

SPICAによる原始惑星系円盤からの複雑な有機分子輝線の観測予測2

野村英子¹, Chen-En Wei², Catherine Walsh³, T. J. Millar⁴

1. 国立天文台, 2. 東工大地惑, 3. リーズ大学, UK, 4. キーンズ大学ベルファスト, UK

ABSTRACT 原始惑星系円盤中の物質進化の理解は、太陽系や系外惑星系の物質の起源を探るうえで重要である。我々は円盤物理構造モデルにもとづき、ダスト表面反応も含めた化学反応計算を行い、円盤中の複雑な有機分子生成過程を調べた。その結果、円盤外縁の低温部においてはダスト表面で水素付加反応が進むのに対し、円盤内縁の暖かな領域においては、光解離により生じたラジカル同士の反応で複雑な有機分子が生成された。ALMA 観測では、円盤外縁でCH₃OHやCH₃CNが観測されている。特にCH₃OHは低温領域をトレースする遷移線が観測されており、モデルとの比較により、円盤外縁部において水素付加反応により生成された分子が非熱的な過程により気相に脱離したものを観測したと考えられている。本研究では、これまでの化学反応計算の結果を用い、円盤からの複雑な有機分子輝線の赤外線放射スペクトル

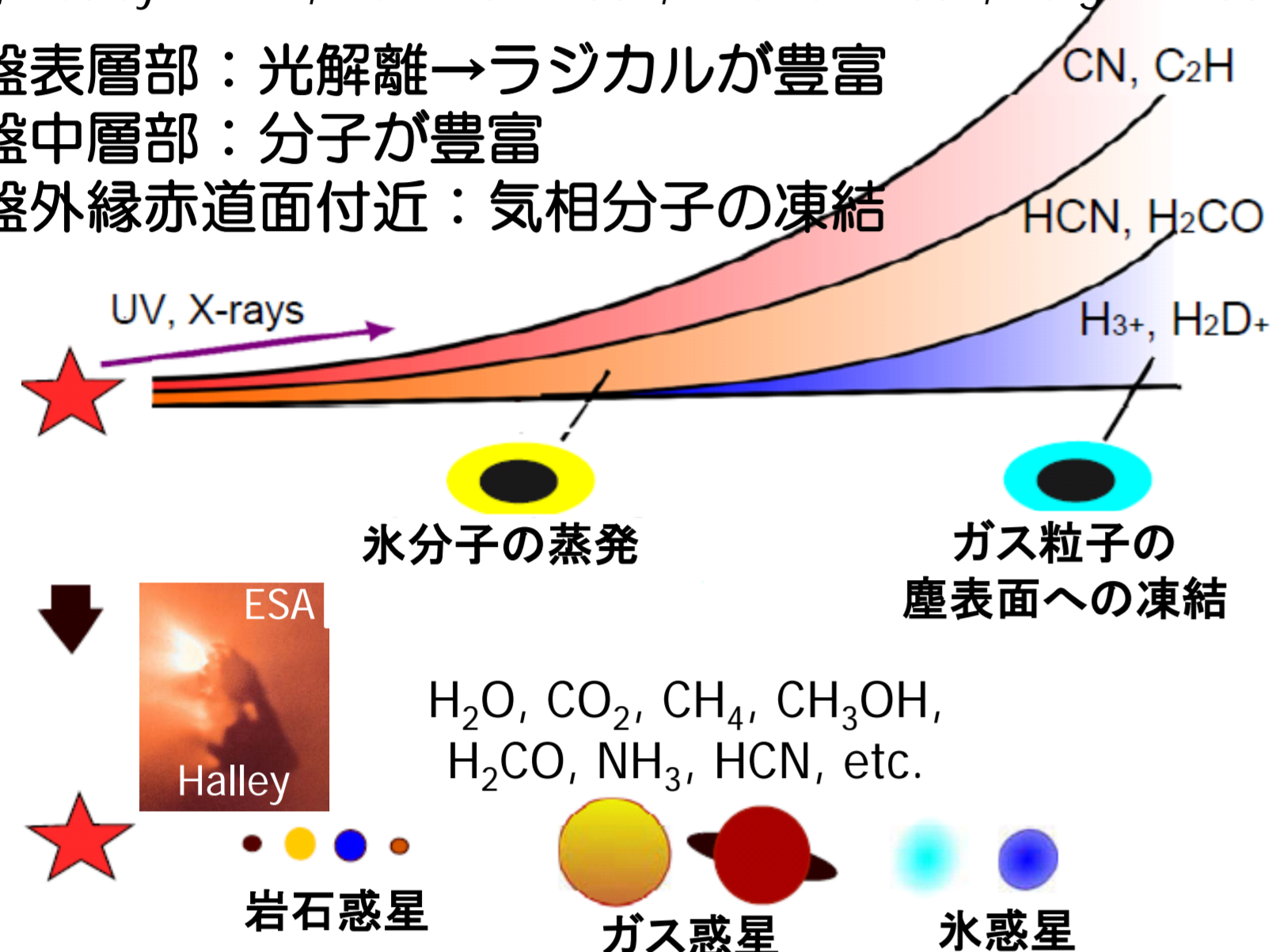
の輻射輸送計算を行った。次世代赤外線天文衛星SPICAは、中間・遠赤外線領域の高感度分光観測が可能である。本研究では、SPICAで観測可能な波長帯に現れる複雑な有機分子輝線をモデル計算した。その結果、このような輝線はSPICAを用いれば検出可能であり、また、赤外線輝線は励起温度が高いため、円盤内縁の暖かい領域から放射されることが示された。このような領域は、ダスト表面でラジカル同士の反応が進む領域、あるいは分子がダストから熱的に脱離する領域であり、また、彗星形成領域に相当する。ALMAではCH₃OH以外にもHC₃N, CH₃CN, HCOOH, H₂CSといった分子が円盤より観測されており、これらの分子は、SPICA/SMIやSAFARIで観測可能な中間赤外線、遠赤外線の波長帯にも遷移線を持つ。SPICAによりこれらの分子を観測することで、円盤内での暖かなダスト表面反応に対する理解が進むと期待される。

