

「2017年度最優秀発表賞受賞論文」 高分散分光観測を用いた原始惑星系円盤の H₂Oスノーラインの同定可能性

野津 翔太¹

2018年3月30日受領, 査読を経て2018年6月7日受理.

(要旨) 原始惑星系円盤内のH₂Oスノーラインを観測的に同定することは、微惑星・惑星形成過程や、地球上の水の起源を考える上で極めて重要です。私たちは、円盤の化学反応ネットワーク計算と放射輸送計算の手法を用いて、H₂¹⁶O, H₂¹⁸O輝線プロファイルの観測から円盤内のH₂Oスノーライン位置を同定する方法を提案してきました。その結果、光学的厚みが比較的小さく励起エネルギーが比較的高い輝線のプロファイルを高分散分光観測で調べることで、H₂Oスノーラインを同定できる可能性があることがわかりました。またこの様な特徴を持つH₂O輝線が、中間赤外線からサブミリ波までの幅広い波長帯に多数存在し、その強度は波長が短い程大きいことなどもわかりました。本記事では、これまでの解析結果の紹介と今後の高分散分光観測でのH₂Oスノーラインの同定可能性の議論を行います。

1. 導入

1.1 H₂Oスノーラインと、惑星形成における氷ダストの役割

原始惑星系円盤(以後、“円盤”)とは、誕生直後の星の周りに形成される、ダスト(塵)とガス(主成分は水素分子)でできた円盤です。円盤内部において、中心星近傍は中心星からの光で高温となりH₂O分子は円盤中に漂うダスト表面から脱離して気体となります。一方遠方では光が弱く低温となり、H₂O分子はダスト表面に凍結します。この境界がH₂Oスノーラインです。図1は、円盤内のH₂Oスノーラインとダスト分布・進化の概念図です。一般的に固体微粒子の合体成長で惑星を作る際、H₂Oスノーラインの内側では地球型の岩石惑星が形成されると考えられています。一方外側では固体微粒子の総量が増加し、さらに氷を纏った固体微粒子は岩石(ケイ酸塩)微粒子に比べ破壊されにくくなるため、巨大な固体コアが形成されます。その後それらが重力で周りのガスを大量に集めることで、木星

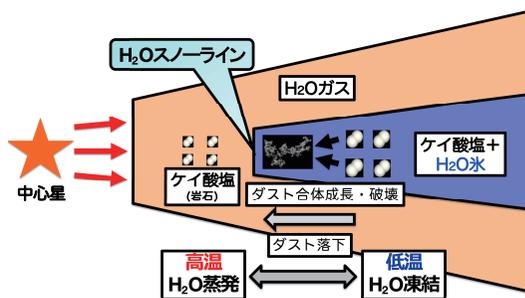


図1: 円盤内のH₂Oスノーラインと、ダスト分布・進化の概念図 (ダストアグリゲイトの画像は Wada, K. et al., 2008, ApJ, 677, 1296の図1から引用)

型のガス惑星が形成されると考えられています[1-3]。最近の研究では、H₂Oスノーライン付近にダストが濃集することで、局所的に微惑星・惑星が形成されたと考えるモデルなども提案されています[4]。更にH₂Oスノーライン外側で形成される氷微惑星や彗星は、地球型惑星の水・有機物の起源とも考えられています[5]。よってH₂Oスノーラインを観測的に同定することは、微惑星・惑星形成過程や、地球上の水の起源を考える上で重要であると言えます。

1. 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室
snotsu@kusastro.kyoto-u.ac.jp

