

« Propriétés et évolution des galaxies »

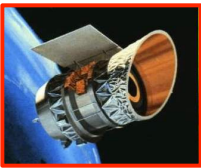
David Elbaz (delbaz@cea.fr)

Service d'Astrophysique - CEA Saclay
Tel: 01 69 08 54 39

Galaxies infrarouges et fond diffus cosmologique infrarouge

Master Recherche M2 Astronomie & Astrophysique
Enseignement thématique des parcours M2 – Galaxies

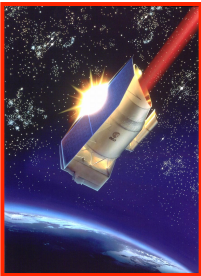
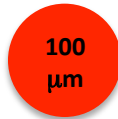
http://david.elbaz3.free.fr/master_m2



IRAS 1985

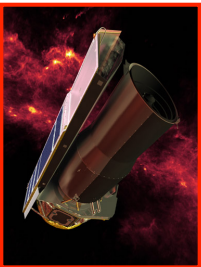
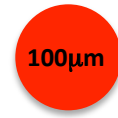
57 cm

41" fwhm



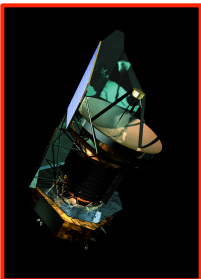
ISO 1995

60 cm



Spitzer 2003

85 cm

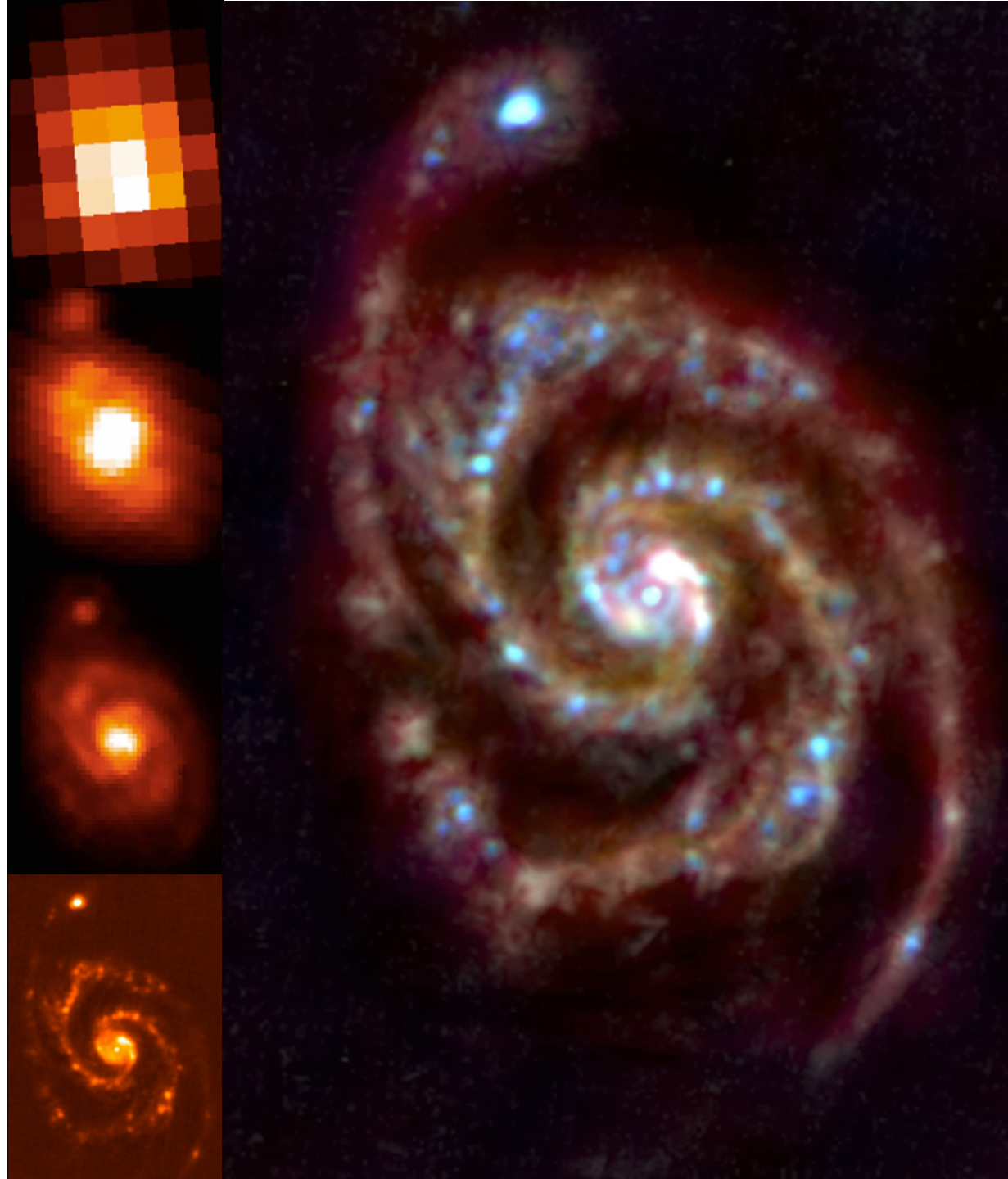


Herschel 2009

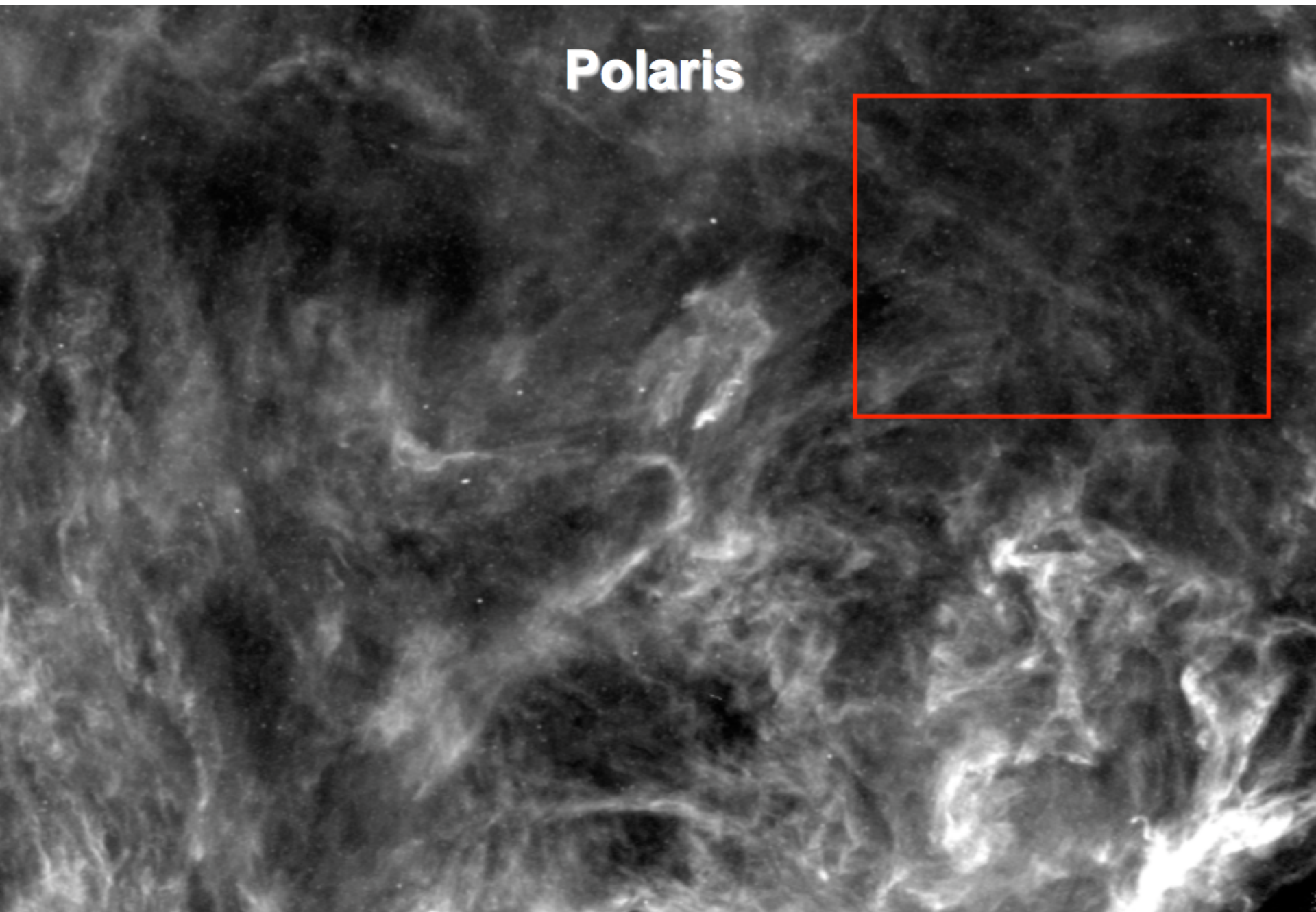
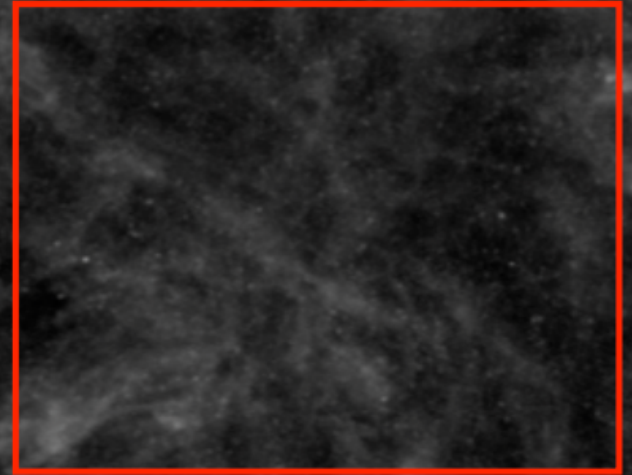
350 cm

FWHM

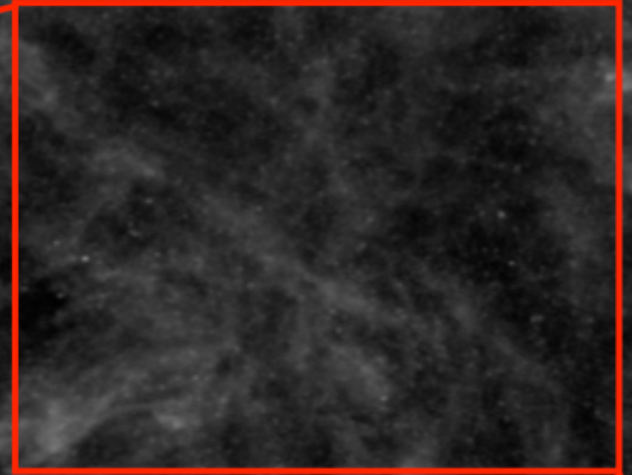
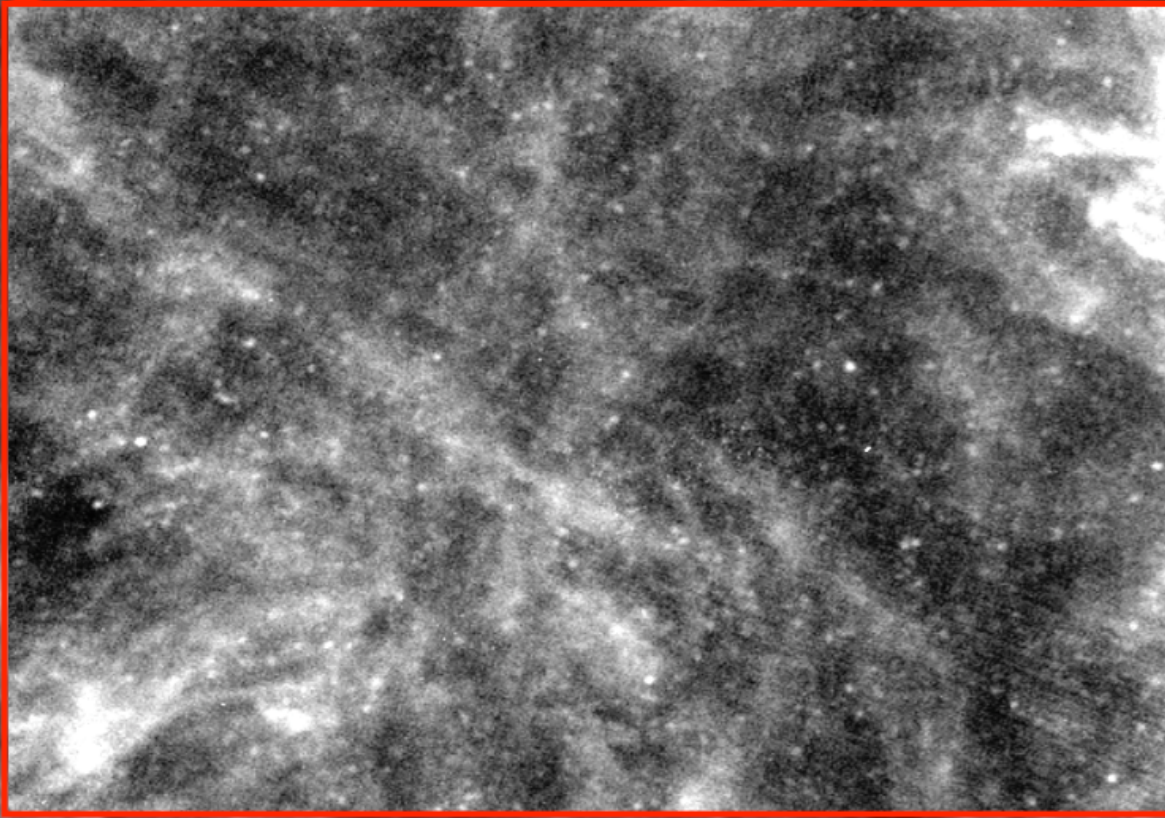
$100\mu\text{m}=6.7\text{ arcsec}$



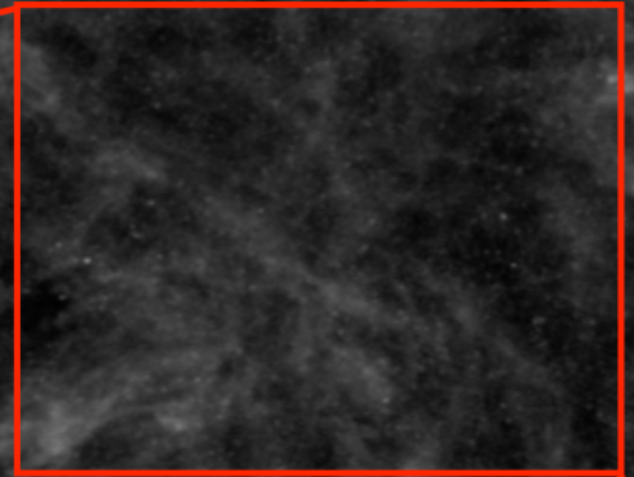
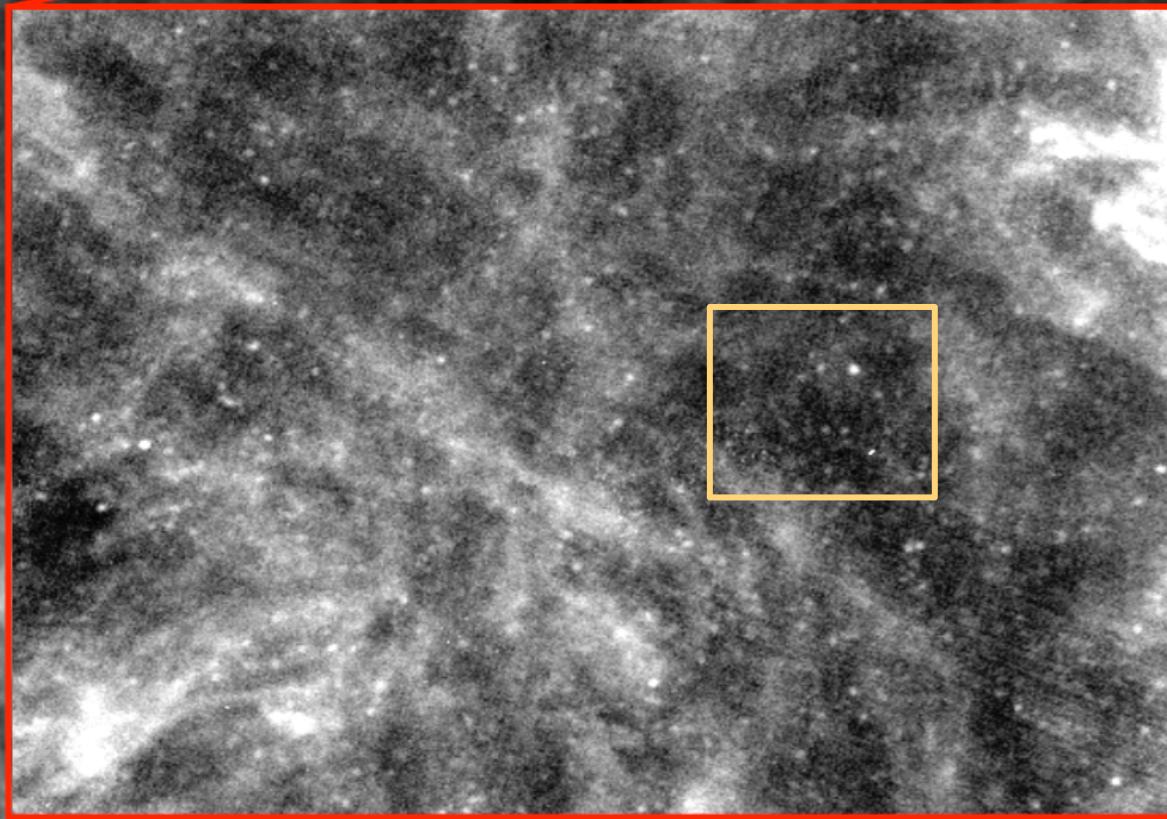
Polaris