Introduction

原始惑星系円盤の化学構造

(e.g., Dutrey+ 1997, Markwick+2002, Aikawa+ 2002, Bergin+ 2007)

- 円盤表層部：光解離→ラジカルが豊富
- 円盤中層部：分子が豊富
- 円盤外縁赤道面付近：気相分子の凍結



原始惑星系円盤からのガス輝線の観測

UV H₂ Lyman-Werner band transitions

Optical [OI] 6300Å

NIR H₂ v=1-0 S(1), S(0), CO Δv=2, Δv=1, H₂O, OH, HCN, C₂H₂, CH₄

MIR H₂ v=0-0 S(1), S(2), S(4) H₂O, OH, HCN, C₂H₂, CO₂ (Spitzer Space Telescope)

FIR [OI] 63μm, 145μm, CO, H₂O, CH⁺, HD, NH₃, etc. (Herschel Space Observatory)

(sub)mm

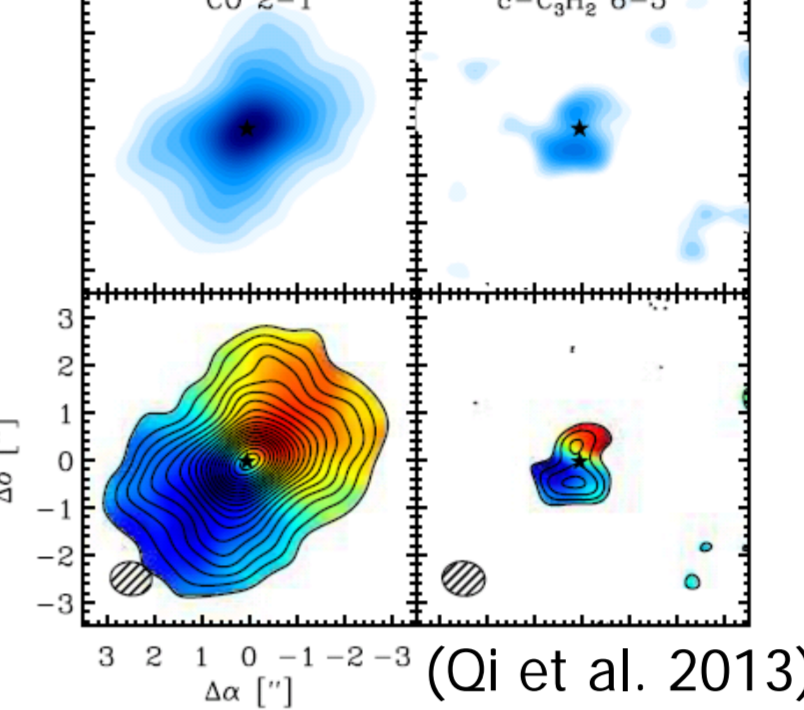
CO, ¹³CO, C¹⁸O, C¹⁷O, ¹³C¹⁸O, ¹³C¹⁷O, HCO⁺, H¹³CO⁺, DCO⁺, [C₁], C₂H, c-C₃H₂, H₂CO, HCOOH, CH₃OH, HCN, H¹³CN, DCN, HC¹⁵N, HNC, CN, C¹⁵N, N₂H⁺, N₂D⁺, HC₃N, CH₃CN, CS, C³⁴S, H₂S, SO, H₂CS, etc.

infrared (sub)mm (ALMA)