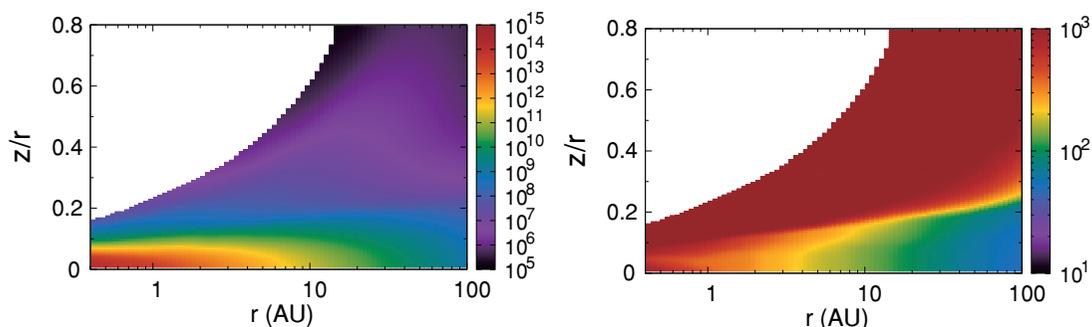


図2：中心星がHerbig Ae星の円盤のガス密度分布(左図、カラーバーの単位は cm^{-3})、ガス温度分布(右図、カラーバーの単位はK) [14]。横軸は円盤半径(AU, 天文単位)、縦軸は円盤赤道面からの高さと同半径の比です。

円盤赤道面におけるH₂Oスノーラインの位置は、太陽質量程度の前主系列星(T Tauri星)周りの円盤の場合、中心星から10分の数auから数auの位置付近に存在します。しかし中心星の放射強度、円盤内のダストサイズ分布、中心星への質量降着率など、円盤の物理構造が変わることでその位置は変化します[6]。そのため、太陽系外の円盤の観測からH₂Oスノーラインの位置を決めることで、逆に円盤の物理構造、ひいては惑星形成理論に制限をかけることが出来ると考えられます。

1.2 H₂O輝線の観測とH₂Oスノーライン

円盤の観測からH₂Oスノーラインを決定する場合、まずはH₂Oガス・氷の撮像観測から情報を得ることが考えられます[7, 8]。しかし円盤において、中心星から数au付近を分解する撮像観測は、空間分解能が足りず難しいのが現状です。

近年Spitzer(中間赤外線)・Herschel(遠赤外線)宇宙望遠鏡などを用いて、円盤から放射されるH₂O輝線を検出できるようになりました(e.g., [5, 9-11])。しかし、これらの輝線は主に円盤表層の高温部やH₂Oスノーライン外側の円盤外縁低温部に存在するH₂Oガスから放射されたものであり、円盤赤道面のスノーライン位置を直接同定することはできませんでした。

一方で円盤はほぼケプラー回転している為、円盤から放射される輝線はドップラーシフトを受け広がっています。この輝線のプロファイルの解析から、輝線放射領域の中心星からの距離の情報を得ることが出来ます。実際にこの手法を用いた研究もなされていて、例えばCOの4.7 μm の振動回転輝線を用いた、円盤の内

部構造の研究(e.g., [12])が挙げられます。よって、今後波長分解能が数万を超える高分散分光観測が幅広い波長帯で可能になれば、円盤赤道面内縁から放射されるH₂O輝線のプロファイルの解析を通じ、H₂Oスノーラインを同定できると考えられます。

そこで私たちは、円盤の化学反応ネットワーク計算と放射輸送計算の手法を用いて、H₂O輝線プロファイルの観測から円盤内のH₂O分布、特にH₂Oスノーラインを同定する方法を提案してきました[13-15]。次章以降では、私たちの解析手法と解析結果の概要を紹介します。

2. 原始惑星系円盤の物理構造

円盤内の化学反応ネットワーク計算を行う際には、円盤内の各点での温度・密度・中心星からの紫外線放射などの物理量が必要になります。本研究では円盤の物理モデルとして、Nomura & Millar(2005)のモデル[16]に、X線加熱を加えたモデル([17])を使用しました。中心星はT Tauri星(質量0.5 M_☉, 半径2.0 R_☉、有効温度4000 K)とHerbig Ae星(質量2.5 M_☉, 半径2.0 R_☉、有効温度10000K)を考え、円盤は定常、軸対称を仮定しました。また、円盤中のダストサイズ分布はNomura & Millar(2005) [16]と同じモデルを用いて、ダストの最大サイズは約10 μm です。(詳細は[13-15]、及び[16-18]を参照)。

図2は中心星がHerbig Ae星の場合の円盤ガス密度分布と、ガス温度分布です。密度分布の図からは円盤内側及び赤道面ほど密度が高いことが読み取れます。温度分布の図からは、円盤赤道面は中心星近傍ほど温

