

# 原始惑星系円盤からの水素分子輝線：ダスト成長の影響

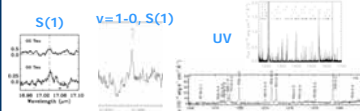
野村 英子、相川 祐理 (神戸大)、Tom Millar (Univ. of Manchester)

## ABSTRACT

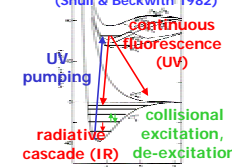
最近の近・中間赤外線、紫外線観測は原始惑星系円盤ガス質量を最も確実にトレースする水素分子遷移線の観測を可能にしつつある。本研究では、円盤のガス温度分布、水素分子各エネルギー準位の滞在密度を計算し、円盤からの水素分子輝線をモデル計算した。特に円盤内ダスト粒子のサイズ成長が、ダスト吸収係数・ダスト表面の光電加熱率等を通じ、円盤からの水素分子輝線へ及ぼす影響について調べたところ、ダスト成長に伴い、ダスト表面の光電加熱率が減少した結果、ガス温度は低くなった。これにより、高エネルギー準位の滞在密度はLTEからnon-LTEへと変化した。その結果、ダスト成長に伴い、各水素分子輝線の強度比が変化することがわかった。

## INTRODUCTION

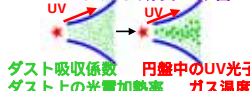
**Tタウリ型星周囲からのH<sub>2</sub>輝線観測**  
 MIR S(0)@28μm, S(1)@17μm, S(2)@12μm  
 GG Tau, GO Tau, LkCa 15 by ISO (Thi et al. 2001)  
 GG Tau, DG Tau by TEXES (Richer et al. 2002)  
 NIR v=1-0 S(1) @2.12μm  
 GG Tau, TW Hya, LkCa 15, DoAr25 by NOAO (Bary et al. 2003)  
 LkHα 264 by Subaru (Itoh et al. 2004)  
 UV TW Hya by HST, FUSE (Herczeg et al. 2002)  
 146 Lyman-band H<sub>2</sub> lines



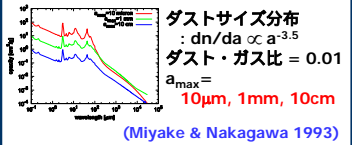
### 水素分子遷移過程



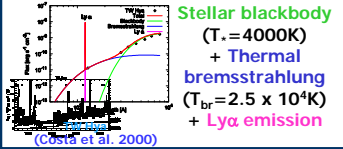
### 水素分子輝線へのダスト成長の影響



## ダスト吸収係数



## 中心星からのUV放射



## ガス密度分布

z方向の静水圧平衡

$$c_s^2 \frac{d\rho}{dz} = -\rho g_z = -\frac{\rho GM_* z}{(x^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$c_s^2 = 2kT/\mu m_p, M_* = 0.5 M_\odot$$

エネルギー・パランス (円盤面密度: Σ)

$$\frac{9}{4} \Sigma \alpha c_s^3 \Omega = \frac{3GM_* \dot{M}}{8\pi x^3} \left[ 1 - \left( \frac{R_*}{x} \right)^{1/2} \right]$$

$$\dot{M}_{acc} = 10^{-8} M_\odot / \text{yr} (= \text{const.}), \alpha = 0.01$$

## 円盤モデル

ガス温度分布

$$\Gamma_{pe} + L_{gr} - A_{line} = 0$$

FUV光子に起因するダスト上の光電加熱:  $\Gamma_{pe}$

OI, CII, CO遷移線による輻射冷却:  $A_{line}$

ガス・ダスト粒子の衝突による加熱・冷却:  $L_{gr}^{OC} (T_{gr} - T)$

ダスト温度分布

局所輻射平衡 (吸収=再放射)

$$\int_0^\infty dv \kappa_v \int_0^\infty I_\nu d\Omega = 4\pi \int_0^\infty dv \kappa_v B_\nu(T_{gr})$$

加熱源

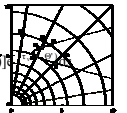
(A) 赤道面における粘性加熱 (粘性)

(B) 中心星からの照射加熱

輻射輸送方程式 (軸対称2次元)

$$I_\nu(r, \theta; \mu, \phi) = \int_0^\infty \kappa_\nu(r', \theta') B_\nu(T(r', \theta'))$$

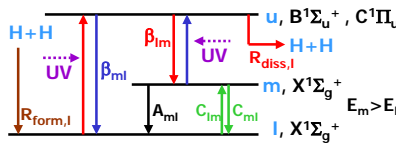
球座標 Short characteristic 法 (Dullemond & Turloula 2000)