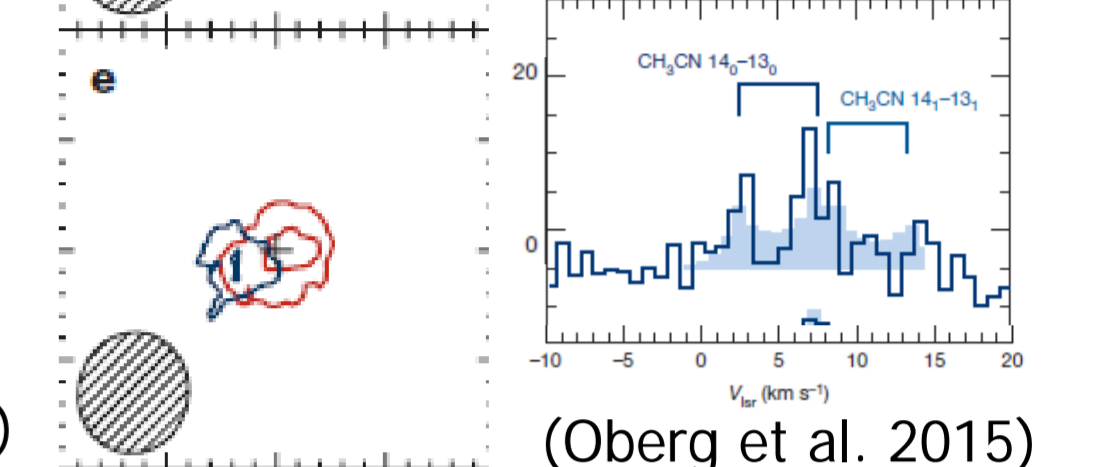
原始惑星系円盤からの複雑な有機分子の観測

c-C₃H₂ J=6-5 @ 218GHz

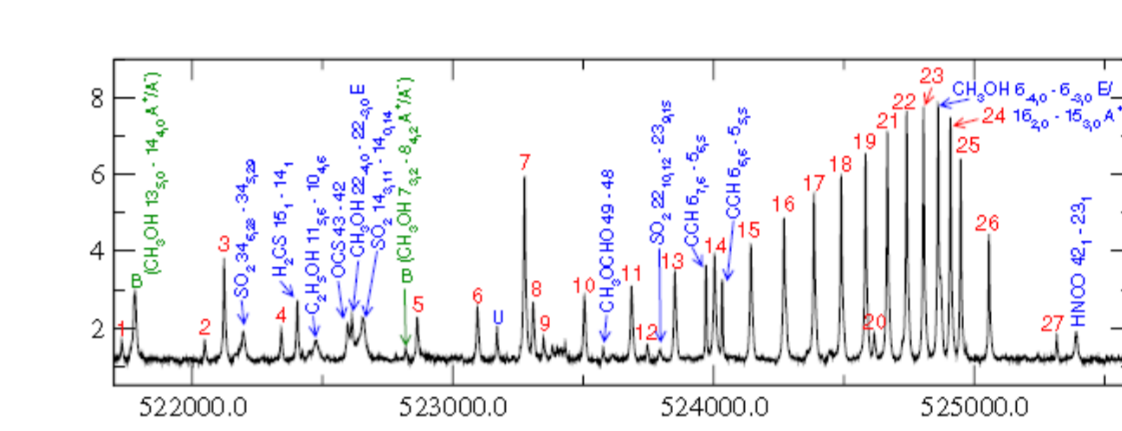
HD163296, ALMA SV



CH₃CN 14₀-13₀, 14₁-13₁, @ 257GHz, MWC480, ALMA cycle 2



ハーシェル宇宙天文台によるCOMsの観測

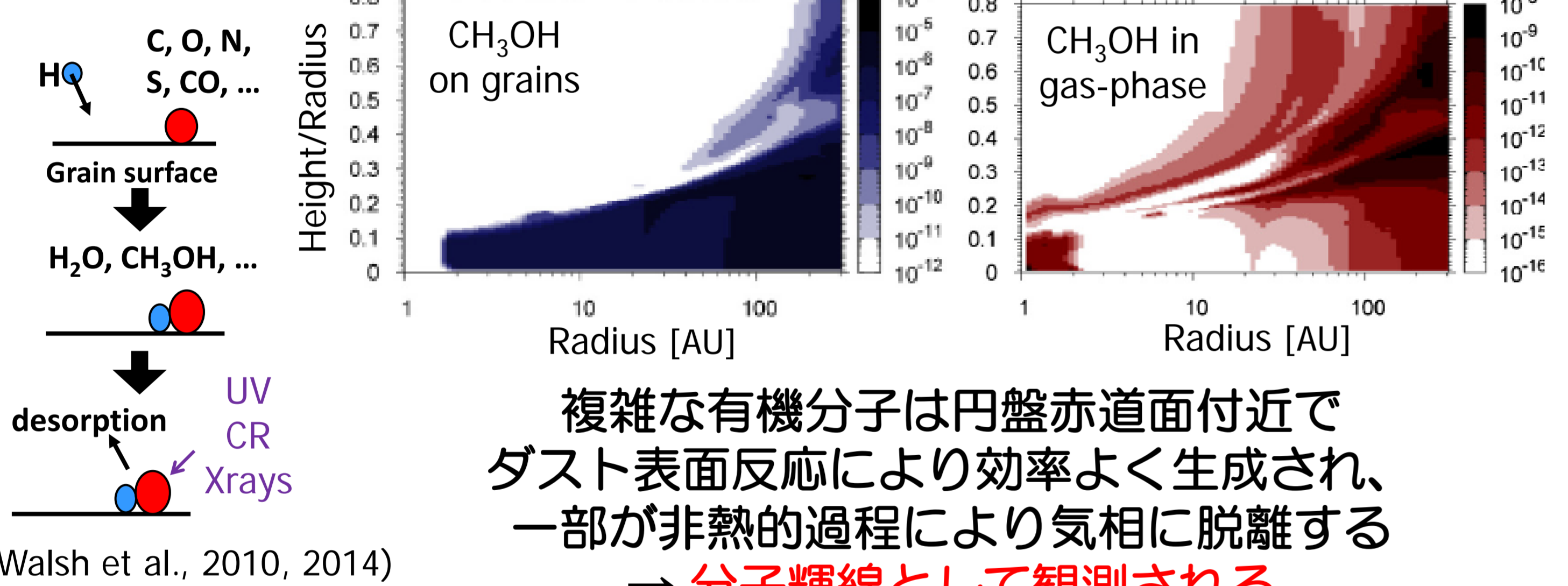


CH₃OH @ 524, 1061GHz Orion KL, Herschel/HIFI (Wang et al. 2011)

原始惑星系円盤中の有機分子生成

~ モデル計算 ~

円盤内の固相と気相中の複雑な有機分子の分布



複雑な有機分子は円盤赤道面付近でダスト表面反応により効率よく生成され、一部が非熱的過程により気相に脱離する → 分子輝線として観測される

物理モデル

(Nomura & Millar 2005, Nomura et al. 2007)

- Central star: typical T Tauri star, M_{*}=0.5M_S, T_{*}=4000K
typical Herbig Ae star, M_{*}=2.5M_S, T_{*}=10,000K
- Gas density profile: vertical hydrostatic equilibrium
- Gas temperature profile: local thermal equilibrium (Γ_X + Γ_{pe} + L_{gr} - ΔI_{line} = 0)
- Dust temperature profile: local radiative equilibrium (2D radiative transfer)

化学反応ネットワーク

- Gas-phase chemistry: (Walsh et al., 2010, 2012, 2014)
UMIST Database for Astrochemistry (Rate12) (McElroy et al. 2013)
OSU chemical network (Harada et al. 2010)
- Grain-surface reactions (Garrod et al. 2008)
- Gas-grain interactions: thermal desorption + non-thermal (cosmic-ray, photo-) desorption

