

EMISSION A GRANDE LONGUEUR D'ONDE DES PAH_s INTERSTELLAIRES

NATHALIE YSARD

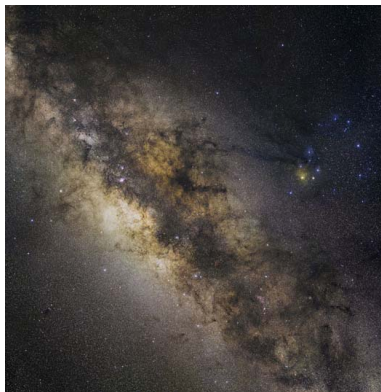
sous la direction de L. Verstraete

Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay

Soutenance de thèse, 2 mars 2009

- 1 Introduction
- 2 Emission rovibrationnelle des PAHs
- 3 Excitation rotationnelle des PAHs - Emission associée
- 4 Tests et contraintes observationnels
- 5 Conclusions et perspectives

Composition du milieu interstellaire (MIS)



Voie Lactée, désert de l'Atacama (S. Bernier)

Composition du milieu interstellaire (MIS)



DRAO
HI 21 cm

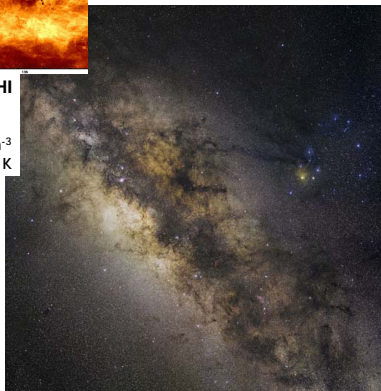
Milieu neutre \Rightarrow HI

-CNM : $n_H \sim 30 \text{ cm}^{-3}$

$T_{\text{gaz}} \sim 100 \text{ K}$

-WNM : $n_H \sim 0.4 \text{ cm}^{-3}$

$T_{\text{gaz}} \sim 6000 \text{ K}$

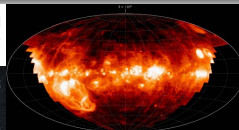


Composition du milieu interstellaire (MIS)



DRAO
HI 21 cm

WHAM
H α



Milieu neutre \Rightarrow HI

-CNM : $n_H \sim 30 \text{ cm}^{-3}$

$T_{\text{gaz}} \sim 100 \text{ K}$

-WNM : $n_H \sim 0.4 \text{ cm}^{-3}$

$T_{\text{gaz}} \sim 6000 \text{ K}$

Milieu ionisé \Rightarrow HII

-WIM : $n_H \sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$

$T_{\text{gaz}} \sim 8000 \text{ K}$

-HIM : $n_H < 0.1 \text{ cm}^{-3}$

$T_{\text{gaz}} \sim 10^6 \text{ K}$

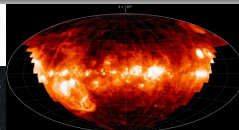


Composition du milieu interstellaire (MIS)



DRAO
HI 21 cm

WHAM
H α



Milieu neutre \Rightarrow HI

- CNM : $n_H \sim 30 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{gaz}} \sim 100 \text{ K}$
- WNM : $n_H \sim 0.4 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{gaz}} \sim 6000 \text{ K}$

Milieu ionisé \Rightarrow HII

- WIM : $n_H \sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{gaz}} \sim 8000 \text{ K}$
- HIM : $n_H < 0.1 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{gaz}} \sim 10^6 \text{ K}$

Nuage moléculaire \Rightarrow H $_2$

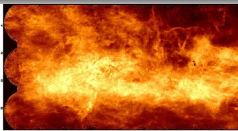
- MC : $n_H > 100 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{gaz}} \sim 10\text{-}30 \text{ K}$



VLT, ESO
B, V, I

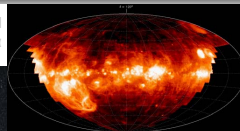


Composition du milieu interstellaire (MIS)



DRAO
HI 21 cm

WHAM
H α



Milieu neutre \Rightarrow HI

- CNM : $n_H \sim 30 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{gaz}} \sim 100 \text{ K}$
- WNM : $n_H \sim 0.4 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{gaz}} \sim 6000 \text{ K}$

Milieu ionisé \Rightarrow HII

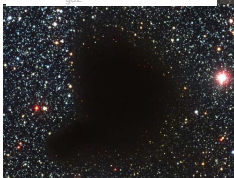
- WIM : $n_H \sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{gaz}} \sim 8000 \text{ K}$
- HIM : $n_H < 0.1 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{gaz}} \sim 10^6 \text{ K}$

Nuage moléculaire \Rightarrow H $_2$

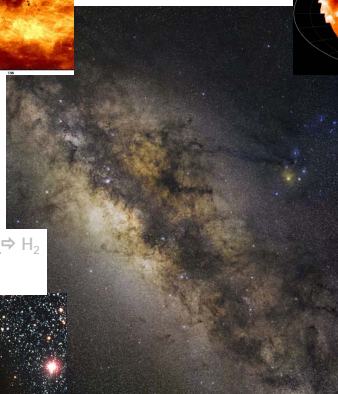
- MC : $n_H > 100 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{gaz}} \sim 10\text{-}30 \text{ K}$

Formation d'étoiles

- rayonnement UV



VLST, ESO
B, V, I



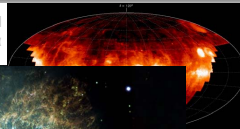
HST
OIII, H α , SII

Composition du milieu interstellaire (MIS)



DRAO
HI 21 cm

WHAM
Ha



Evolution des étoiles massives

- ondes de choc
- vent stellaire
- éléments lourds

Milieu

-CNM :

-WNM

Nuage

-MC : n

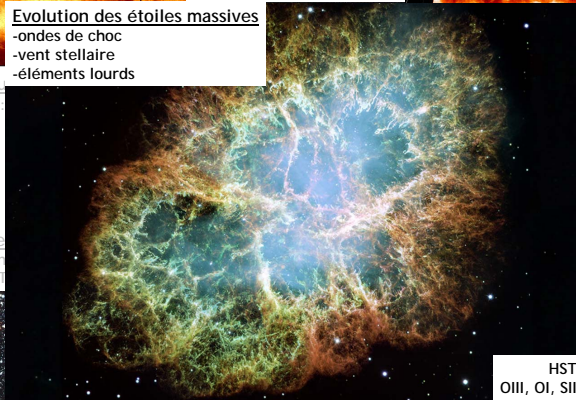
⇒ HII

1 cm^{-3}

3000 K

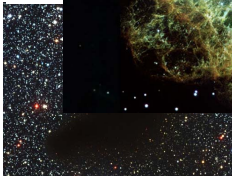
1 cm^{-3}

10^6 K



étoiles

UV



VLT, ESO
B, V, I

HST
OIII, OI, SII

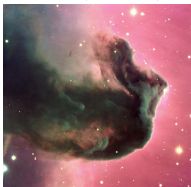
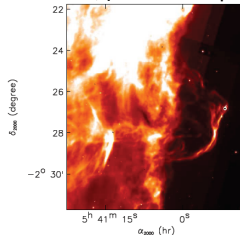
HST
OIII, Ha, SII