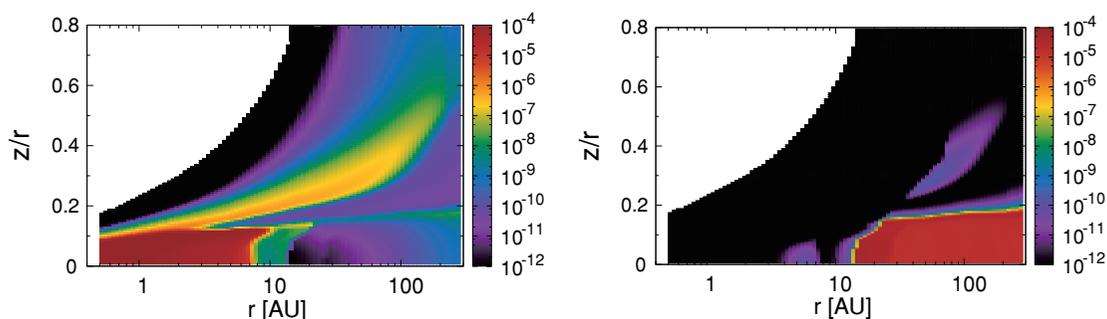


図3: Herbig Ae円盤モデルの場合の H_2O ガス(左図)および氷(右図)の存在度の分布 [14]. ここで存在度は、単位体積中の水素原子数に対する H_2O ガス分子または氷分子の数の比を表します. 横軸は円盤半径(AU), 縦軸は円盤赤道面からの高さと同半径の比です.

度が高く、円盤外側ほど温度が低くなっていることがわかります. 円盤赤道面は中心星放射のほか、円盤の粘性加熱も効いています. また、円盤表層部に関しては密度が低いために、円盤外側まで中心星の紫外線放射などが届き、高温となっています.

3. 原始惑星系円盤の化学反応ネットワーク計算

原始惑星系円盤内の化学反応ネットワーク計算の際、反応係数としてUMIST Database for Astrochemistry (Rate06)の値を用いました[19]. 計算に含んだ化学種数は375種、気相中での化学反応の数は4346個になります. また、ガス・ダスト間の相互作用として、ダスト表面への化学種の凍結や、ダスト表面からの熱的・非熱的脱離の過程も合わせて考えました. なお H_2O スノーラインの位置には大きく影響を及ぼさない事を踏まえ、今回の計算では簡単のため乱流拡散の効果は入っていません. (これら化学反応ネットワーク計算の詳細は[13-15], 及び[18-21]を参照)

図3はHerbig Ae円盤モデルの場合の H_2O ガスの組成分布の結果です. H_2O スノーラインは14 au付近に存在することが分かります[14]. 図2と比較すると、円盤赤道面の H_2O スノーライン内側の高温領域だけでなく、円盤外側の上層部高温領域や光脱離領域でも H_2O ガスの存在量が多いことが分かります. 高温領域で H_2O が多いことは、気相中で H_2O を生成する反応が促進されることが理由です. 従って、 H_2O 輝線の観測を通じ H_2O スノーラインを同定するためには、円盤外側ではなく、主に H_2O スノーラインの内側から

放射される輝線を選ぶ必要があります. 中心星の放射強度が弱いT Tauri星モデルの場合は、 H_2O スノーラインは1.6 au付近に存在します[13].

4. ortho- H_2^{16}O 輝線の放射輸送計算と結果

前章の計算で得られた H_2O ガスの組成分布のデータを用い、まずortho- H_2^{16}O 輝線の放射輸送計算を行いました. ここで、天球面上の円盤の各点から放射される輝線強度は、円盤内部の視線方向の各点の寄与の足し合わせで表されます. 各点における放射係数は、自発放射の遷移確率を表すアインシュタインA係数(A_{ul})と励起状態にある分子の数密度(n_u)に比例するため、ある視線方向の光学的厚みが十分小さい場合、その方向の輝線強度もまた、 A_{ul} と n_u に比例します. 放射輸送計算の際はLTE(局所熱力学平衡)を仮定していますが、円盤赤道面ではガス密度が十分大きく輝線の臨界密度を上回るため、この後の計算結果に対し問題はない仮定となっています. また計算の際はRATRAN[22]の1次元計算コードを修正したものを使用したほか、分子輝線のデータとしてLAMDA database[23]とHITRAN database[24]の値を用いました.

