

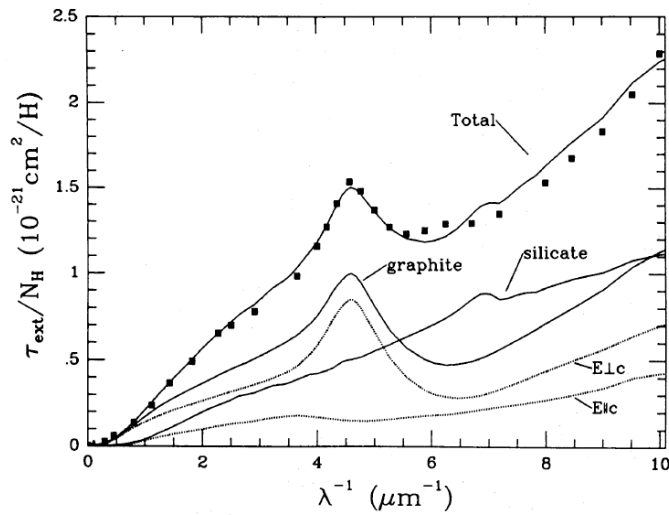
Emission infrarouge des galaxies

- 1 Origine de la loi d'extinction et émission associée
- 2 Chauffage stochastique des grains de poussière (VSGs)
- 3 Distribution en tailles des grains
- 4 Les PAHs
- 5 SEDs en IR moyen de régions HII
- 6 L'émission thermique des gros grains (BGs)
- 7 SED globale d'une galaxie
- 8 Cas extrême d'extinction : les starbursts poussiéreux
- 9 L'émission des poussières comme traceur de la formation stellaire

Origine et forme de l'émission IR due à la poussière

Seules les étoiles de plus de $10 M_{\odot}$ et de durée de vie < 20 Myr produisent une contribution significative au flux ionisant des régions HII. On a donc accès grâce à leur lumière à un instantané, un SFR plus direct, moins pollué par les étoiles vieilles mais les étoiles jeunes sont localisées dans les régions les plus affectées par l'extinction par la poussière...

1 Origine de la loi d'extinction selon Draine & Lee (1984,ApJ 285,89)



Origine de la loi d'extinction et émission associée (Désert et al 90)

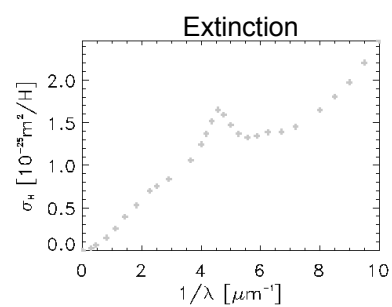
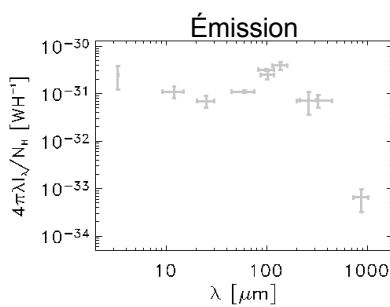
- Cohérence entre émission et extinction
- 3 composantes de grains :
 - PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons): *molécules* de tailles 0.4 – 1.2 nm
 - VSGs (very small grains): *grains* carbonés (1.2 – 15 nm)
 - BGs (big grains): grains silicatés (15 – 110 nm)

Origine de la loi d'extinction et émission associée (Désert et al 90)

➤ Cohérence entre émission et extinction

➤ 3 composantes de grains :

- PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons): *molécules* de tailles 0.4 – 1.2 nm
- VSGs (very small grains): *grains carbonés* (1.2 – 15 nm)
- BGs (big grains): *grains silicatés* (15 – 110 nm)

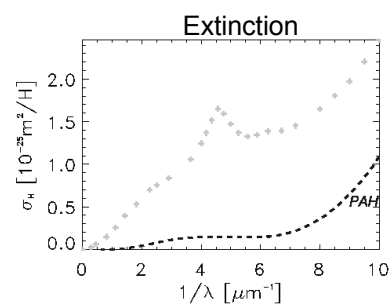
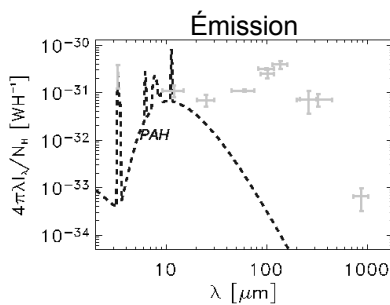


Origine de la loi d'extinction et émission associée (Désert et al 90)

➤ Cohérence entre émission et extinction

➤ 3 composantes de grains :

- PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons): *molécules* de tailles 0.4 – 1.2 nm
- VSGs (very small grains): *grains carbonés* (1.2 – 15 nm)
- BGs (big grains): *grains silicatés* (15 – 110 nm)

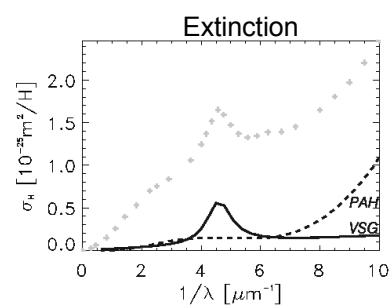
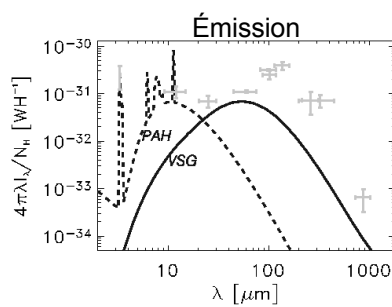


Origine de la loi d'extinction et émission associée (Désert et al 90)

➤ Cohérence entre émission et extinction

➤ 3 composantes de grains :

- PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons): *molécules* de tailles 0.4 – 1.2 nm
- VSGs (very small grains): *grains* carbonés (1.2 – 15 nm)
- BGs (big grains): grains silicatés (15 – 110 nm)

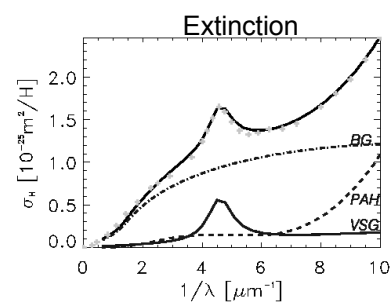
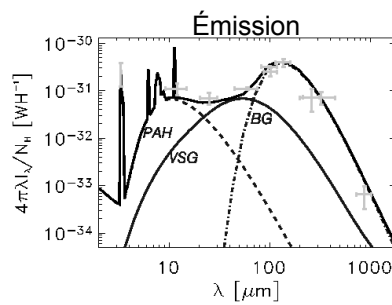


Origine de la loi d'extinction et émission associée (Désert et al 90)

➤ Cohérence entre émission et extinction

➤ 3 composantes de grains :

- PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons): *molécules* de tailles 0.4 – 1.2 nm
- VSGs (very small grains): *grains* carbonés (1.2 – 15 nm)
- BGs (big grains): grains silicatés (15 – 110 nm)



8.2 Chauffage stochastique des grains de poussière VSG

➤ Chauffage par le rayonnement stellaire (UV-optique)

➤ Émission thermique (IR-mm) :

▪ Équilibre thermique :

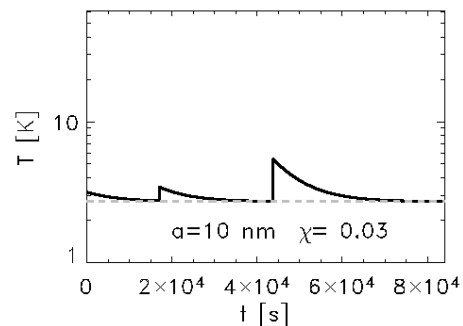
$$I_\lambda = Q_{\text{abs}}(\lambda, a) \times B_\lambda(T_{\text{eq}})$$

▪ Chauffage stochastique :

✓ *Énergie interne*

✓ *Flux de photons*

χ est l'intensité du champ de rayonnement en unité du voisinage solaire.



2 Chauffage stochastique des grains de poussière VSG

➤ Chauffage par le rayonnement stellaire (UV-optique)

➤ Émission thermique (IR-mm) :

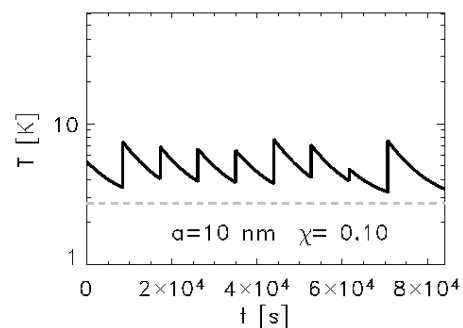
▪ Équilibre thermique :

$$I_\lambda = Q_{\text{abs}}(\lambda, a) \times B_\lambda(T_{\text{eq}})$$

▪ Chauffage stochastique :

✓ *Énergie interne*

✓ *Flux de photons*



2 Chauffage stochastique des grains de poussière VSG

➤ Chauffage par le rayonnement stellaire (UV-optique)

➤ Émission thermique (IR-mm) :

▪ Équilibre thermique :

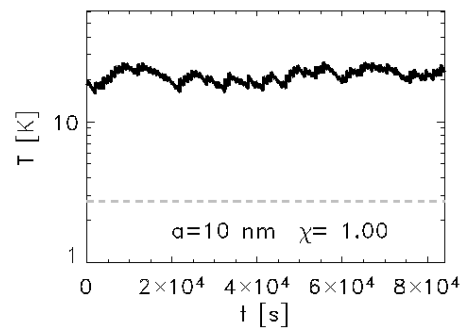
$$I_{\lambda} = Q_{\text{abs}}(\lambda, a) \times B_{\lambda}(T_{\text{eq}})$$

▪ Chauffage stochastique :

✓ *Énergie interne*

✓ *Flux de photons*

χ est trop fort: un second photon excite le grain de poussière avant qu'il ait eu le temps de se relaxer.