Composition du milieu interstellaire (MIS)

Nébuleuse de la Tête de Cheval

visible (VLT/ESO)

IR (Spitzer IRAC, 8 μ m)

- Les grains ou poussières
 - une grande partie des éléments lourds
 - 1% de la masse du MIS
 - sites de formation de H₂ (chimie)
 - chauffage du gaz par effet photoélectrique
 - transfert de rayonnement dans la Galaxie

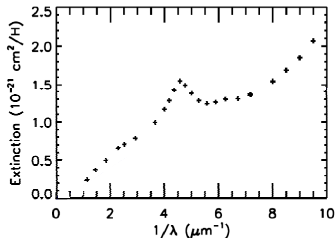
Extinction et émission

- Extinction et émission caractéristiques du milieu diffus

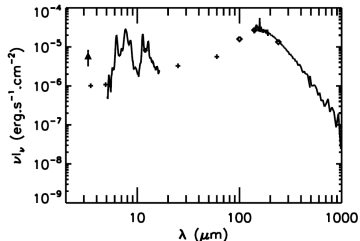
absorption

+

diffusion

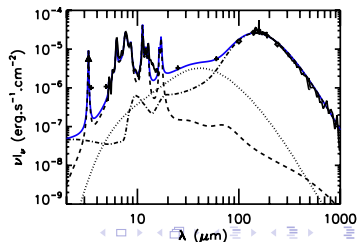
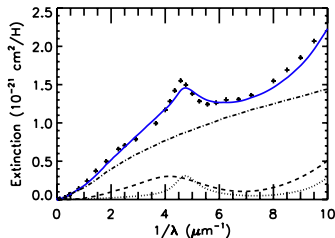


émission IR
après absorption
de photons stellaires



Trois populations de grains (de Désert et al. 1990 à Li & Draine 2001)

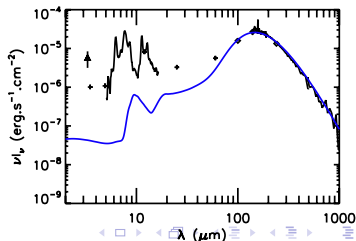
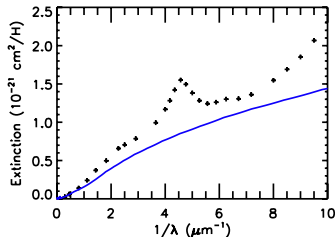
Rendre compte de l'extinction et de l'émission interstellaires :



Trois populations de grains (de Désert et al. 1990 à Li & Draine 2001)

Rendre compte de l'extinction et de l'émission interstellaires :

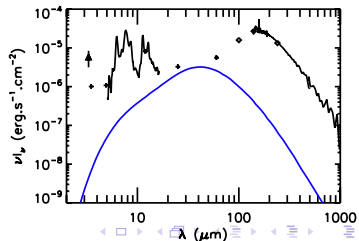
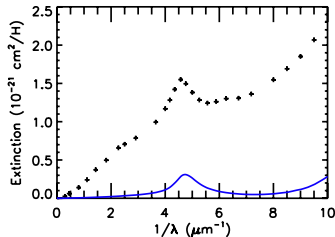
- Les gros grains ou BG (*Big Grains*) : $15 \leq a \lesssim 100$ nm, mélange de graphite et de silicates, à l'équilibre thermique



Trois populations de grains (de Désert et al. 1990 à Li & Draine 2001)

Rendre compte de l'extinction et de l'émission interstellaires :

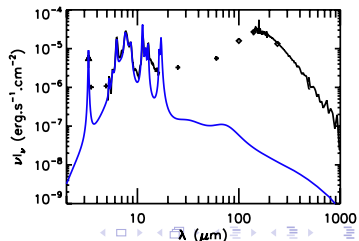
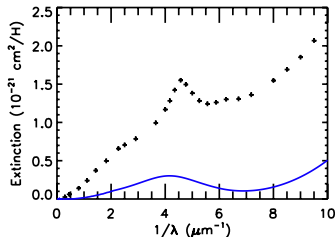
- Les gros grains ou BG (*Big Grains*)
- Les très petits grains ou VSG (*Very Small Grains*) :
 $1 \leq a \leq 15$ nm, particules carbonées



Trois populations de grains (de Désert et al. 1990 à Li & Draine 2001)

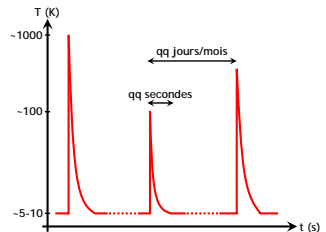
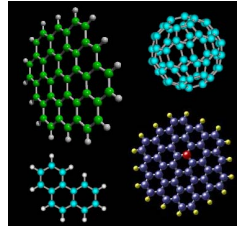
Rendre compte de l'extinction et de l'émission interstellaires :

- Les gros grains ou BG (*Big Grains*)
- Les très petits grains ou VSG (*Very Small Grains*)
- Les molécules polycycliques aromatiques hydrogénées ou PAHs (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*)



Les PAHs interstellaires

- bandes d'émission de 3 à 20 μm : vibration, élongation, flexion de liaisons C-C et C-H sur des cycles aromatiques
- grosses molécules : $4 \leq a \leq 13 \text{ \AA}$
- $\sim 20\%$ du carbone interstellaire
- variabilité de la position et des rapports entre les bandes IR
- chauffage impulsif

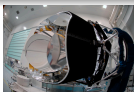


Les missions Planck et Herschel

- opportunité d'observer les grains à grande longueur d'onde
 - confirmer et approfondir les résultats obtenus avec COBE et WMAP
- ⇒ émissivité des grains, abondances respectives

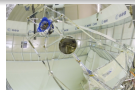
Planck

- HFI : 100 à 857 GHz
(350 μm à 3 mm)
- LFI : 30, 43 & 70 GHz
(4 mm à 1 cm)



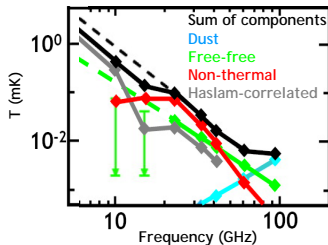
Herschel

- SPIRE : 60 à 210 μm
- PACS : 250 à 520 μm
- HIFI : 157 à 625 μm

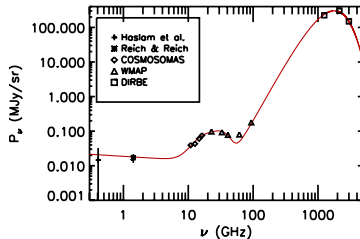


Emission dite "anormale"

- composante "anormale" entre 10 et 100 GHz
(Kogut et al., de Oliveira-Costa et al. 1996, Leitch et al. 1997)
- corrélée avec l'IR (12 μm , Casassus et al. 2006)



Spectre moyen de la Galaxie
 $20^\circ < |b| < 50^\circ$, WMAP5
 (Hinshaw et al. 2006)



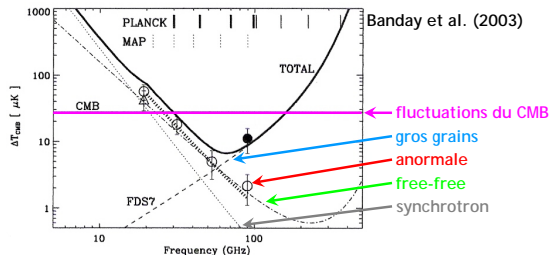
Nuage moléculaire
 dans le complexe de Persée
 (Watson et al. 2005)

Origine et importance de l'émission anormale

- Origine de l'émission anormale ?
 - émission dipolaire électrique de PAHs en rotation
 - émission dipolaire magnétique des gros grains
(Draine & Lazarian 1998/1999)
- Pourquoi est-elle importante ?