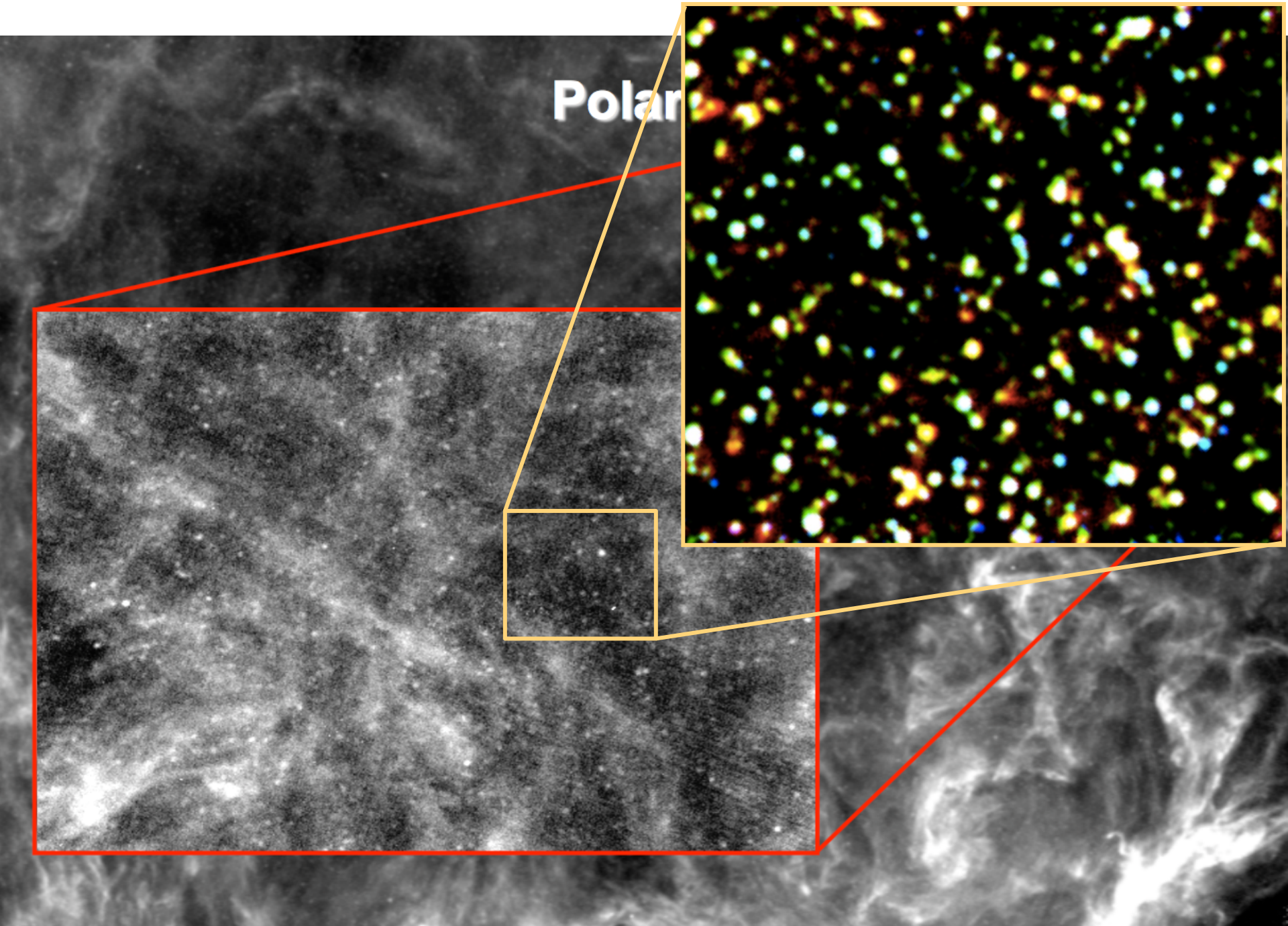


Polaris



Polaris





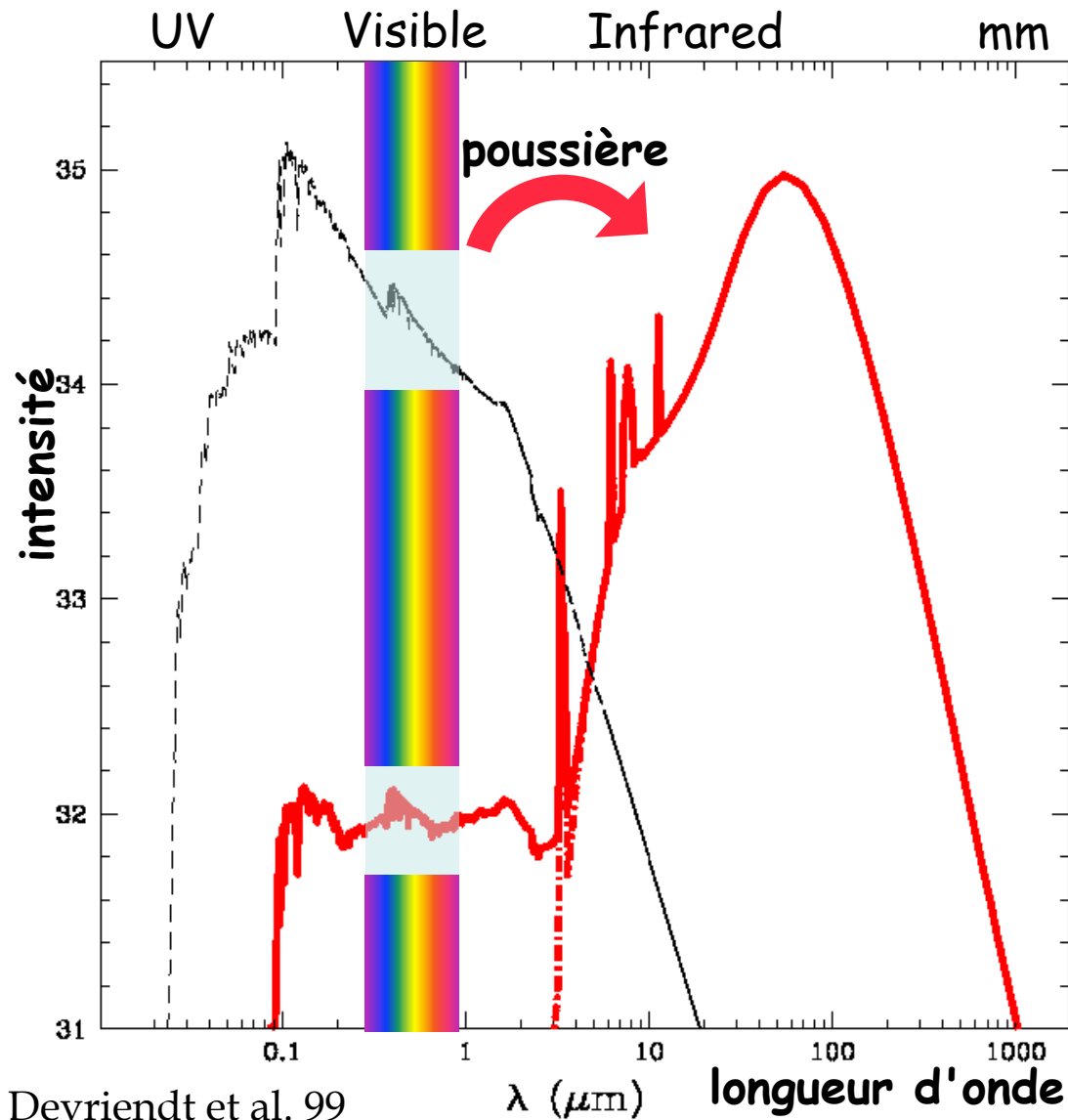
Polar

Polar

Âge univers: 1,5 milliard d'années
12,3 milliards d'années dans le passé !

2000 soleils /an = 1 étoile / 4 heures !

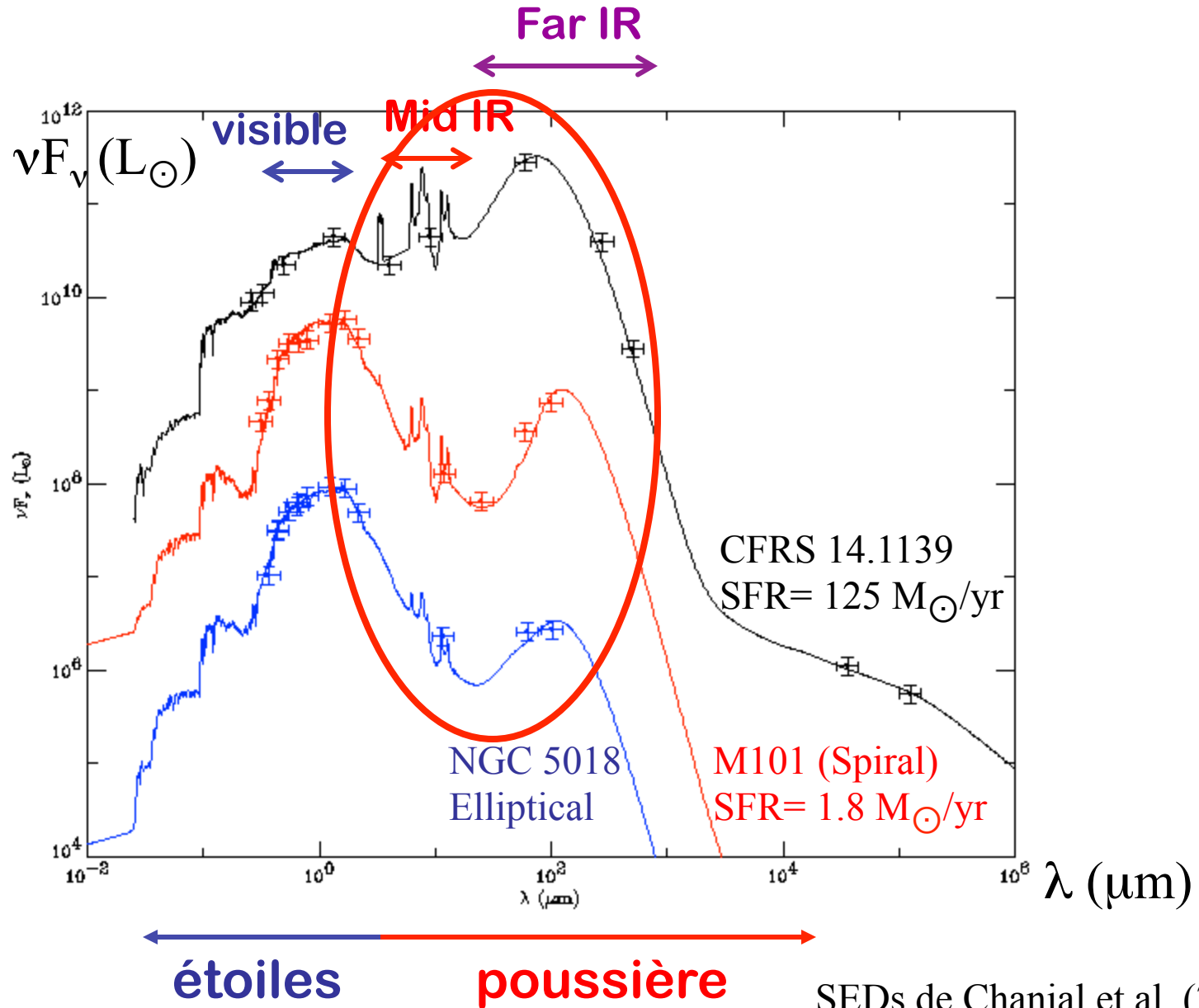
Emission infrarouge des galaxies



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 .

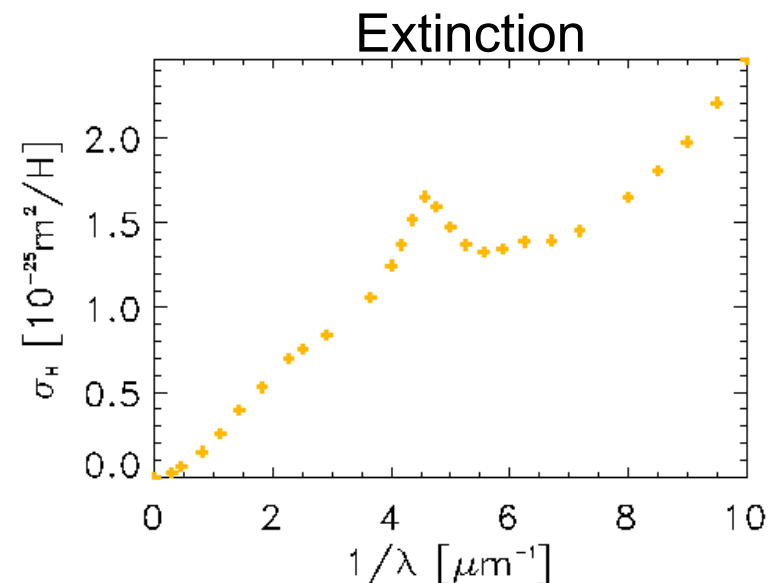
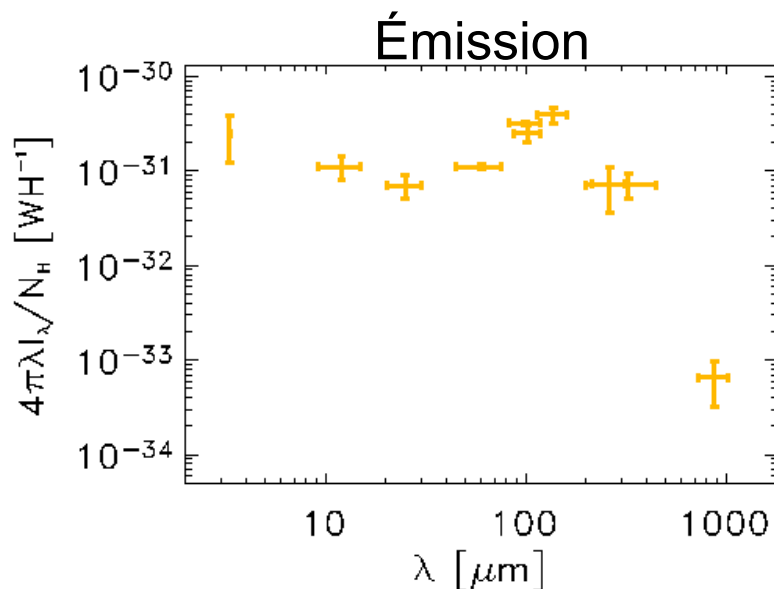
SEDs: Elliptique, Spirale et Starburst



- 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)

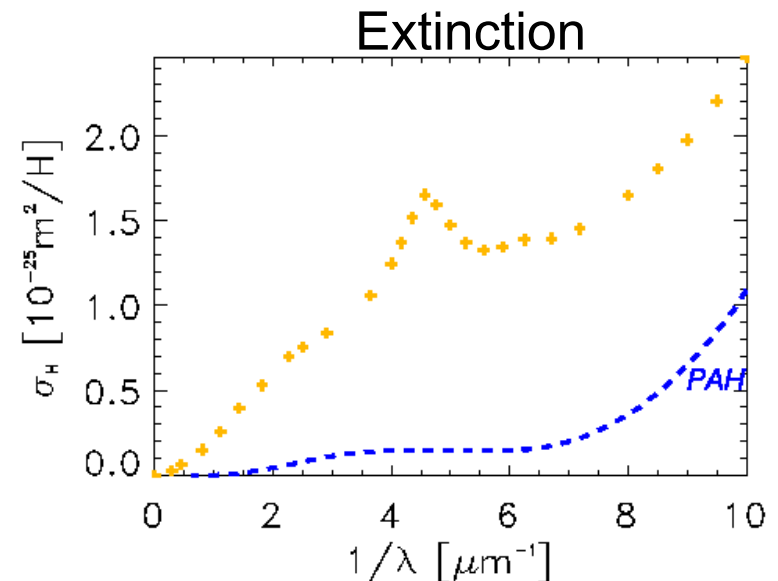
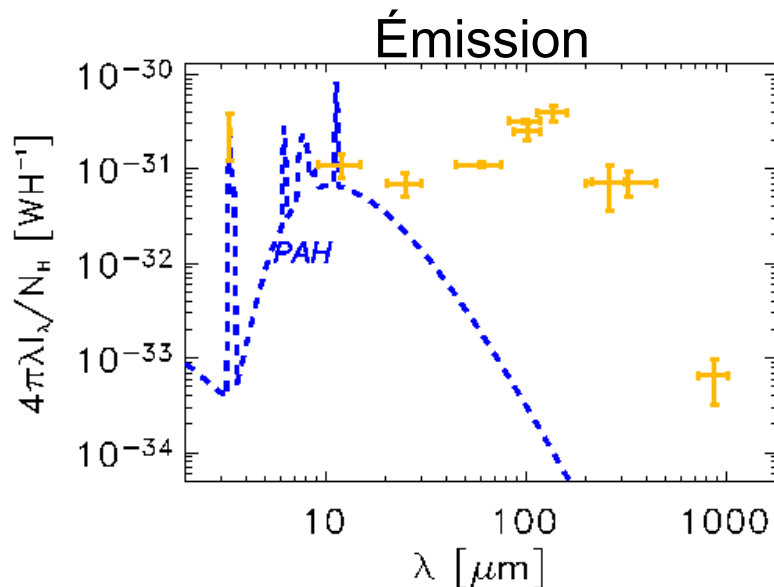
Origine de la loi d'extinction et émission associée (Désert et al 90)

- 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)



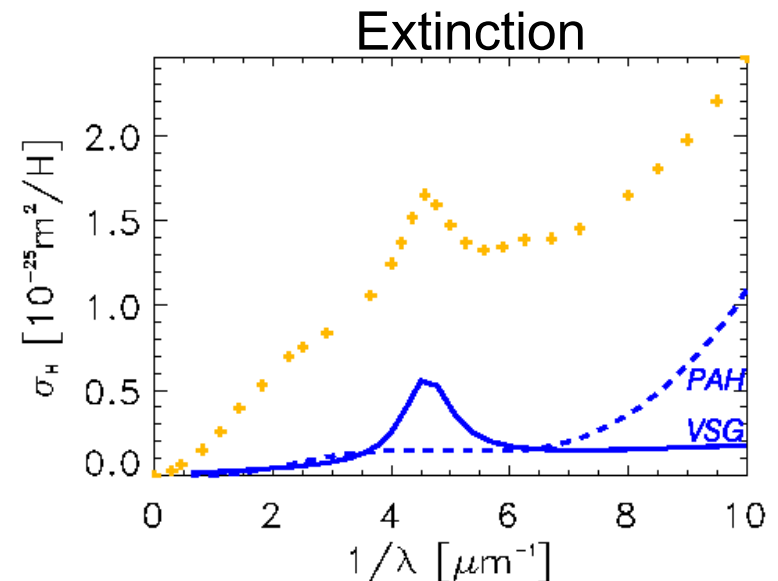
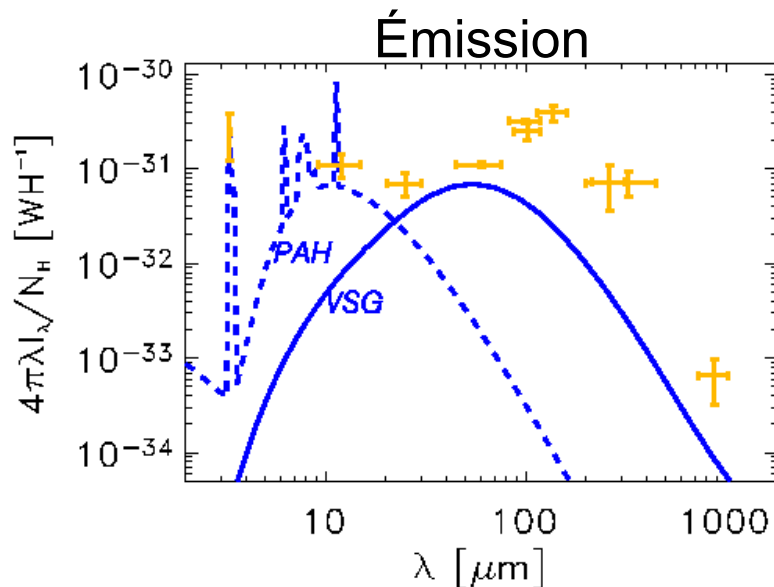
Origine de la loi d'extinction et émission associée (Désert et al 90)

- 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)



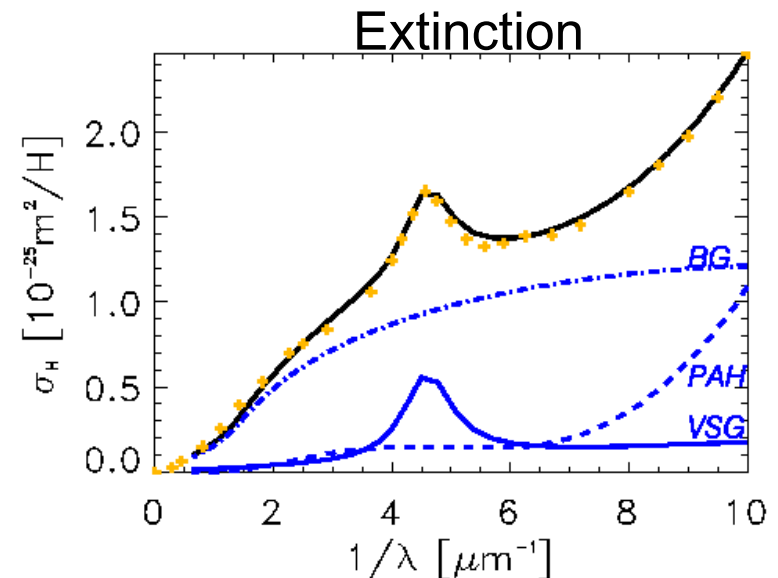
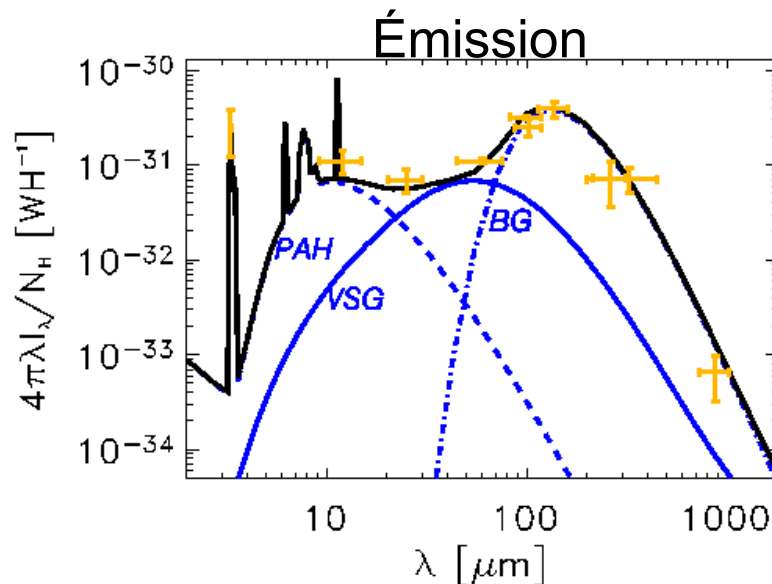
Origine de la loi d'extinction et émission associée (Désert et al 90)

- 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)