2 Chauffage stochastique des grains de poussière VSG

➤ Chauffage par le rayonnement stellaire (UV-optique)

➤ Émission thermique (IR-mm) :

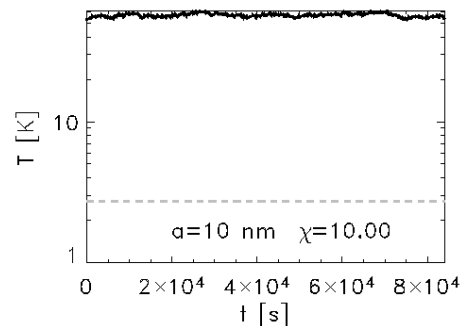
▪ Équilibre thermique :

$$I_{\lambda} = Q_{\text{abs}}(\lambda, a) \times B_{\lambda}(T_{\text{eq}})$$

▪ Chauffage stochastique :

✓ *Énergie interne*

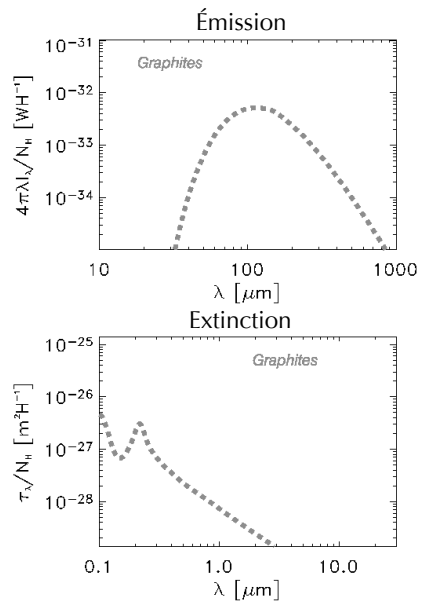
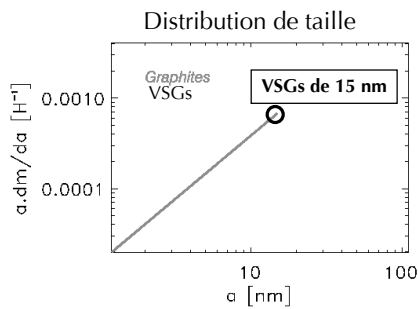
✓ *Flux de photons*



3 Distribution en tailles des grains

Grains carbonés & silicates :

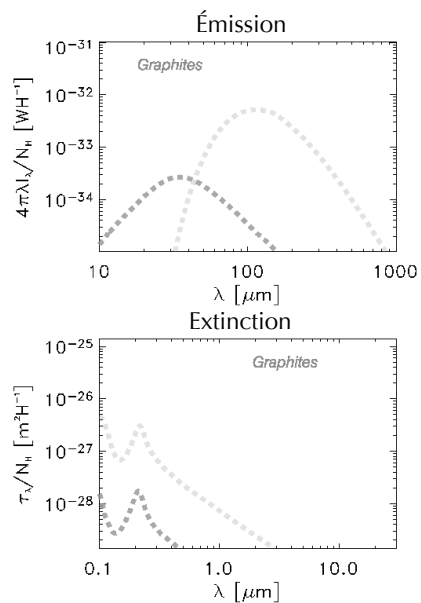
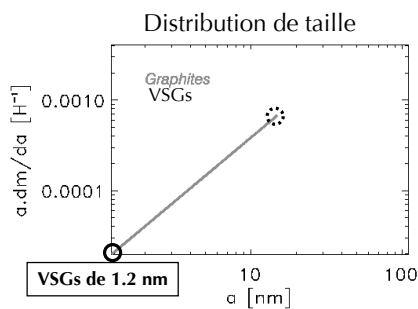
- déplétion des éléments lourds
- caractéristiques spectrales observées
- présence dans les météorites



3 Distribution en tailles des grains

Grains carbonés & silicates :

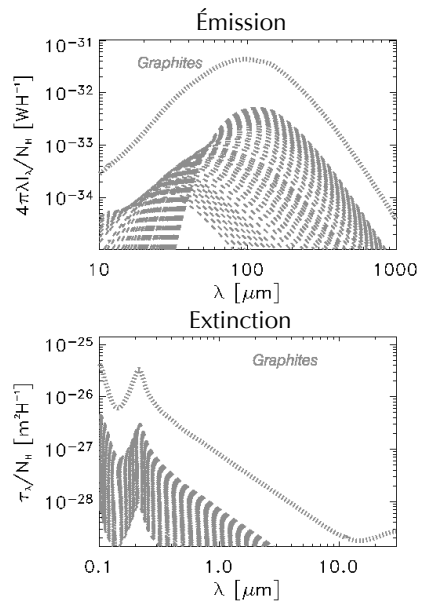
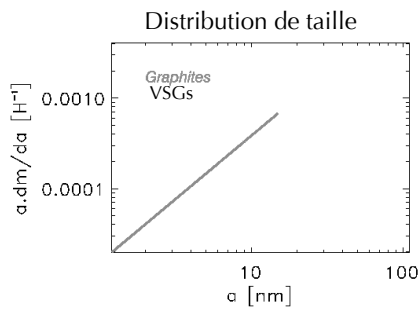
- déplétion des éléments lourds
- caractéristiques spectrales observées
- présence dans les météorites



3 Distribution en tailles des grains

Grains carbonés & silicates :

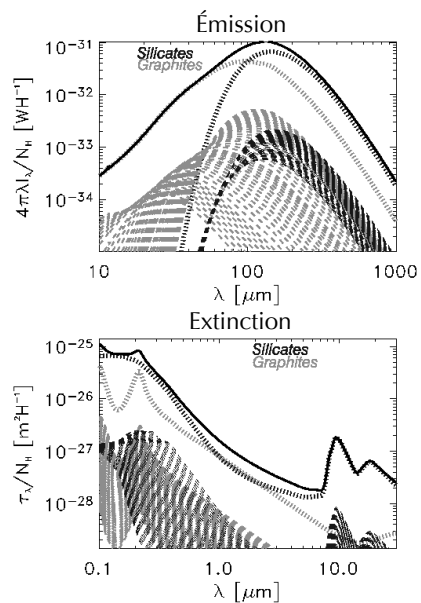
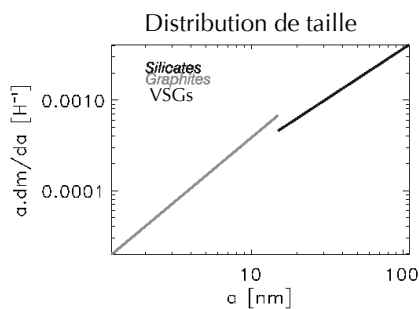
- déplétion des éléments lourds
- caractéristiques spectrales observées
- présence dans les météorites



3 Distribution en tailles des grains

Grains carbonés & silicates :

- déplétion des éléments lourds
- caractéristiques spectrales observées
- présence dans les météorites

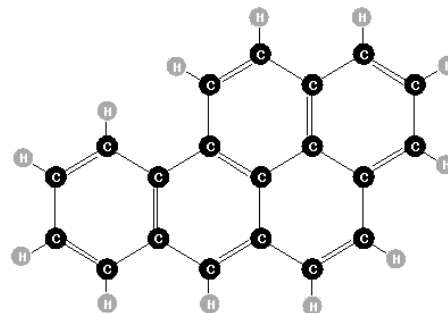
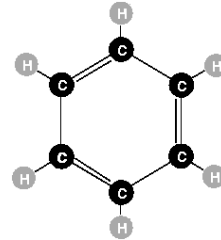
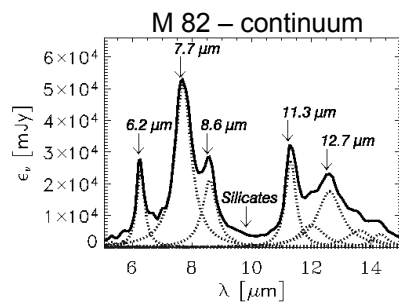


4 Les PAHs

Explication des bandes infrarouges, universelles

⇒ produites par les modes de vibration C-C et C-H de PAHs chauffés stochastiquement

(Léger & Puget, 1984 ; Allamandola, 1985)

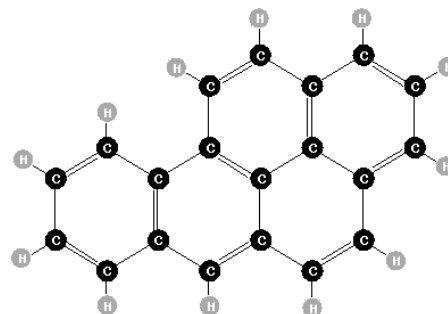
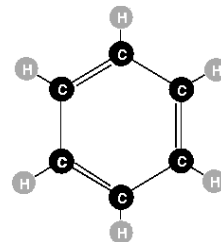
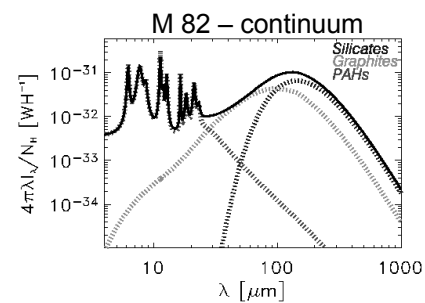


4 Les PAHs

Explication des bandes infrarouges, universelles

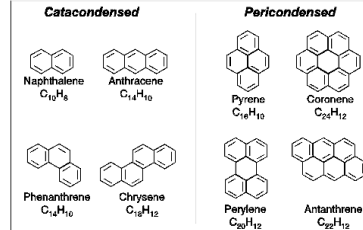
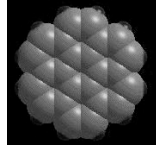
⇒ produites par les modes de vibration C-C et C-H de PAHs chauffés stochastiquement

(Léger & Puget, 1984 ; Allamandola, 1985)



Qui sont les PAHs (*hydrocarbure aromatique polycycliques*)?