放射輸送計算の結果、アインシュタインA係数が小さく($A_{ul} \sim 10^{-6} - 10^{-3} \text{s}^{-1}$)、励起エネルギーが比較的高い($E_u \sim 1000 \text{K}$) ortho- H_2^{16}O 輝線のプロファイルを高分散分光観測で調べることで、 H_2O スノーラインを同定できる可能性があることが分かりました. これは A_{ul} が小さい輝線の場合、光学的に薄い円盤外側の表層部

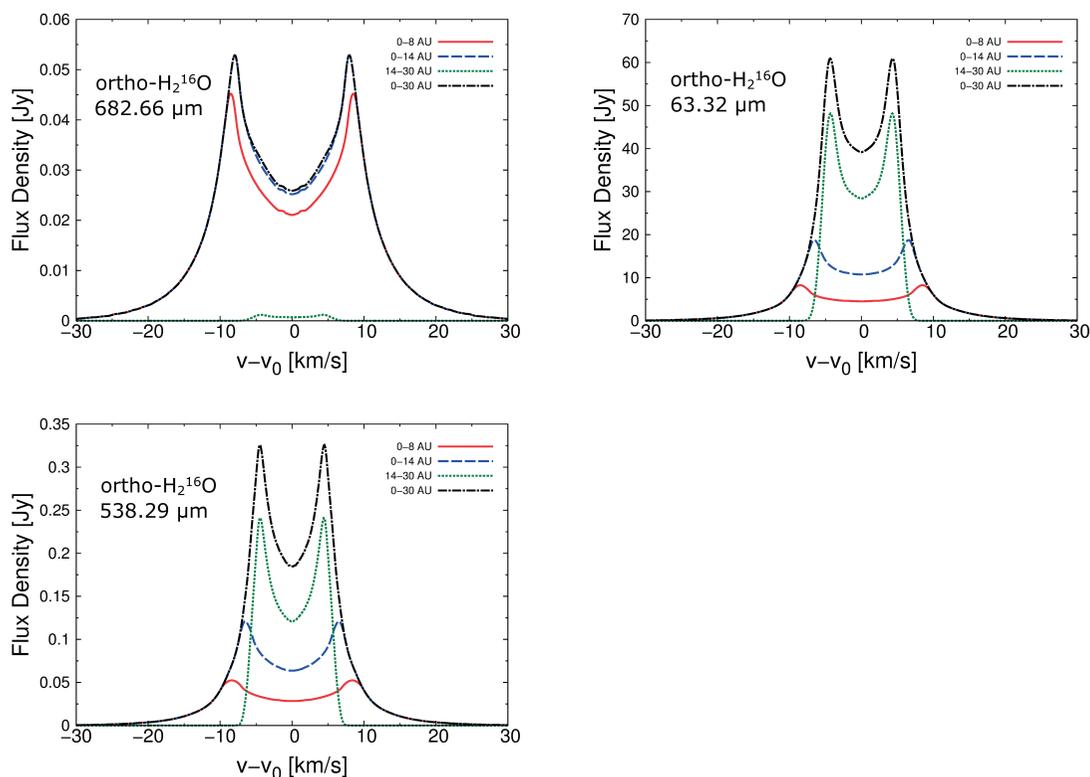


図4：ortho-H₂¹⁶O 682.66 μm輝線，63.32 μm輝線，538.29 μm輝線のプロファイル[14]。赤色直線は0-8 AU(円盤赤道面におけるH₂Oガス存在度が10⁻⁵以上の高い値を示す領域)からの寄与，青色破線は0-14 AU(円盤赤道面のH₂Oスノーライン内側)からの寄与，緑色点線は14-30 AU(円盤赤道面のH₂Oスノーライン外側)からの寄与，黒色一点破線は半径30 AU以内の寄与の合計を表します。

の高温領域にあるH₂Oガスからの放射の寄与が，光学的に厚く高温な円盤赤道面のH₂Oスノーライン内側領域のH₂Oガスからの放射の寄与と比較して十分小さくなるのが原因です。また励起エネルギーが比較的高い輝線は，H₂Oスノーライン外側の低温な光脱離領域からは放射されないことも原因です。

