

# EMISSION A GRANDE LONGUEUR D'ONDE DES PAH<sub>s</sub> INTERSTELLAIRES

**NATHALIE YSARD**

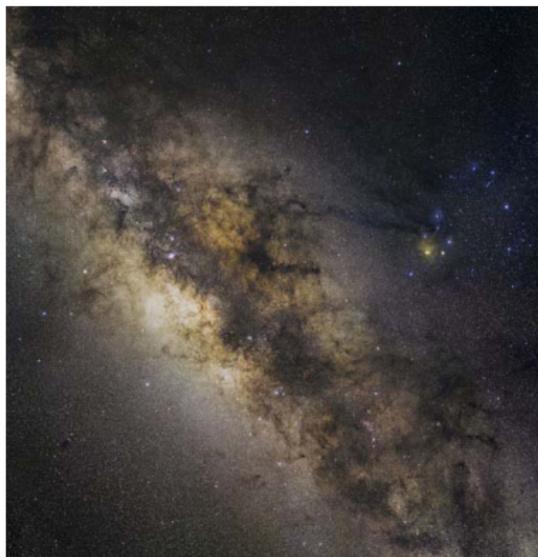
sous la direction de L. Verstraete

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

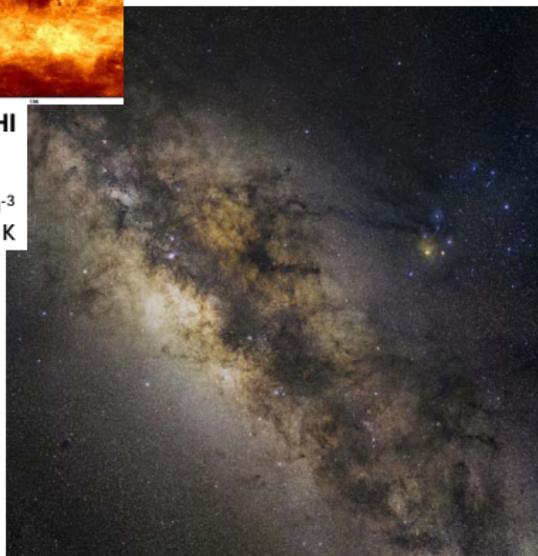
## Milieu neutre $\Rightarrow$ HI

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

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

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

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

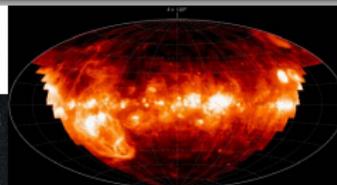


# Composition du milieu interstellaire (MIS)



DRAO  
HI 21 cm

WHAM  
H $\alpha$



## Milieu neutre $\Rightarrow$ HI

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

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

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

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

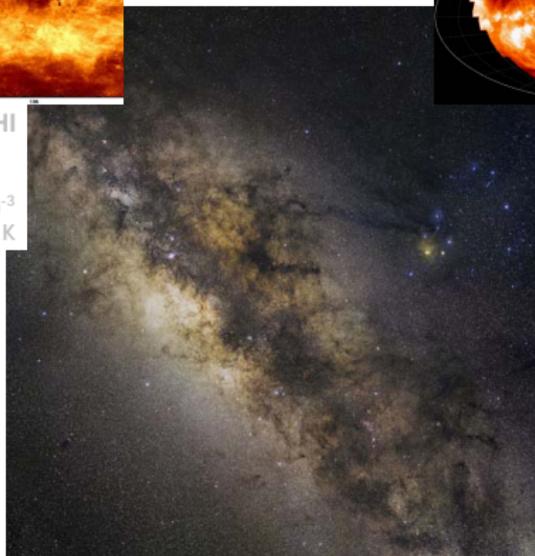
## Milieu ionisé $\Rightarrow$ HII

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

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

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

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

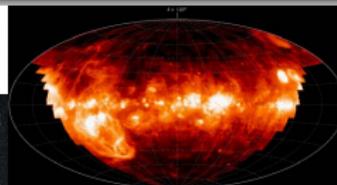


# Composition du milieu interstellaire (MIS)



DRAO  
HI 21 cm

WHAM  
H $\alpha$



## 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

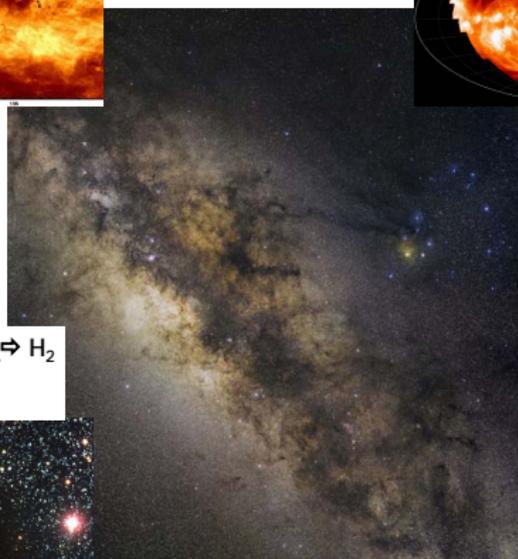
- WIM :  $n_H \sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$   
 $T_{\text{gaz}} \sim 8000 \text{ K}$
- HIM :  $n_H < 0.1 \text{ cm}^{-3}$   
 $T_{\text{gaz}} \sim 10^6 \text{ K}$

## 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

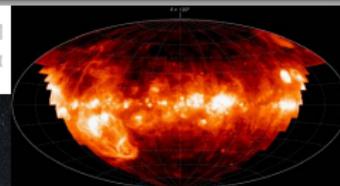


# Composition du milieu interstellaire (MIS)



DRAO  
HI 21 cm

WHAM  
H $\alpha$



## 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 $_2$

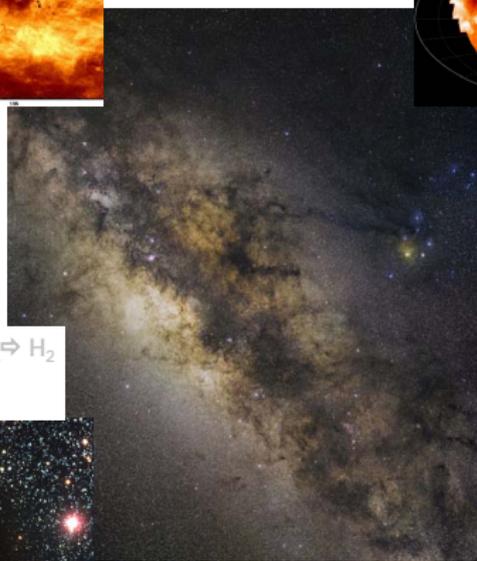
- MC :  $n_H > 100 \text{ cm}^{-3}$   
 $T_{\text{gaz}} \sim 10\text{-}30 \text{ K}$