- Molécules faites de cycle de benzène
- Structure plane

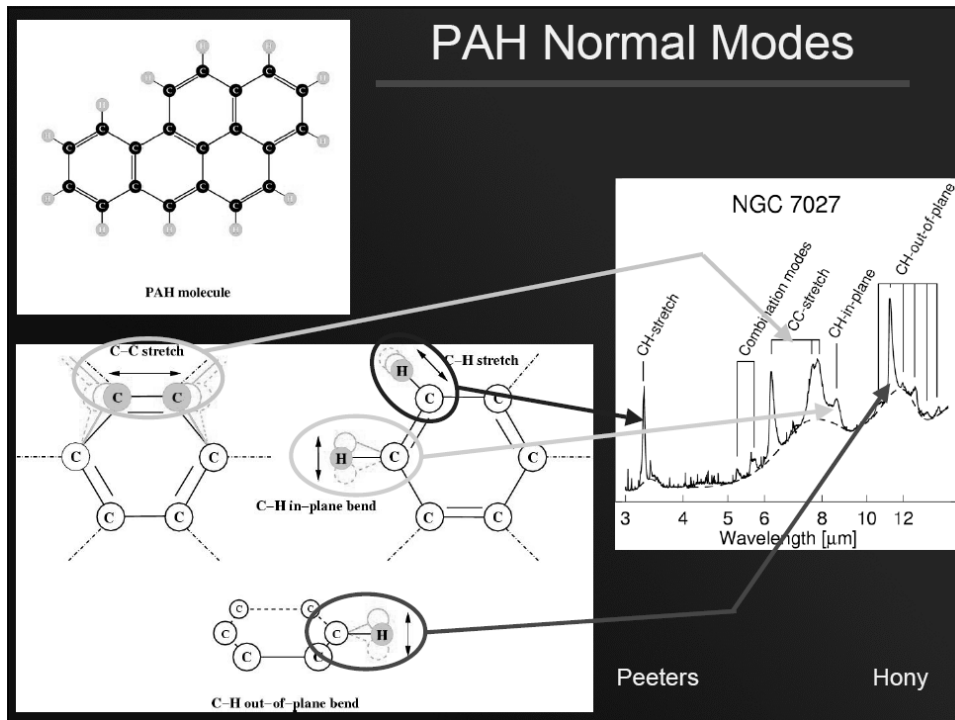
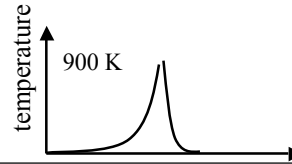
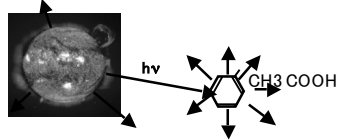


2 processus de formation des PAHs:

- Fragmentation de grains carbonés de structure amorphe ou de charbons (Duley, 1988)
- Photodissociation des molécules C₂H₂ créées dans la matière éjectée des étoiles riches en carbone -> radicaux qui peuvent réagir ensemble

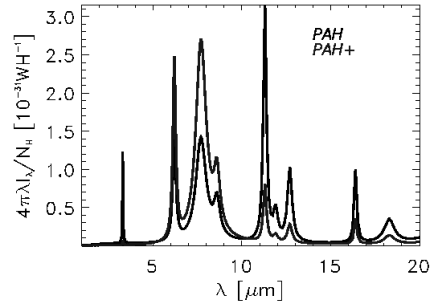
Processus d'excitation:

- Chauffage impulsif par le rayonnement VUV des étoiles (Potentiel < 8 eV)
- Raie d'émission à 3.3, 8.6, 11.3 et 12.7 μm (liaison C-H) et à 6.2, 7.7 μm (liaison C-C)



Rapports de raies PAHs et ionisation

$\lambda(\mu\text{m})$	Origine
3.29	Aromatic C-H stretch ($\nu=1-0$)
6.2	C-C skeletal deformation
7.7	C-C skeletal deformations
8.6	C-H in-plane bend
11.3	C-H out-of-plane bend
11.9	C-H out-of-plane bend
12.7	C-H out-of-plane bend



Galliano et al. (05)

L'ionisation des PAHs affecte plus les raies liées à l'H et donc diminue le rapport entre les raies à 11.3 et [6.2,7.7] μm .

5 SEDs en IR moyen de régions HII

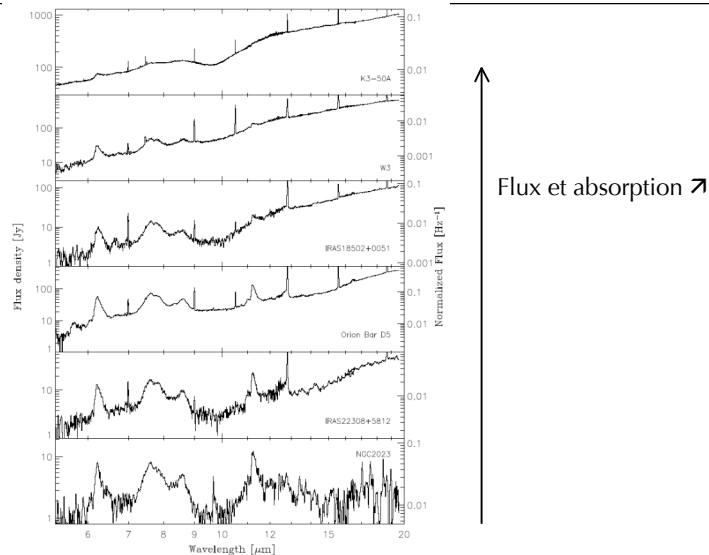


FIGURE 7.1 – Spectral variation in the mid-IR characteristics of HII regions. As a reference, the reflection nebula NGC 2023 is shown in the bottom panel. Note that the units on the left vertical axis represent the FIR normalized flux. Full 2–200 μm spectra for the compact HII regions can be found in Peeters et al. (2002b).

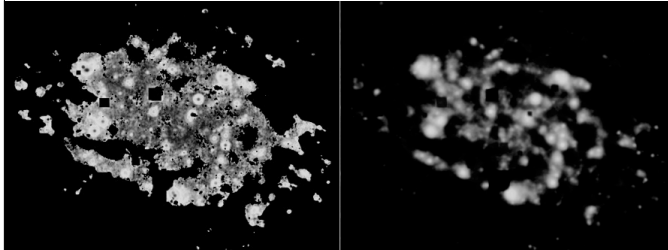
Paradoxes liés à l'émission des PAHs

1. Il existe une corrélation entre la luminosité en IR moyen (MIR) due aux PAHs et la luminosité totale IR (TIR), dominée par l'émission thermique des gros grains, malgré les origines physiques et les localisations différentes de ces émissions. Cette corrélation présente une dispersion inférieure à 40 % ($1-\sigma$, Chary & Elbaz 2001).
2. Le rapport des raies PAHs varie à l'intérieur d'une galaxie, mais varie peu d'une galaxie à l'autre en moyenne.
3. Le rapport entre les raies à 11.3 et [6.3,7.7 μm] augmente quand on se rapproche du centre de la galaxies M51, alors qu'on attendrait l'inverse si cela résultait de l'ionisation des PAHs puisque l'ionisation doit être plus forte au centre de la galaxie.

Les raisons pour lesquelles on pourrait s'attendre à une variation des spectres IR en allant des galaxies proches aux lointaines

1. Métallicité:
 - Moins de métaux, moins de poussière produite
 - Moins de métaux, moins d'opacité aux UV durs qui détruisent les PAHs et donc moins d'émission PAH attendue.
 - métallicité + faible \Rightarrow H/C + fort \Rightarrow 11.3 μm + fort.
2. Ionisation: plus les PAHs sont ionisés plus le rapport 11.3 (C-H) sur [6.3,7.7 μm] (C-C) est faible.
3. Géométrie: les galaxies distantes contiennent plus de gaz, le déclenchement de la formation d'étoiles peut-être plus efficace et les régions de formation d'étoiles plus diffuses, ce qui entraînerait une moins grande destruction des PAHs et donc un plus fort rapport PAH/continuum.
4. Distribution en tailles différentes des grains.

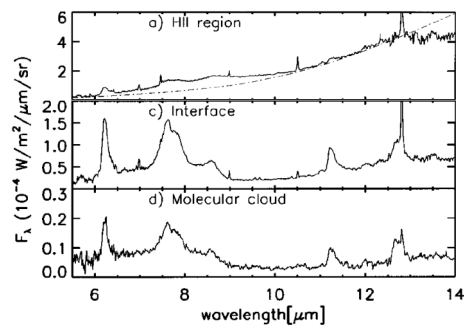
Origine "galactographique" de l'émission PAH



NGC 300: Helou et al. 2004

M17: Verstraete et al. 1996

L'émission PAH provient majoritairement des régions de photodissociation (PDR) à l'interface entre les régions HII et les nuages moléculaires.



Galaxies sans PAHs

Bien que les PAHs soient partout, on observe des galaxies dont les spectres MIR sont "lisses":

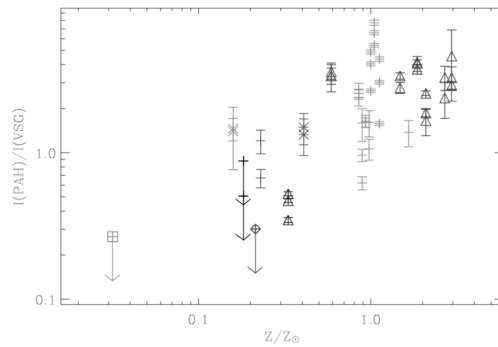
- Noyaux actifs de galaxies
 - Galaxies naines bleues compactes déficientes en métaux
- ↳
- Quels sont les mécanismes de formation des PAHs?
 - Quels sont les mécanismes de destruction des PAHs?