ここで，ortho-H₂O, para-H₂Oは分子を構成する水素原子核の核スピンの向きが平行・反平行であるものを指します。熱力学平衡状態において，常温ではortho-para比は量子力学的な性質から3になりますが，極低温ではpara-H₂Oの存在量が増加すると考えられてきました。今回の計算において，ortho-para比は100 Kを超える高温なガスからの放射が主であることを踏まえ，高温度近似の値である3を採用しました。なお，近年のダスト表面反応・脱離過程の実験研究によると，ortho-para比の値はH₂O氷生成時の環境温度を反映するものではなく極低温なダスト上でも3とな

る事が示されており，円盤ガス中の化学反応等で二次的に変化する可能性も議論されています[25, 26]。

図4は，計算した輝線のうちH₂Oスノーライン観測に適した輝線の代表例としてortho-H₂¹⁶O 682.66 μm輝線(A_{ul} = 2.82 × 10⁻⁵ s⁻¹, E_u = 1088.7 K)と，H₂Oスノーライン観測に適さない輝線の代表例としてortho-H₂¹⁶O 63.32 μm輝線(A_{ul} = 1.7 s⁻¹, E_u = 1070.6 K)とortho-H₂¹⁶O 538.29 μm輝線(A_{ul} = 3.50 × 10⁻³ s⁻¹, E_u = 61 K)のラインプロファイルを示しています。計算の際，天体までの距離140 pc(=近傍の星形成領域であるおうし座分子雲までの典型的な距離)，軌道傾斜角i = 30度としました。63.32 μm, 538.29 μm輝線はそれぞれH₂Oスノーライン外側の表層高温部と光脱離領域から主に放射されており，円盤外縁の低速のケプラー回転を反映して線幅が細いという傾向が見えています。これらの輝線は，Herschel宇宙望遠鏡にて円盤からの放射が検出されています[5, 9, 11]。一方で682.66 μm

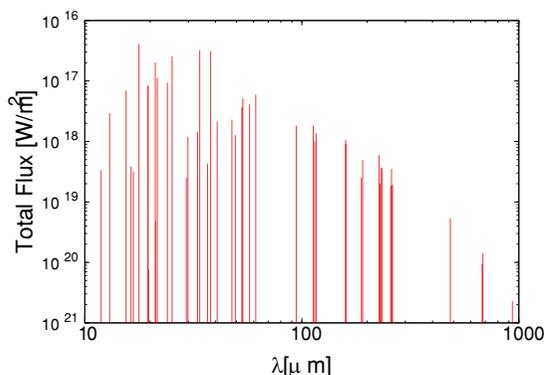


図5: H₂Oスノーライン観測に適したortho-H₂¹⁶O輝線のフラックス分布 (Herbig Ae星モデルの場合) [14]. 横軸は輝線波長 [μm], 縦軸は輝線のフラックス[W/m²]です.

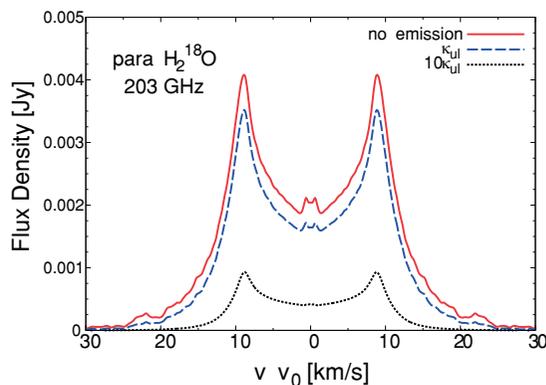


図6: para-H₂¹⁸O 1473.85 μm (203 GHz) 輝線のプロファイル. 赤色直線はダスト連続波なし (図4, 5と同条件). 青色破線はダスト連続波あり. 黒色点線はダスト不透明度を10倍にした場合 [15].