Origine et importance de l'émission anormale

- Origine de l'émission anormale ?
 - **émission dipolaire électrique de PAHs en rotation**
 - émission dipolaire magnétique des gros grains
(Draine & Lazarian 1998/1999)
- Pourquoi est-elle importante ?
 - point de vue "interstellaire"
 - point de vue "cosmologique"



Problématique de ma thèse

Emission des PAHs à grande longueur d'onde de l'IR proche au centimètre

- émission rovibrationnelle
- émission rotationnelle
- séparation des composantes dans WMAP
- confrontation aux observations (WMAP, COSMOSOMAS...)

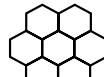
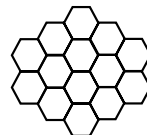
Objectif

Modélisation de l'émission rovibrationnelle de l'IR proche au centimètre

- 1) Introduction
- 2) Section efficace d'absorption
- 3) Distribution de l'énergie interne
- 4) Emission dans l'IR moyen
- 5) Emission dans l'IR lointain
- 6) Conclusions

Choix de la structure des PAHs interstellaires

- espèces compactes
(Le Page et al. 2003, Hony et al. 2001)
- molécules planes de symétrie hexagonale
 $\Rightarrow C_{6p^2}H_{6p}$
 - rayon $a(\text{Å}) = 0.9\sqrt{N_C}$ (Omont 1986)
avec N_C le nombre d'atomes de carbone dans la molécule

Pyrène $C_{16}H_{10}$ Coronène $C_{24}H_{12}$ Ciccumpyrène $C_{42}H_{16}$

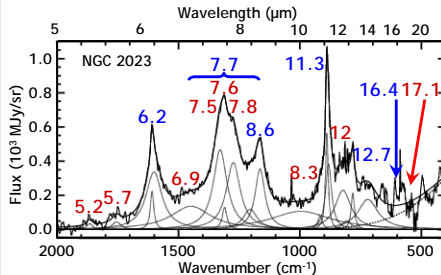
Section efficace dans l'UV, le visible et l'IR moyen

A partir d'observations et/ou d'expériences en laboratoire
(Joblin et al. 1992, Pech et al. 2002)

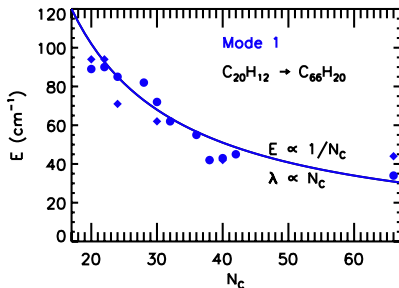
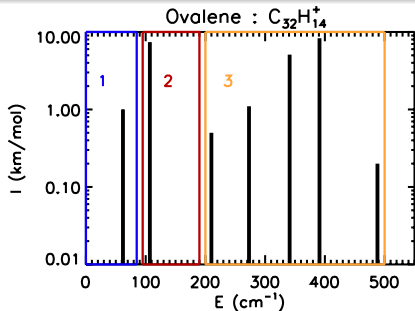
Dans l'UV et le visible

- section efficace de Verstraete & Léger (1992)
- coupure électronique $\lambda_C \propto a$ (Robertson et al. 1986)

Dans l'IR moyen : 3 à 20 μm (basée sur Verstraete et al. 2001)



Section efficace dans l'IR lointain



- Mallocci et al. (2007) : fréquence et largeur des modes ($\nu_i, \Delta\nu_i$)
- pour les molécules compactes : 3 groupes de modes distincts
- 2 modes indépendants de la taille
+ 1 mode à plus basse énergie dépendant de la taille $\propto 1/N_c$

Probabilité de trouver un PAH d'énergie interne E

- système isolé entre 2 échanges de photons
- PAH à basse E la plupart du temps

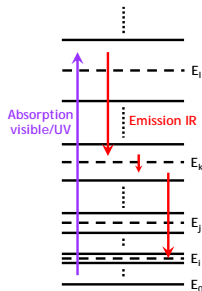


description microcanonique

- à l'état stationnaire (Draine & Li 2001) :

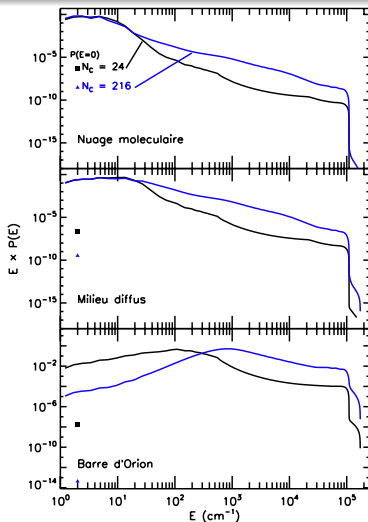
$$\frac{dP_i}{dt} = \sum_{j \neq i}^M T_{j \rightarrow i} P_j - \sum_{i \neq j}^M T_{i \rightarrow j} P_i = 0$$

- P_i : probabilité d'être dans l'état i
- $T_{i \rightarrow j}$: probabilité de passer d'un état i à j
 pour un PAH : $T_{i \rightarrow j} = f(\sigma_{abs}, \rho(E), u_E)$



- densité d'états rovibrationnels (Beyer & Swinehart 1973)

Distribution résultante $P(E)$



- Nuage moléculaire
ISRF, $G_0 = 10^{-2}$
- Milieu diffus
ISRF, $G_0 = 1$
 $T_{\text{eff}} \sim 22\,000 \text{ K}$
- Barre d'Orion (PDR)
 $G_0 = 14\,000$
 $T_{\text{eff}} = 37\,000 \text{ K}$

Emission IR résultante

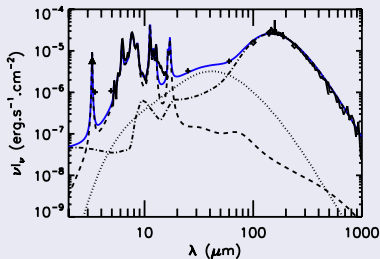
Emission IR pour une taille donnée de PAH :

$$\nu F_\nu(\nu, N_C) = \frac{2h\nu^4}{c^2} \sigma_{abs}(\nu) \left[1 + \frac{\lambda^3}{8\pi} u_E \right] \times f_\nu(P(E))$$

Emission IR résultante

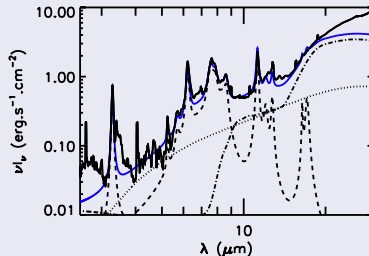
Milieu diffus

- MRN : $n(a) \propto a^{-3.5}$
- 2/3 de PAHs ionisés
- $N_H = 10^{20} \text{ cm}^{-2}$
- $\left[\frac{C}{H}\right]_{PAH} = 4.3 \times 10^{-5}$



