gyr}^{-1}$; $f_{\text{gaz}} \sim 54\%$

CONCLUSION

Et questions