## Formation d'étoiles

-rayonnement UV



VLT, ESO  
B, V, I



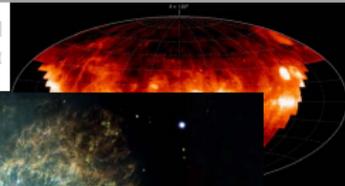
HST  
OIII, H $\alpha$ , SII

# 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

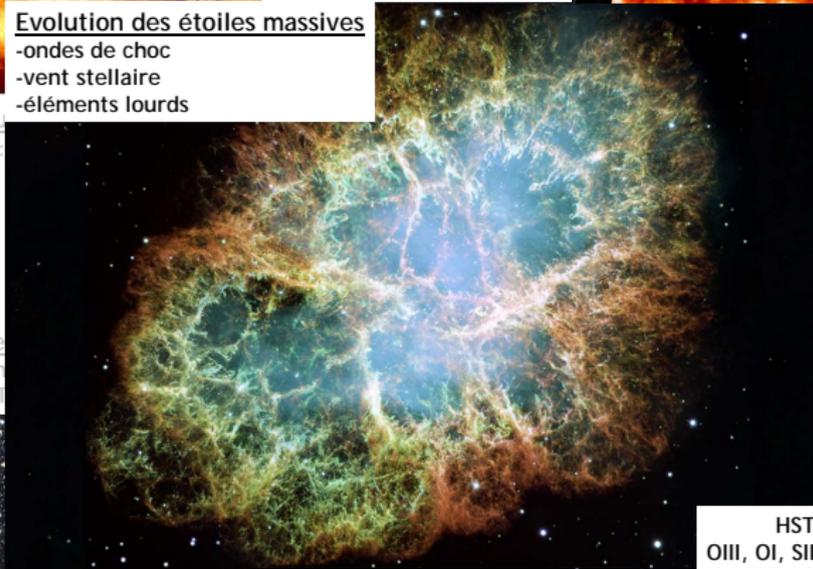
$\Rightarrow$  HII

$1 \text{ cm}^{-3}$

3000 K

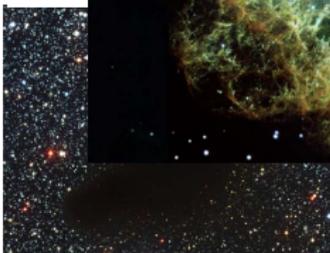
$1 \text{ cm}^{-3}$

$10^6 \text{ K}$



### étoiles

UV



VLT, ESO  
B, V, I

HST  
OIII, Ha, SII

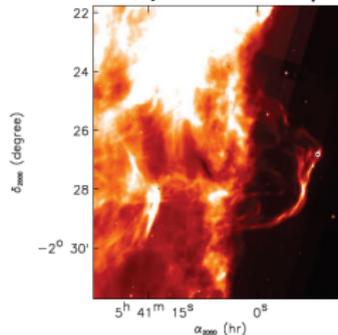


HST  
OIII, OI, SII

# Composition du milieu interstellaire (MIS)

## Nébuleuse de la Tête de Cheval

visible (VLT/ESO)

IR (Spitzer IRAC, 8 $\mu$ m)

- Les grains ou poussières
  - une grande partie des éléments lourds
  - 1% de la masse du MIS
  - sites de formation de H<sub>2</sub> (chimie)
  - chauffage du gaz par effet photoélectrique
  - transfert de rayonnement dans la Galaxie

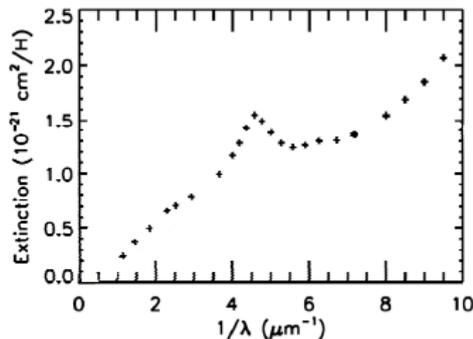
# Extinction et émission

- Extinction et émission caractéristiques du milieu diffus

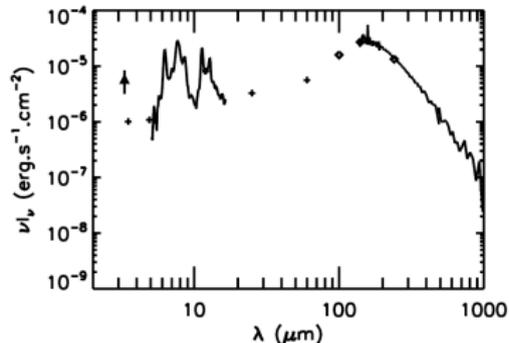
absorption

+

diffusion

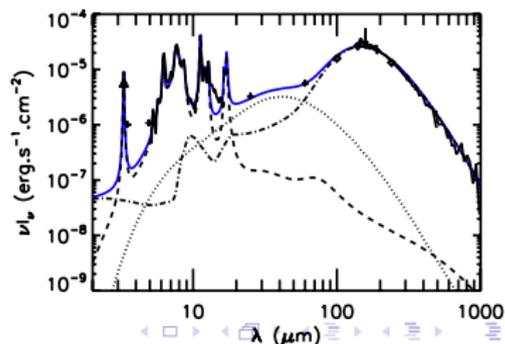
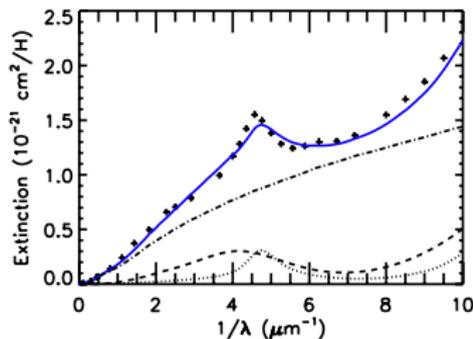


émission IR  
après absorption  
de photons stellaires



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

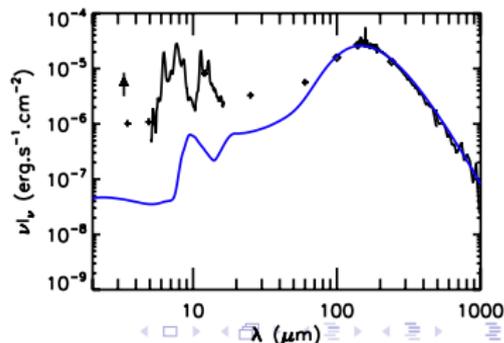
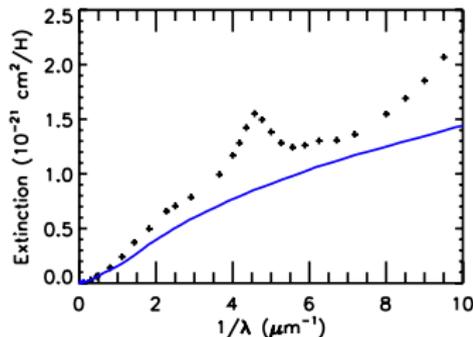
Rendre compte de l'extinction et de l'émission interstellaires :



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

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

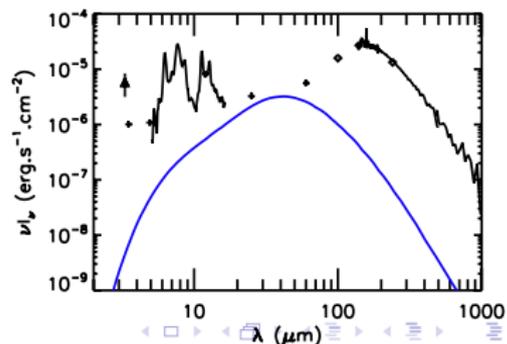
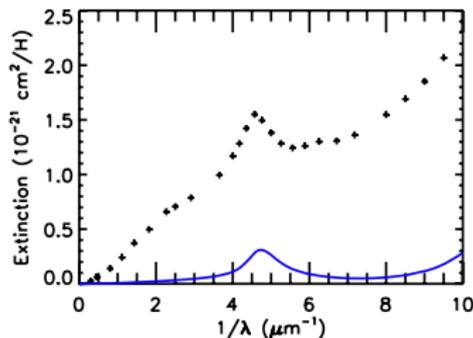
- Les gros grains ou BG (*Big Grains*) :  $15 \leq a \lesssim 100$  nm, mélange de graphite et de silicates, à l'équilibre thermique



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

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

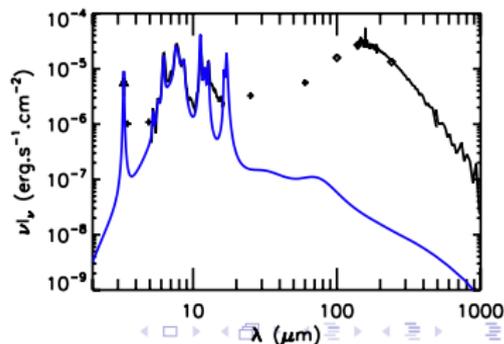
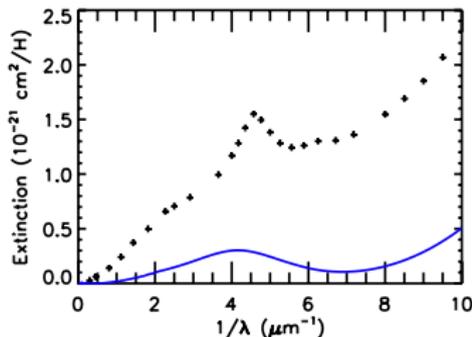
- Les gros grains ou BG (*Big Grains*)
- Les très petits grains ou VSG (*Very Small Grains*) :  
 $1 \leq a \leq 15$  nm, particules carbonées