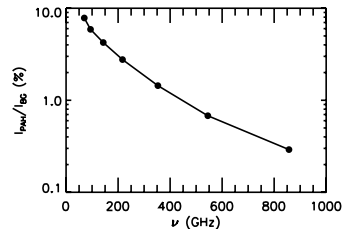
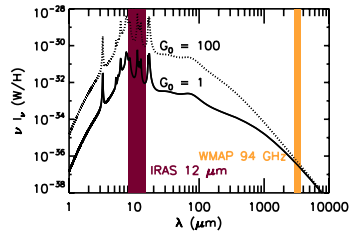
Barre d'Orion

- MRN (Mathis et al. 1977)
- 82% de PAHs ionisés
- $N_H = 1.8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
- $\left[\frac{C}{H}\right]_{PAH} = 1.8 \times 10^{-5}$



Emissivité submillimétrique

- proportionnelle à G_0 dans l'IR moyen, pas dans l'IR lointain
- rapport PAH/BG sur tout le ciel :
 - BG : modélisation du ciel
 - PAHs : bande IRAS à $12 \mu\text{m}$ \Rightarrow contribution faible $\lesssim 10\%$

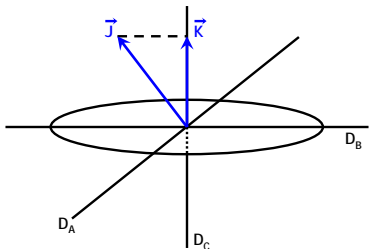


Objectif

Modélisation de l'émission rotationnelle dans le domaine micro-onde

- 1) Introduction
- 2) Excitation rotationnelle
- 3) Résultats : moment angulaire et spectre résultant
- 4) Influence des paramètres physiques
- 5) Conclusions

Description de la rotation



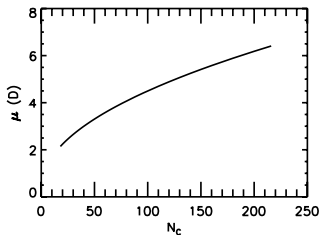
- Moment angulaire total \vec{J} : $l\omega = \hbar J$
 $l \rightarrow$ moment d'inertie de la molécule
- Energie rotationnelle : $E_{rot} = BJ(J + 1) + (C - B)K^2$
 $B, C \rightarrow$ constantes rotationnelles

Moment dipolaire électrique

Spectroscopie des PAHs :
ionisés, déshydrogénés, hétéroatomes, cycles pentagonaux
(Le Page et al. 2003, Peeters et al. 2002-2004, Moutou et al. 2000)

⇒ moment dipolaire électrique non nul

$$\begin{cases} \mu = \mu_i + \epsilon a Z e \\ \mu_i = m \sqrt{N_{at}} \quad \& \quad m = 0.4 \text{ D} \end{cases}$$

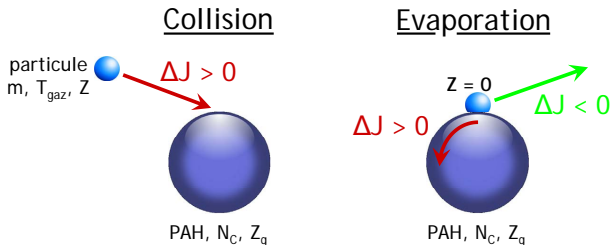


Qu'est-ce qui fait tourner les grains ?

Processus participant au freinage et à l'excitation rotationnels :

$$(\Delta J < 0) \quad (\Delta J > 0)$$

- émission de photons
- interactions gaz/grain



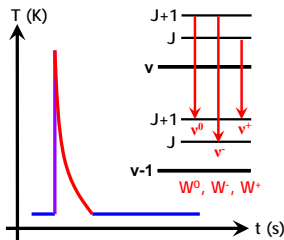
⇒ taux de changement de J pour tous les processus $(\tau^{-1} \Delta J)_i$

Emission de photons IR

Règles de sélection rovibrationnelles pour une “toupie symétrique”
 (Townes et Schawlow 1975) :

$$\begin{cases} \Delta v = -1 \\ \Delta J = 0, \pm 1 \\ \Delta K = 0, \pm 1 \end{cases}$$

⇒ émission de photons IR pendant la phase de refroidissement



Absorption d'un photon UV

Emission de photons IR
 proche à lointain

$$(\tau^{-1} \Delta J)_{\text{IR}} = W^+ - W^-$$

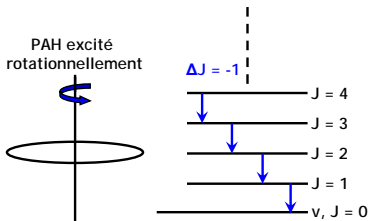
P(E), σ_{abs}

Emission de photons rotationnels

Règles de sélection pour les transitions purement rotationnelles
(Townes et Schawlow 1975) :

$$\begin{cases} \Delta v = 0 \\ \Delta J = -1 \\ \Delta K = 0 \end{cases}$$

$$(\tau^{-1} \Delta J)_{rot} = -1.8 \times 10^{-14} \left(\frac{N_C}{50} \right)^{-6} \left(\frac{\mu}{1D} \right)^2 \times J^3 \frac{(2J+1)^2 - (J+2)}{(2J+1)^2}$$



Marche au hasard et distribution du moment angulaire

Marche au hasard (Rouan et al. 1992/1997)

- compétition entre différents processus aléatoires
⇒ marche au hasard de pas ΔJ
- à l'équilibre, moment angulaire le plus probable J_0 :

$$\left[\sum_i (\tau^{-1} \Delta J)_i \right]_{J=J_0} = 0$$

Distribution du moment angulaire $n(J)$

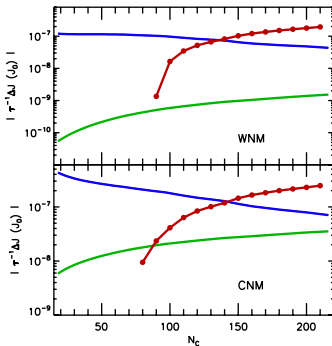
- $\Delta J \ll J \Rightarrow$ thermique

$$n(J) = n_0 J^2 e^{-J^2/J_0^2}$$

Contributions au freinage et à l'excitation rotationnels

CNM : $n_H = 30 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 100 \text{ K}$

WNM : $n_H = 0.4 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 6000 \text{ K}$

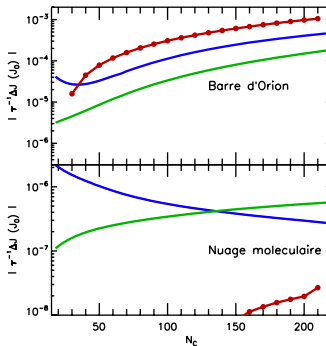


Freinage

- rotation
- émission IR
- collisions & plasma

Barre d'Orion : $n_H = 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 400 \text{ K}$