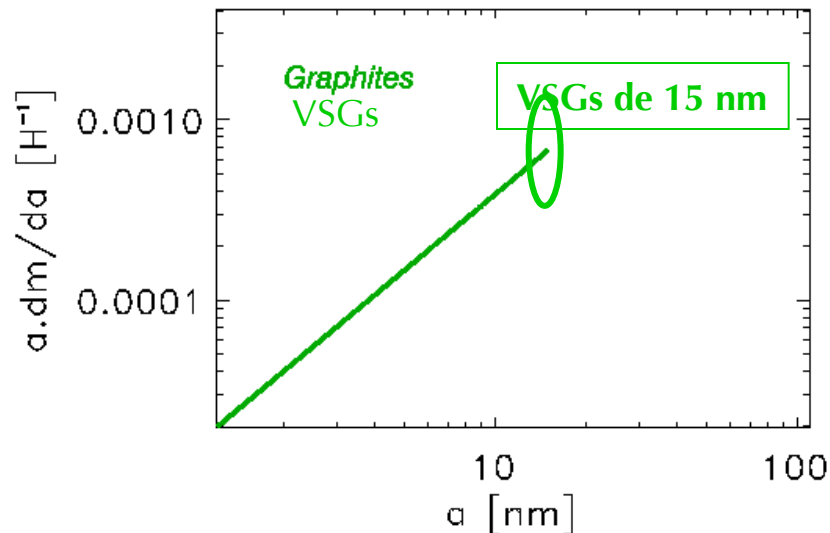


3 Distribution en tailles des grains

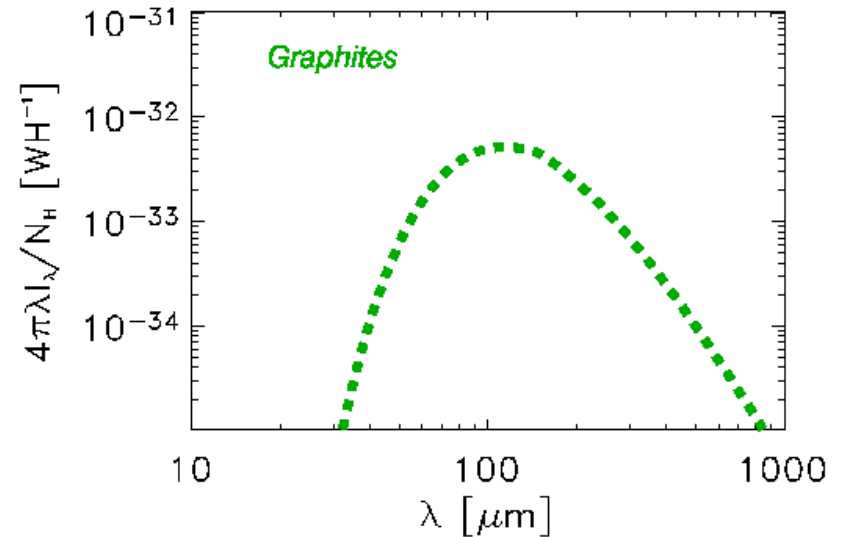
Grains carbonés & silicates :

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

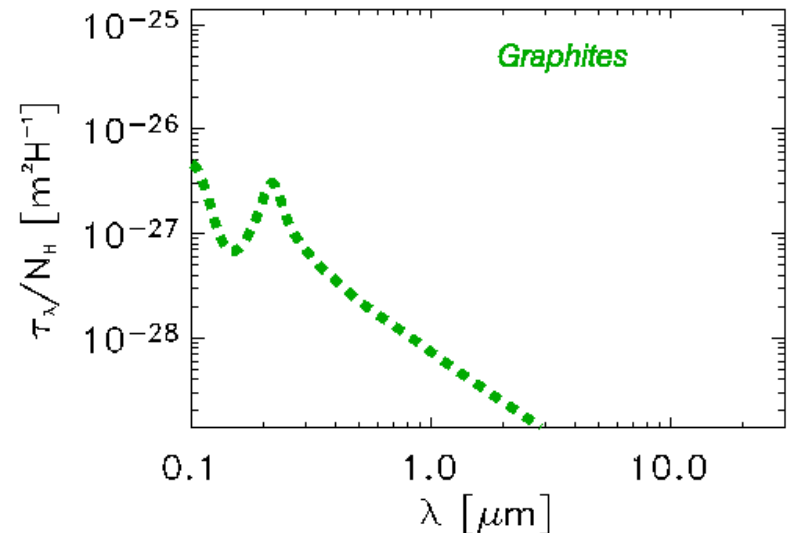
Distribution de taille



Émission



Extinction

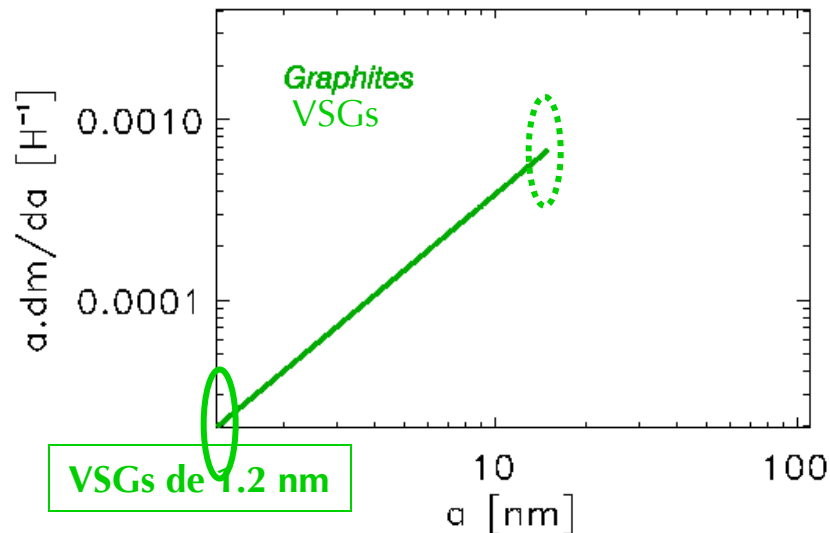


3 Distribution en tailles des grains

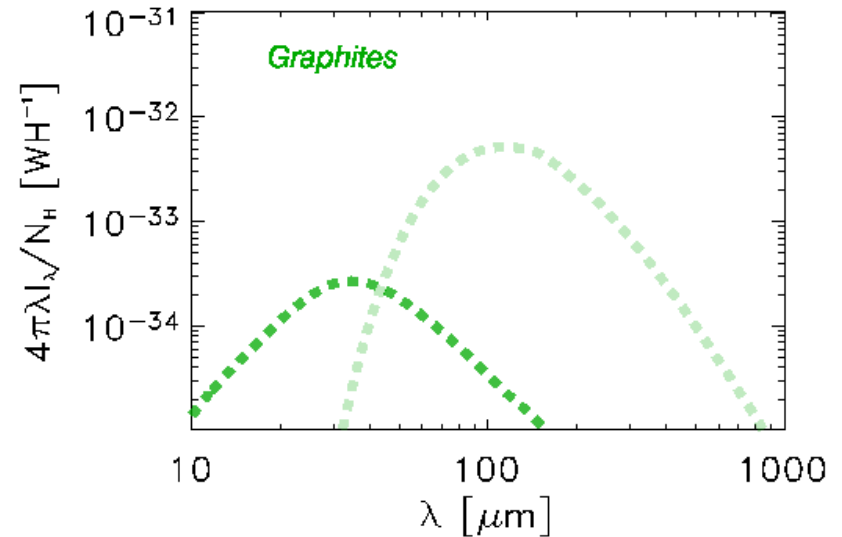
Grains carbonés & silicates :

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

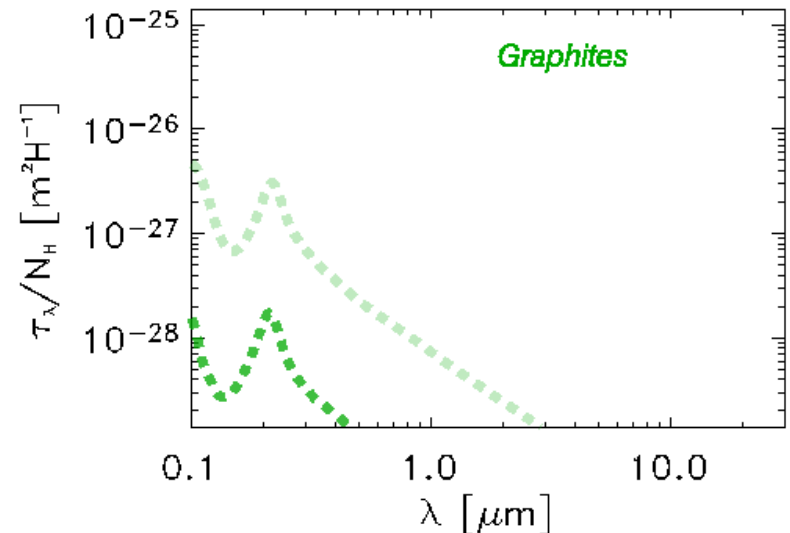
Distribution de taille



Émission



Extinction

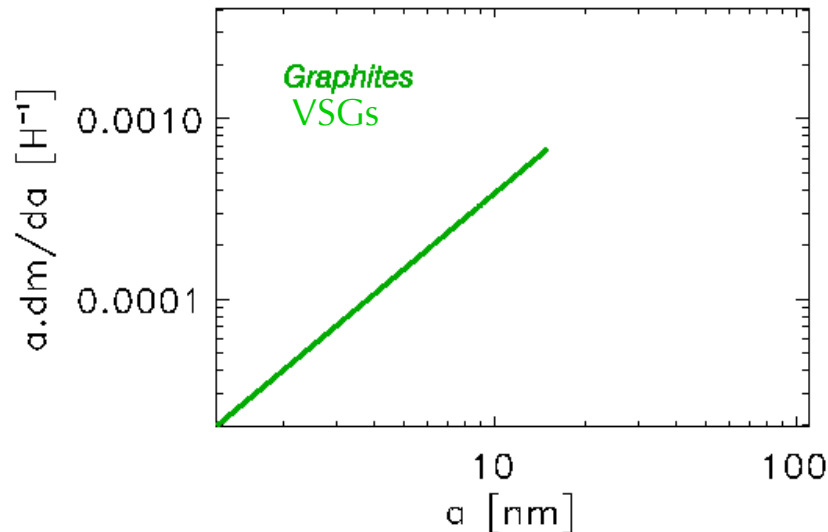


3 Distribution en tailles des grains

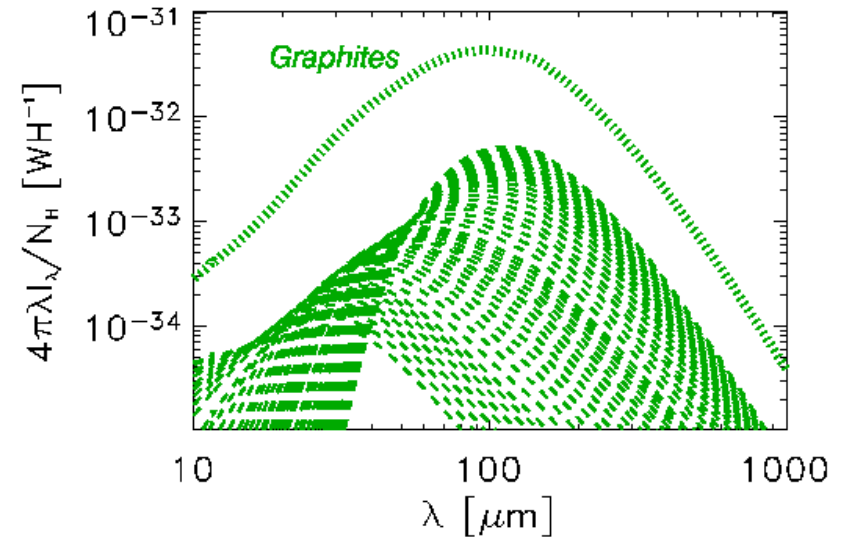
Grains carbonés & silicates :

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

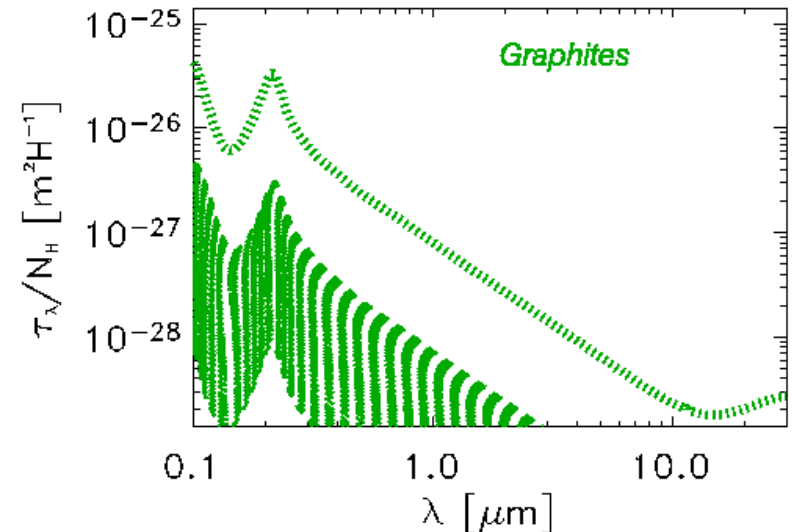
Distribution de taille



Émission



Extinction

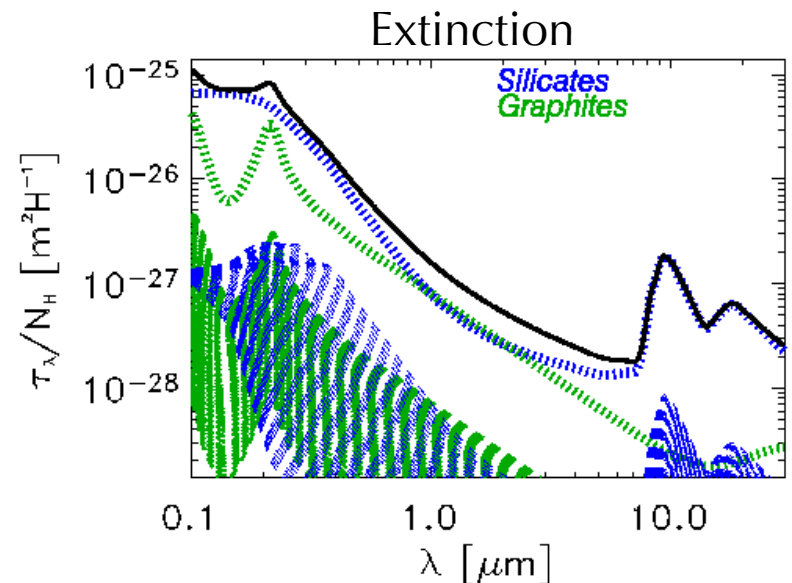
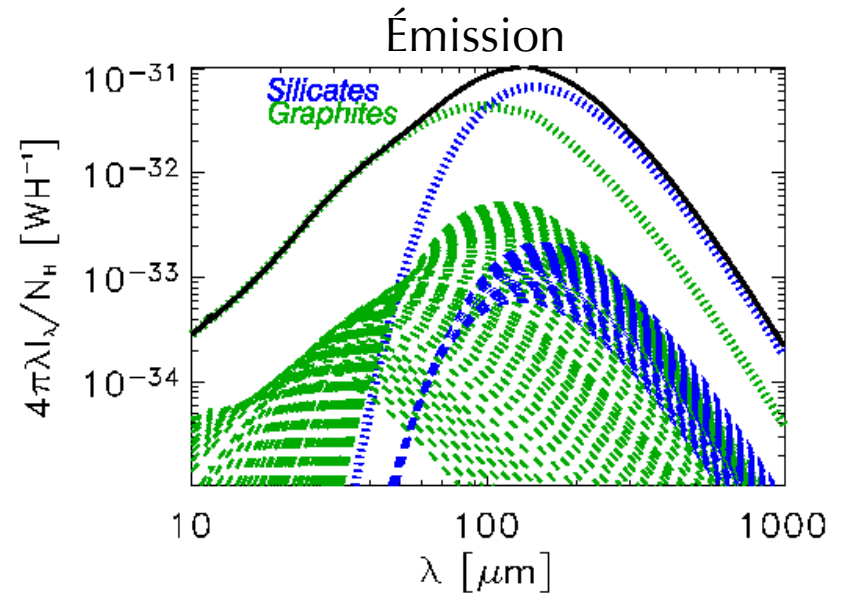
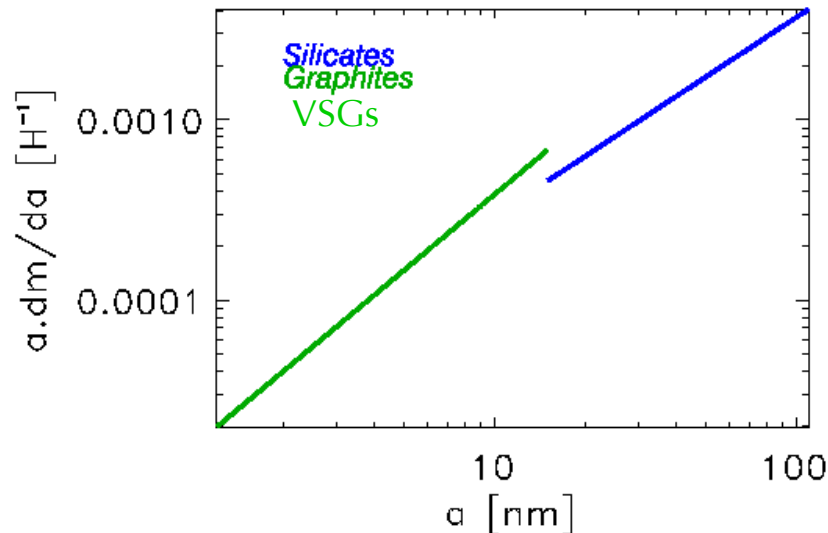


3 Distribution en tailles des grains

Grains carbonés & silicates :

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

Distribution de taille

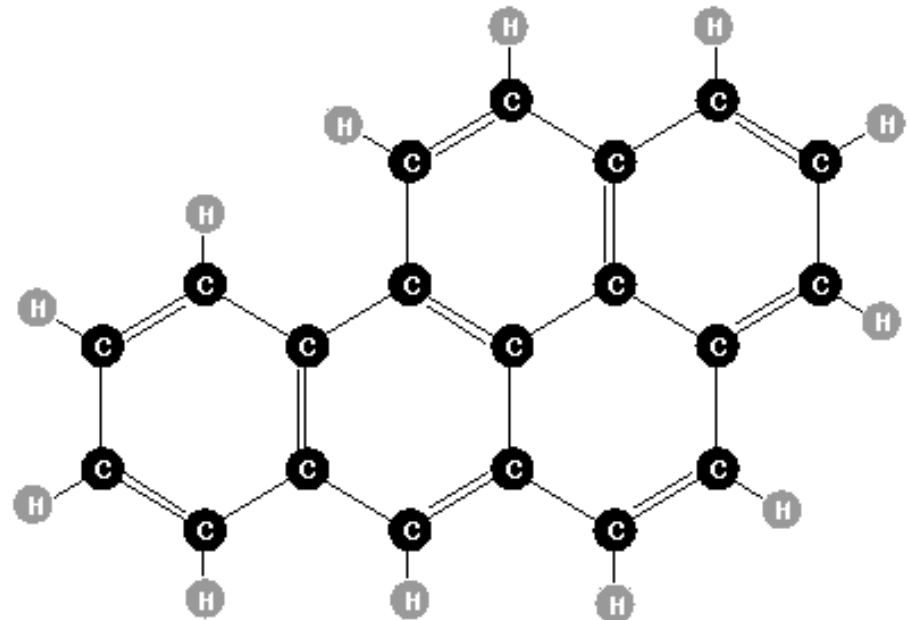
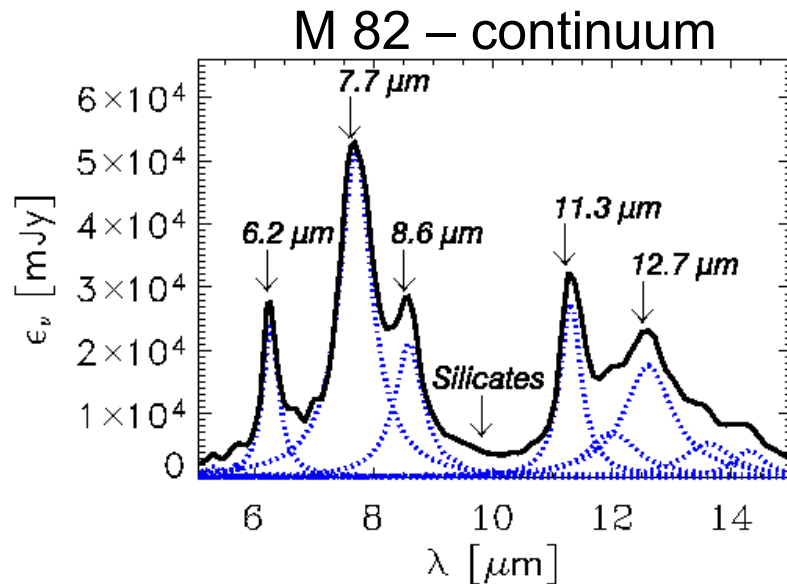
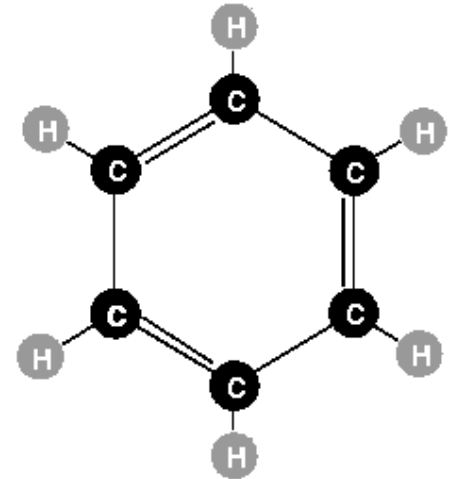