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

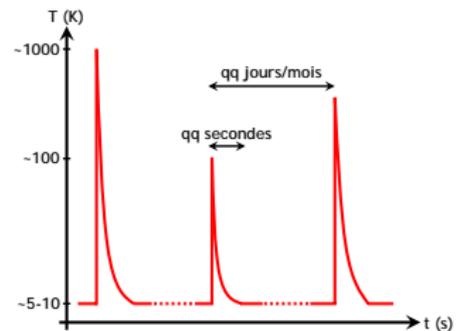
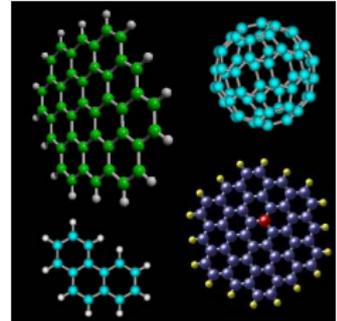
Rendre compte de l'extinction et de l'émission interstellaires :

- 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  $\mu\text{m}$  : 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

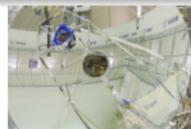
## Planck

- HFI : 100 à 857 GHz  
(350  $\mu\text{m}$  à 3 mm)
- LFI : 30, 43 & 70 GHz  
(4 mm à 1 cm)



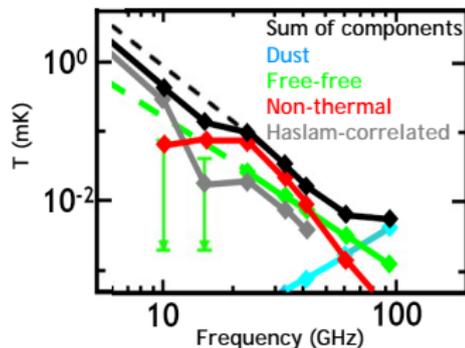
## Herschel

- SPIRE : 60 à 210  $\mu\text{m}$
- PACS : 250 à 520  $\mu\text{m}$
- HIFI : 157 à 625  $\mu\text{m}$

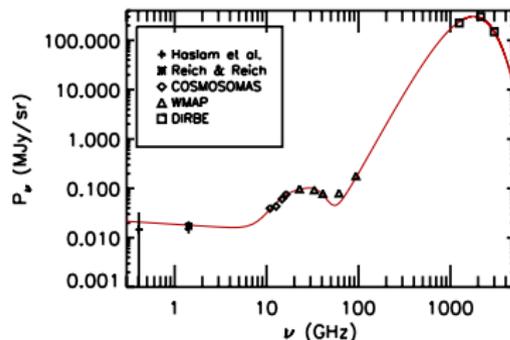


## Emission dite “anormale”

- 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  $\mu\text{m}$ , Casassus et al. 2006)



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



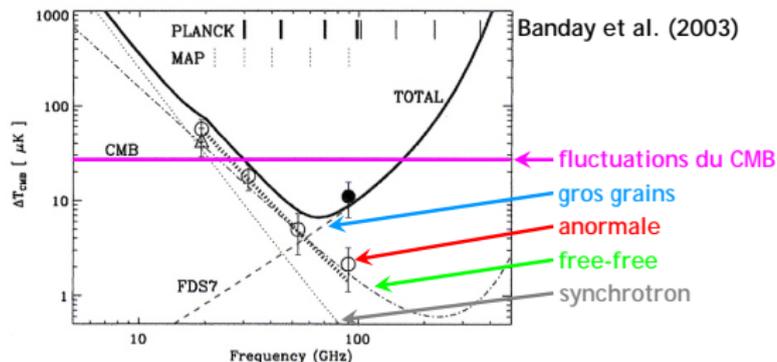
Nuage moléculaire  
 dans le complexe de Persée  
 (Watson et al. 2005)

# 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  $C_{42}H_{16}$

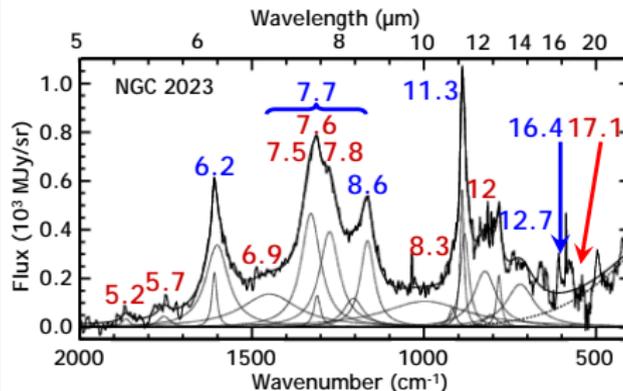
## Section efficace dans l'UV, le visible et l'IR moyen

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

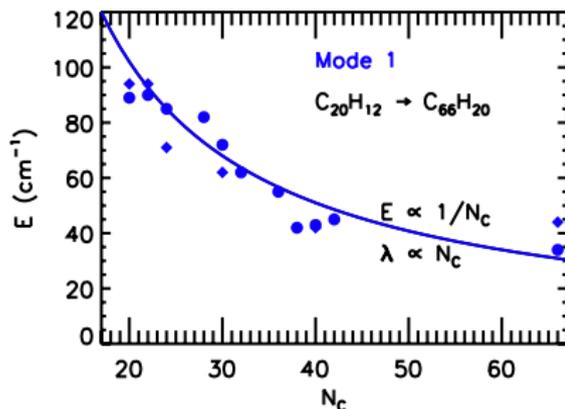
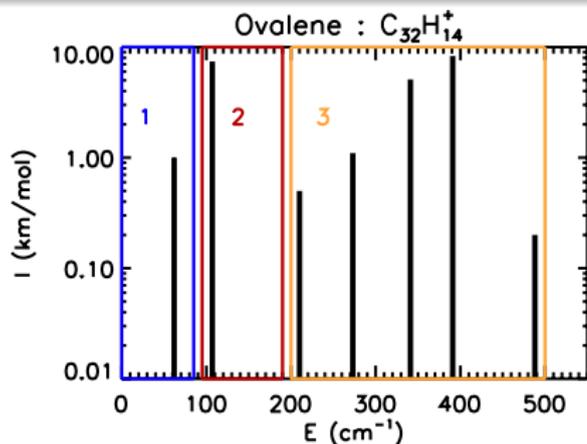
### Dans l'UV et le visible

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

### Dans l'IR moyen : 3 à 20 $\mu\text{m}$ (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

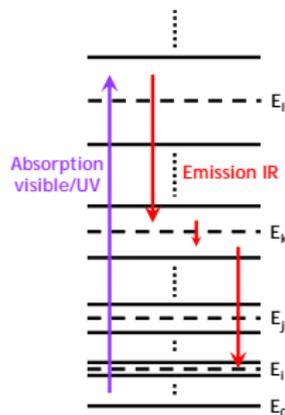


description  
microcanonique

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

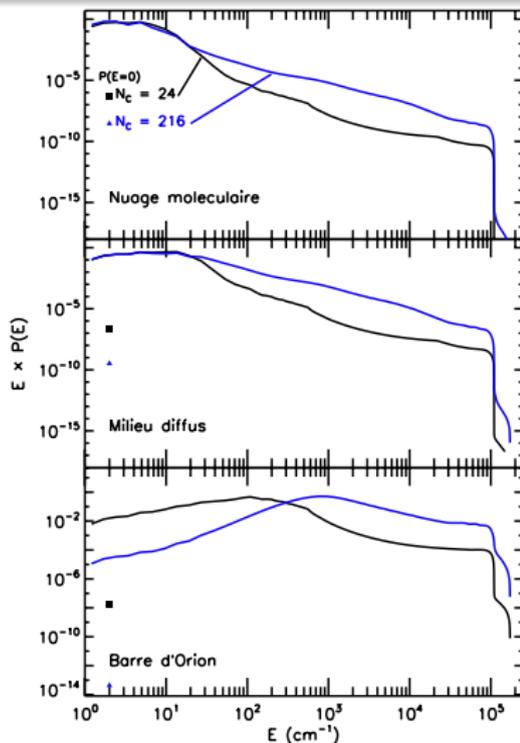
$$\frac{dP_i}{dt} = \sum_{j \neq i}^M T_{j \rightarrow i} P_j - \sum_{i \neq j}^M T_{i \rightarrow j} P_i = 0$$