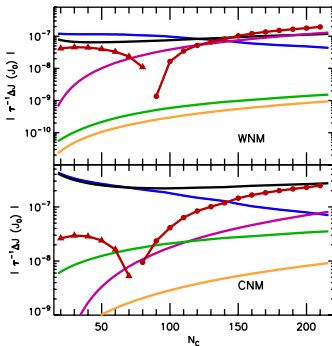
Nuage moléculaire : $n_H = 300 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 20 \text{ K}$



Contributions au freinage et à l'excitation rotationnels

CNM : $n_H = 30 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 100 \text{ K}$

WNM : $n_H = 0.4 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 6000 \text{ K}$

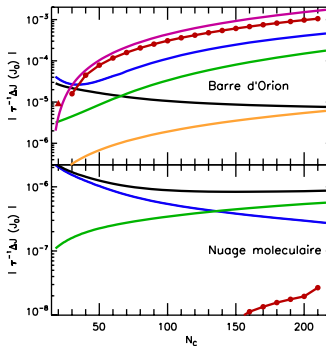


Freinage

- rotation
- émission IR
- collisions & plasma

Barre d'Orion : $n_H = 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 400 \text{ K}$

Nuage moléculaire : $n_H = 300 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 20 \text{ K}$



Excitation

- effet photoélectrique
- ▲ émission IR
- collisions & plasma
- formation H₂

Contributions au freinage et à l'excitation rotationnels

CNM : $n_H = 30 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 100 \text{ K}$
WNM : $n_H = 0.4 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 6000 \text{ K}$

Barre d'Orion : $n_H = 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 400 \text{ K}$
Nuage moléculaire : $n_H = 300 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} = 20 \text{ K}$

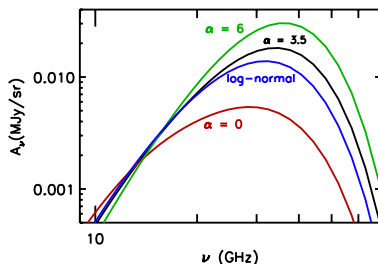
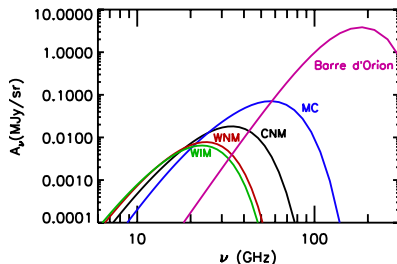
- Freinage : émission de photons rotationnels et IR
- Excitation : collisions ou effet photoélectrique

Spectre rotationnel

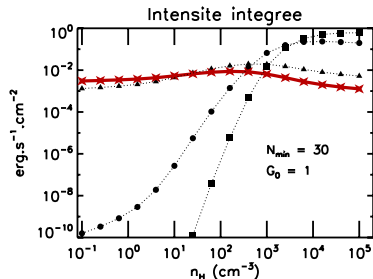
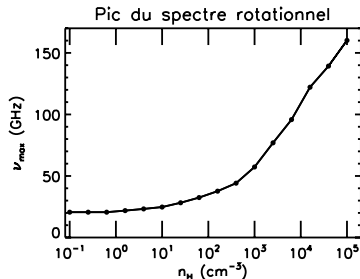
Intensité émise pour une distribution de taille $n_{PAH}(N_C)dN_C$:

$$A_\nu = \frac{N_H}{4\pi} \int_{N_{min}}^{N_{max}} A_{J \rightarrow J-1} n(N_C, J) \frac{2BJ}{2Bc} n_{PAH}(N_C) dN_C$$

$$A_\nu \propto N_H \left[\frac{C}{H} \right]_{PAH} m^2 \quad (\mu_i = m\sqrt{N_{at}})$$



Influence de la densité n_H



⇒ spectre peu sensible aux variations de la densité entre 20 et 30 GHz pour $0.1 \lesssim n_H \lesssim 30 \text{ cm}^{-3}$

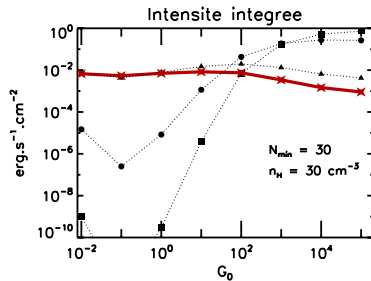
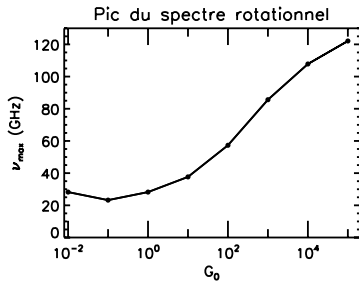
★ 23 GHz (WMAP)

▲ 30 GHz (Planck LFI)

● 70 GHz (LFI)

■ 100 GHz (HFI)

Influence du champ de rayonnement



⇒ spectre peu sensible à l'intensité du champ de rayonnement pour $0.01 \lesssim G_0 \lesssim 100$ entre 20 et 30 GHz

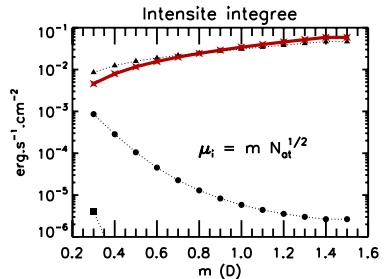
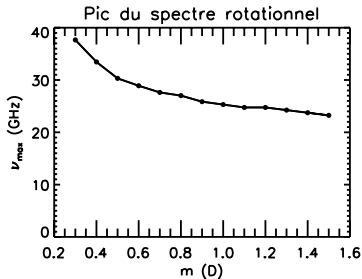
★ 23 GHz (WMAP)

▲ 30 GHz (Planck LFI)

● 70 GHz (LFI)

■ 100 GHz (HFI)

Influence du moment dipolaire électrique μ_i



⇒ spectre décalé à plus basse fréquence quand μ augmente, intensité plus forte

★ 23 GHz (WMAP)

▲ 30 GHz (Planck LFI)

● 70 GHz (LFI)

■ 100 GHz (HFI)

Conséquences observationnelles

- spectre rotationnel dominé par les plus petits PAHs ($N_C \leq 100$)
⇒ meilleure corrélation anormale/IRAS 12 μm que 100 μm
- peu sensible à G_0 et n_H à 23 GHz pour :
 $n_H \lesssim 30 \text{ cm}^{-3}$ et $0.01 \lesssim G_0 \lesssim 100$
⇒ meilleure corrélation avec IR/ G_0 qu'avec IR

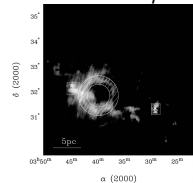
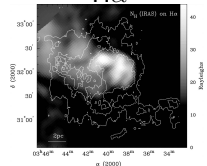
Objectif

Comparaison du modèle de rotation aux observations

- 1) Introduction
- 2) Le nuage moléculaire G159.6-18.5
- 3) Extraction de l'émission anormale des données WMAP
- 4) Corrélation de l'émission anormale avec l'émission IR