Les PAHs

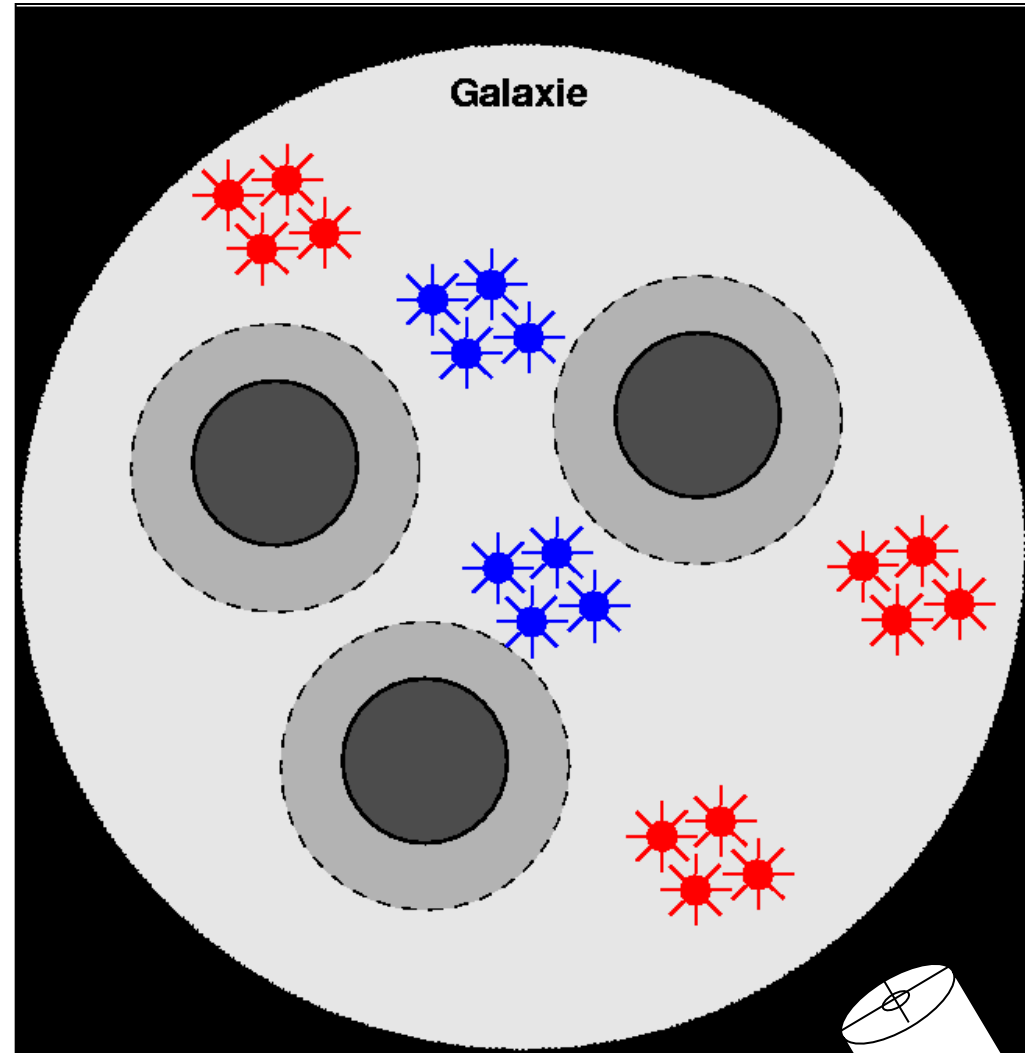
Explication des bandes infrarouges, universelles

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

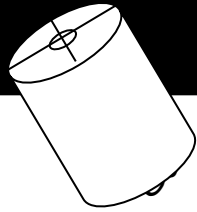
(Léger & Puget, 1984 ; Allamandola, 1985)



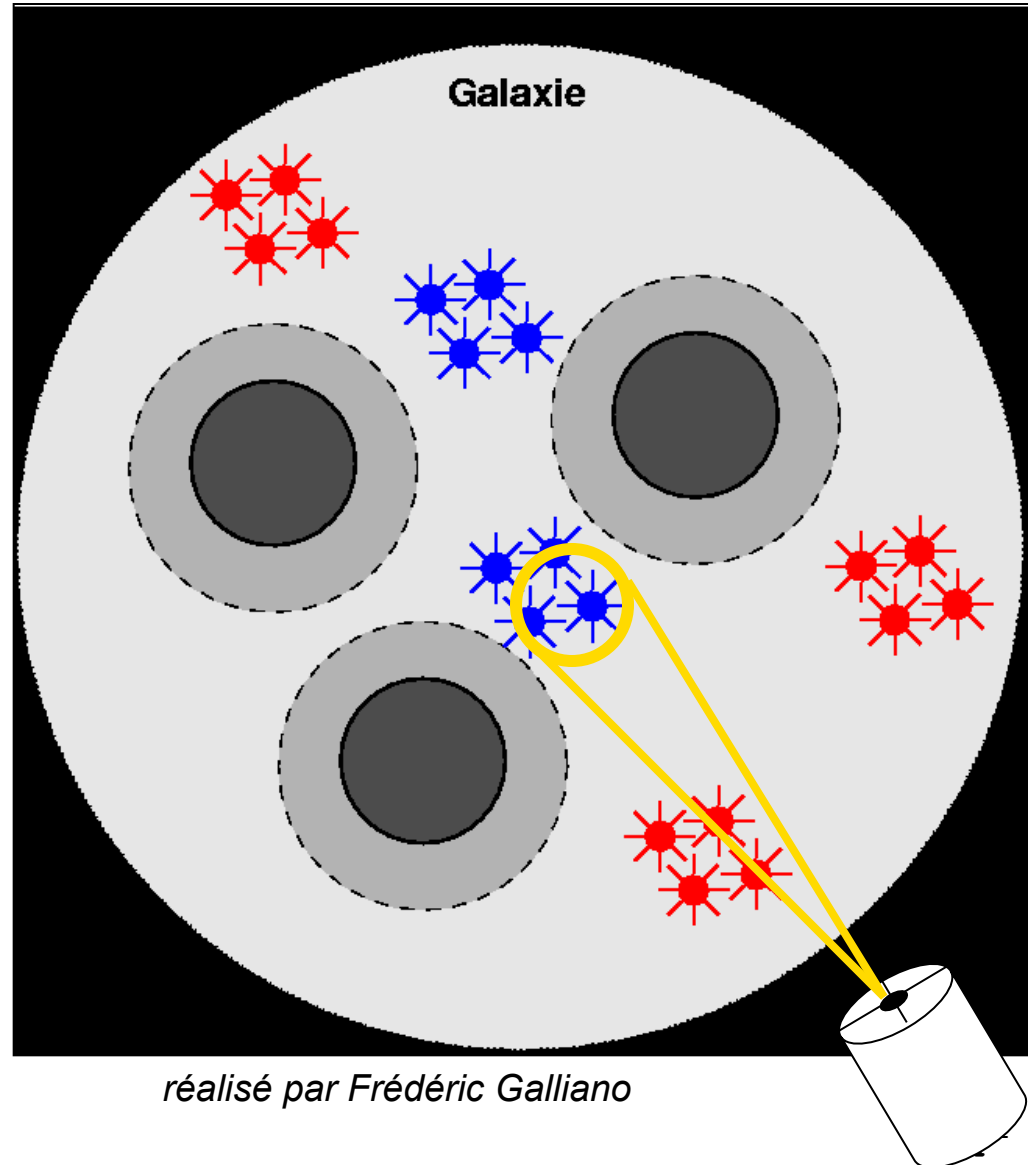
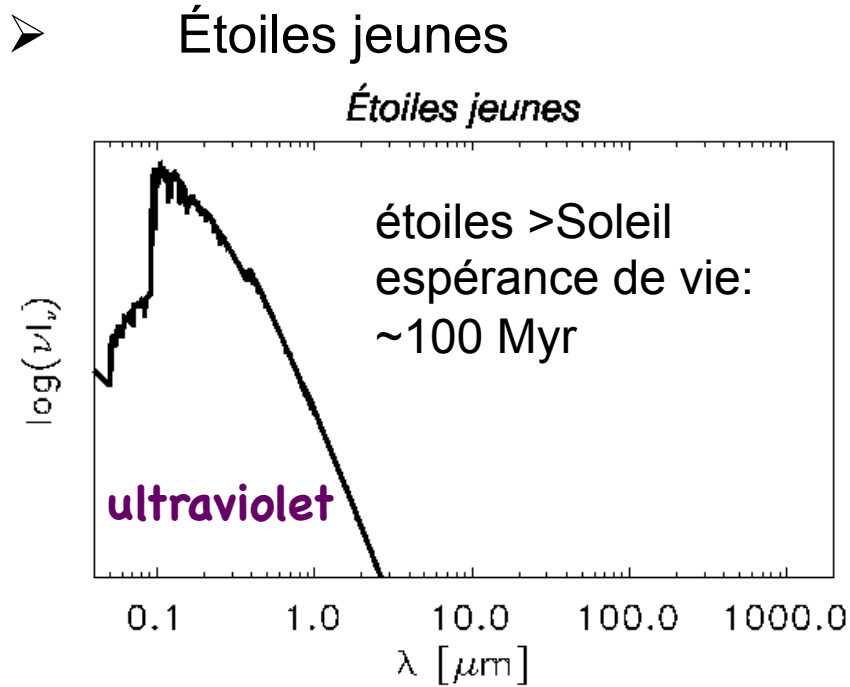
Distribution d'énergie rayonnée par une galaxie



réalisé par Frédéric Galliano



Distribution d'énergie rayonnée par une galaxie

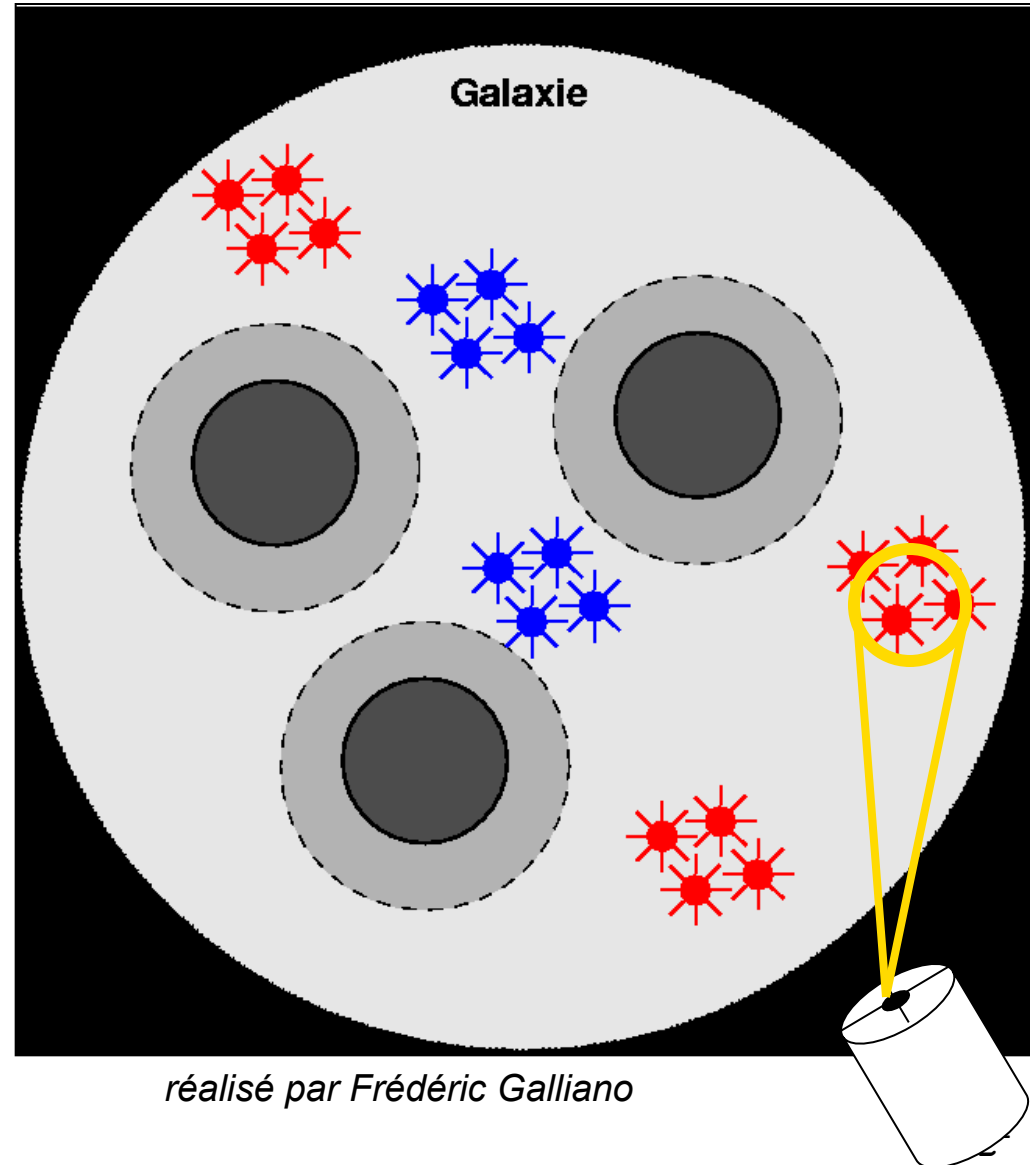
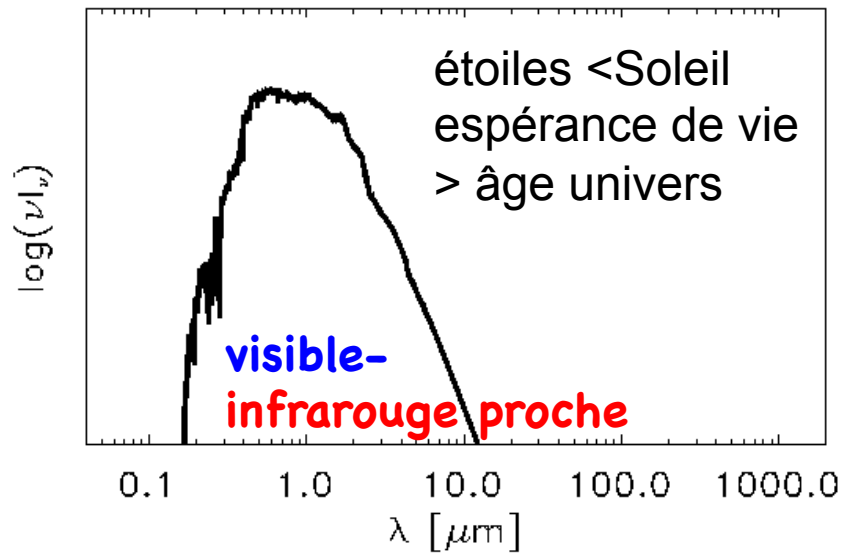


Distribution d'énergie rayonnée par une galaxie

➤ Étoiles jeunes

➤ Étoiles vieilles

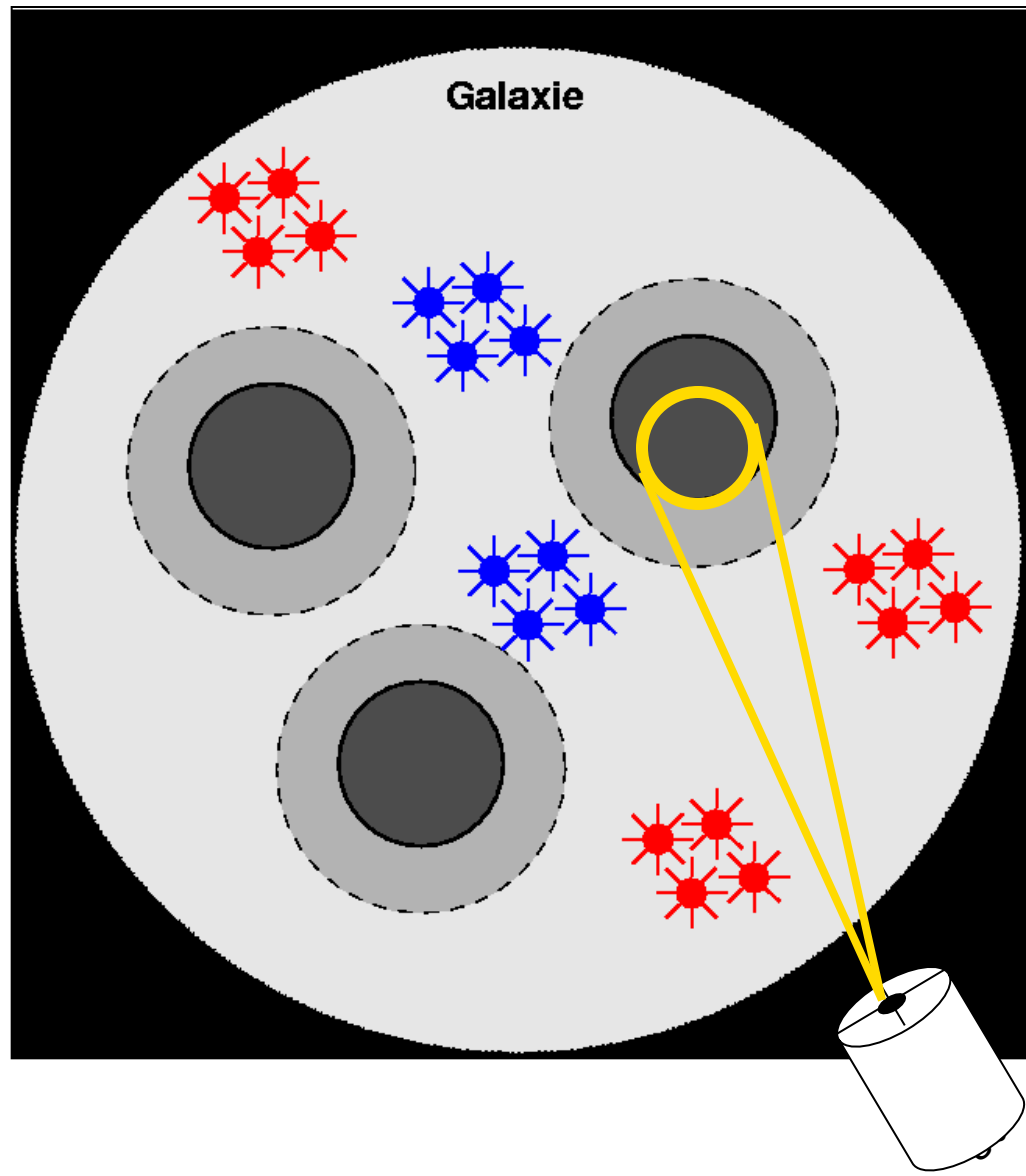
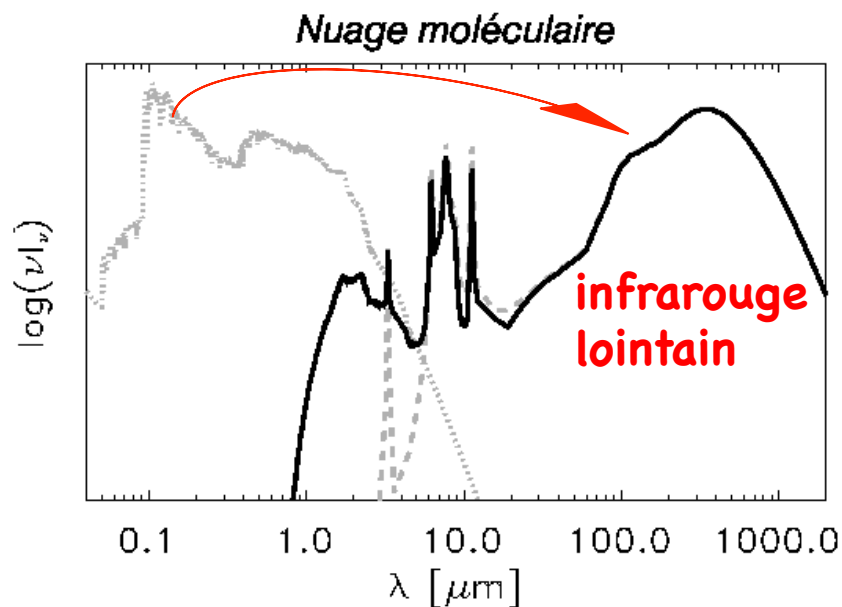
Étoiles vieilles