L'observation de galaxies "jeunes", du point de vue du développement de leur milieu interstellaire, peut permettre de répondre à ces questions.

Formation et destruction des PAHs

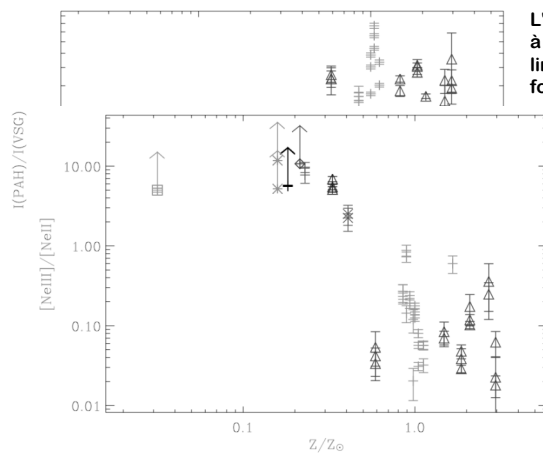
Un problème (très) complexe, Galliano et al. 2005



L'abondance des PAH semble être liée à la métallicité des galaxies (donc limitée par les processus de formation)

Formation et destruction des PAHs

Un problème (très) complexe, Galliano et al. 2005

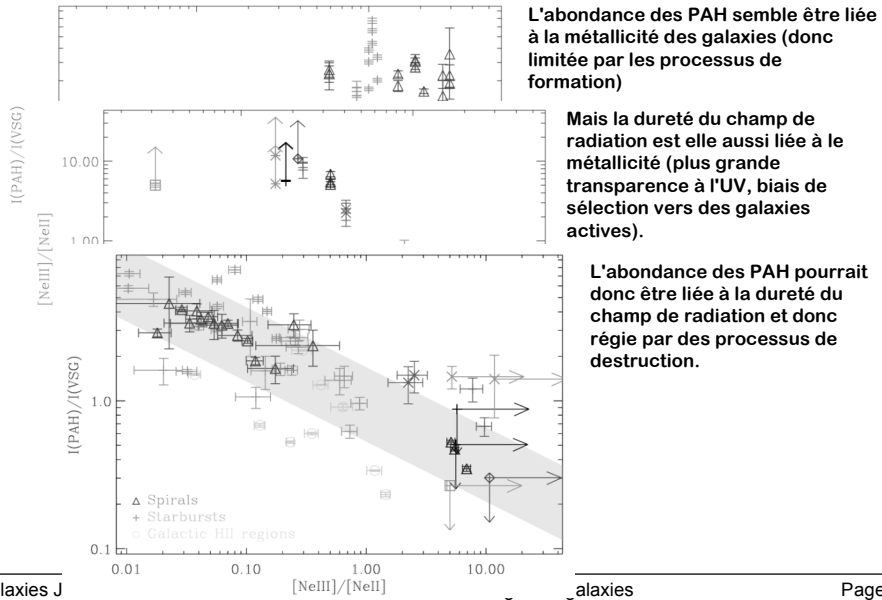


L'abondance des PAH semble être liée à la métallicité des galaxies (donc limitée par les processus de formation)

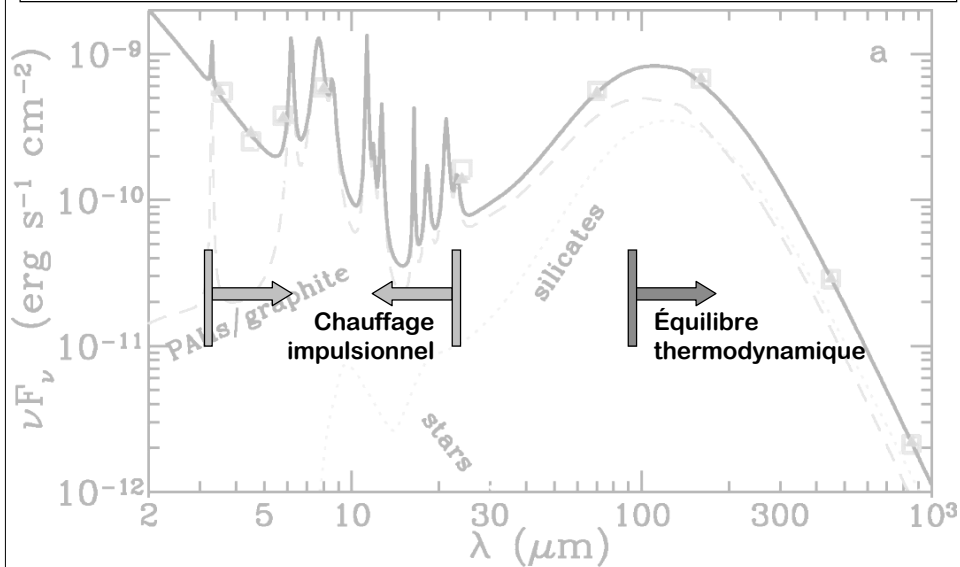
Mais la dureté du champ de radiation est elle aussi liée à la métallicité (plus grande transparence à l'UV, biais de sélection vers des galaxies actives).

Formation et destruction des PAHs

Un problème (très) complexe, Galliano et al. 2005



Le spectre IR des galaxies proches



6 L'émission thermique des gros grains (BGs)

$$I_\lambda \propto \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Coeff. d'absorption}}}{Q_{abs}(\lambda_0)} (\lambda/\lambda_0)^{-\beta} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Fct. de Planck}}}{B_\lambda(T_{eq})} \quad \beta : \text{indice spectral}$$

$$B_\lambda(T) = 2hc^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$B_\lambda(\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}) = B_\nu(\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}) \times c/\lambda^2$$

Les BGs émettent un rayonnement en équilibre thermique autour de 35 K (20-40 K) avec une loi de type corps noir modifié, i.e. corps noir multiplié par $\lambda^{-\beta}$ où l'indice spectral β est $\approx 1-2$.

Rappels sur l'émission des corps noirs

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

For high and low frequencies we have:

- **Rayleigh-Jeans approximation**

$$\begin{aligned} \frac{h\nu}{kT} \ll 1 &\Rightarrow e^{h\nu/kT} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT} \\ &\Rightarrow B_\nu(T) = \frac{2\nu^2}{c^2} kT \end{aligned}$$

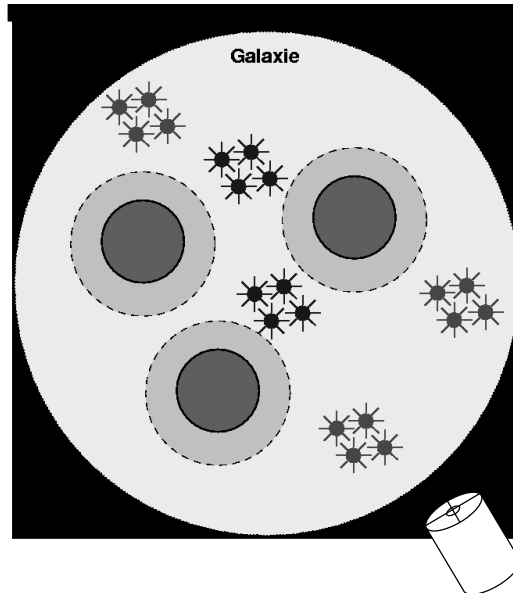
- **Wien's approximation**

$$\begin{aligned} \frac{h\nu}{kT} \gg 1 &\Rightarrow e^{h\nu/kT} \gg 1 \\ &\Rightarrow B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-h\nu/kT} \end{aligned}$$

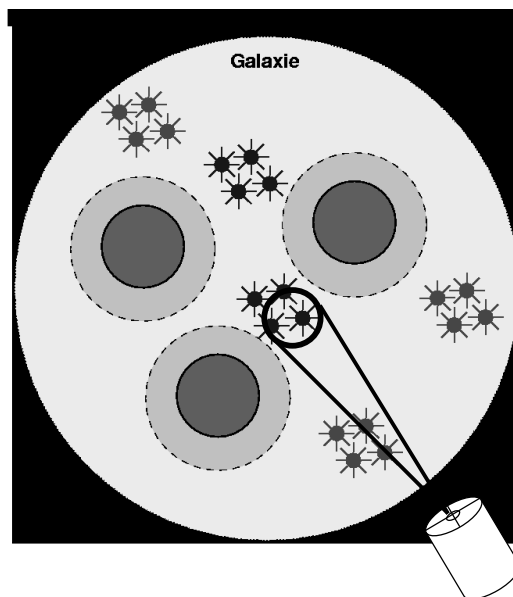
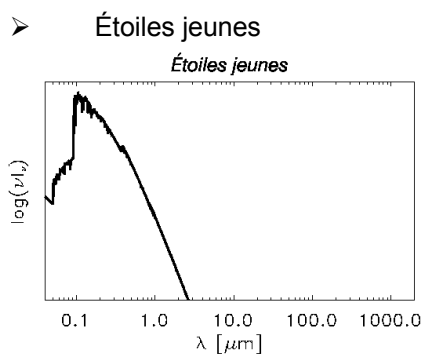
Integration over frequency yields the **Stefan-Boltzmann law for black body radiation**:

$$B(T) = \int_0^\infty B_\nu(T) d\nu = \sigma_B T^4$$

7 SED globale d'une galaxie

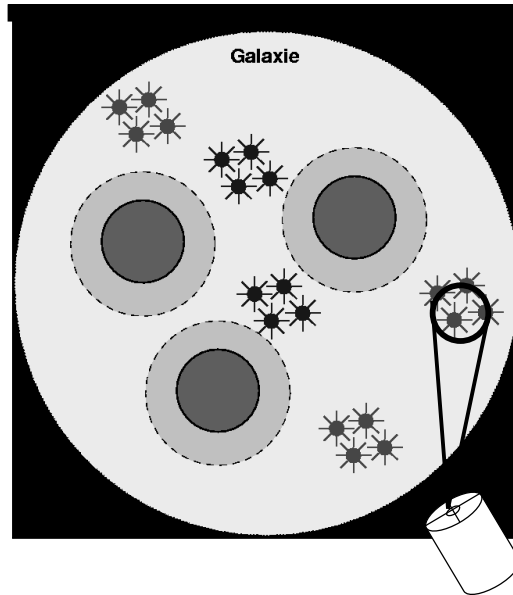
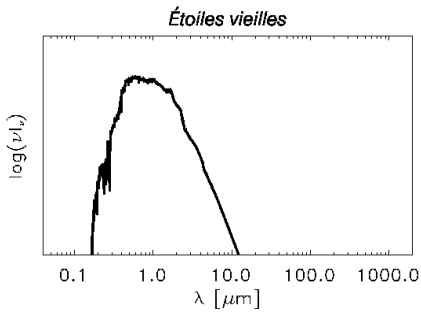