- $P_i$  : 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

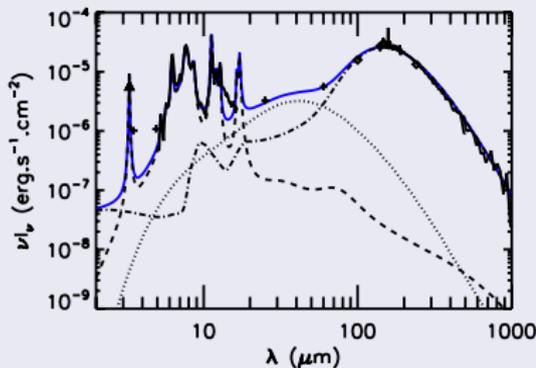
Emission IR pour une taille donnée de PAH :

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

# Emission IR résultante

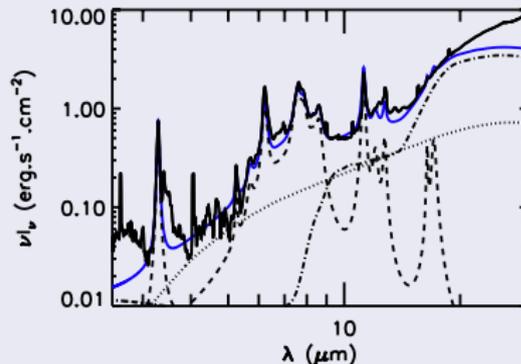
## Milieu diffus

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



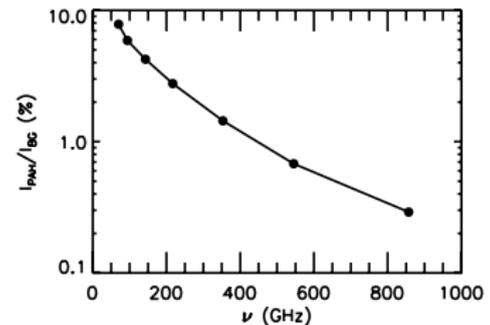
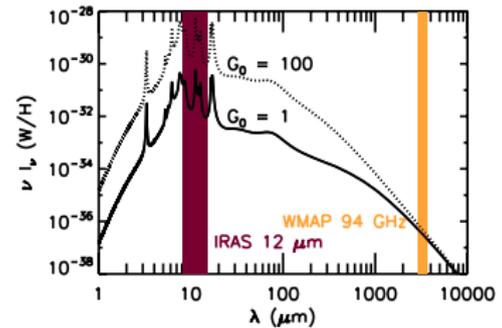
## Barre d'Orion

- 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  $\lesssim 10\%$

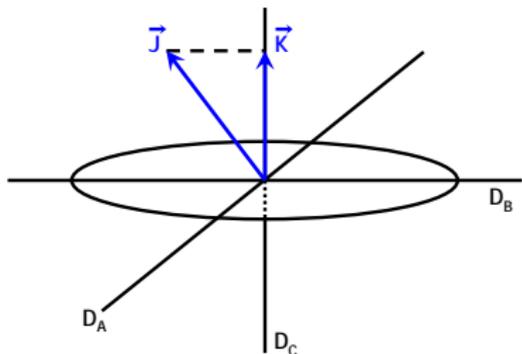


# Objectif

## 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



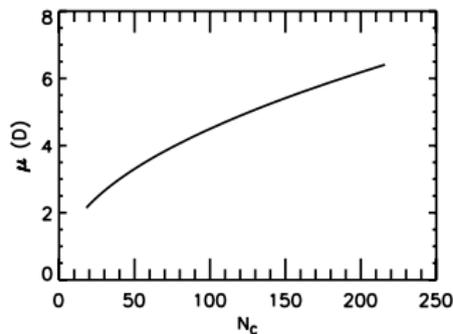
- Moment angulaire total  $\vec{J}$  :  $l\omega = \hbar J$   
 $l \rightarrow$  moment d'inertie de la molécule
- Energie rotationnelle :  $E_{rot} = BJ(J + 1) + (C - B)K^2$   
 $B, C \rightarrow$  constantes rotationnelles

## 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

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

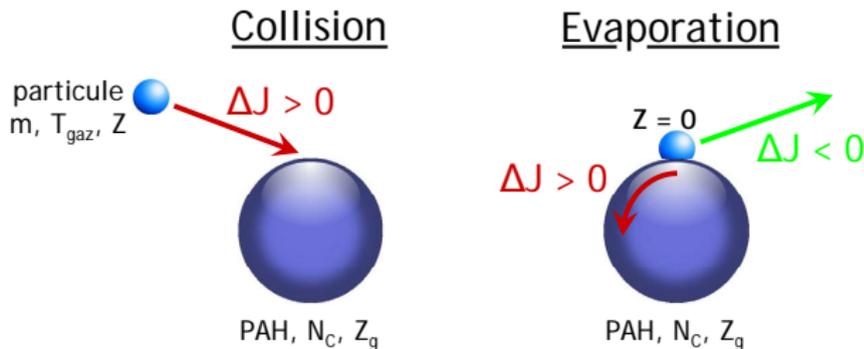


# Qu'est-ce qui fait tourner les grains ?

Processus participant au freinage et à l'excitation rotationnels :

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

- émission de photons
- interactions gaz/grain



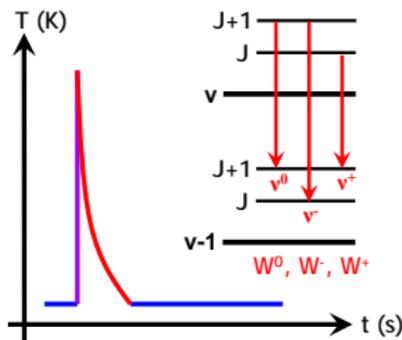
⇒ taux de changement de  $J$  pour tous les processus  $(\tau^{-1} \Delta J)_i$

# 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

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

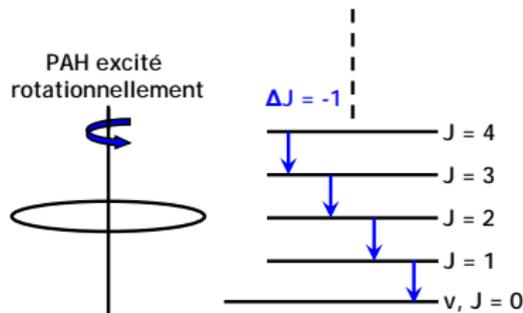
$P(E), \sigma_{\text{abs}}$

## 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  $\Delta J$
- 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 $n(J)$

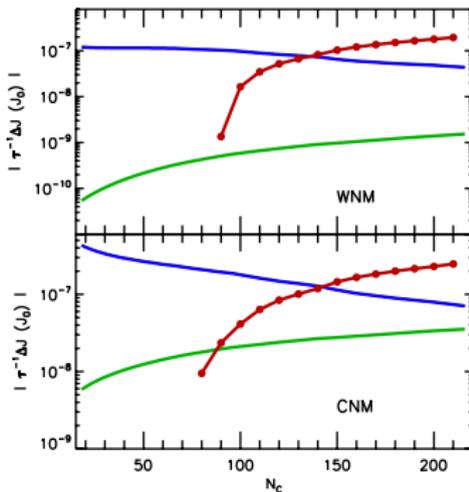
- $\Delta J \ll J \Rightarrow$  thermique

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

# Contributions au freinage et à l'excitation rotationnels

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

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

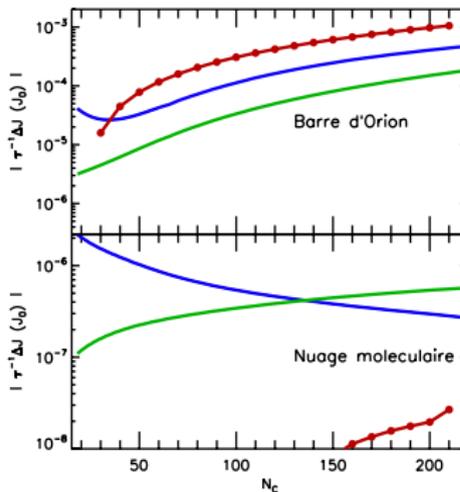


Freinage

- rotation
- émission IR
- collisions & plasma

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

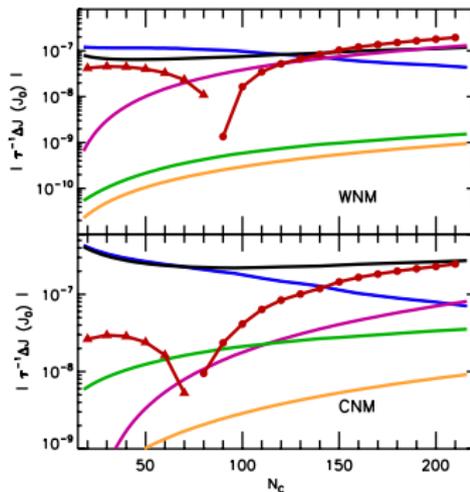
Nuage moléculaire :  $n_H = 300 \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_{\text{gaz}} = 20 \text{ K}$