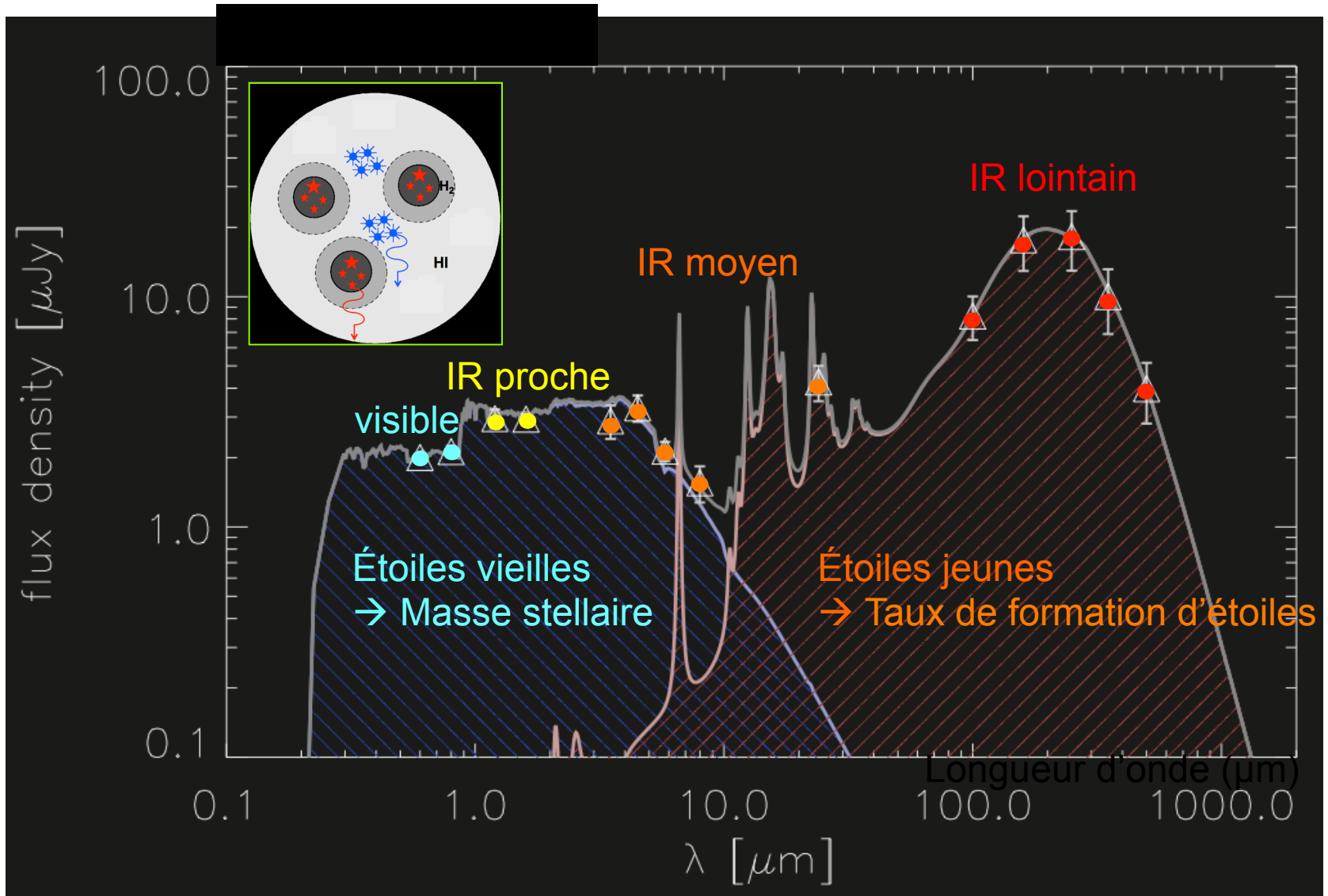
réalisé par Frédéric Galliano

Distribution d'énergie rayonnée par une galaxie

- Étoiles jeunes
- Étoiles vieilles
- Nuages moléculaires denses où naissent les étoiles



Décoder la lumière intégrée sur toute une galaxie

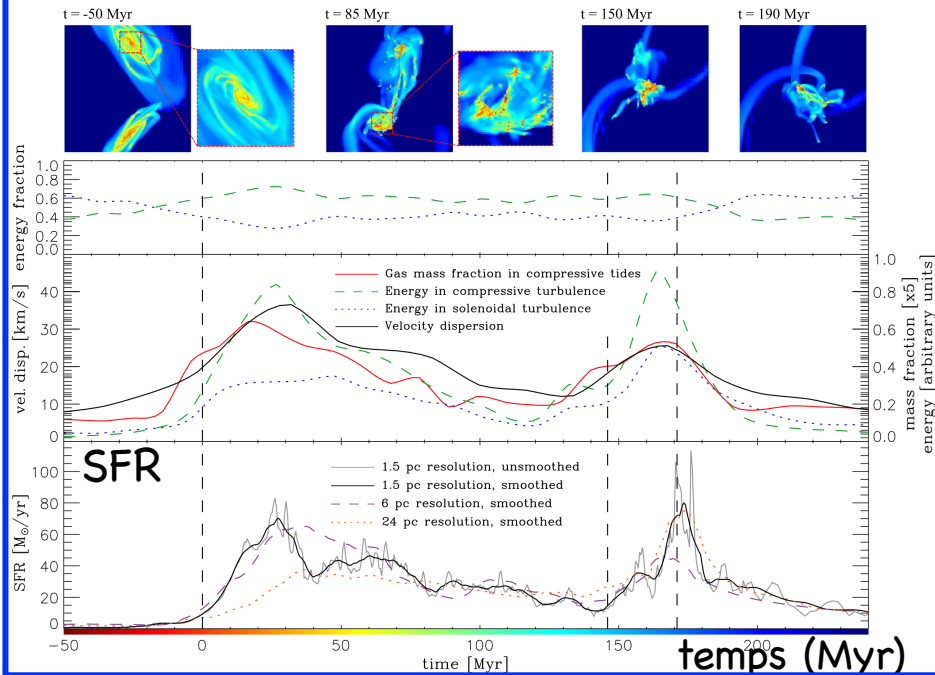


Starbursts provoqués par la fusion de galaxies: compression efficace dans les galaxies peu riches en gaz interstellaire

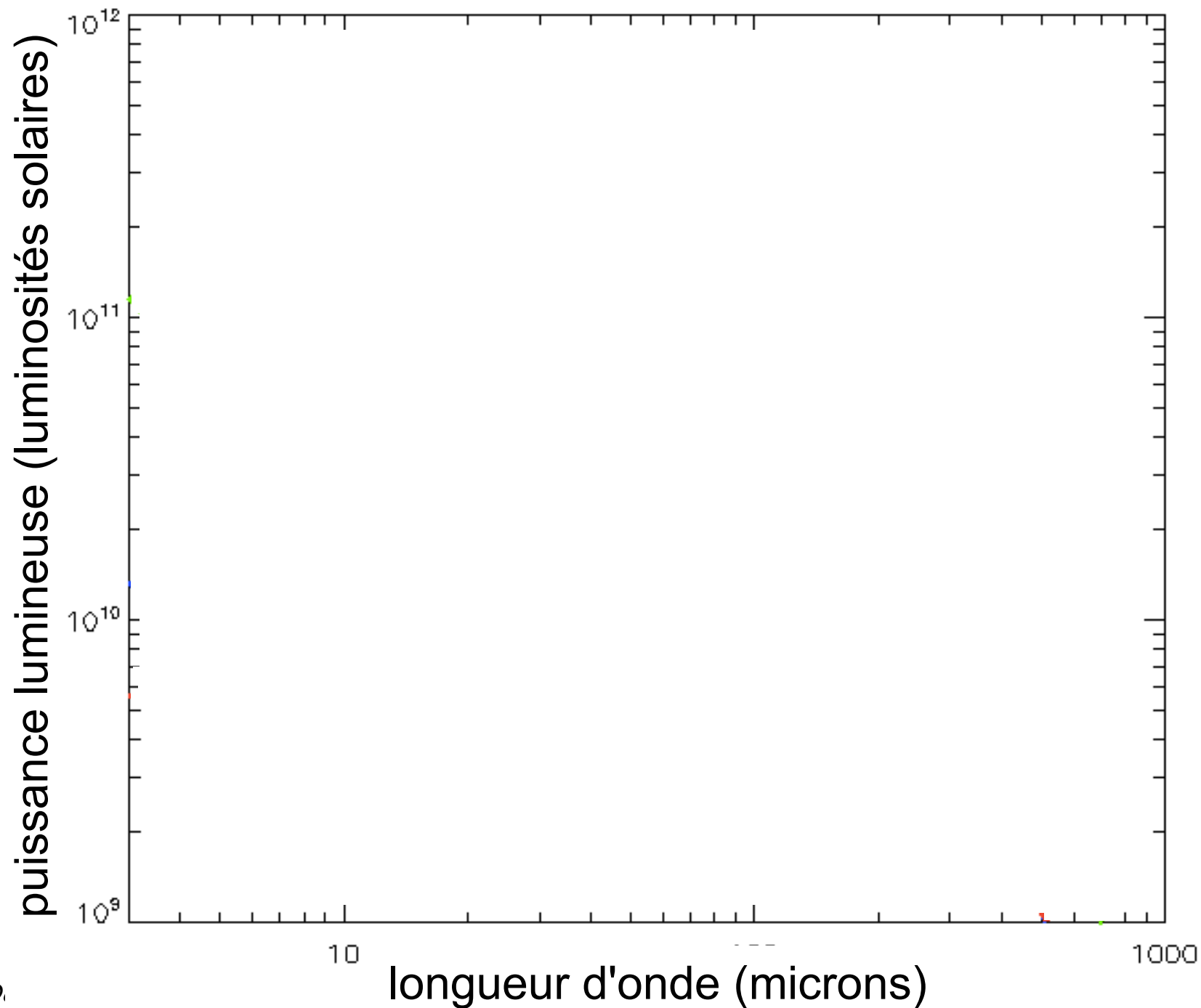
dispersion de vitesse (turbulence)