7 SED globale d'une galaxie



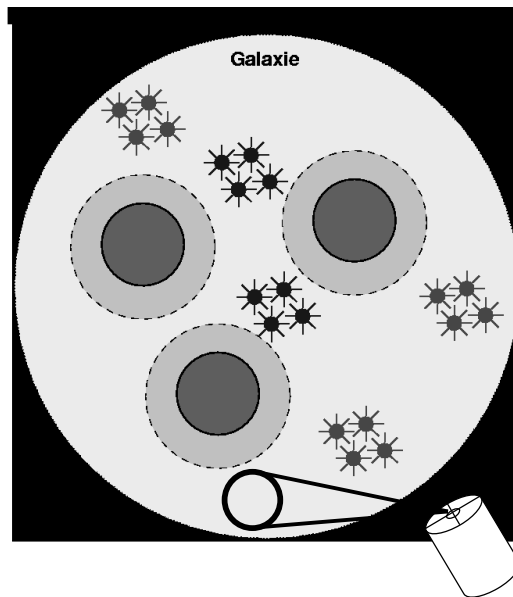
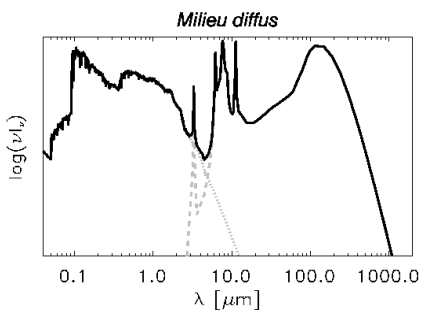
7 SED globale d'une galaxie

- Étoiles jeunes
- Étoiles vieilles



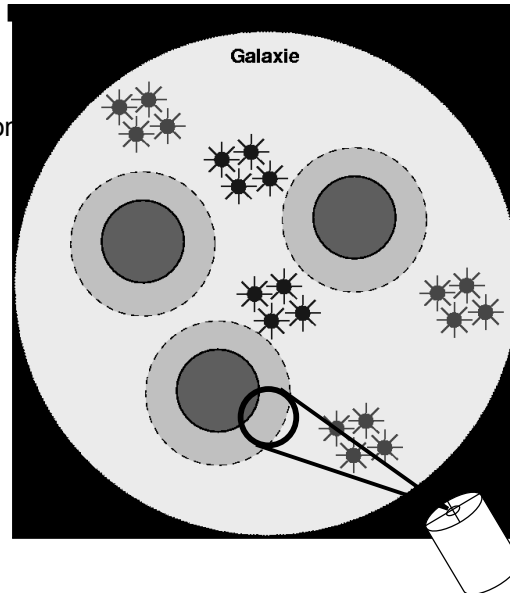
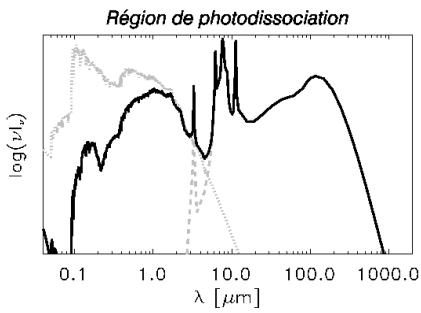
7 SED globale d'une galaxie

- Étoiles jeunes
- Étoiles vieilles
- Milieu diffus



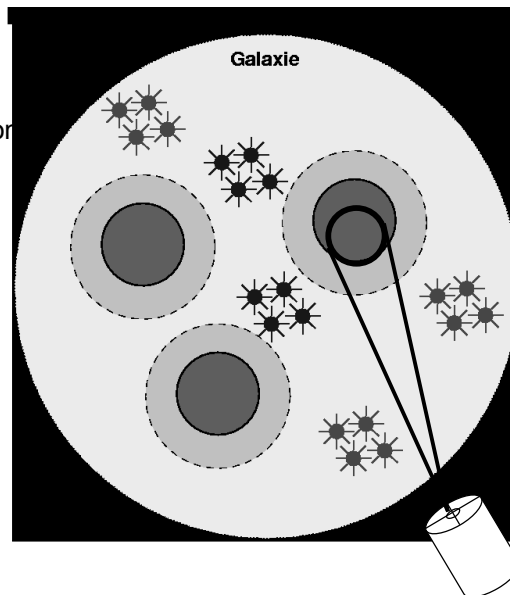
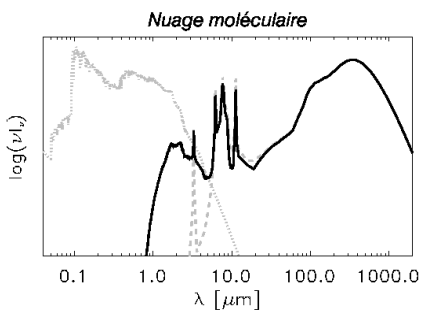
7 SED globale d'une galaxie

- Étoiles jeunes
- Étoiles vieilles
- Milieu diffus
- Régions de photodissociation



7 SED globale d'une galaxie

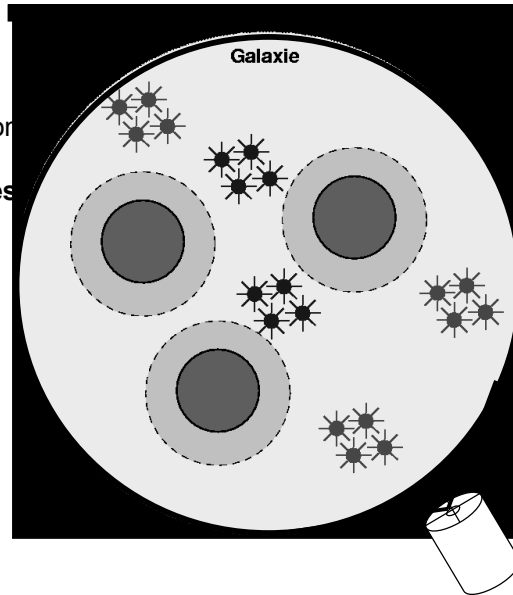
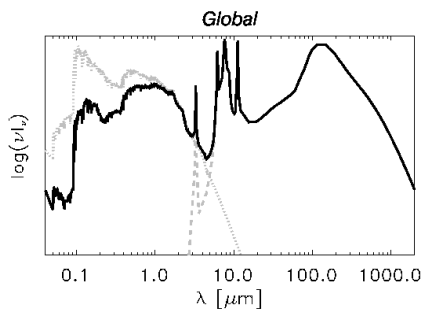
- Étoiles jeunes
- Étoiles vieilles
- Milieu diffus
- Régions de photodissociation
- Nuages moléculaires



7 SED globale d'une galaxie

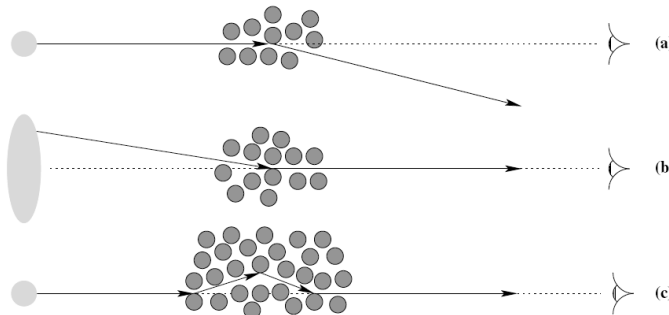
- Étoiles jeunes
- Étoiles vieilles
- Milieu diffus
- Régions de photodissociation
- Nuages moléculaires

SED globale = contribution de ces composantes & transfert de rayonnement



Rôle de la géométrie

L'étude des galaxies éloignées ne permettant pas de résoudre les étoiles individuelles, la géométrie de la source doit être prise en compte et l'approximation de l'écran de poussière n'est plus valable. En effet, pour des régions étendues, la diffusion de la lumière par la poussière d'avant-plan peut rediriger des photons vers la ligne de visée alors qu'ils étaient au départ émis dans une direction différente (cf ci-dessous)



- (a) cas d'une source ponctuelle où la diffusion retire un photon de la ligne de visée
- (b) cas d'une source étendue où la diffusion peut amener dans la ligne de visée un photon au départ émis dans une direction différente.
- (c) cas où le chemin optique retire puis ramène des photons après plusieurs diffusions

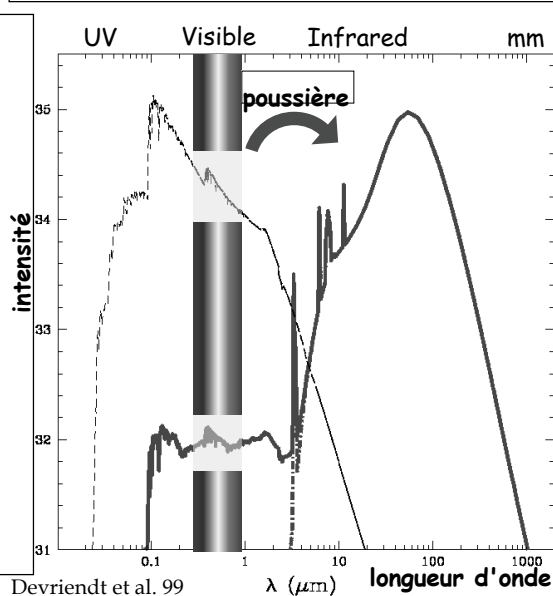
Rôle de la géométrie

De plus, la diffusion étant plus efficace pour les courtes longueurs d'ondes (partie bleue du spectre), elle agit comme une source supplémentaire de rayonnement à ces longueurs d'ondes et compense en partie le rougissement. Ainsi une grande quantité de poussière peut être présente dans la galaxies bien qu'on observe un relativement faible rougissement (Bruzual, Magris & Calvet 1988, ApJ 333, 673; Witt, Thronson & Capuano 1992, ApJ 393, 611).