~ ALMA 観測 ~

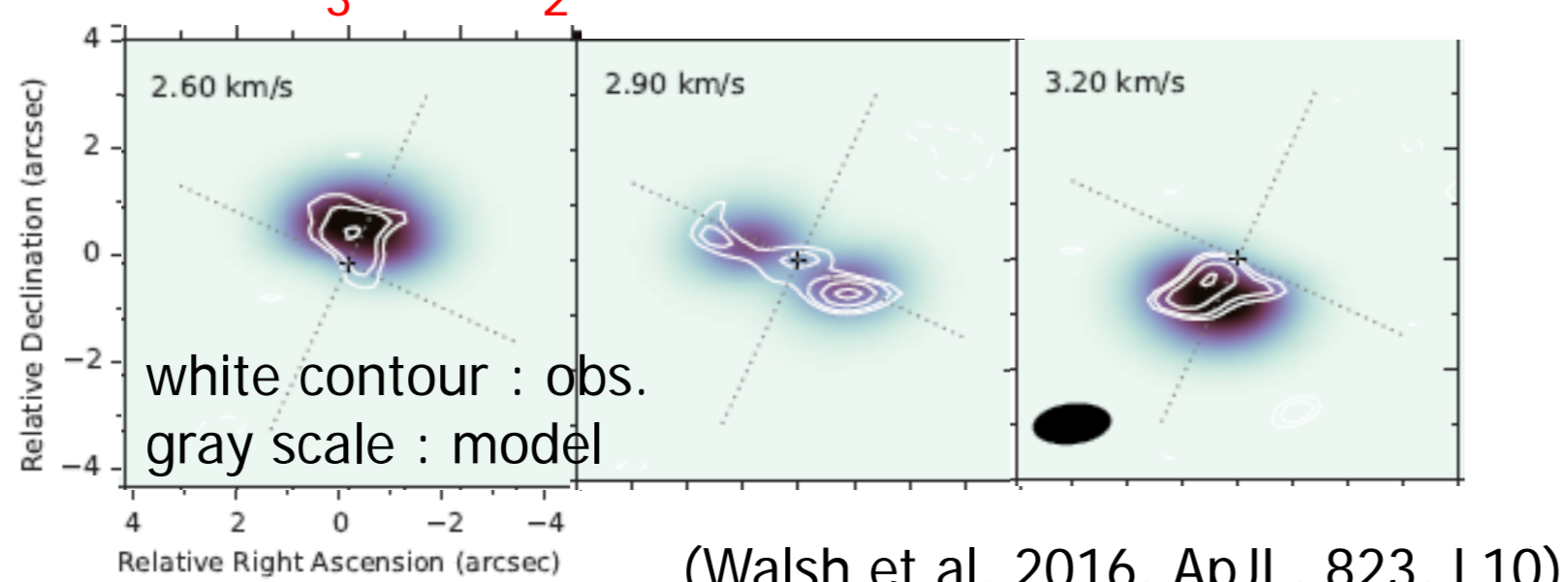
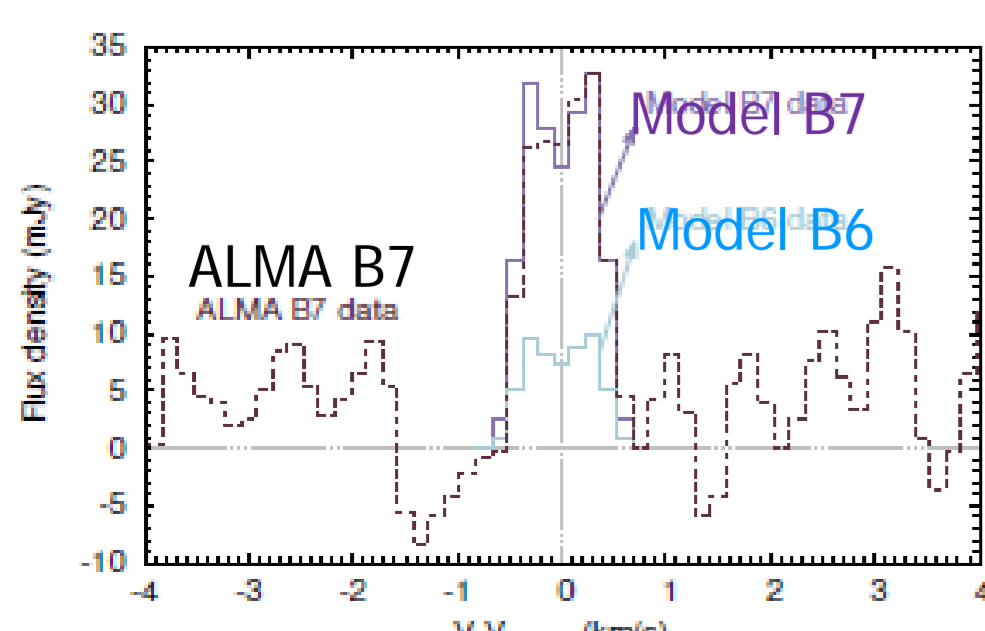
TW Hya 円盤からのメタノール分子の検出

CH₃OH @ 304, 305, 307GHz
TW Hya, ALMA cycle 2
Stacking three lines of CH₃OH