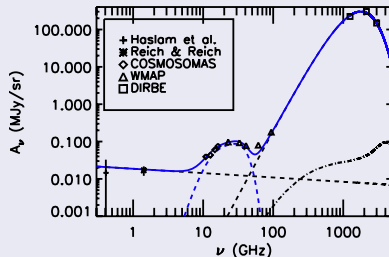
Description de G159.6-18.5

- dans le complexe moléculaire de Persée (Andersson et al. 2000, Ridge et al. 2006)
- étoile centrale HD278942 de type B0V
 $T_{eff} \sim 30\,000\text{ K}$
- anneau moléculaire centré sur HD278942
 $r \sim 2.75\text{ pc}$, $n_H \sim 560\text{ cm}^{-3}$, $T_{gaz} \sim 20\text{ K}$
- région HII au centre de l'anneau moléculaire
 $n_H \sim 1\text{ cm}^{-3}$
- densité de colonne totale, abondance (Watson et al. 2005)
 $[C/H] \sim 2.4 \times 10^{-5}$ et $N_H = 1.3 \times 10^{22}\text{ cm}^{-2}$
- modélisation de cette région

IRAS 100 μm H α 

Emission anormale

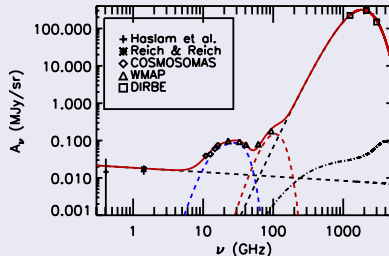
Premier modèle



- gros grains : $T_{BG} = 19$ K, $\beta_{BG} = 1.55$
- région moléculaire : $N_C = 50 - 216$, $N_H = 4.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
 $N_C = 25 - 50$, $N_H = 1.25 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ avec $\mu \sim 0.1\sqrt{N_{at}}$ (D)
- région HII : $N_C = 25 - 216$, $N_H = 8.1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
- moment dipolaire : $\mu \sim 0.6\sqrt{N_{at}}$ (D)

Emission anormale

Second modèle



- gros grains : $T_{BG} = 18 \text{ K}$, $\beta_{BG} = 2$
- région moléculaire : $N_C = 50 - 216$, $N_H = 4.25 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
 $N_C = 25 - 50$, $N_H = 1.25 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ avec $\mu \sim 0.1\sqrt{N_{at}}$ (D)
- région HII : $N_C = 25 - 216$, $N_H = 7.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
- moment dipolaire : $\mu \sim 0.6\sqrt{N_{at}}$ (D)

Emission anormale

Conclusion

- contraindre la distribution de taille et l'abondance des PAHs
- estimation de l'indice spectral des BG avec Herschel
- données en polarisation Planck

Extraction de l'émission anormale des données WMAP

(Miville-Deschênes et al. 2008)

Objectif : trouver un modèle d'émission Galactique à 23 GHz

- cartes d'intensité et de polarisation de WMAP
- champ magnétique galactique

Hypothèses :

- émission anormale non polarisée
- émission des gros grains négligeable à 23 GHz
- polarisation à 23 GHz : synchrotron

$$I_{23} = S_{23} + FF_{23} + CMB(+A_{23}) \quad \& \quad P_{23} = S_{23}^P$$

Extraction de l'émission anormale des données WMAP

(Miville-Deschênes et al. 2008)

Objectif : trouver un modèle d'émission Galactique à 23 GHz

- cartes d'intensité et de polarisation de WMAP
- champ magnétique galactique

Hypothèses :

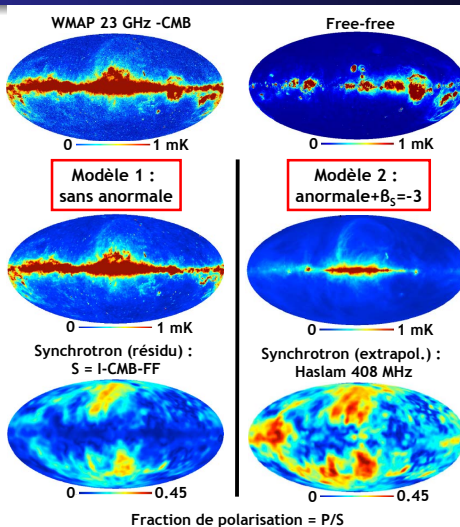
- émission anormale non polarisée
- émission des gros grains négligeable à 23 GHz
- polarisation à 23 GHz : synchrotron

$$I_{23} = S_{23} + FF_{23} + CMB(+A_{23}) \quad \& \quad P_{23} = S_{23}^P$$

Principe : comparaison de deux modèles aux données WMAP

⇒ un SANS et un AVEC émission anormale

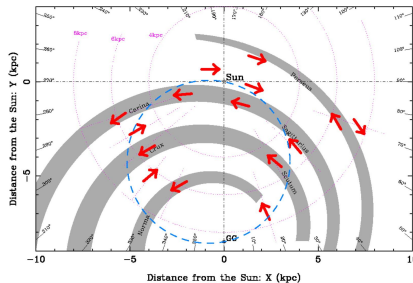
Les deux modèles



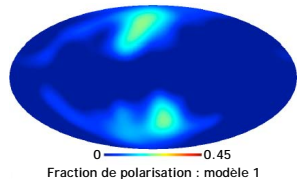
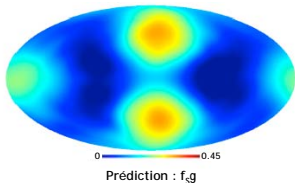
Champ magnétique Galactique

Emission synchrotron : S , Q , U fonctions de ν , f_S , \vec{B} et $(\vec{B}, l.o.s)$

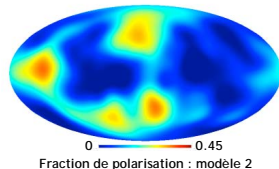
$$\frac{P}{S} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{S} = f_S g \quad \text{avec } g \text{ le facteur de dépolarisation}$$



Fraction de polarisation

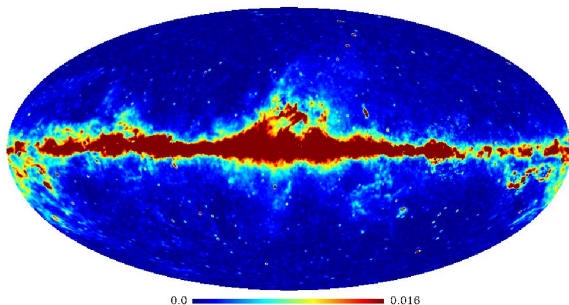


- fractions de polarisation lissées à 20°
- modèle 2 reproduit mieux structure et valeur



⇒ existence d'une composante anormale non polarisée

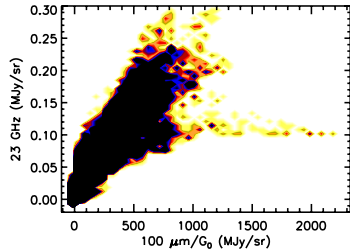
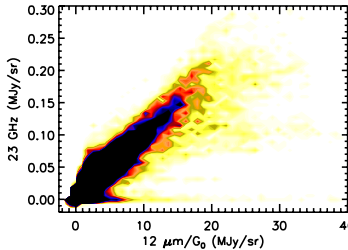
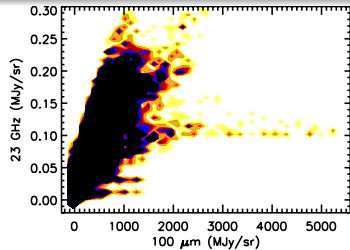
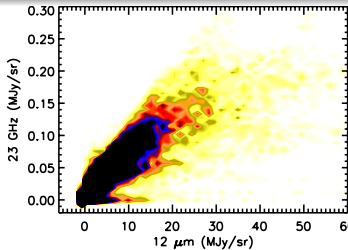
Emission anormale résultante