Les effets observés peuvent être importants, de l'ordre de la magnitude dans le domaine visible, pour certaines galaxies très lumineuses dans l'infrarouge lointain, donc contenant une grande quantité de poussière (Disney, Davie & Phillipps 1989, MNRAS 239, 939).

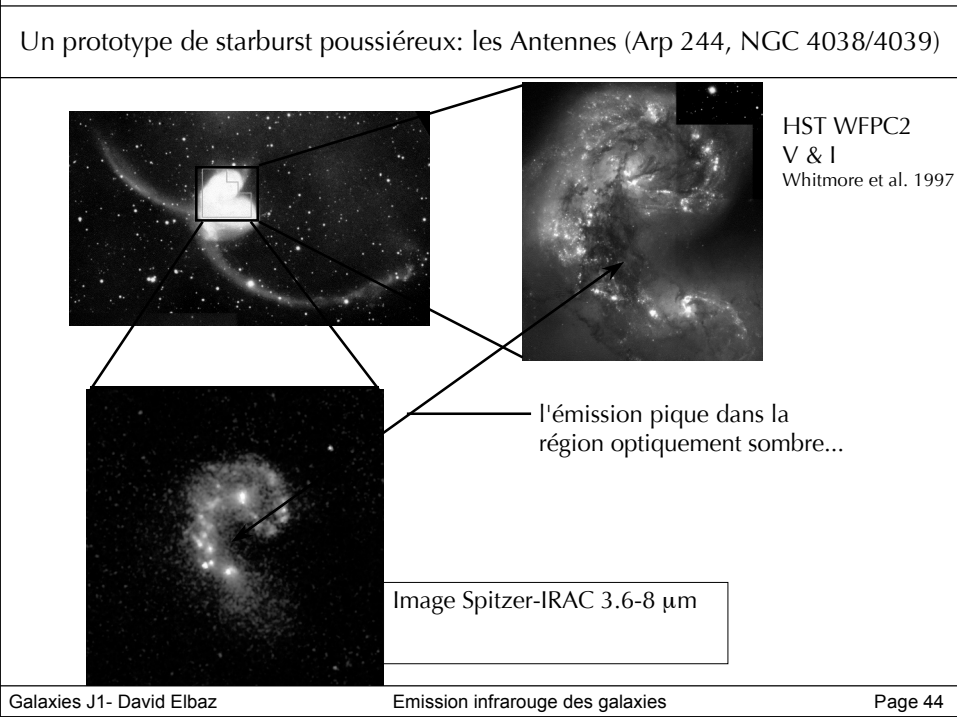
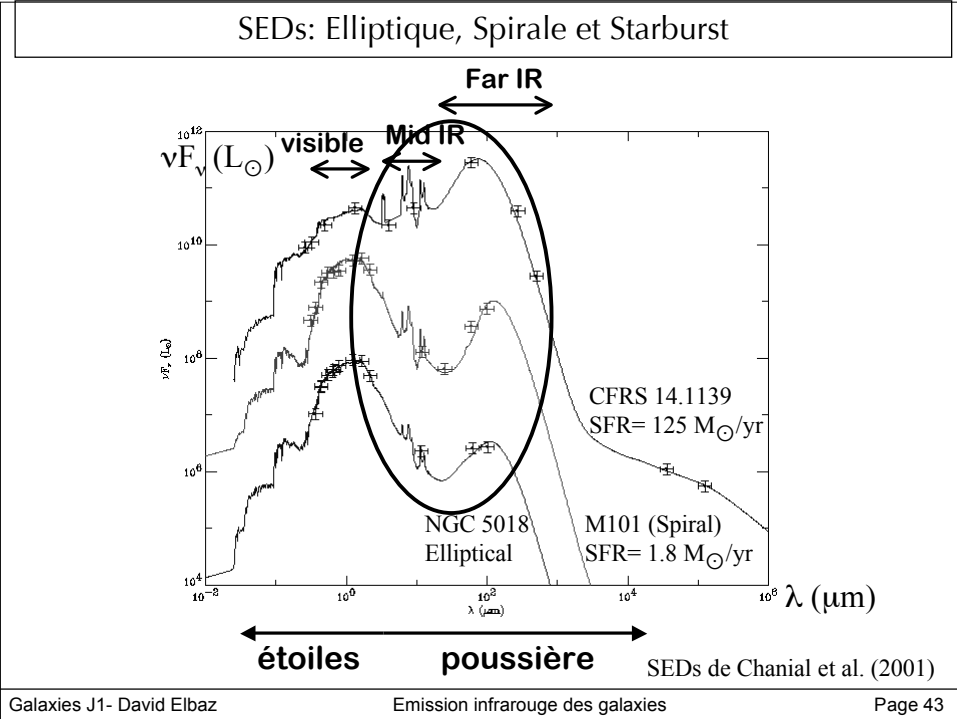
La mesure directe de l'extinction dans une galaxie est donc une opération complexe et délicate et peut conduire à fortement sous-estimer la quantité de poussière si elle est basée sur une méthode dépendant d'un paramètre variant avec la longueur d'onde comme les excès de couleur (Witt, Thronson & Capuano 1992).

8 Cas extrême d'extinction : les starbursts poussiéreux



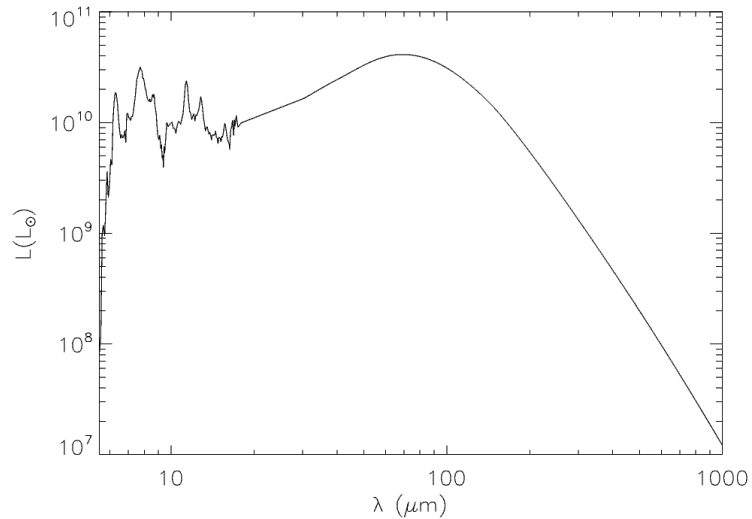
La poussière absorbe les photons visibles et UV, puis produit un rayonnement "thermique" dans l'infrarouge:

- corps "gris" dans l'IR lointain ($>40\mu\text{m}$) rayonnant à $T\sim 35\text{ K}$ (gros grains de poussière, BG), i.e. pic à $\lambda\sim 80\mu\text{m}$.
- émission hors équilibre thermique (chauffage impulsif) des petits grains de poussière (VSGs) responsables de la montée dans l'UV de la courbe d'extinction ($T\sim 150\text{ K}$, $\lambda_{\text{max}}\sim 80\mu\text{m}$)
- raies larges en émission dues à des molécules complexes (PAHs= Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) à 3.3, 6.5, 7.7, 8.6, 11.3, 12.7 μm .



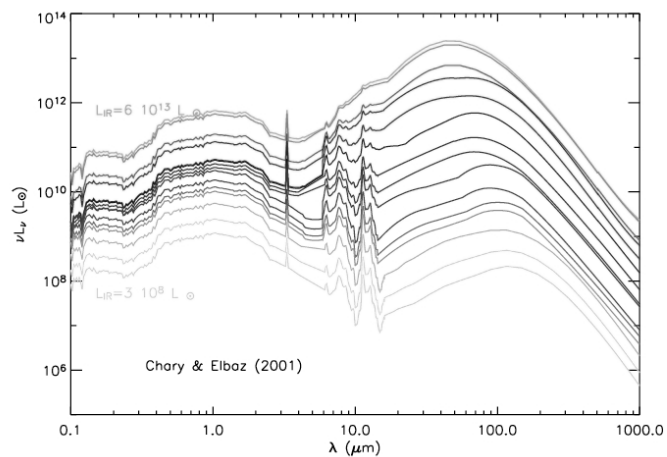
SED en IR moyen (MIR) et lointain (FIR) de Arp 244 (Les Antennes)

loi de Wien: $\lambda_{\text{max}} T = 0.29 \text{ cm.K}$ donc pic à $80 \mu\text{m} \Rightarrow T = 35 \text{ K}$

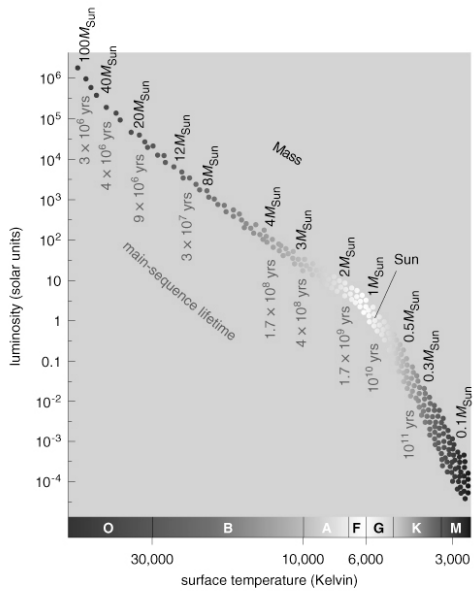


Distributions Spectrales en Energie (SEDs) : des galaxies normales aux starbursts poussiéreux

plus la luminosité d'une galaxie augmente (en relation avec sa proportion d'étoiles jeunes), plus la fraction de sa lumière rayonnée dans l'infrarouge moyen (3-40 μm) et lointain (40-1000 μm) est grande.