# Contributions au freinage et à l'excitation rotationnels

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

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

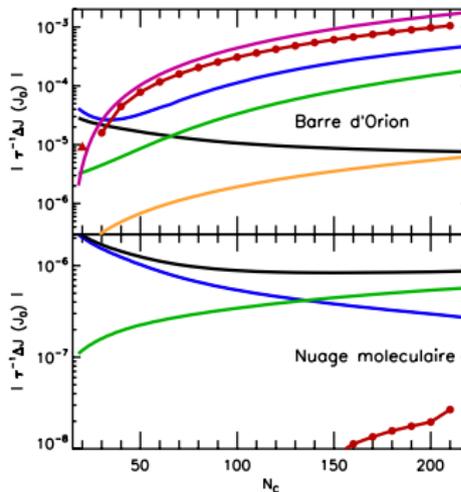


### Freinage

- 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 H<sub>2</sub>

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

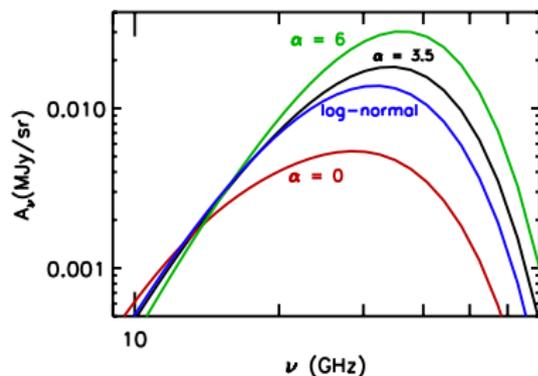
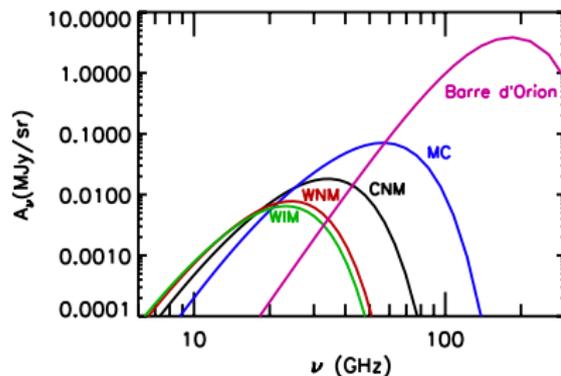
- Freinage : émission de photons rotationnels et IR
- Excitation : collisions ou effet photoélectrique

# Spectre rotationnel

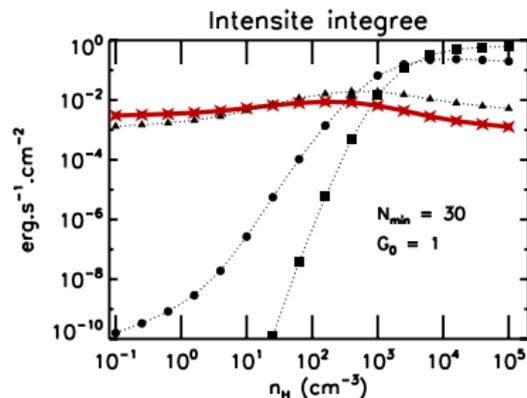
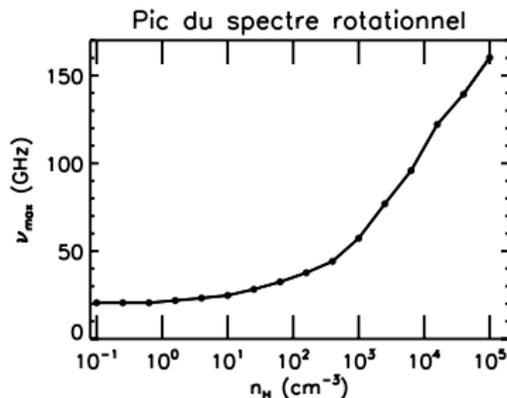
Intensité émise pour une distribution de taille  $n_{PAH}(N_C)dN_C$  :

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

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



## Influence de la densité $n_H$



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

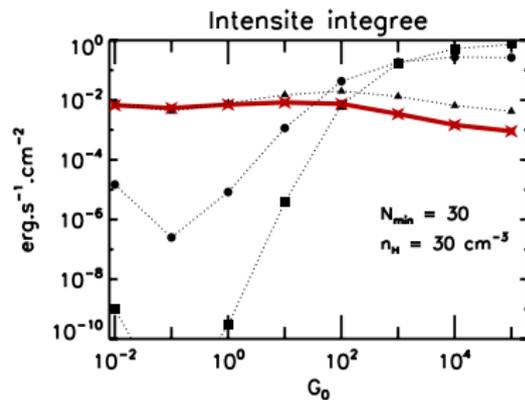
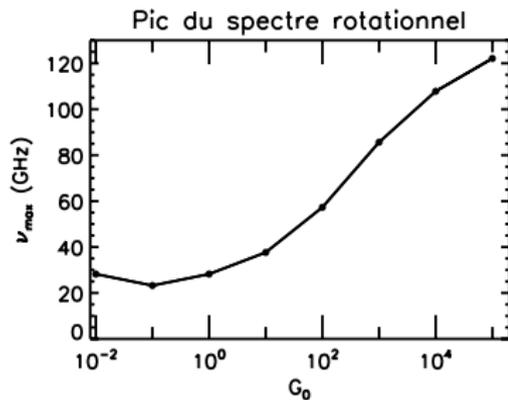
★ 23 GHz (WMAP)

▲ 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

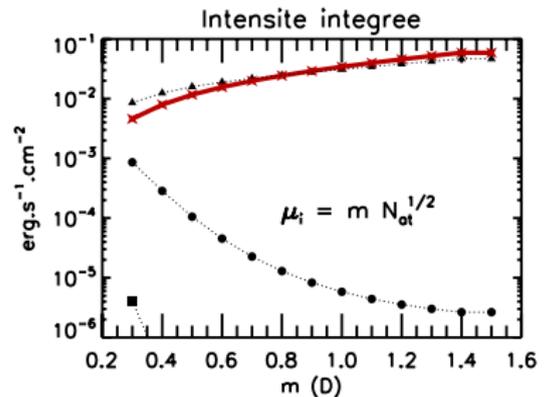
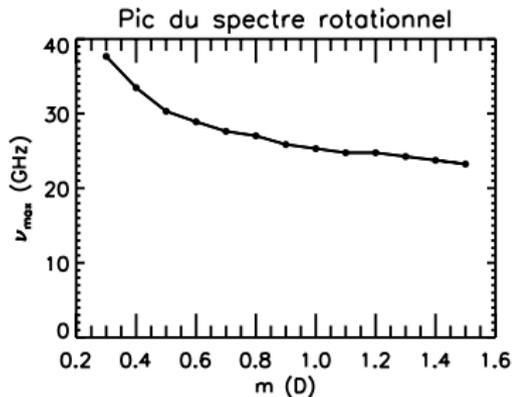
★ 23 GHz (WMAP)

▲ 30 GHz (Planck LFI)

● 70 GHz (LFI)

■ 100 GHz (HFI)

# Influence du moment dipolaire électrique $\mu_i$



⇒ spectre décalé à plus basse fréquence quand  $\mu$  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  $\mu\text{m}$  que 100  $\mu\text{m}$
- 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

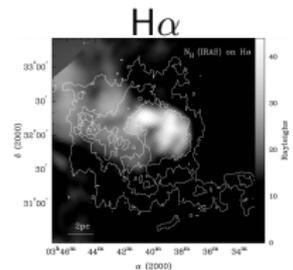
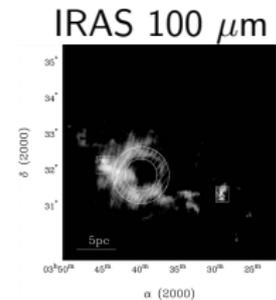
# Objectif