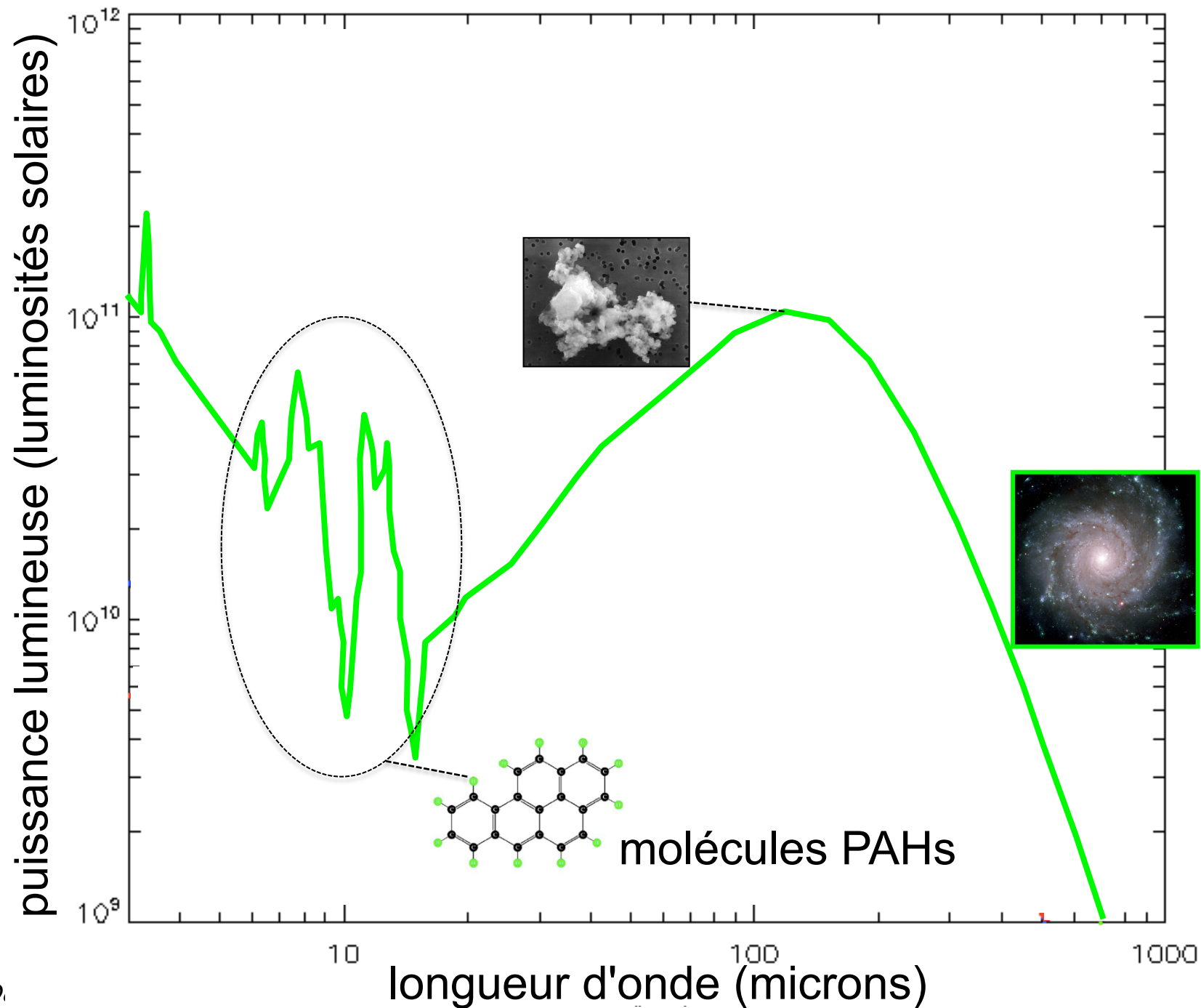
galaxie isolée: 5 km/s

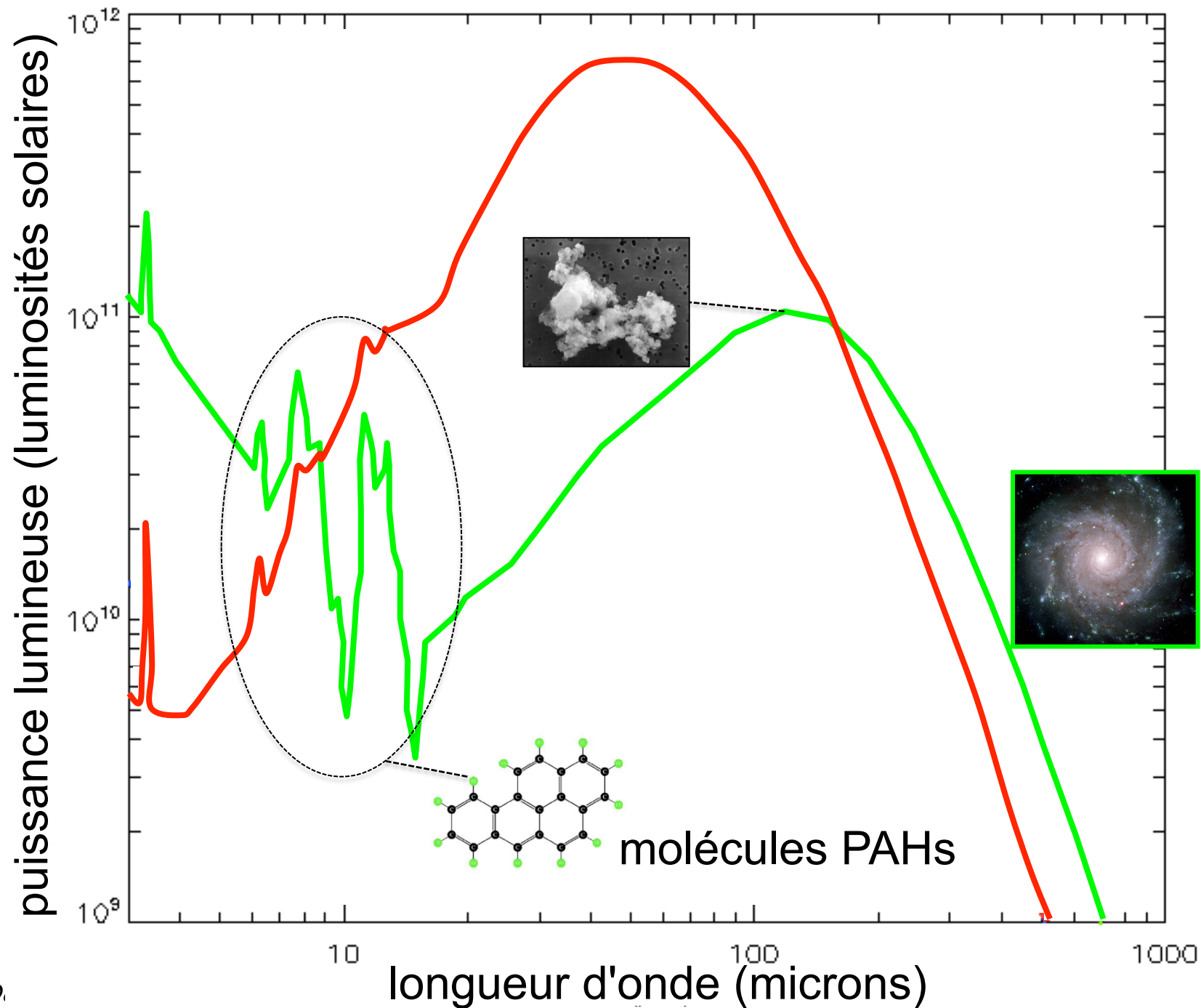
fusion de galaxies: 50 km/s

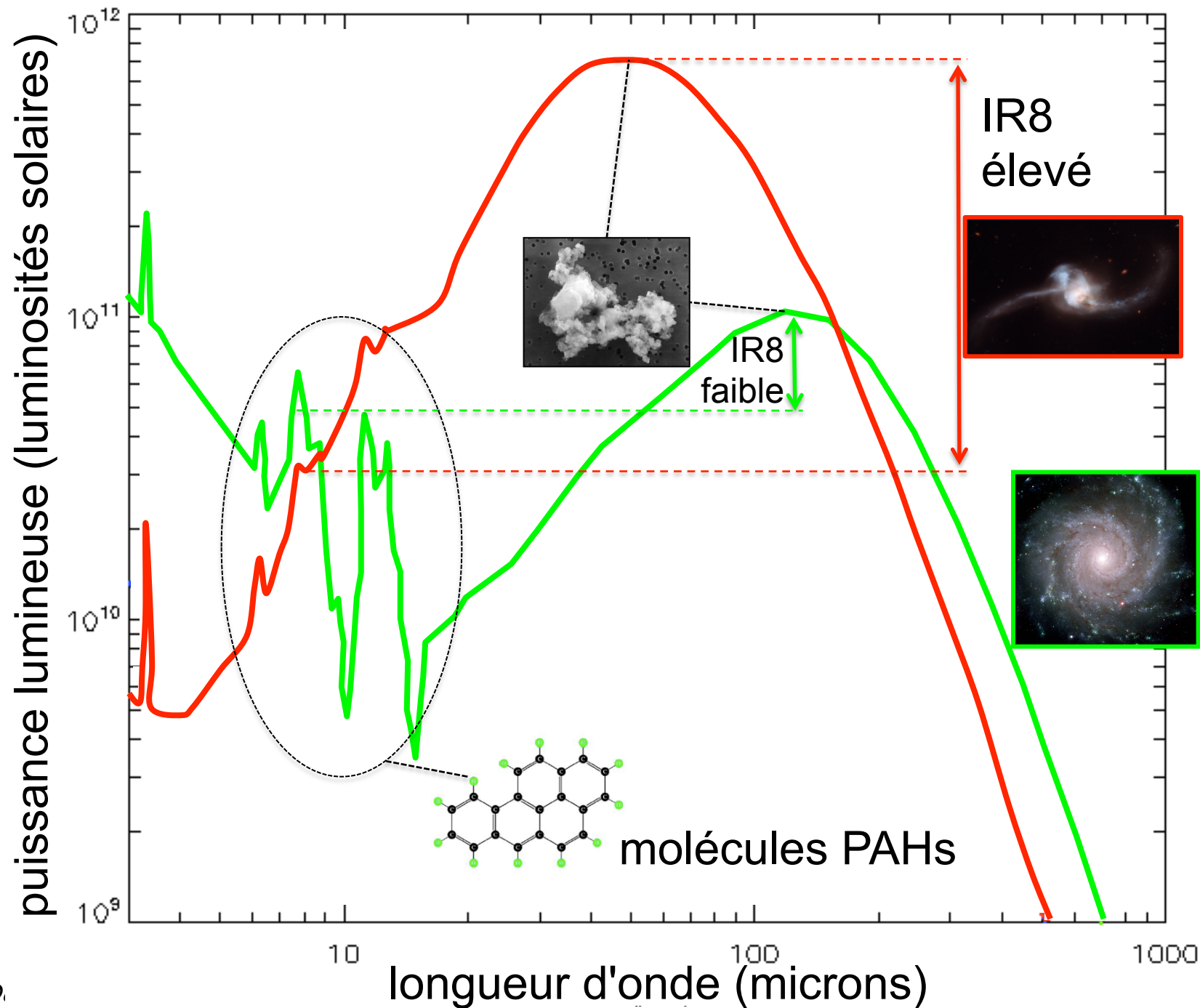


Renaud, Bournaud +2014
Prix La Recherche 2015

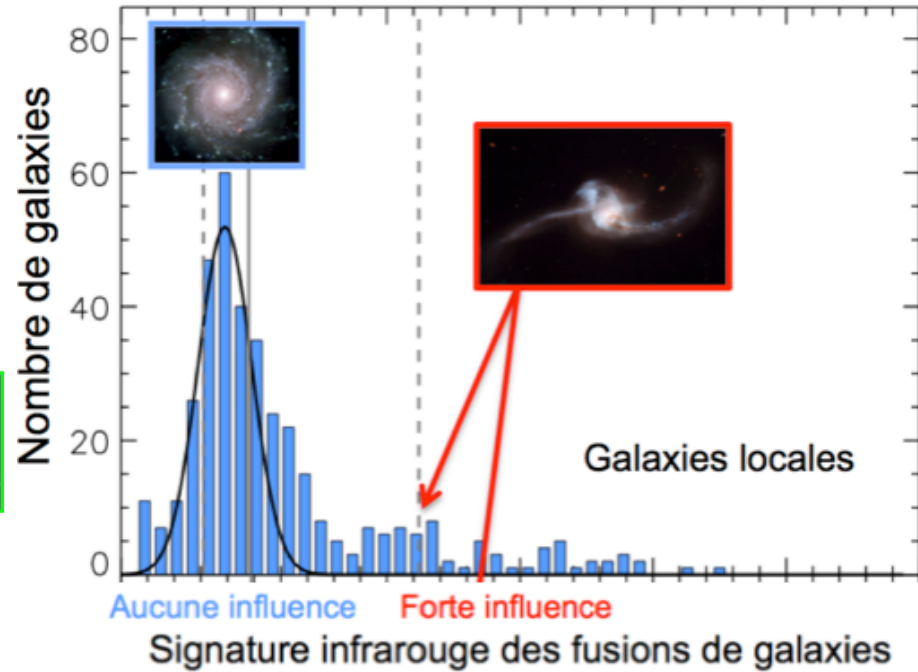
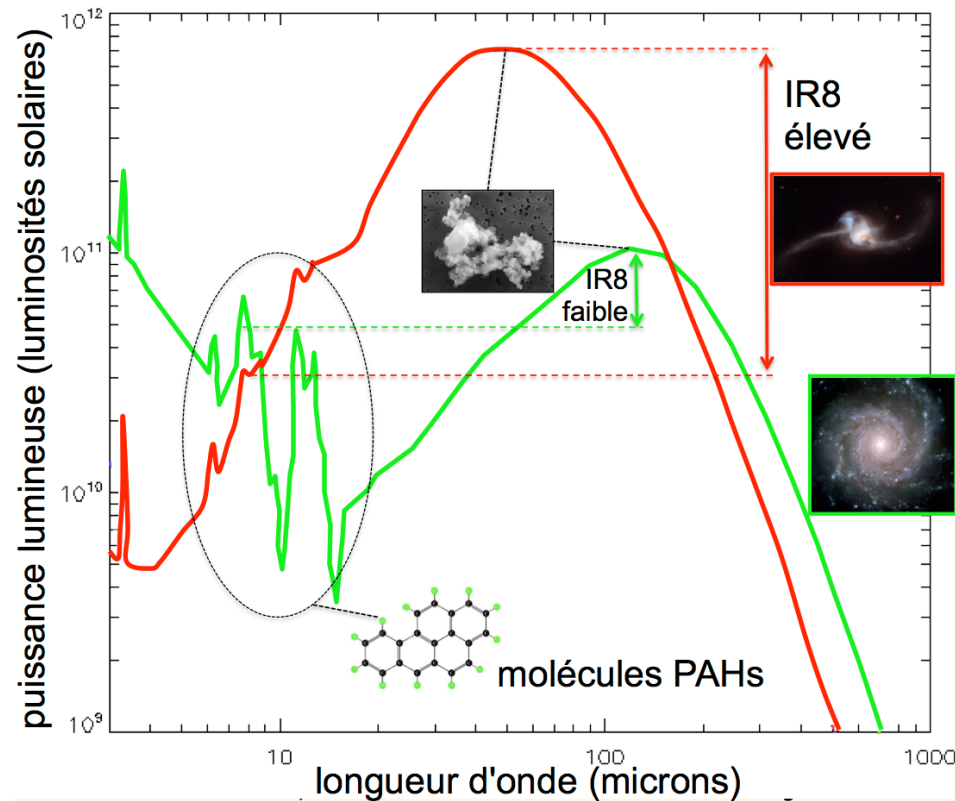








La signature infrarouge des starbursts



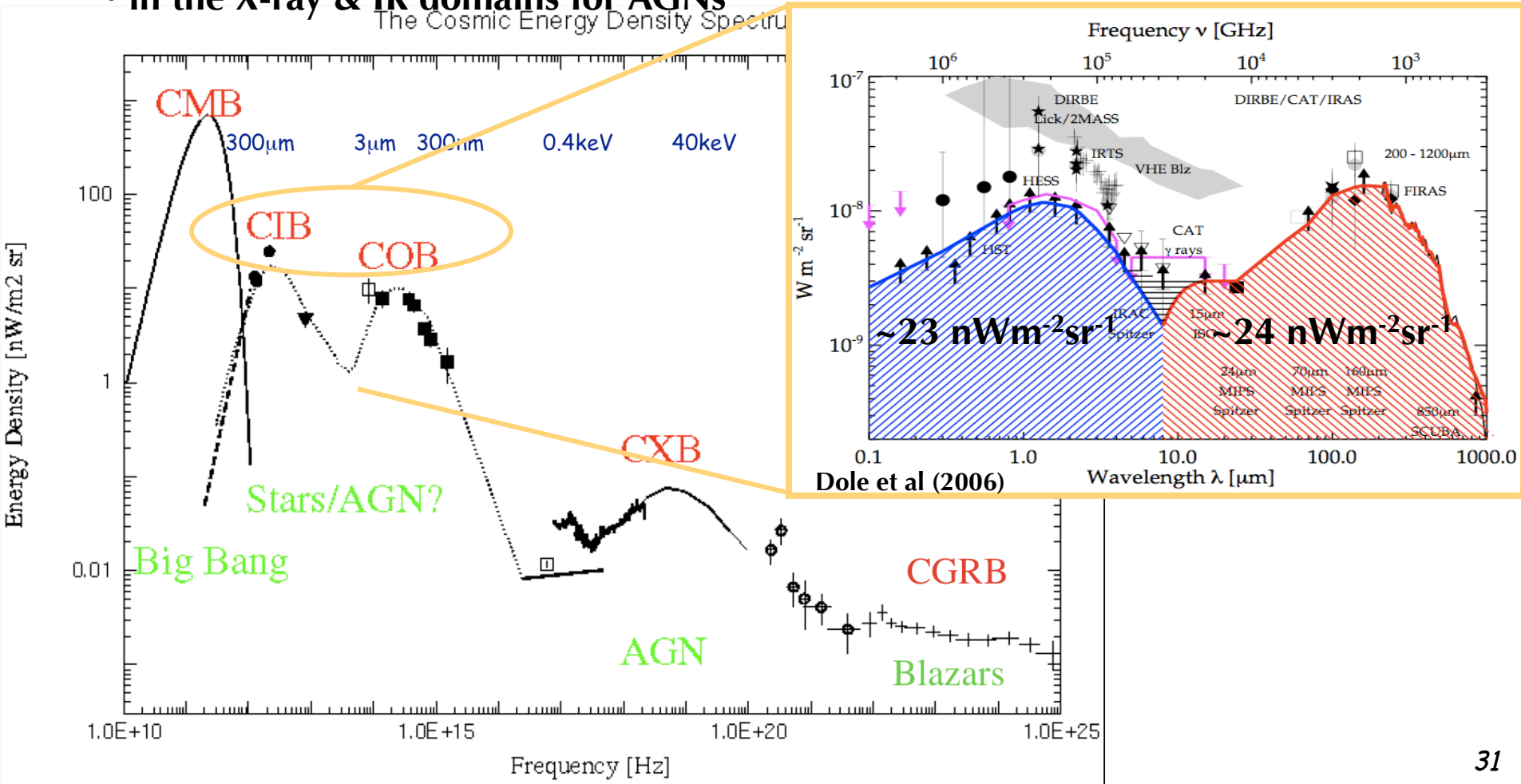
Global energetics: fossil memory (metals) vs background light

2 main sources of light after Big Bang-CMB:

nucleosynthesis (stars) & accretion (black holes)

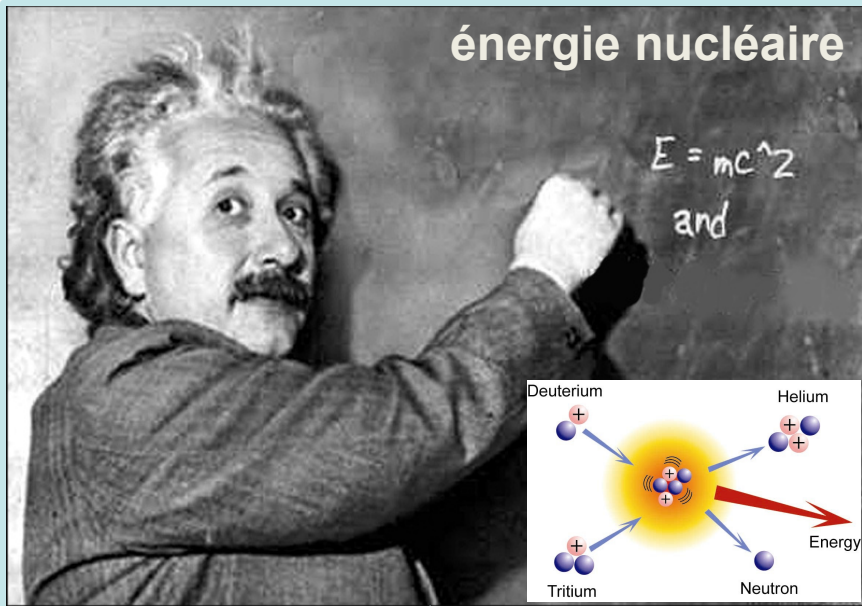
Their global energetic budget is well constrained by the Cosmic Backgrounds

- in the UV to IR for star formation
- in the X-ray & IR domains for AGNs

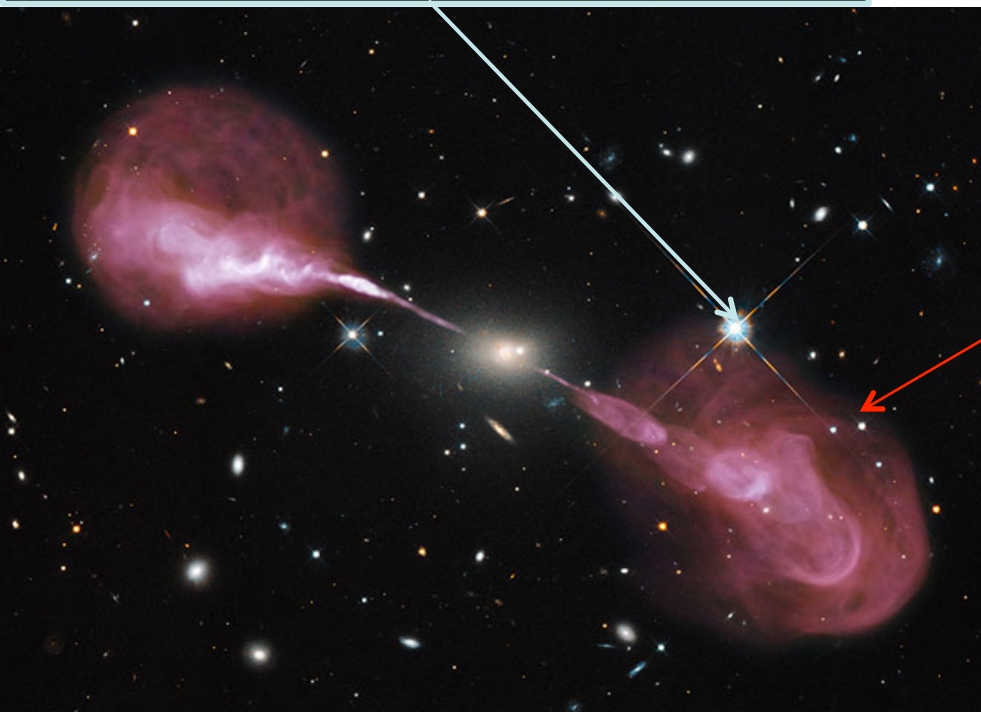
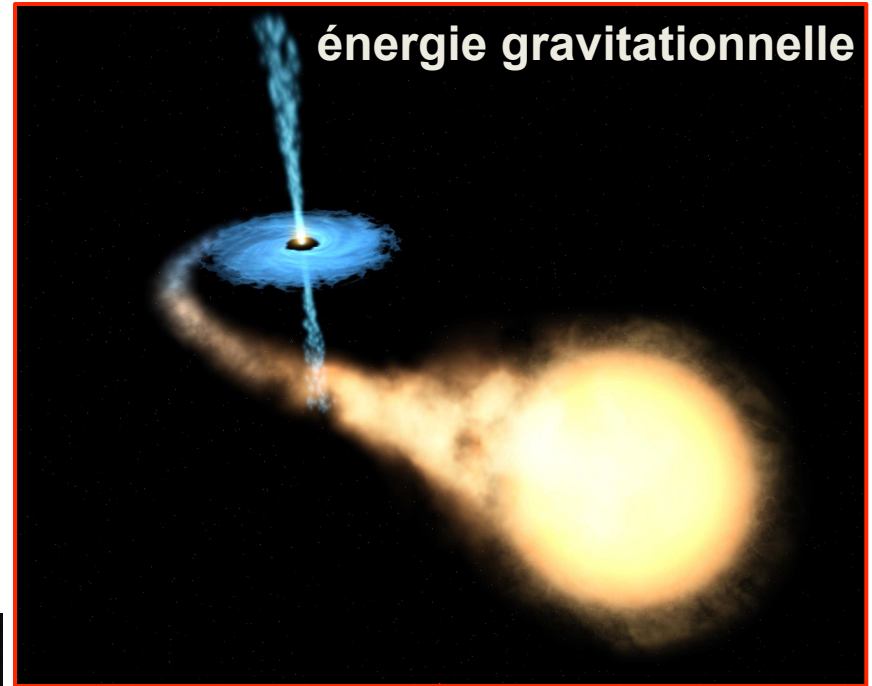


Les 2 sources d'énergie lumineuse dans l'univers

énergie nucléaire



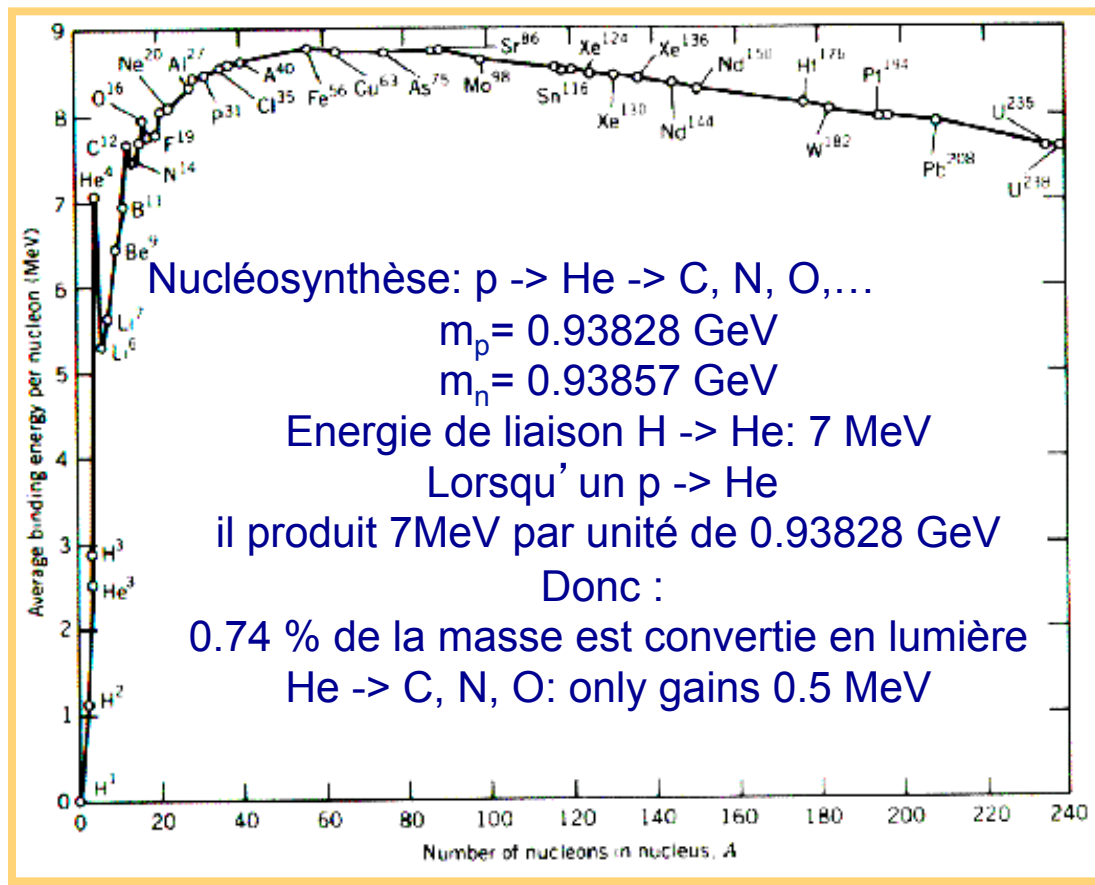
énergie gravitationnelle



Budget énergétique

L'énergie de liaison par nucléon de l'hélium est de 7MeV/nucléon. Celle du fer-56, le noyau d'atome le plus « soudé » n'est pas beaucoup plus élevée, avec 8.8 MeV/nucléon.

Une étoile passe la plus grosse fraction de son temps à convertir de l'H en He. Cette réaction est la principale source de lumière stellaire dans l'univers.



Globalement le budget de la nucléosynthèse est :

Energie rayonnée = $0.007 \times \text{masse de « métaux »} \times c^2$ [Joules]

par unité de temps, quand dM « métaux » sont produits en dt :

Luminosité rayonnée = $d [0.007 M_Z c^2] / dt$

En réalité les « métaux » sont ici constitués de l'He non primordial et des métaux classiques (C,N,O,Fe principalement).

La masse du proton et du neutron est de ~ 0.94 GeV, donc l'énergie de liaison rayonnée au cours de la fusion d'un proton pour donner de l'He est de $7\text{MeV}/0.94\text{GeV}=\mathbf{0.74\%}$ de sa masse ($m_p= 0.93828$ GeV, $m_n= 0.93857$ GeV), i.e. $E = dM c^2$.

La plupart de l'hélium est d'origine primordiale mais une partie a été générée par la nucléosynthèse stellaire. La valeur primordiale est de $Y_p=M_{\text{He}}/M_{\text{totale}}=0.24$, mais on observe dans le Soleil $Y_{\odot}=0.28$, donc **DY=0.04** ont été générés par les étoiles.

Dans le voisinage solaire, la **métallicité est de $Z=M_{\text{métaux}}/M_{\text{totale}}=0.02$** avec :
~60% d'oxygène (8 meV), ~7% de fer (8.6 MeV) et le reste de C,N principalement (7.5 MeV),
ce qui fait un taux équivalent de ~ 7.9 MeV , i.e. **0.84 %** (/0.94GeV).

Globalement, sur 1 kg de masse stellaire dans l'univers local, il y a donc 4% d'He non primordial et 2% de métaux, qui ont donné lieu à de la lumière. La quantité totale de lumière ainsi produite est:

He: 4% de 1 kg sont convertis en lumière avec une efficacité de $0.74\%= 30 \text{ gr} \times c^2$.

Métaux: 2% de 1 kg sont convertis en lumière avec une efficacité de $0.84\%= 17 \text{ gr} \times c^2$.