**Les étoiles de $M_* > 10 M_\odot$: 10% de la masse mais 80 % de la lumière...
 ... leur durée de vie est inférieure à celle du GMC où elles sont nées
 => forte absorption des UV par la poussière**

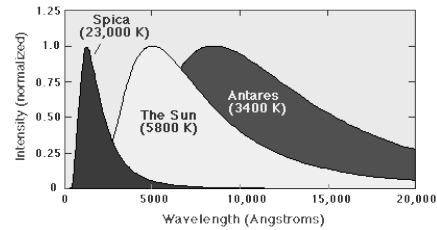


Loi de Wien:
 $\lambda_{\max}(\text{cm}) T(\text{K}) = 0.29 [\text{cm.K}]$
 $T = 5770 \text{ K Soleil} \Rightarrow 5022 \text{ \AA}$

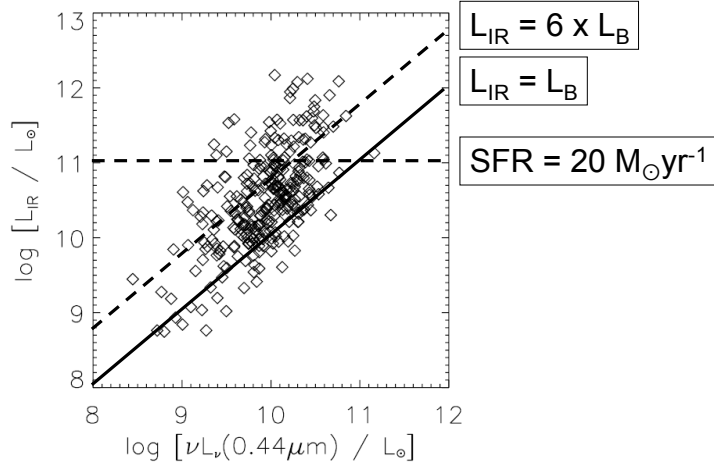
étoiles OB: $T > 1.6 \times 10^4 \text{ K} \Rightarrow 500-2900 \text{ \AA}$

$\Rightarrow \sim \text{totalité dans UV} \rightarrow \text{IR}$:

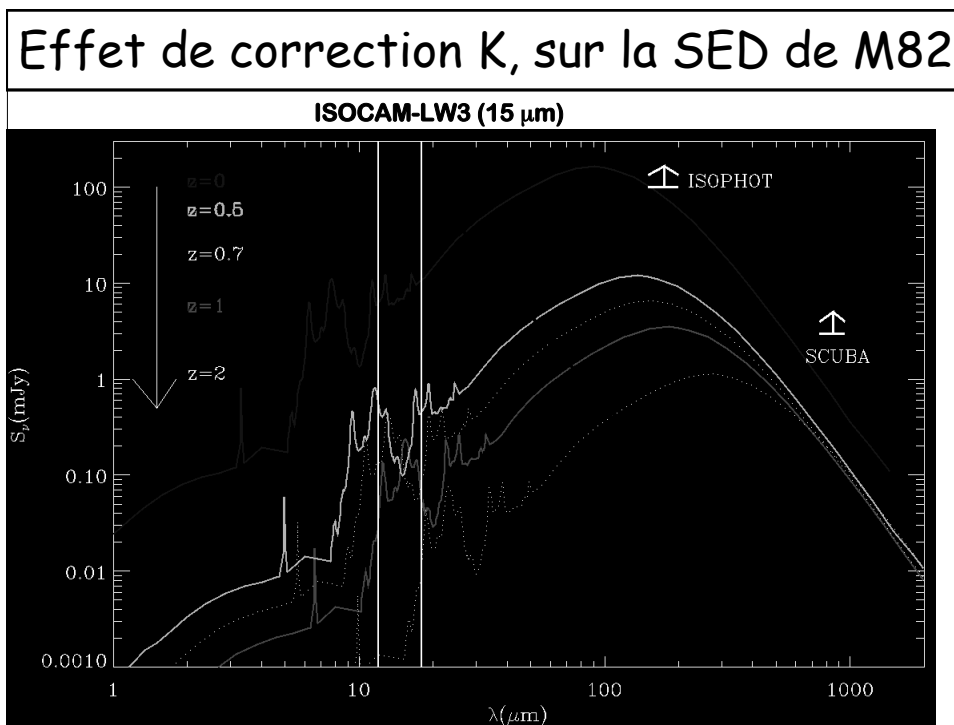
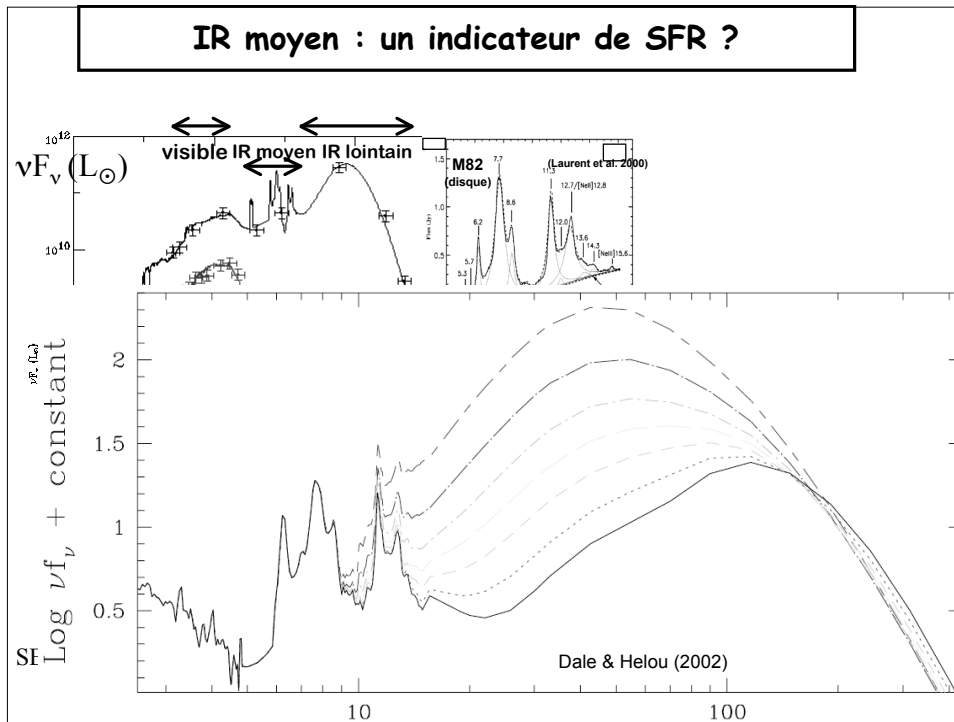
$\Rightarrow \text{SFR} = 1.71 \times 10^{-10} \times [L(\text{UV}) + L(\text{IR})]$