輝線放射領域：30 - 100AU
→ 非熱的脱離

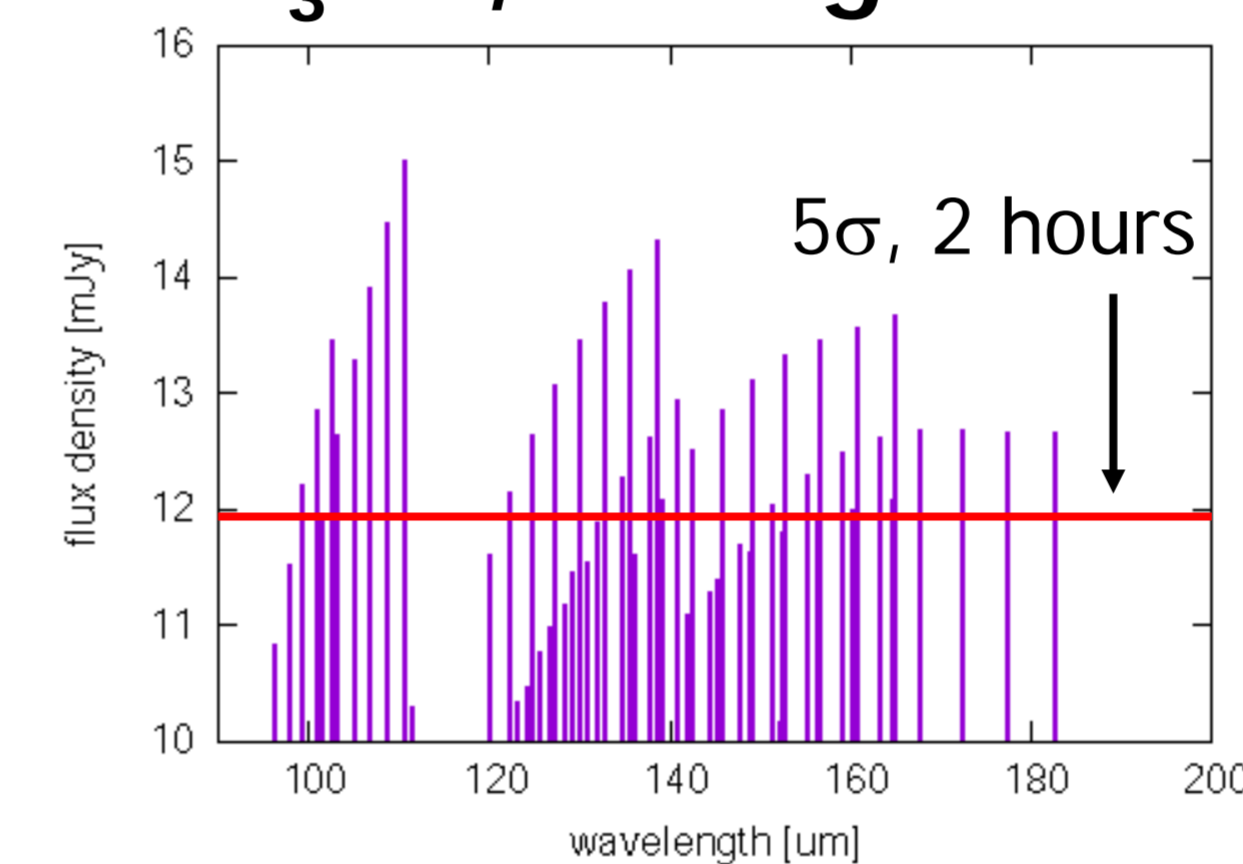
Model: x(CH₃OH) ~ 10⁻¹¹ fits observations + Herschel/HIFI obs. of cold H₂O line (Hogerheijde et al. 2011)