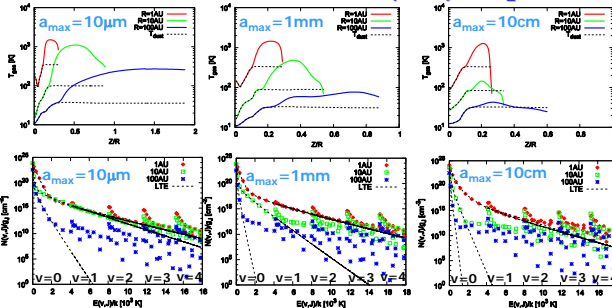
## H<sub>2</sub> LEVEL POPULATION

Statistical Equilibrium

$$n_1(H_2) \left[ \sum_{m=1}^{\infty} (\beta_{1m} + \sum_n n(S) C_{1m}^n) + R_{diss,1} \right] = \sum_{m=1}^{\infty} n_m(H_2) \left( A_{m1} + \beta_{m1} + \sum_n n(S) C_{m1}^n \right) + n(H) R_{form,1}$$

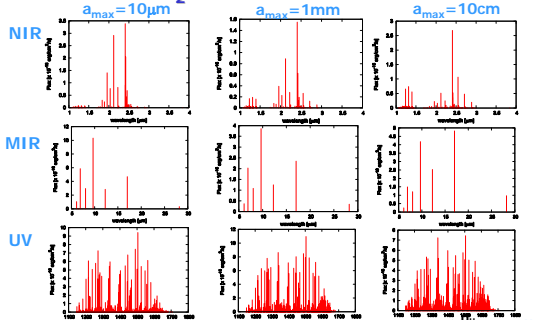


## 計算結果：ガス温度分布(上段)・H<sub>2</sub> Level Population(下段)



$a_{max} \nearrow \rightarrow n_{dust} \searrow \rightarrow$   
 ダスト上の光電加熱  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  円盤表面で  $T_{gas} \searrow$   
 $a_{max} \nearrow \rightarrow T_{gas} \searrow$   
 高エネルギー準位: non-LTE  
 UV pump. & cascade

## H<sub>2</sub> LINE SPECTRE



$\frac{dI_\nu}{dz} = -\alpha_\nu(I_\nu - S_\nu)$   $S_\nu = \frac{1}{4\pi} \sum_n n_n A_{nu} \frac{h\nu_\nu}{4\pi}$   $\alpha_\nu = \kappa_\nu(n_\nu) + (n_1 B_{1u} - n_u B_{u1}) \frac{h\nu_\nu}{4\pi}$   $\frac{A_{ul}}{B_{ul}}$   $\frac{B_{ul} J_\nu}{B_{ul} J_\nu}$

NIR (振動回転遷移: LTE/non-LTE):  $a_{max} / I(v=2-0) / I(v=1-0)$   
 MIR (純回転遷移: LTE):  $a_{max} / T_{gas} / I(\text{small } J) / I(\text{large } J)$   
 UV (電子軌道遷移):  $a_{max} / n(\text{large } v) / n(\text{small } v) / \text{line: 密}$

## 観測との比較

		[erg/cm <sup>2</sup> /s]				
NIR: v=1-0 S(1) @2.12μm	Obs.	Strong UV	$a_{max}=10\mu\text{m}$	$a_{max}=1\text{mm}$	$a_{max}=10\text{cm}$	
	$(1.0 - 15) \times 10^{-15}$	$3.4 \times 10^{-15}$	$2.9 \times 10^{-16}$	$8.9 \times 10^{-16}$	$5.1 \times 10^{-16}$	
	MIR: S(0) @28μm, S(1) @17μm, S(2) @12μm	Obs. by ISO	Obs. by TEXES	Strong UV	$a_{max}=10\mu\text{m}$	$a_{max}=1\text{mm}$
S(0) $(2.5 - 5.7) \times 10^{-14}$	$3.1 \times 10^{-18}$	$3.1 \times 10^{-18}$	$9.0 \times 10^{-18}$	$3.5 \times 10^{-18}$	$9.7 \times 10^{-18}$	
S(1) $(2.8 - 8.1) \times 10^{-14}$	$< 3.9 \times 10^{-14}$	$2.4 \times 10^{-15}$	$4.7 \times 10^{-16}$	$2.3 \times 10^{-16}$	$4.8 \times 10^{-16}$	
S(2) $< 3.0 \times 10^{-14}$	$< 3.0 \times 10^{-14}$	$2.2 \times 10^{-15}$	$2.8 \times 10^{-16}$	$1.2 \times 10^{-16}$	$2.5 \times 10^{-16}$	
UV: v=1-3 P(5) @1272.0Å	Obs.	Strong UV	$a_{max}=10\mu\text{m}$	$a_{max}=1\text{mm}$	$a_{max}=10\text{cm}$	
	$2.05 \times 10^{-14}$	$2.35 \times 10^{-14}$	$7.3 \times 10^{-15}$	$7.8 \times 10^{-15}$	$5.3 \times 10^{-15}$	

## まとめ

原始惑星系円盤内のガス温度・密度分布 & 水素分子滞在密度・輝線計算

円盤表面のガス温度:  $a_{max} / T_{gas}$   
 水素分子滞在密度:  $a_{max} / \text{高エネルギー準位の滞在数} / \text{LTE non-LTE}$   
 水素分子輝線:  $a_{max} / \text{NIR: } n(v=2)/n(v=1) / I(v=2-0)/I(v=1-0) / \text{MIR: } n(\text{small } J) / n(\text{large } J) / I(\text{small } J) / I(\text{large } J) / \text{UV: } n(\text{large } v) / n(\text{small } v) / \text{line 間隔: 密}$