## 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

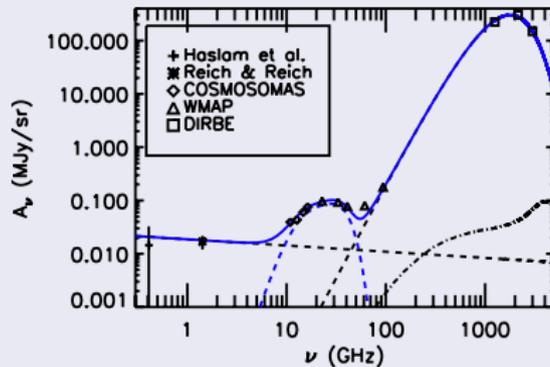
## Description de G159.6-18.5

- 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



# Emission anormale

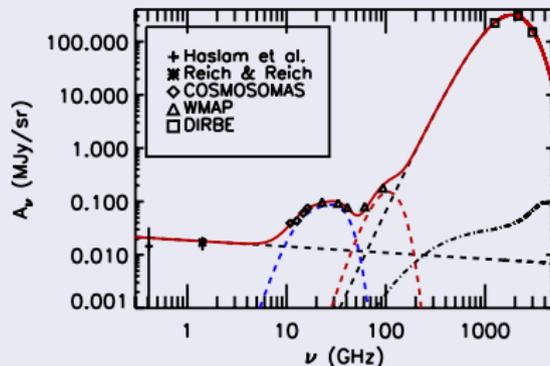
## Premier modèle



- 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** :

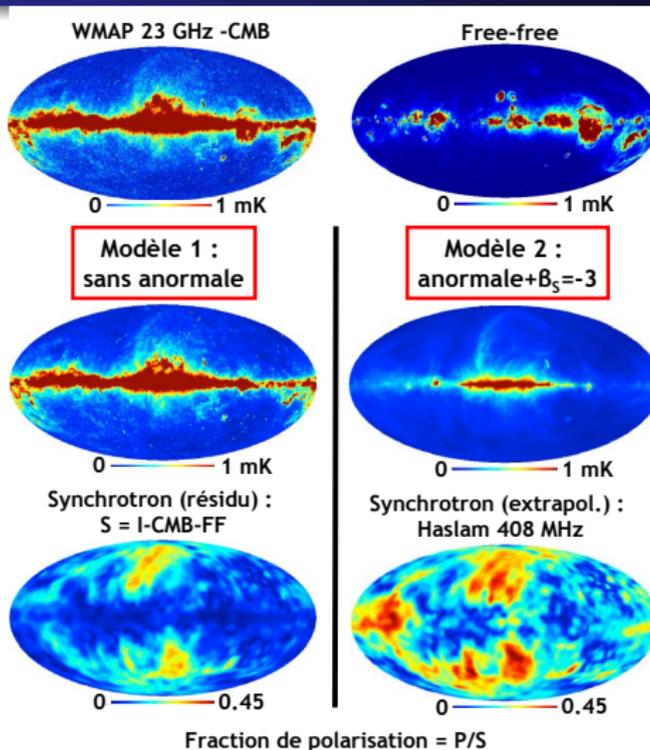
- émission anormale non polarisée
- émission des gros grains négligeable à 23 GHz
- polarisation à 23 GHz : synchrotron

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

**Principe** : comparaison de deux modèles aux données WMAP

⇒ un SANS et un AVEC émission anormale

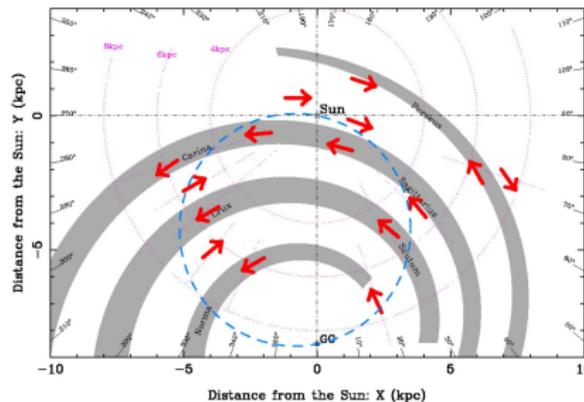
# Les deux modèles



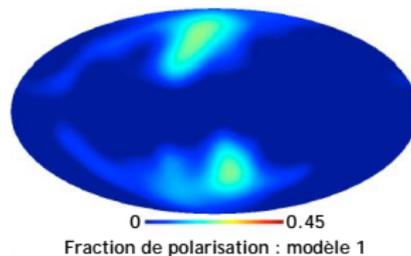
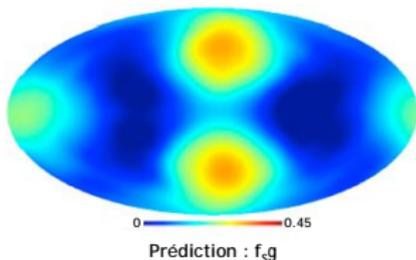
# Champ magnétique Galactique

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

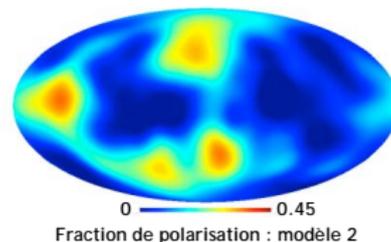
$$\frac{P}{S} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{S} = f_S g \quad \text{avec } g \text{ le facteur de dépolarisation}$$



# Fraction de polarisation

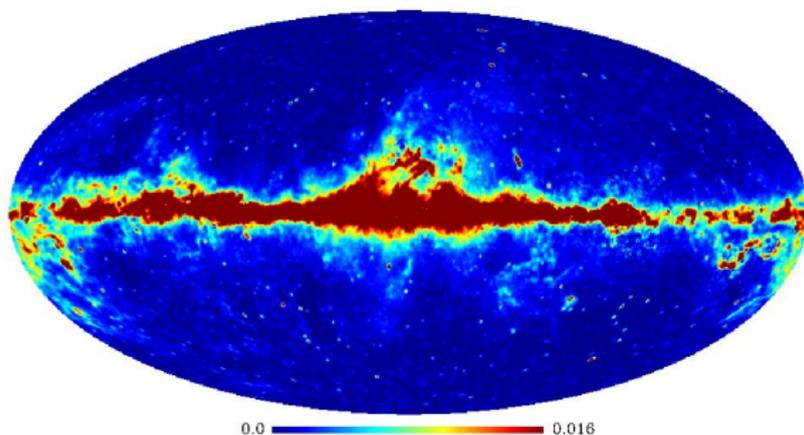


- fractions de polarisation lissées à  $20^\circ$
- modèle 2 reproduit mieux structure et valeur



⇒ existence d'une composante anormale non polarisée

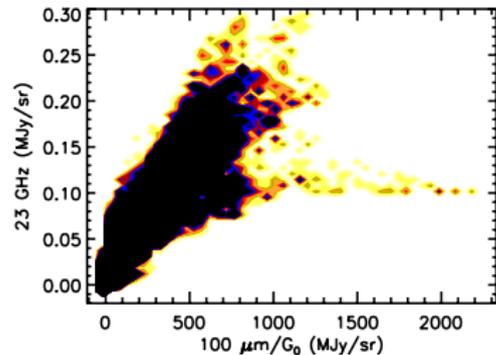
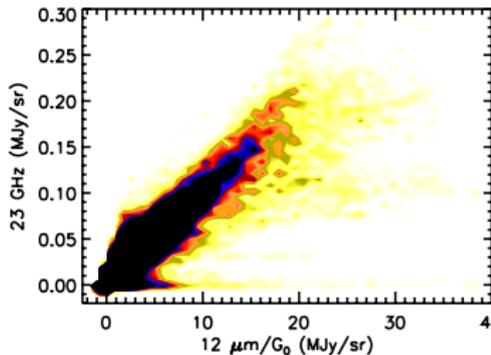
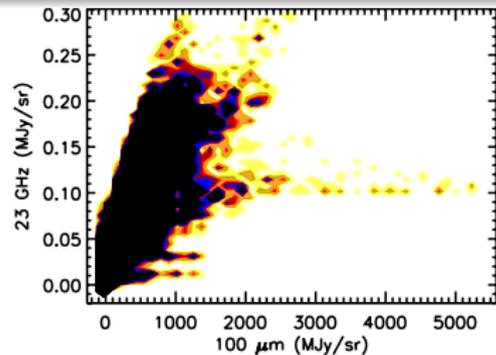
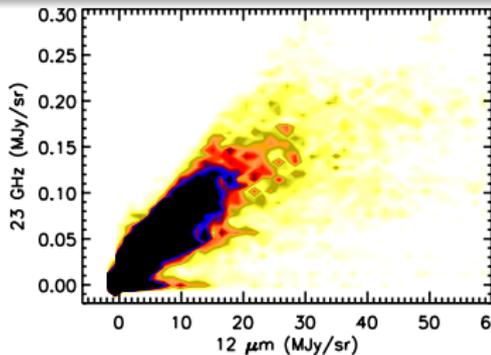
# Emission anormale résultante