Globalement, $0.0074 \times 0.04 + 0.0084 \times 0.02 = \mathbf{0.0464\%}$ de la masse est convertie en lumière

1 Joule = $1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$, donc on a $46.4 \times 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2 = \mathbf{4.2 \times 10^{13} \text{ Joules/kg d' étoiles}}$

Validation du raisonnement à l'échelle de la Voie Lactée

Globalement: 0.0464% de la masse est convertie en lumière ($E=mc^2$)

Dans le cas de la Voie Lactée: $M_*=7.8 \times 10^{10} M_\odot \rightarrow 6.5 \times 10^{54}$ Joules ($M_\odot=2 \times 10^{30}$ kg)

Si on suppose que cette énergie a été produite en continu sur les 12 Gyr d'âge de la V.L.:

$$L = 6.5 \times 10^{54} \text{ Joules} / 31\,556\,926 \text{ sec} = 1.72 \times 10^{37} \text{ W} = 4.55 \times 10^{10} L_\odot \quad (L_\odot = 3.826 \times 10^{26} \text{ W})$$

Or $L_{\text{bande I}}(\text{V.L.}) = (3.8 \pm 0.6) \times 10^{10} L_\odot$!!! (Flynn et al. 2006, MNRAS 372, 1149)

Le fond diffus cosmologique

A l'échelle de l'univers:

1. Mesurer la quantité d'He et de métaux par unité de volume (Mpc^3) de l'univers local:

$$\rho_{\text{métaux}} \sim 2.5 \times 10^{-30} \text{ kg m}^{-3} \text{ et } \Delta Y = 0.04 = 2Z \Rightarrow \rho_{\text{He}} \sim 5 \times 10^{-30} \text{ kg m}^{-3}$$

ETOILES

Les baryons sous la forme d'étoiles (+ restes stellaires) constituent une proportion d'étoiles (+ restes stellaires) de:

$$\Omega_{\text{bulbes}} = \rho_{\text{bulbes}} / \rho_c \sim 0.002600 \text{ h}^{-1} \quad (\text{Fukugita, Hogan, Peebles 1998})$$

$$\Omega_{\text{disques}} = \rho_{\text{disques}} / \rho_c \sim 0.000860 \text{ h}^{-1}$$

$$\Omega_{\text{irrégulières}} = \rho_{\text{irrégulières}} / \rho_c \sim 0.000069 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{où: } \Omega = \rho / \rho_c \text{ avec } \rho_c = 9.47 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3} = 3H_0^2 / (8\pi G)$$

$$(H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}; G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}; h = H_0 / 100 = 0.71)$$

$$\rho_{\text{bulbes}} \sim 3.5 \times 10^{-29} \text{ kg m}^{-3}, \text{ avec } Z_{\text{bulbe}} \sim 2 \times Z_{\odot} = 0.04 \Rightarrow$$

$$\rho_{\text{bulbes}}^{\text{métaux}} \sim 14.0 \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_{\text{disques}} \sim 1.1 \times 10^{-29} \text{ kg m}^{-3}, \text{ avec } Z_{\text{disques}} \sim 1 \times Z_{\odot} = 0.02 \Rightarrow$$

$$\rho_{\text{disque}}^{\text{métaux}} \sim 2.3 \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_{\text{irrégulières}} \sim 0.09 \times 10^{-29} \text{ kg m}^{-3}, \text{ avec } Z_{\text{irrégulières}} \sim 0.02 \Rightarrow$$

$$\rho_{\text{irrégul}}^{\text{métaux}} \sim 0.2 \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}$$

$$\Rightarrow \rho_{* \text{ galaxies}}^{\text{métaux}} \sim 1.8 \times 10^{-30} \text{ kg m}^{-3}$$

MILIEU INTERGALACTIQUE

$$\text{Milieu intergalactique dans les amas de galaxies} = \text{milieu intra-amas: } \Omega_{\text{ICM}} = \rho_{\text{ICM}} / \rho_c \sim 0.0026 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{Où } Z_{\text{ICM}} = 0.3 \times Z_{\odot} = 0.006 \Rightarrow \rho_{\text{ICM}}^{\text{métaux}} \sim 2.1 \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}$$

$$\text{Milieu intergalactique dans les groupes de galaxies} = \text{milieu intra-groupes: } \Omega_{\text{groupes}} = \rho_{\text{groupes}} / \rho_c \sim 0.0056 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{Où } Z_{\text{ICM}} = 0.3 \times Z_{\odot} = 0.006 \Rightarrow \rho_{\text{groupes}}^{\text{métaux}} \sim 4.5 \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}$$

$$\Rightarrow \rho_{\text{intergalactique}}^{\text{métaux}} \sim 0.7 \times 10^{-30} \text{ kg m}^{-3}$$

$$\Rightarrow \rho_m (\text{métaux}) \sim 2.5 \times 10^{-30} \text{ kg m}^{-3}$$

The local cosmic metal density

- From previous considerations, we get:

$$\rho_Z = 25 \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}$$

- Calura & Matteucci (2004, MNRAS 350, 351) :

$$\begin{aligned}\rho_Z &= 9.37 \times 10^6 M_\odot \text{ Mpc}^{-3} \\ &= 9.37 \times 10^6 \times 1.989 \times 10^{30} / (3.0856 \times 10^{22})^3 \text{ kg m}^{-3} \\ \rho_Z &= 6.34 \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}\end{aligned}$$

- Mushotzky & Lowenstein (1997) :

$$\rho_Z = 1.4 \times 10^7 M_\odot \text{ Mpc}^{-3} = 9.5 \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}$$

- Zepf & Silk (1996) :

$$\rho_Z = 4 \times 10^7 M_\odot \text{ Mpc}^{-3} = 27 \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}$$

- Madau et al. (1996) :

$$\rho_Z = 5.4 \times 10^6 M_\odot \text{ Mpc}^{-3} = 3.7 \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}$$

- So globally, we get :

$$\rho_Z = [4 - 27] \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3} = [1.5 \pm 1.1] \times 10^{-30} \text{ kg m}^{-3}$$

Le fond diffus cosmologique

1. Mesurer la quantité d'He et de métaux par unité de volume (Mpc^3) de l'univers local: $\rho_{\text{métaux}} \sim 2.5 \times 10^{-30} \text{ kg m}^{-3}$ (cf diapo précédente) et $\Delta Y = 0.04 = 2Z \Rightarrow \rho_{\text{He}} \sim 5 \times 10^{-30} \text{ kg m}^{-3}$

2. En déduire la quantité totale de lumière produite par unité de volume :

$$\rho_L = \rho_{\text{lum}} \times c^2 \text{ [J m}^{-3} \text{] où } \rho_{\text{lum}} = [0.0074 \times \rho_{\text{He}} + 0.0084 \times \rho_{\text{métaux}}]$$

3. Sur Terre, on mesure un fond diffus par u. de surface et par stéradian: en $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$. Ce fond nous arrive sur la totalité du ciel = 4π stéradians :

$$\epsilon_L = \rho_{\text{lum}} \times c^2 / 4\pi \text{ [J m}^{-3} \text{ sr}^{-1} \text{]}$$

4. La lumière nous arrive à la vitesse « c », donc sur une surface collectrice de 1 m^2 on reçoit la lumière contenue dans « c » m^3 par seconde:

$$I = \rho_{\text{lum}} \times c^3 / 4\pi \text{ [W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{]}$$

5. Mais on mesure $h\nu_{\text{observé}}$, ce qui est émis est $h\nu_{\text{émis}}$: $h\nu_{\text{obs}} = h\nu_{\text{em}} / (1+z_{\text{em}})$
 $I = \rho_{\text{lum}} \times c^3 / (4\pi \times (1+z)) \text{ [W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{]}$ du fait de l'expansion de l'univers

$$\rightarrow I = [0.0074 \times 5 \times 10^{-30} + 0.0084 \times 2.5 \times 10^{-30}] \times (3 \times 10^8)^3 / (4\pi \times (1+z)) = 125 / (1+z) \text{ [nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{]}$$

$$\rightarrow \text{Si on suppose que le redshift moyen d'émission est de } z \sim 1 \rightarrow I \sim 62 \text{ [nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{]}$$

$$\rightarrow \text{Pour la valeur moyenne de } \rho_{\text{métaux}} \sim (4 - 27) \times 10^{-31} \text{ kg m}^{-3} : I \sim 40 \pm 30 \text{ [nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{]}$$

Comparaison au fond diffus mesuré...

On a vu que : $I = \rho_{\text{lum}} \times c^3 / (4\pi \times (1+z))$ [W m⁻² sr⁻¹]

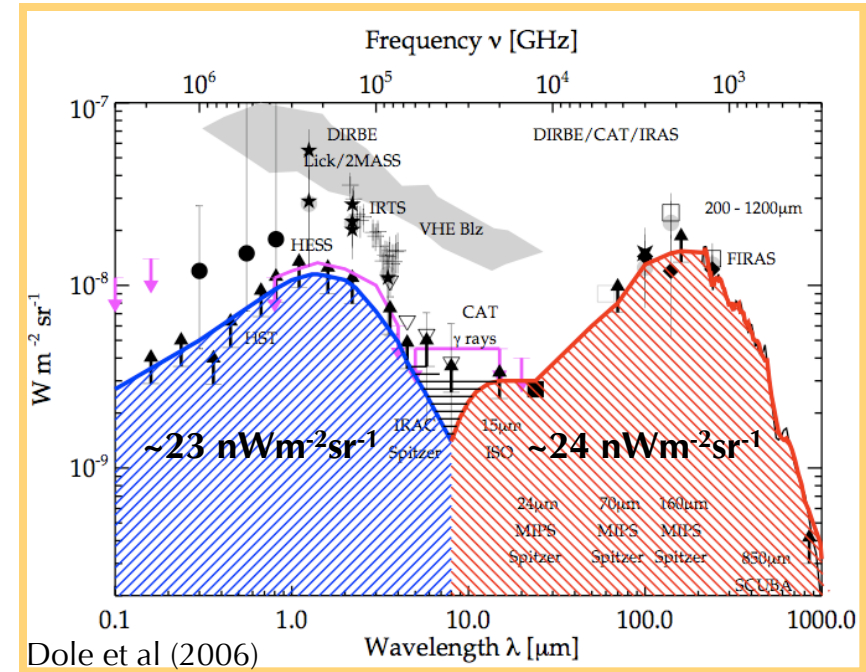
→ 125/(1+z) [nW m⁻² sr⁻¹]

où z est le redshift typique auquel les éléments ont été formés.

→ Si on suppose que le z_{moyen} d'émission z~1 :

→ $I \sim 62$ [nW m⁻² sr⁻¹]

→ EN prenant en compte l'incertitude sur la densité de métaux $I \sim 40 \pm 30$ [nW m⁻² sr⁻¹]



Le fond diffus cosmologique nous donne une idée du budget total de l'énergie rayonnée au cours de l'univers.

On constate que celui-ci est du même ordre de grandeur que l'énergie qui a été rayonnée par les étoiles dans l'univers pour produire la quantité de métaux observés.

Global energetics: fossil memory (metals) vs background light

Contribution of "Black Holes" to the cosmic background light:

$$M_{\text{BH}} \sim 2 \times 10^{-3} \times M_*(\text{bulges}) \quad \& \quad \rho_{\text{bulges}} \sim 3.5 \times 10^{-29} \text{ kg m}^{-3}$$

$$\Rightarrow \rho_{\text{BH}} \sim 4.6 [-1.4, +1.9] \times 10^{-32} \text{ kg m}^{-3} \quad (\text{Marconi \& Hunt 08})$$

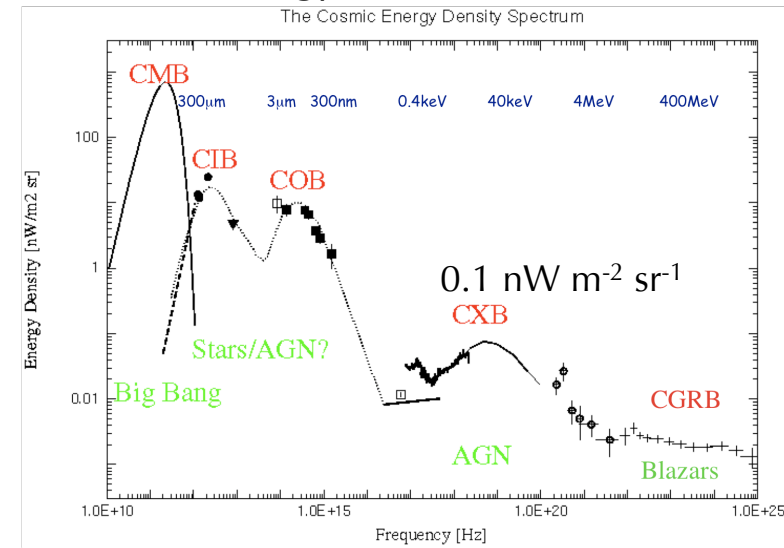
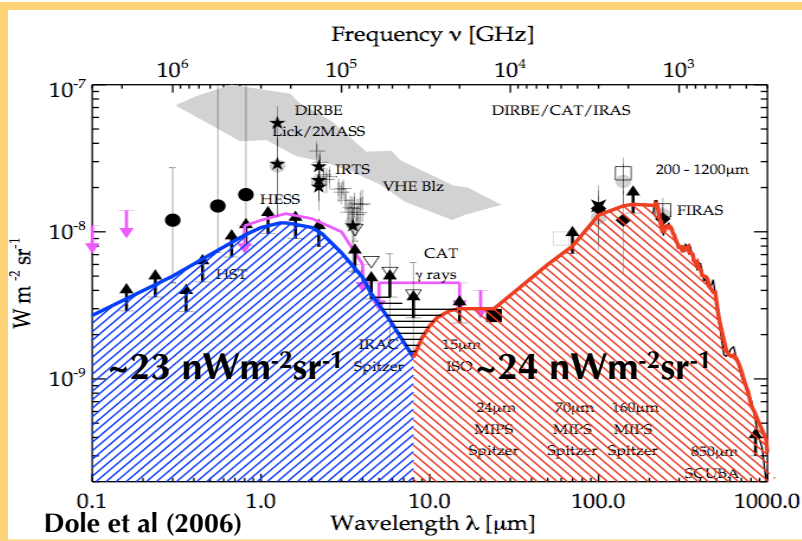
Gravitational accretion (SMBH growth) converts mass into light with an efficiency of $\eta \sim 5\text{-}10\%$ & $\text{IGL}_{\text{SMBH}} = \eta \times \rho_{\text{BH}} c^3 / (4\pi \times (1+z)) = 9 \pm 5 / (1+z) \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$

For $z \sim 1$, we get : $\text{IGL}_{\text{SMBH}} \sim 5 \pm 3 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$

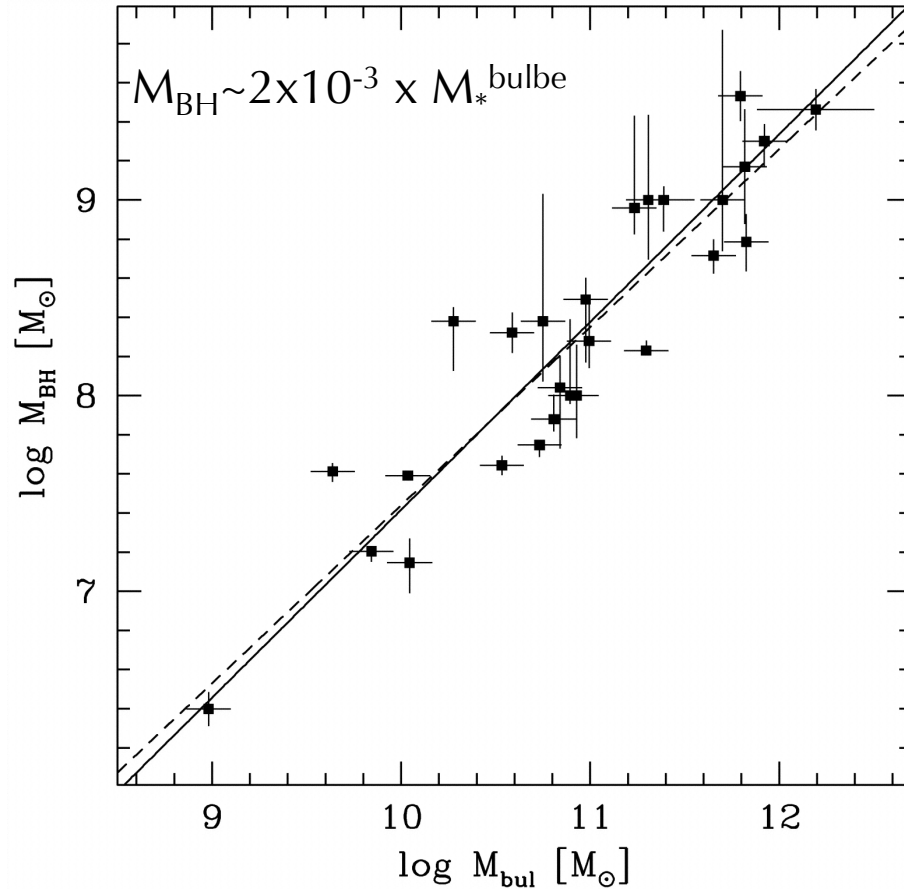
To be compared to: $\text{IGL}_{\text{nucleosynthesis}} \sim 40 \pm 30 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$

Per unit mass accretion is 10 times more efficient than nucleosynthesis ($\sim 7\%$ vs 0.7%)

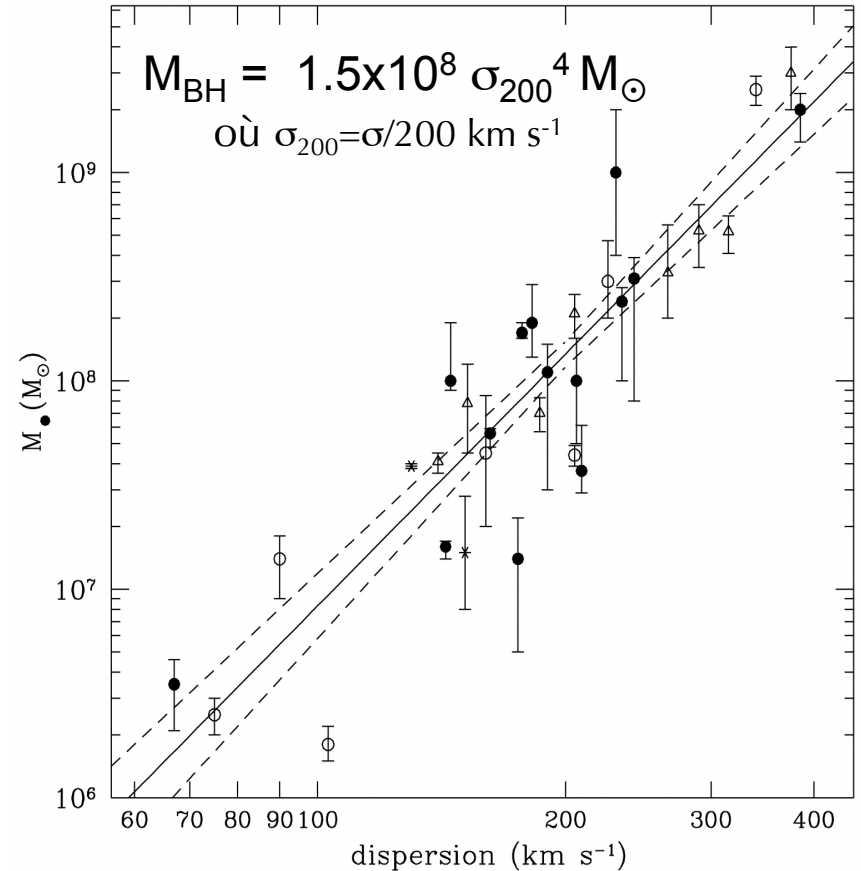
But on average nucleosynthesis produces 10 times more energy than accretion.