CH₃OH/H₂O ~ 0.7-5% ⇔ comets



モデル計算による SPICA 観測予測

CH₃OH, Herbig Ae disk



$$F_{ul,r} = \int_{-z_{\infty}}^{z_{\infty}} n_u A_{ul} \frac{h\nu_{ul}}{4\pi} \exp(-\tau_{ul}) dz$$

n_u: LTE distribution

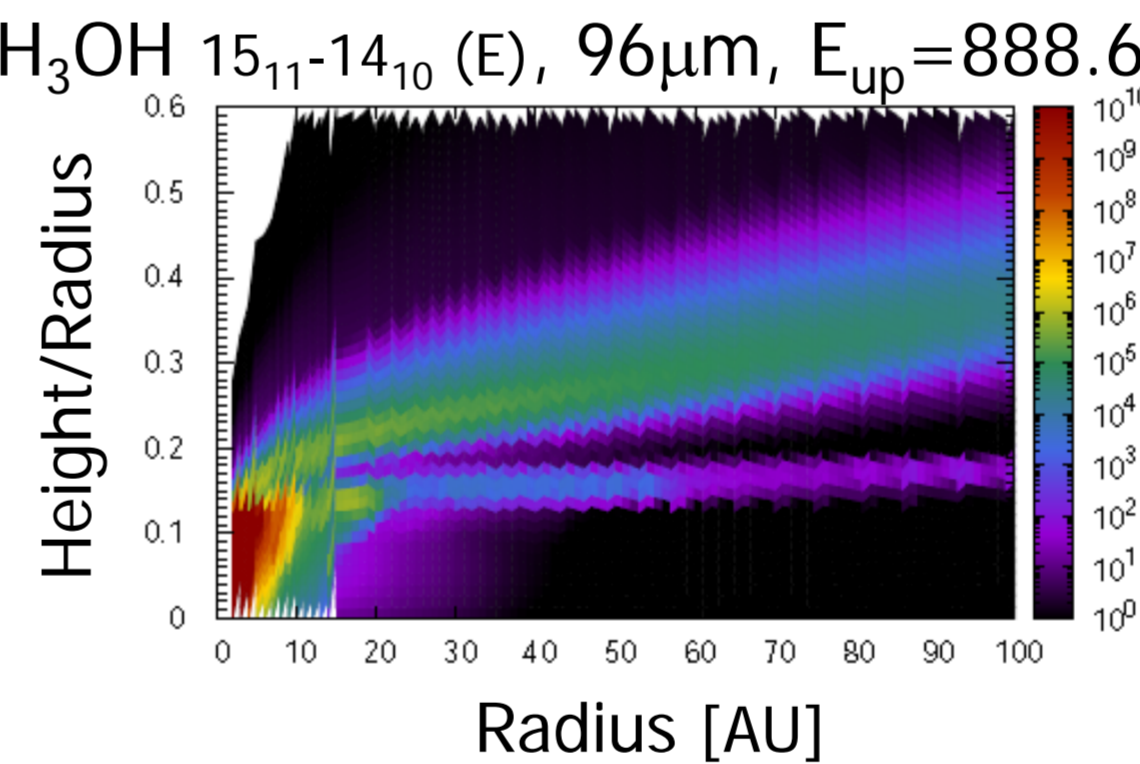
Ratran, LAMDA

(Hogerheijde & van der Tak 2000, Schoier et al. 2005)