Emission synchrotron : $S_{23} = P_{23}/f_{Sg} \Rightarrow \beta_S = -3.00 \pm 0.06$

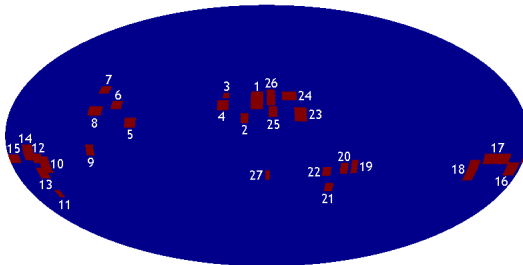
Emission anormale : $A_{23} = I_{23} - S_{23} - FF_{23} - CMB$

Sur tout le ciel

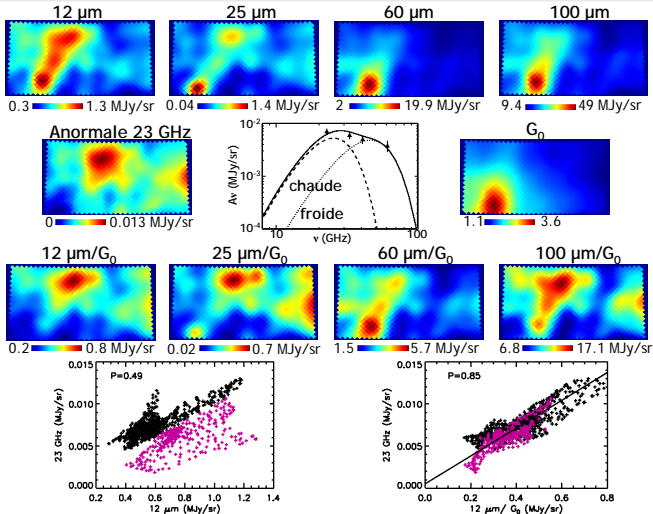


Sur une sélection de champs

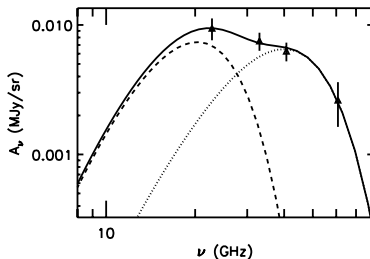
- corrélation améliorée par division par G_0 sur $\sim 60\%$ du ciel
- dégradation sur $\sim 5\%$ du ciel
⇒ indépendance de l'émission anormale par rapport à G_0
- étude sur une sélection de champs



Exemple : le champ 24



Contrainte sur la taille et le moment dipolaire des PAHs



- moment dipolaire : $m = 0.3 - 0.4 D$
⇒ cohérent avec calculs théoriques
- distribution de taille : $N_{min} \sim 24 - 50$

Conclusions

- Modélisation de l'émission IR
 - émissivité IR moyen : cirrus, Barre d'Orion
 - émissivité submillimétrique : $I_{PAH}/I_{BG} \leq 10\%$

Conclusions

- Modélisation de l'émission IR
 - émissivité IR moyen : cirrus, Barre d'Orion
 - émissivité submillimétrique : $I_{PAH}/I_{BG} \leq 10\%$
- Modélisation de l'émission rotationnelle
 - freinage : émission de photons
 - excitation : gaz/grains
 - indépendance du spectre par rapport à G_0 et n_H

Conclusions

- Modélisation de l'émission IR
 - émissivité IR moyen : cirrus, Barre d'Orion
 - émissivité submillimétrique : $I_{PAH}/I_{BG} \leq 10\%$
- Modélisation de l'émission rotationnelle
 - freinage : émission de photons
 - excitation : gaz/grains
 - indépendance du spectre par rapport à G_0 et n_H
- Extraction de l'émission anormale des données WMAP

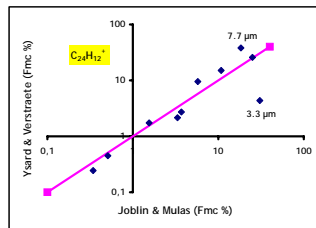
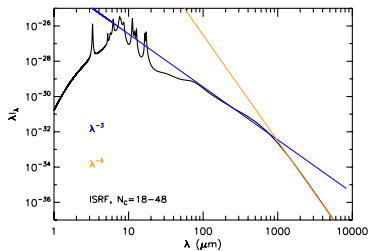
Conclusions

- Modélisation de l'émission IR
 - émissivité IR moyen : cirrus, Barre d'Orion
 - émissivité submillimétrique : $I_{PAH}/I_{BG} \leq 10\%$
- Modélisation de l'émission rotationnelle
 - freinage : émission de photons
 - excitation : gaz/grains
 - indépendance du spectre par rapport à G_0 et n_H
- Extraction de l'émission anormale des données WMAP
- Confrontation aux observations
 - corrélation avec l'émission IR
 - indépendance de G_0

Perspectives

- Etude de l'émission anormale en fonction des phases interstellaires
- Observation de l'émission anormale extragalactique
- Contraindre la distribution de taille des PAHs
⇒ polarisation avec Planck HFI et LFI
- Observation de nuages denses
⇒ tracer avec l'émission anormale les variations d'abondance constatées dans l'IR (Bernard et al. 1993)
- Incorporation de l'émission rotationnelle dans le modèle de régions de photodissociation
⇒ PDR+DUSTEM

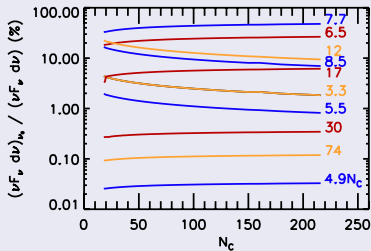
Comparaison à Joblin (2005) & Mulas et al. (2006)



Importance des photons émis à basse énergie

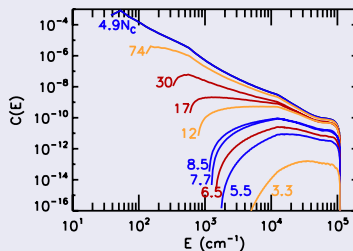
Point de vue énergétique

- émissivité dans l'IR moyen domine ($\sim 7 - 12 \mu\text{m}$)

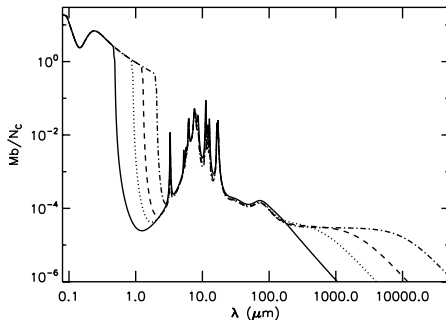


Nombre de photons

- majorité des photons émis par des PAHs à E faible
- important à grande λ et pour la rotation