La masse des Trous Noirs Supermassifs au centre des galaxies est fortement liée aux propriétés de la galaxie-hôte



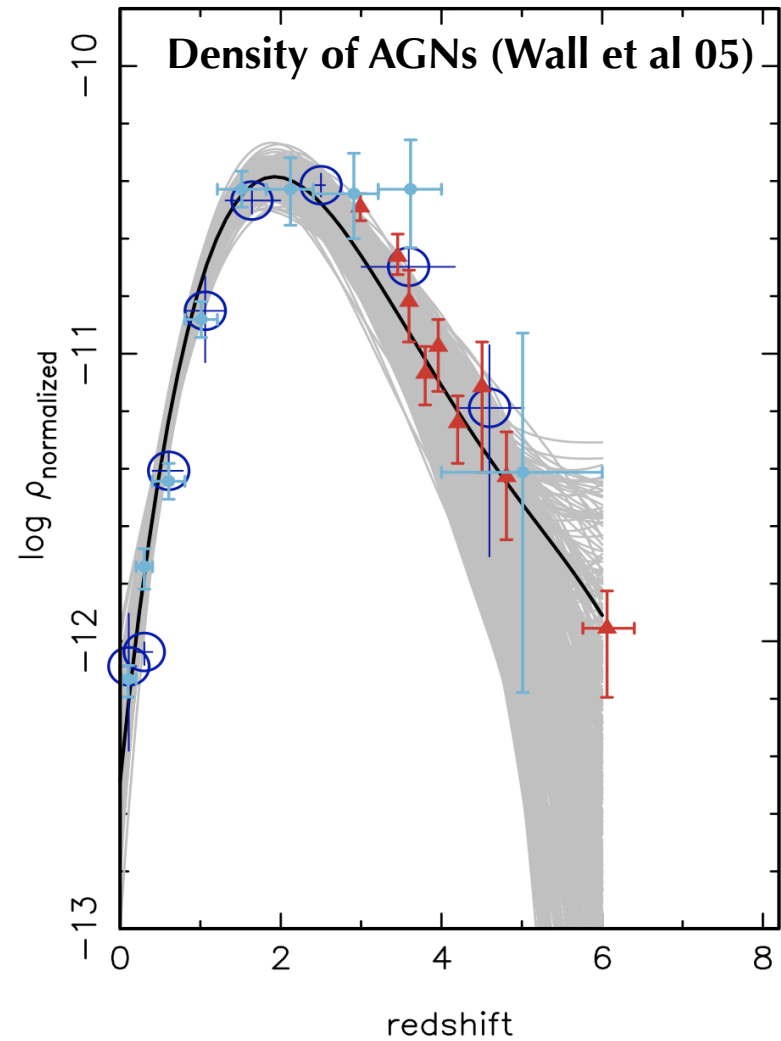
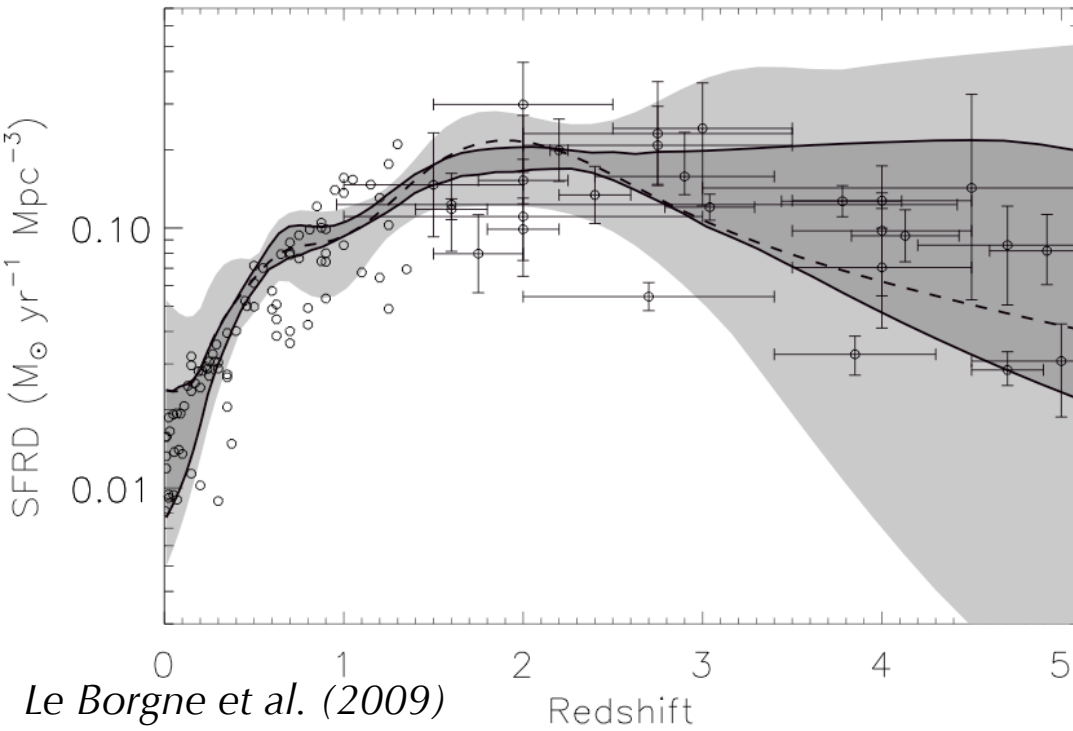
Marconi & Hunt



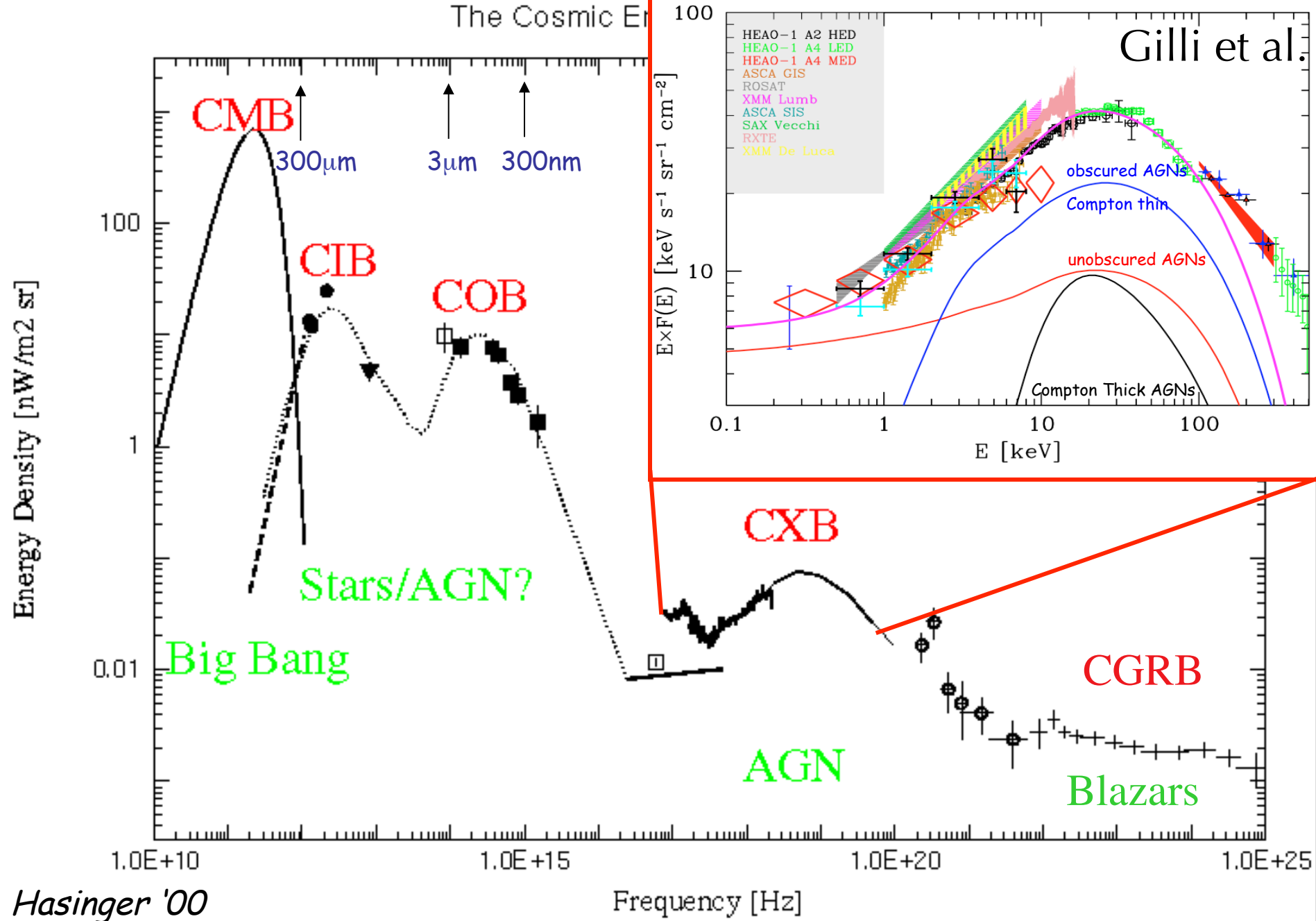
Tremaine et al.

Gebhardt et al. (2000), Ferrarese & Merritt (2000) c.f. Magorrian (1998)

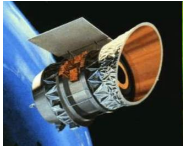
Cosmic history of star formation vs accretion



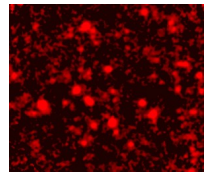
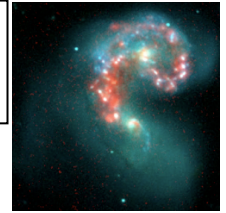
Wang et al. 08



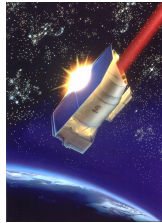
IRAS : 57 cm
25 jan.1983



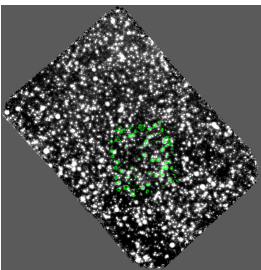
IRAS révèle l'existence de galaxies ultralumineuses IR
Toutes sont produites par des fusions de galaxies



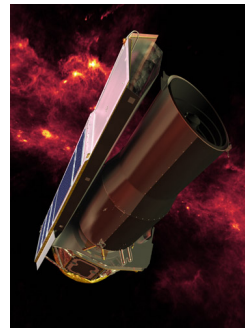
ISO : 60 cm
17 nov.1995



La majorité des étoiles présentes sont nées au cours d'une phase
(ultra) lumineuse dans l'IR

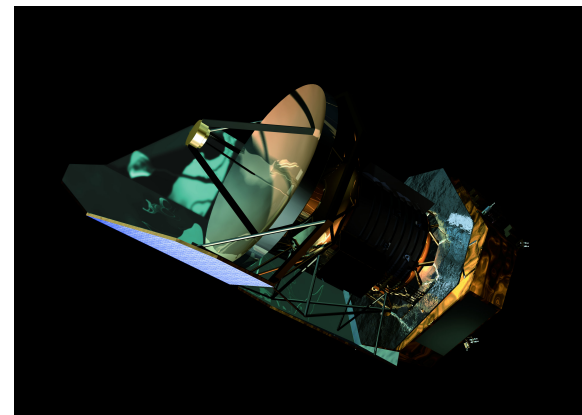


Spitzer : 85 cm
25 august 2003



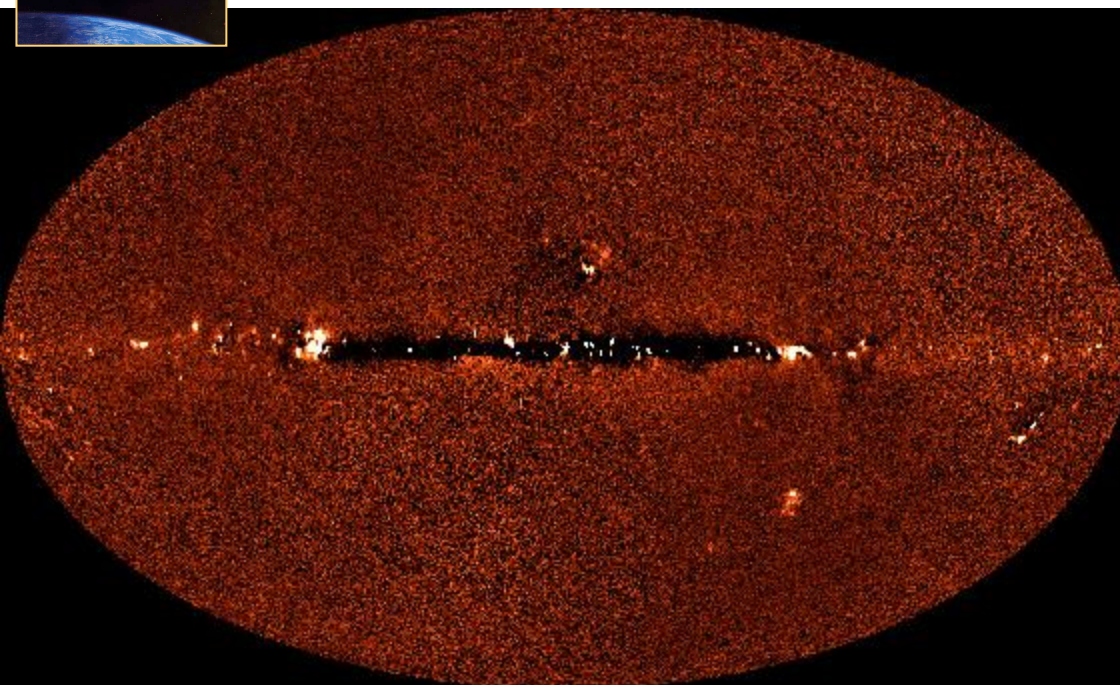
Cette phase est responsable du fond diffus IR cosmologique
Une partie (mineure) vient de noyaux actifs

Herschel: 350 cm
14 may 2009





Le fond diffus cosmologique infrarouge



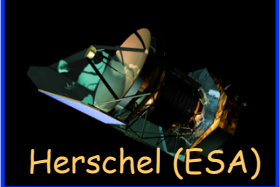
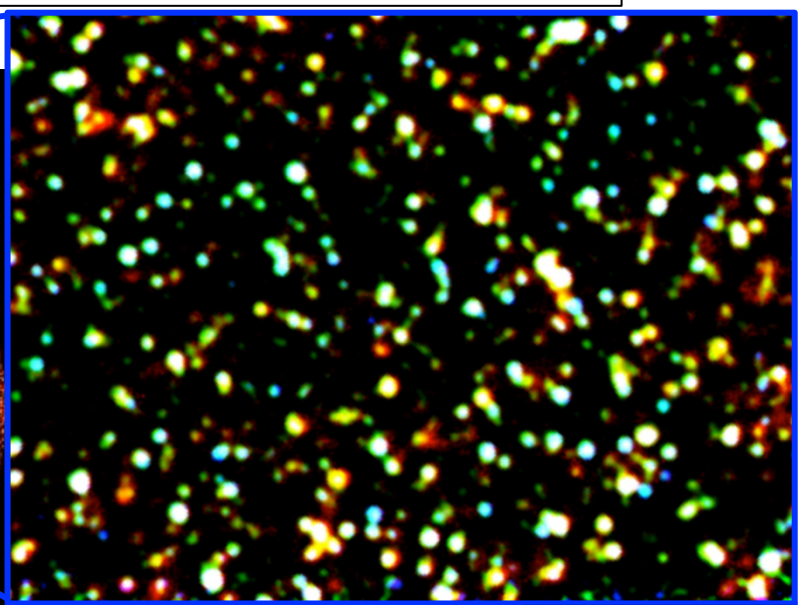
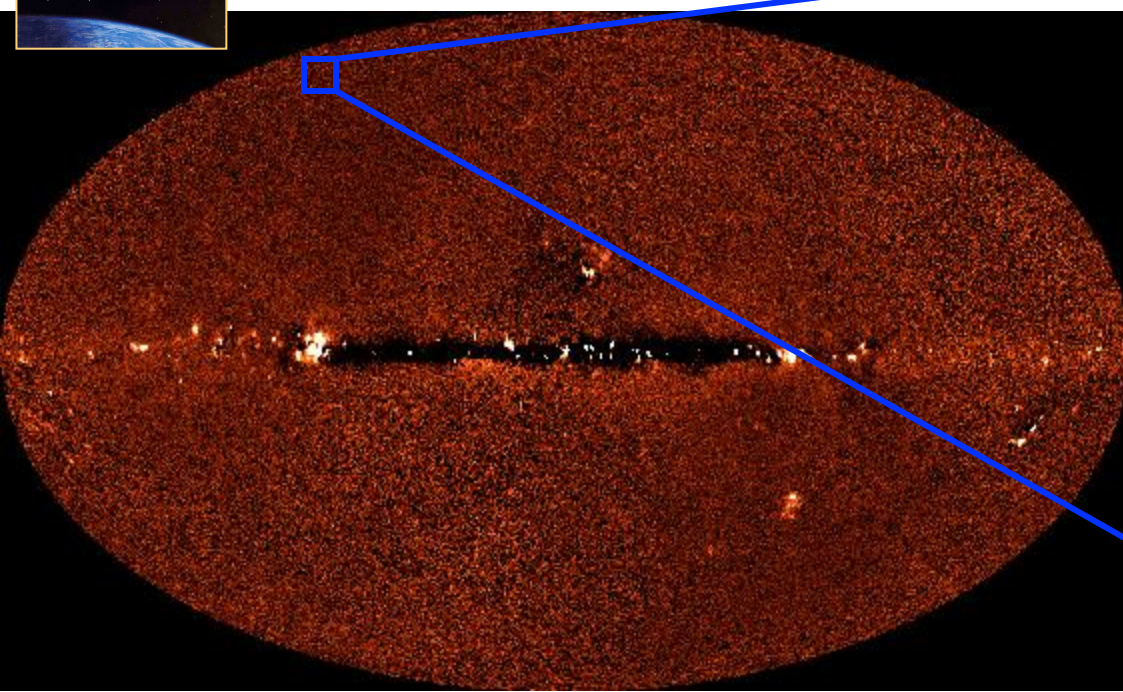
=5% du fond diffus
cosmologique dû au Big Bang
(3000K, 380 000 ans après le
Big Bang)

Image à 240 μm (COBE/DIRBE, NASA)

COBE (NASA)



Le fond diffus cosmologique infrarouge



Herschel (ESA)

Image à 240 μm (COBE/DIRBE, NASA)



Le fond diffus cosmologique infrarouge

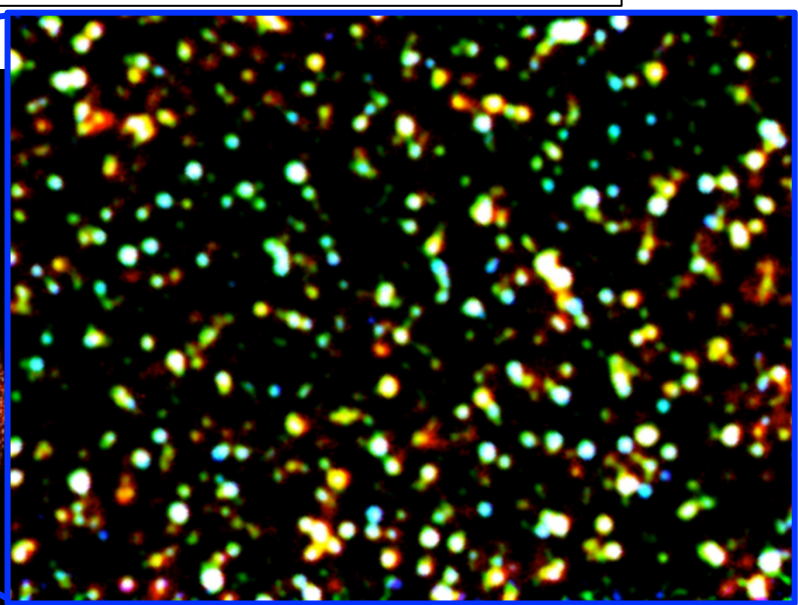
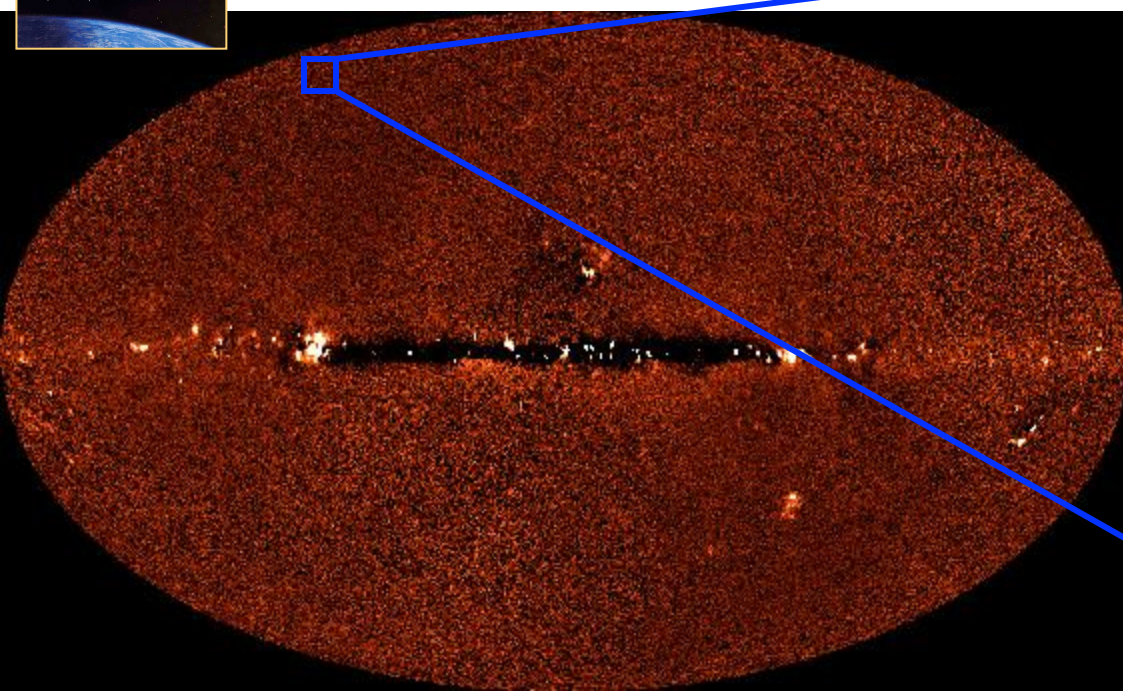
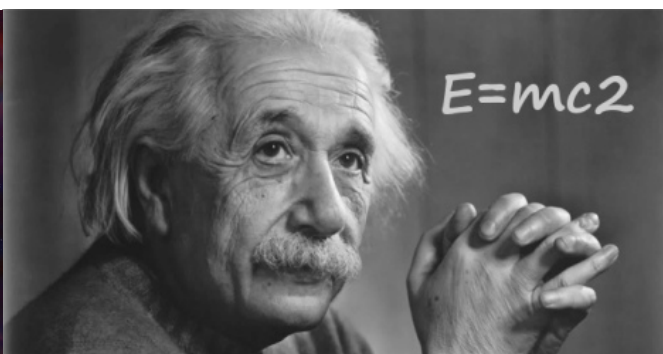
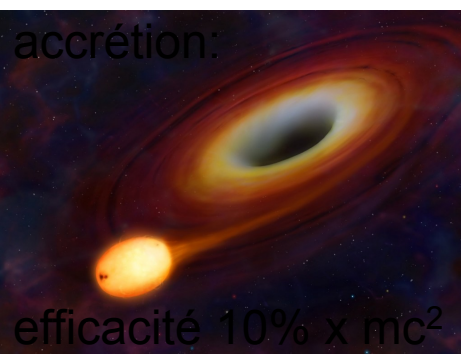


Image à 240 μm (COBE/DIRBE, NASA)



efficacité 10% x mc^2
contribution au fond diffus: 15%