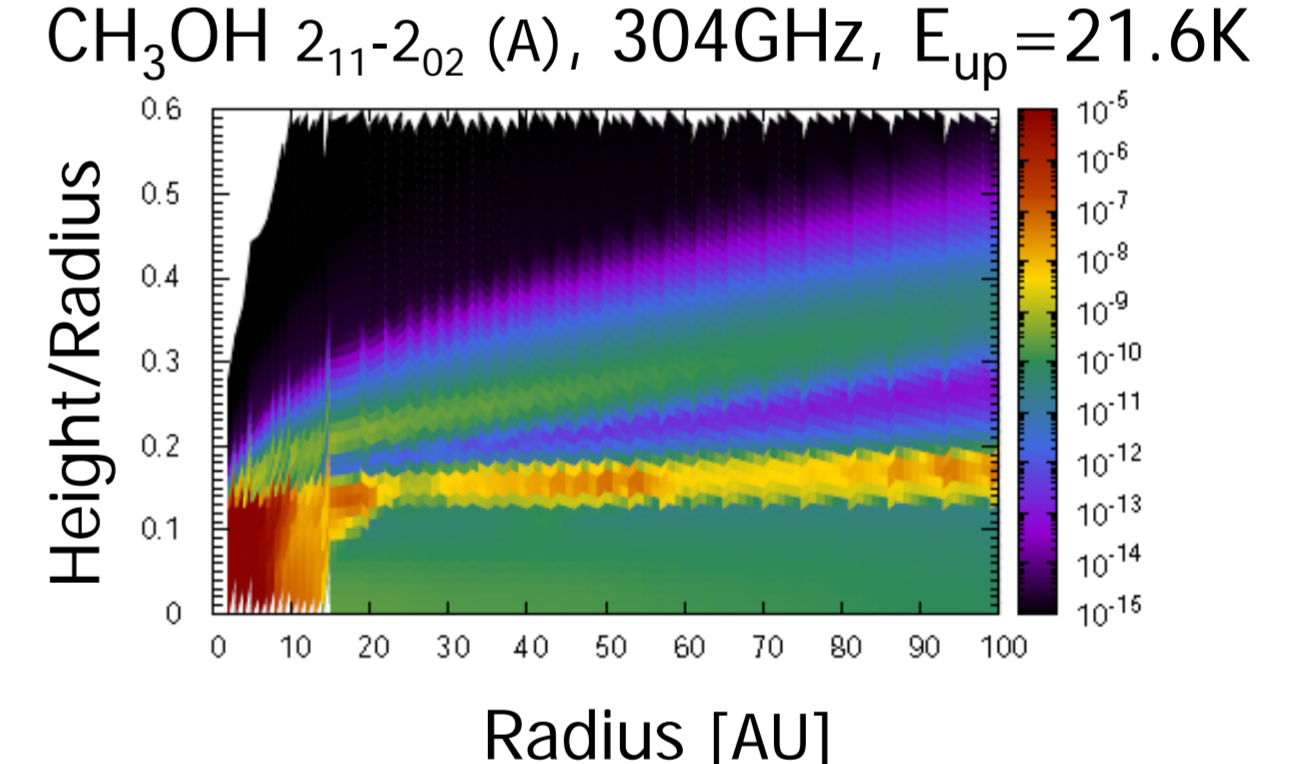
SPICA/SAFARI で CH₃OH 輝線が検出可能 (2 時間積分)

CH₃OH 輝線放射領域

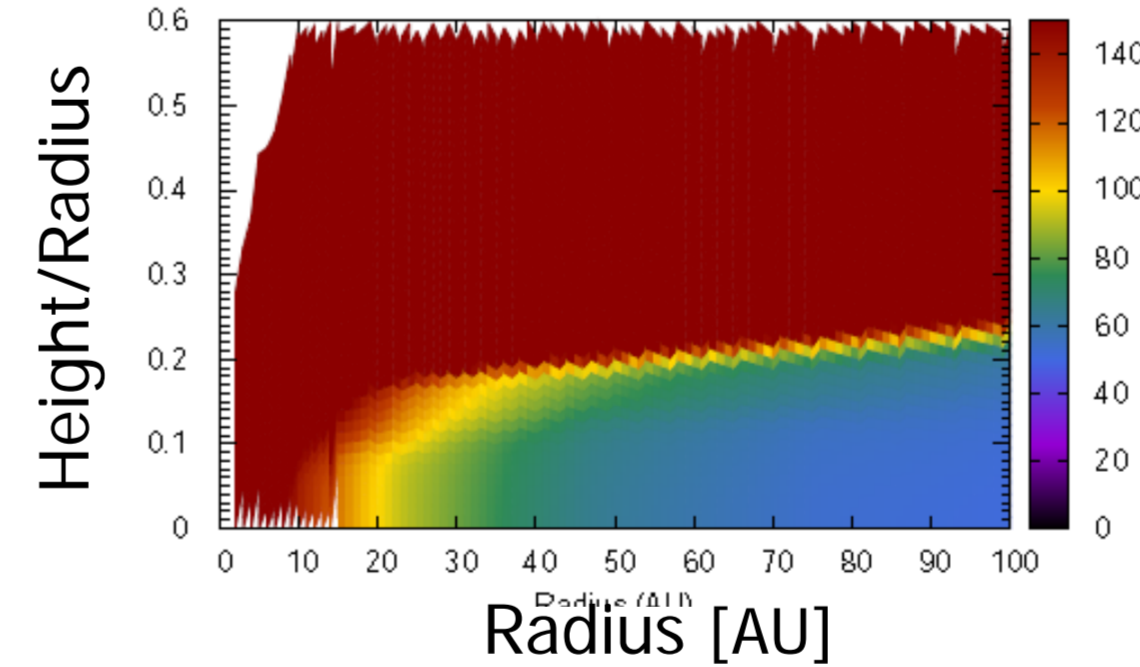
SPICA/SAFARI CH₃OH 15₁₁-14₁₀ (E), 96μm, E_{up}=888.6K