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

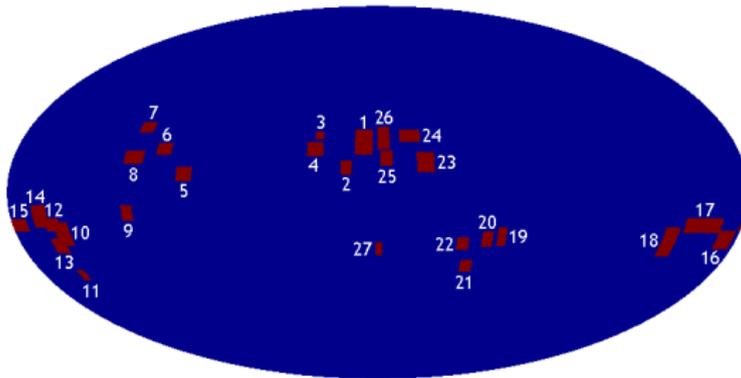
Emission anormale :  $A_{23} = I_{23} - S_{23} - FF_{23} - CMB$

# Sur tout le ciel

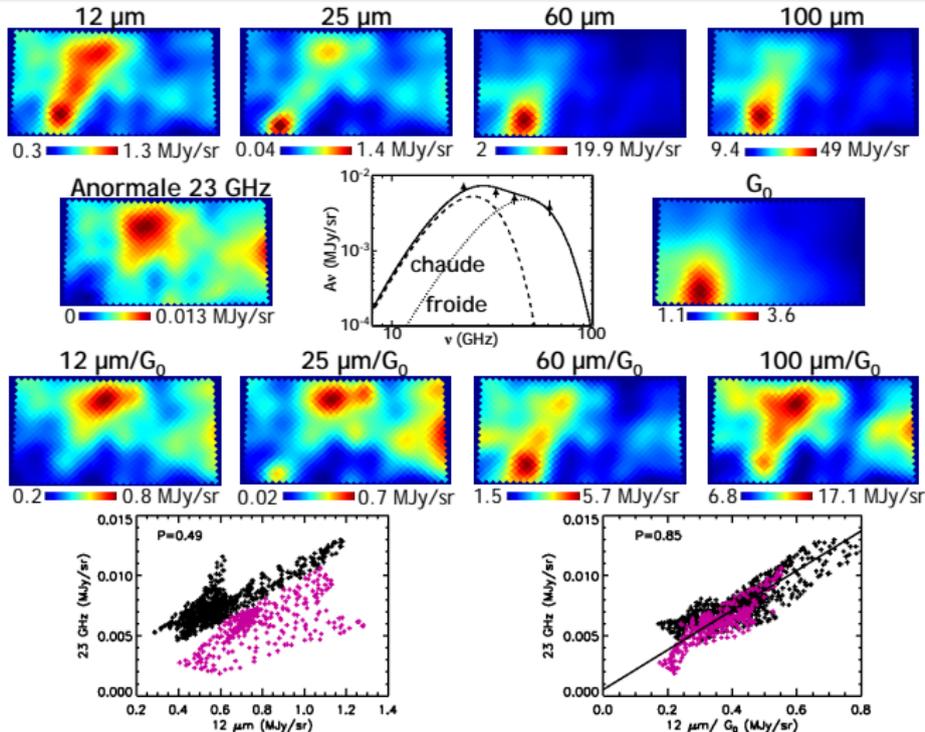


## Sur une sélection de champs

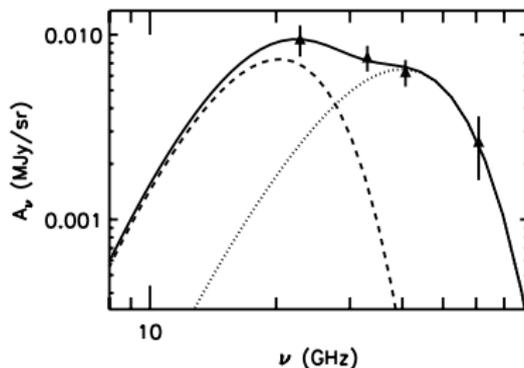
- corrélation améliorée par division par  $G_0$  sur  $\sim 60\%$  du ciel
- dégradation sur  $\sim 5\%$  du ciel  
⇒ indépendance de l'émission anormale par rapport à  $G_0$
- étude sur une sélection de champs



# 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

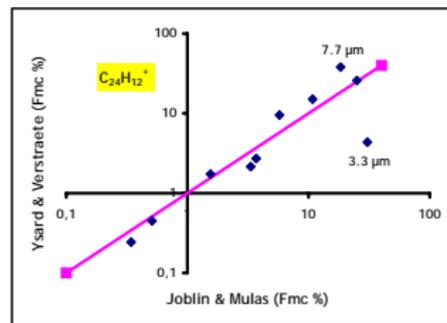
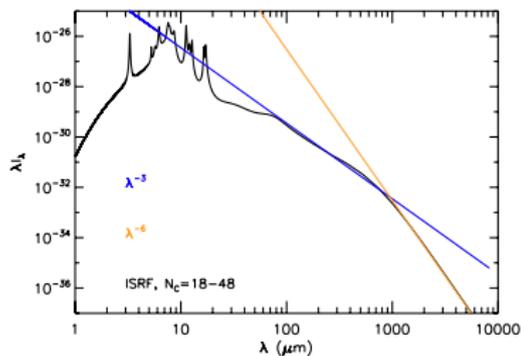
# Conclusions

- 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

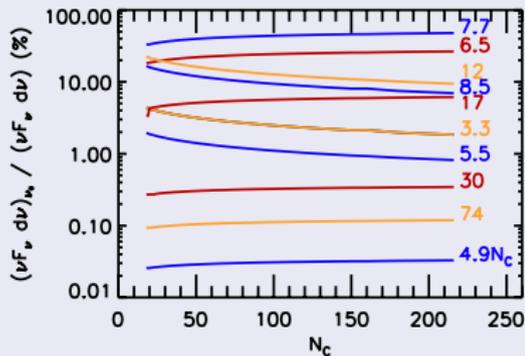
# Comparaison à Joblin (2005) & Mulas et al. (2006)