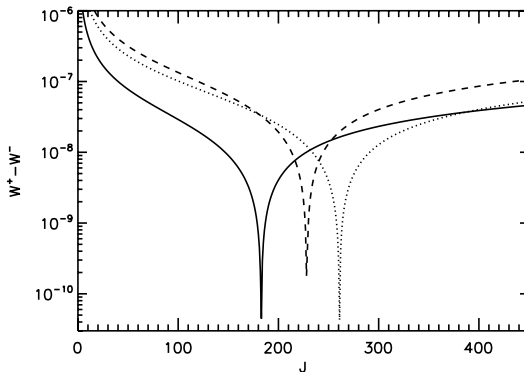


Section efficace d'absorption



- continu : $N_C = 24$
- pointillés : $N_C = 54$
- tirets : $N_C = 96$
- tirets-pointillés : $N_C = 216$

Comparaison $(\tau^{-1} \Delta J)_{IR}$

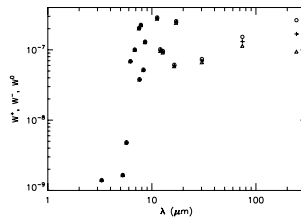
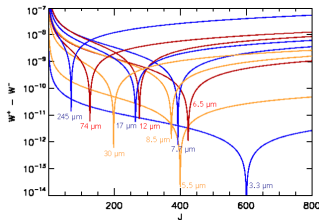
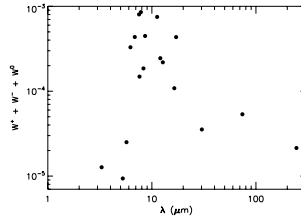
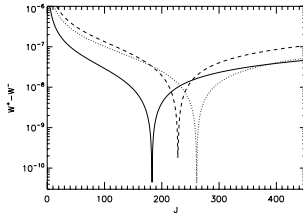


Rouan et al. (1992) : tirets

Draine & Lazarian (1998) : pointillés

Ysard & Verstraete : continu

Suite de la comparaison de l'IR



Comparaison avec Rouan et al. (1992/1997)

- Cas du CNM : $N_C = 50$, $J_0 \sim 100$

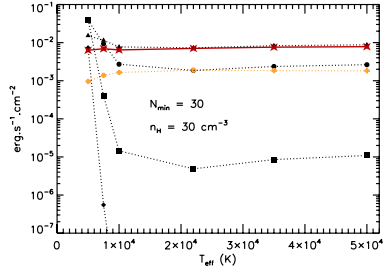
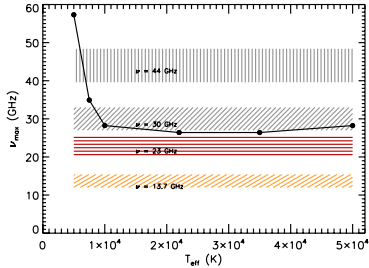
Processus	$ \tau^{-1}\Delta J(J = J_0) $ (Rouan et al. 1992/1997)	$ \tau^{-1}\Delta J(J = J_0) $ (Ysard & Verstraete)
photons rot.	2.98×10^{-7}	2.67×10^{-7}
photons IR	2.09×10^{-7}	2.40×10^{-8}
gaz/grains	2.53×10^{-8}	2.39×10^{-7}
formation H ₂	1.38×10^{-9}	1.02×10^{-9}

Contribution du CMB à l'excitation rotationnelle

- pour $N_C = 24$: $(\tau^{-1}\Delta J)_{CMB} \sim 3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$
- pour $N_C = 54$: $(\tau^{-1}\Delta J)_{CMB} \sim 8 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$
- pour $N_C = 96$: $(\tau^{-1}\Delta J)_{CMB} \sim 3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$
- pour $N_C = 216$: $(\tau^{-1}\Delta J)_{CMB} \sim 6.3 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$

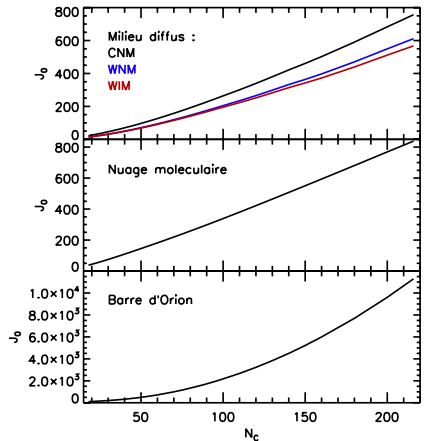
⇒ influence négligeable du CMB pour l'excitation rotationnelle sauf dans des milieux très diffus et faiblement irradiés

Influence de T_{eff}



Moment angulaire le plus probable

- peu d'influence de la section efficace d'absorption (position et profils des bandes)
- J_0 augmente avec la taille des PAHs
- J_0 augmente avec n_H et G_0
⇒ dans quelle mesure ?



Interactions avec le gaz

Collisions avec les atomes et les ions du gaz :

- collage à la surface des PAHs
⇒ évaporation sous forme neutre avec $\tau_{év} = \tau_{coll}$
- Draine & Lazarian 1998

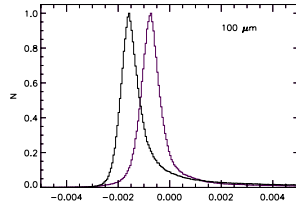
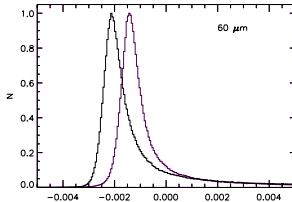
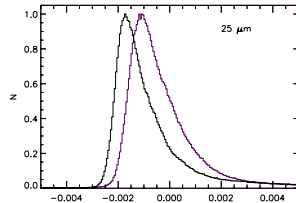
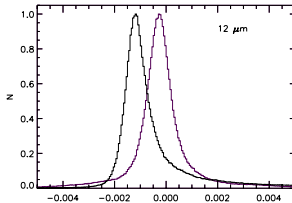
Entraînement par le plasma :

- couple exercé par le \vec{E} créé par les ions sur le $\vec{\mu}$ des PAHs
- Draine & Lazarian (1998)

Formation de H_2 à la surface des PAHs :

- Jura (1975) : $R_f = 3 \times 10^{-17} \sqrt{T_{gaz}/70}$ (cm^{-3}/s)
- limite supérieure

Histogrammes de corrélation



Le Page et al. (2003)

- Dans le milieu diffus ($n_H < 100 \text{ cm}^{-3}$)
 - $N_C < 20$: photodissociés
 - $N_C = 20 - 30$: déshydrogénés et ionisés ($> 60 \%$)
 - $N_C > 30$: quasi-totalement hydrogénés et ionisés ($> 80 \%$)
- Dans le milieu dense ($n_H > 100 \text{ cm}^{-3}$)
 - $N_C < 20$: photodissociés
 - $N_C = 20 - 30$: déshydrogénés et neutres ($> 70\%$)
 - $N_C > 30$: quasi-totalement hydrogénés et ionisés ($> 70\%$)