ALMA CH₃OH 2₁₁-2₀₂ (A), 304GHz, E_{up}=21.6K



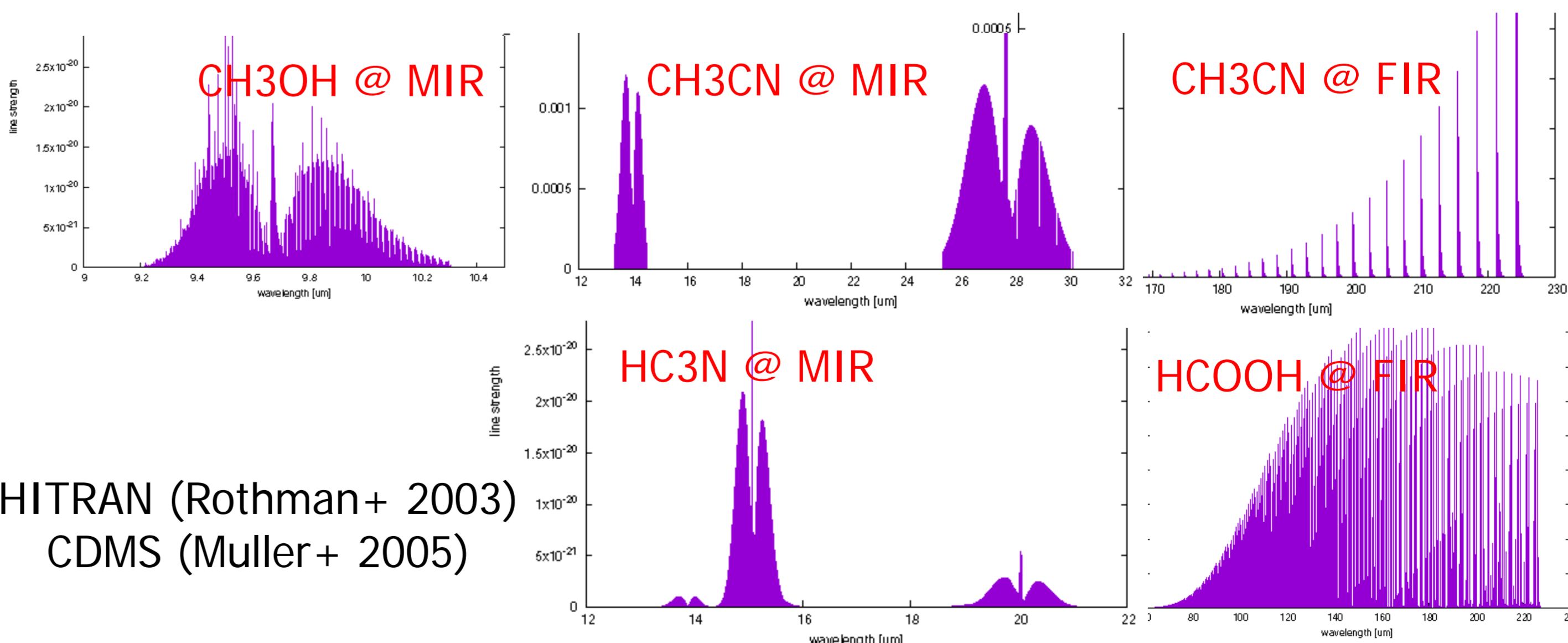
Gas Temperature



CH₃OH の遠赤外の高励起輝線は原始惑星系円盤内縁の高温領域をトレースする

→ ALMAで観測された領域とは異なるダスト表面反応と気相への脱離過程をトレースする

中間・遠赤外線における複雑な有機分子輝線



References

- Walsh, C., Loomis, R.A., Oberg, K.I. et al. 2016, ApJL, 823, L10
- Walsh, C. 2015, EAS, 75, 315
- Walsh, C., Millar, T.J., Nomura, H., Herbst, E., Widicus-Weaver, S., Aikawa, Y., Laas, J.C., Vasyunin, A. 2014, A&A, 563, A33