# Importance des photons émis à basse énergie

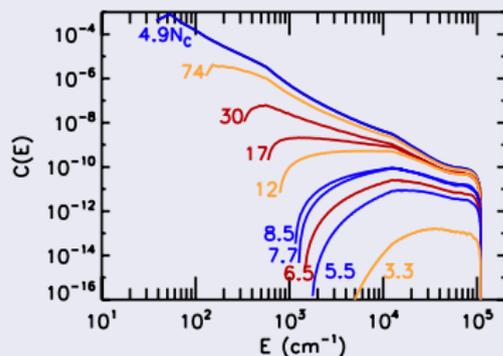
## Point de vue énergétique

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

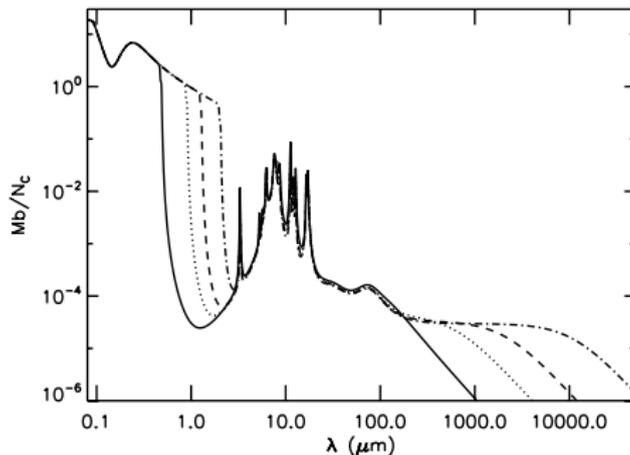


## Nombre de photons

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

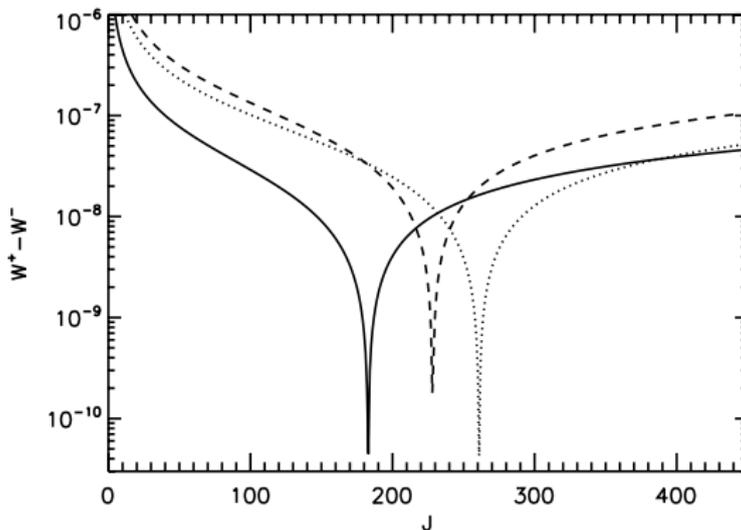


## Section efficace d'absorption



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

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

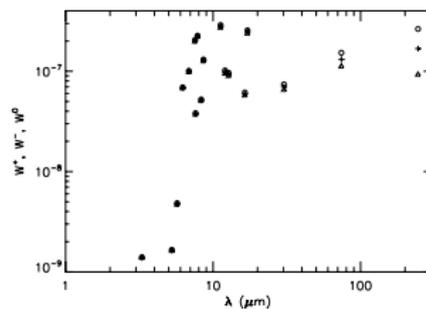
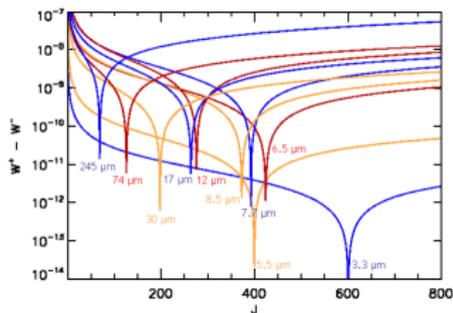
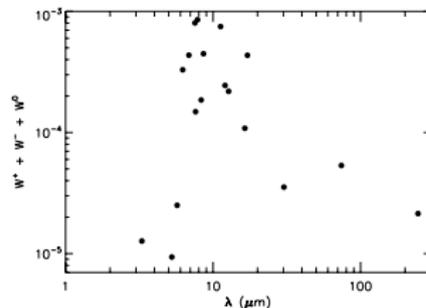
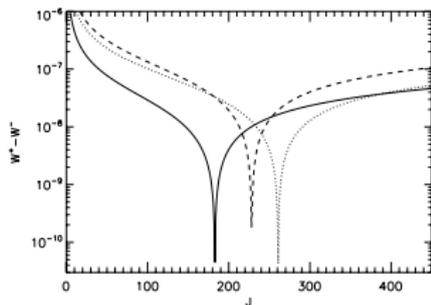


Rouan et al. (1992) : tirets

Draine & Lazarian (1998) : pointillés

Ysard & Verstraete : continu

# Suite de la comparaison de l'IR



## Comparaison avec Rouan et al. (1992/1997)

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

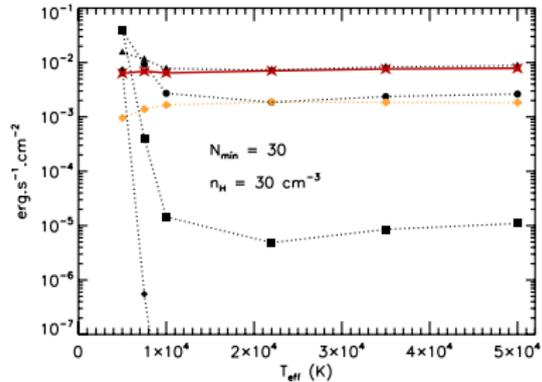
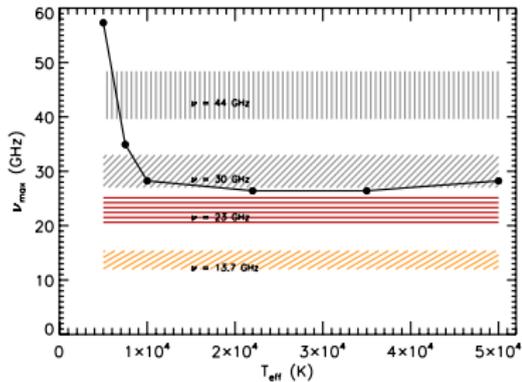
Processus	$ \tau^{-1}\Delta J(J = J_0) $ (Rouan et al. 1992/1997)	$ \tau^{-1}\Delta J(J = J_0) $ (Ysard & Verstraete)
photons rot.	$2.98 \times 10^{-7}$	$2.67 \times 10^{-7}$
photons IR	$2.09 \times 10^{-7}$	$2.40 \times 10^{-8}$
gaz/grains	$2.53 \times 10^{-8}$	$2.39 \times 10^{-7}$
formation H <sub>2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

## 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  $N_C = 216$  :  $(\tau^{-1}\Delta J)_{CMB} \sim 6.3 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$

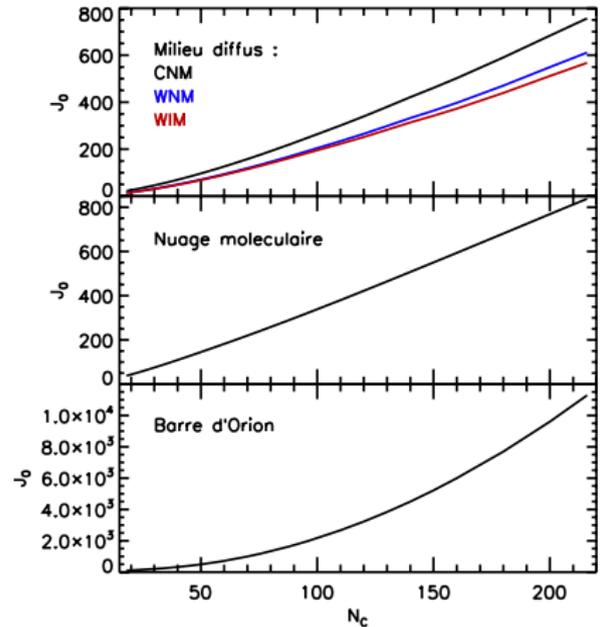
⇒ influence négligeable du CMB pour l'excitation rotationnelle sauf dans des milieux très diffus et faiblement irradiés

# Influence de $T_{\text{eff}}$



# 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

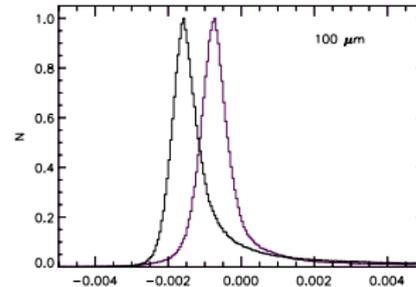
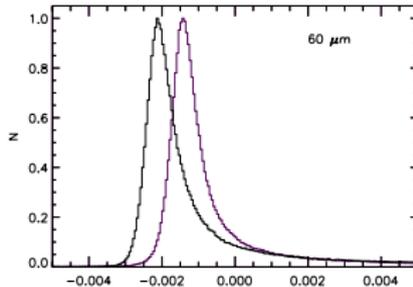
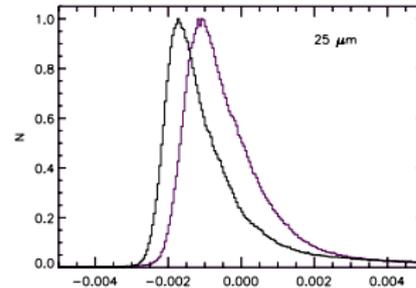
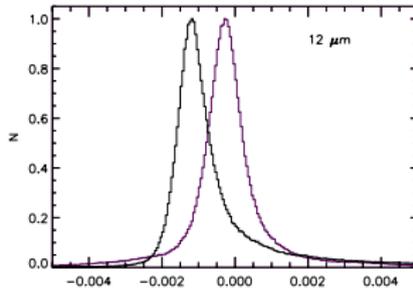
Entraînement par le plasma :

- 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 ( $> 70\%$ )