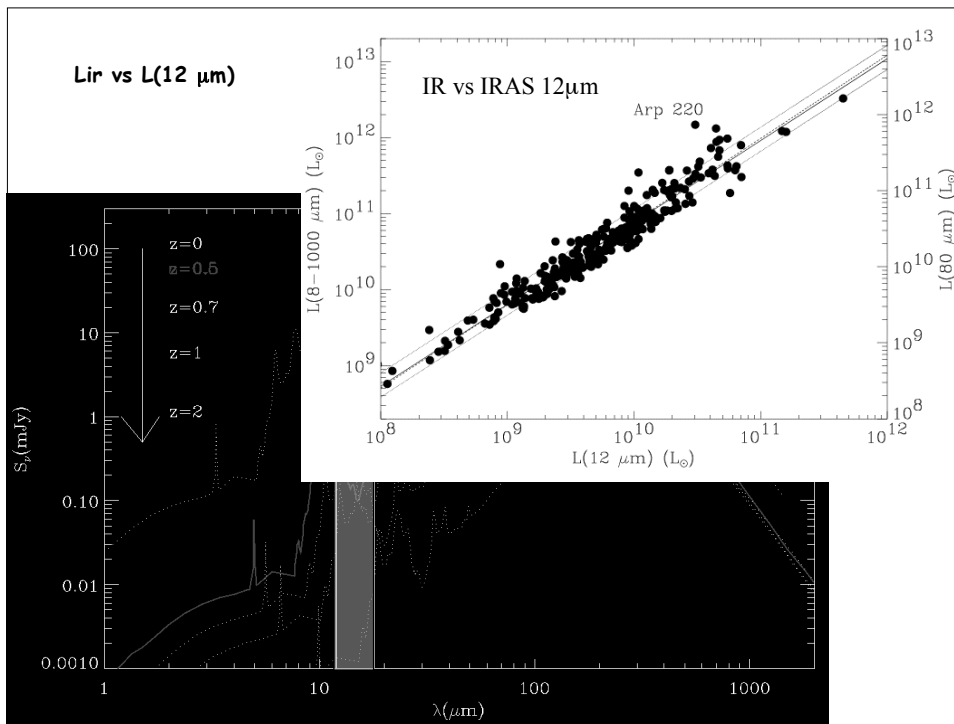
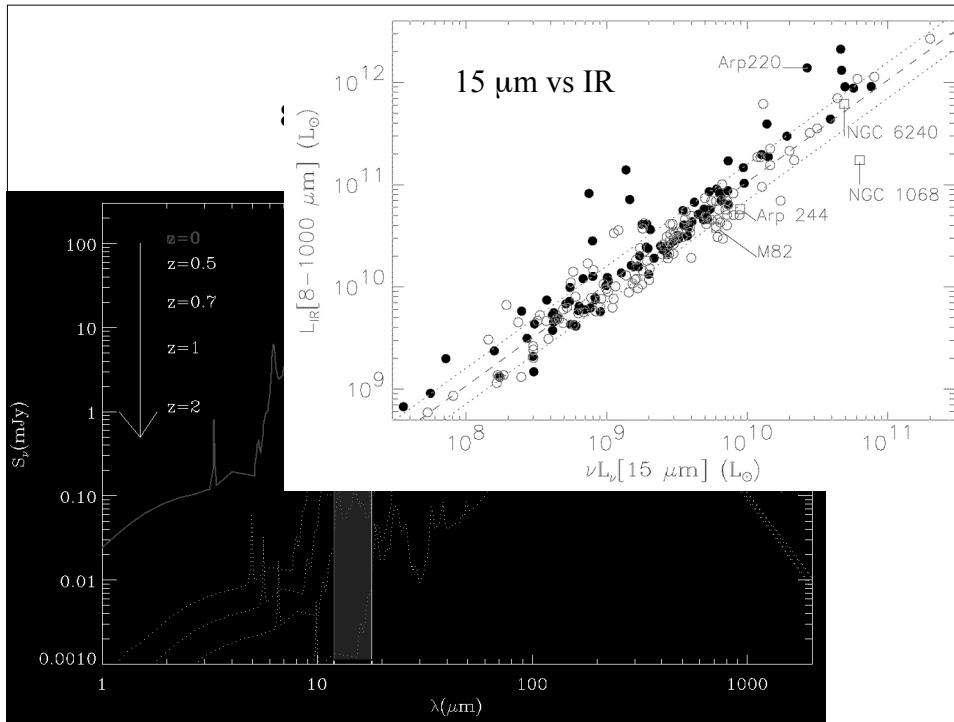


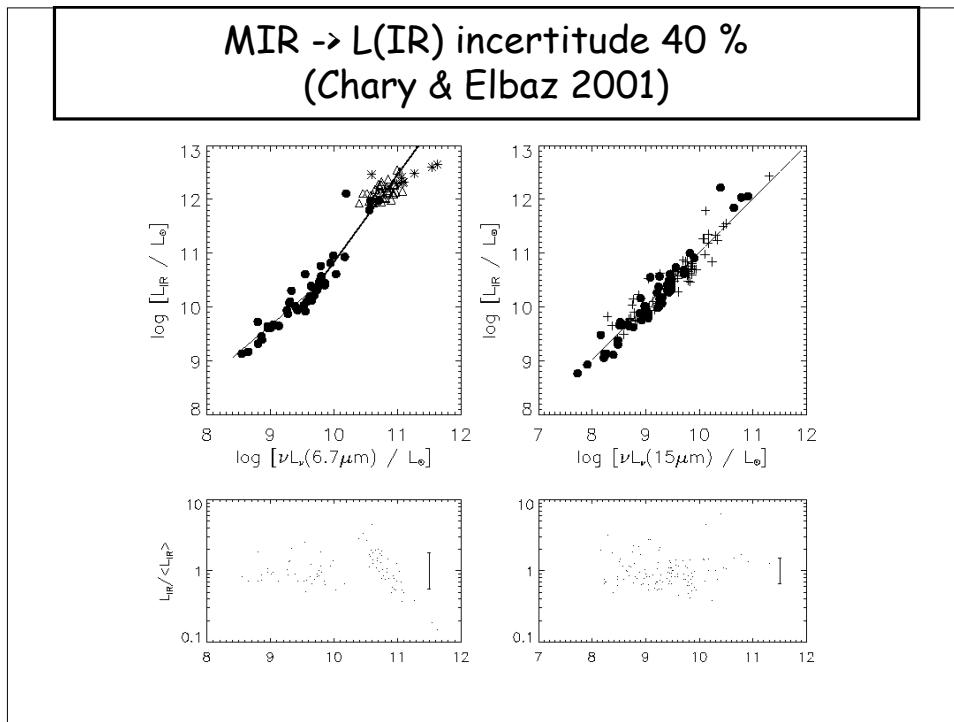
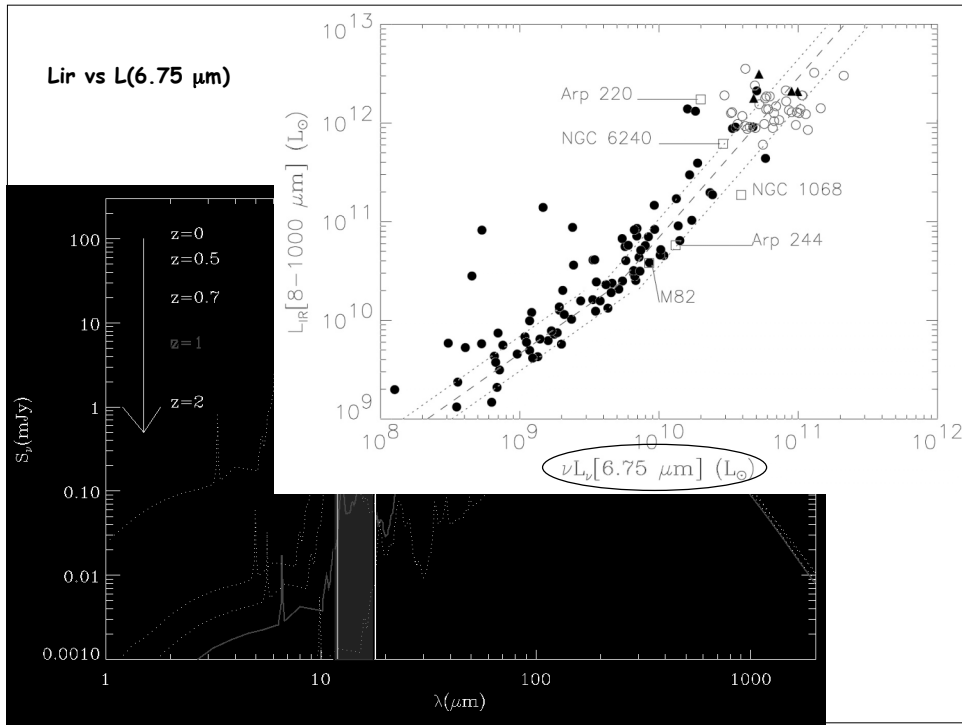
9 L'émission des poussières comme traceur de la formation stellaire



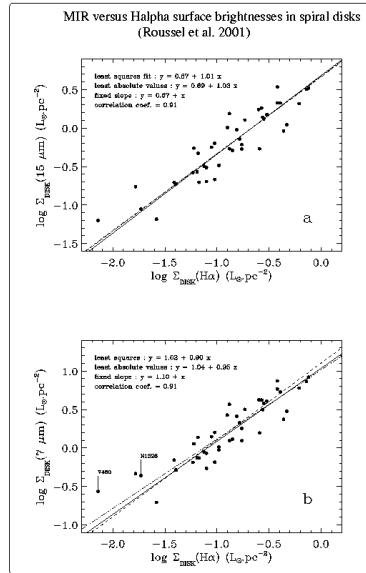
au-delà de $20 M_\odot/\text{yr}$, les galaxies rayonnent principalement dans l'IR







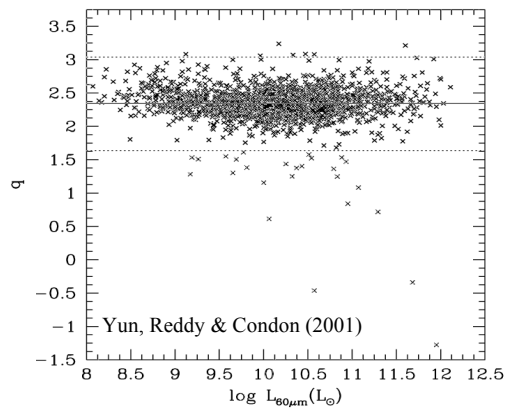
Relation entre l'IR moyen et l'émission H α



Corrélation locale entre L_{FIR} et radio (1.4 GHz)

(Condon et al. 1991):

$$q = \log_{10} \left(\frac{L_{\text{FIR}}(\text{W})}{3.75 \times 10^{12}(\text{Hz})} \times \frac{1}{L_{1.4\text{GHz}}(\text{W Hz}^{-1})} \right)$$



où $L_{\text{FIR}} = 4\pi d^2 \times \text{FIR}$ avec (Helou et al 88):

$$\text{FIR} = 1.26 \times 10^{-14} (2.58 S_{60\mu\text{m}}(\text{Jy}) + S_{100\mu\text{m}}(\text{Jy})) \text{ Wm}^{-2}$$

Echantillon de 1809 galaxies issues du catalogue IRAS-2Jy ($S_{60\mu\text{m}} \geq 2\text{Jy}$) avec flux radio (VLA) et redshift, pour lequel le "paramètre q" vaut :

$$q = 2.34 \pm 0.01$$

Anantharamaiah et al. (2000)