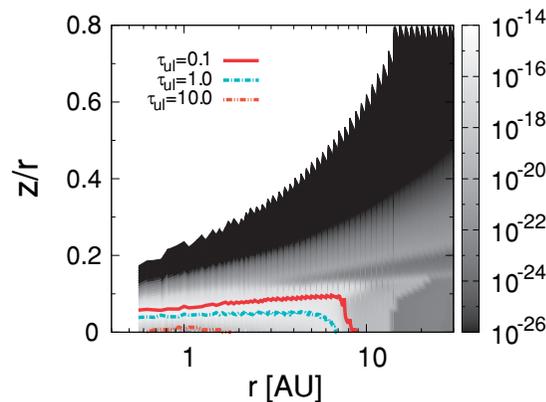
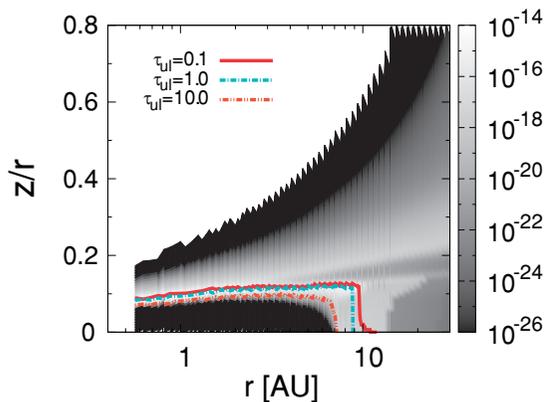


図7: ortho-H₂¹⁶O 682.66 μm輝線(左図)と, para-H₂¹⁸O 1473.85 μm (203 GHz) 輝線(右図)の輝度分布 (W m⁻²Hz⁻¹sr⁻¹). 図中の線は光学的厚み(ガス成分+ダスト成分)分布を表す [14, 15]. 赤色直線は光学的厚み0.1, 青緑色一点破線は光学的厚み1, 橙色二点破線は光学的厚み10を表す.

輝線は、H₂Oスノーライン内側の赤道面付近からの寄与が大きいため、円盤内縁の高速のケプラー回転を反映して線幅が大きくなっています。この輝線のプロファイルからH₂Oスノーラインの位置の情報が読み取れます。

他にもA_{ul}やE_u、波長が異なる様々な輝線について解析を行った結果、H₂Oスノーライン観測に適したortho-H₂¹⁶O輝線が、中間赤外線からサブミリ波までの幅広い波長帯に多数存在することが分かりました。更なる強度は波長が短い程、また中心星の光度が高くH₂Oスノーライン位置が中心星から離れている程大きいことも示しました [13, 14]。図5ではHerbig Ae星モデルの場合について、H₂Oスノーライン観測に適

したortho-H₂¹⁶O輝線のフラックス分布を示しています。これらの輝線のうち、サブミリ波の輝線はALMA(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)、中間赤外線の輝線は次世代赤外線天文衛星SPICA [27]*を用いての高分散分光観測が期待されます。

5. H₂¹⁸O輝線の放射輸送計算と結果

これまで私たちはortho-H₂¹⁶O輝線に絞って輝線の特徴を調べてきました。しかし水分子には水素分子のspin状態を入れ替えたpara-H₂¹⁶O分子のほか、水素分子・酸素分子を同位体と入れ替えたHDO、H₂¹⁸Oと

* http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA_HP/index.html

いった分子も存在します。そこで私たちは最近、新たにpara-H₂¹⁶O輝線やH₂¹⁸O輝線に対しても計算を行い、ALMA Band 7やCycle 5から観測を開始したBand 5などの周波数領域に、H₂Oスノーライン観測に適した輝線を多数特定しました[15]。図6は、計算したH₂¹⁸O輝線のうちH₂Oスノーライン観測に適した輝線の代表例としてpara-H₂¹⁸O 1473.85 μm(203 GHz)輝線(A_{ul} = 4.813 × 10⁻⁶ s⁻¹, E_u = 203.7 K)のプロファイルを、図7はortho-H₂¹⁶O 682.66 μm輝線(左図)と、para-H₂¹⁸O 1473.85 μm(203 GHz)輝線(右図)の輝度分布を示しています。ここで輝度分布は、各領域での強度に上空までの吸収成分を掛けた値となっていて、最終的な円盤輝線プロファイルに寄与する成分を表しています。

para-H₂¹⁸O 1473.85 μm輝線は励起エネルギーが203.7 Kと比較的低いにも関わらず、H₂Oスノーラインの内側赤道面からのH₂O輝線への寄与が、円盤外側の表層高温部と光脱離領域からの寄与と比べ大きいことが分かります。また、輝線放射領域もortho-H₂¹⁶O 682.66 μm輝線と比べより赤道面に近い領域となっています。これらの特徴は、サブミリ波帯のH₂O輝線のA係数が赤外線帯の輝線より小さい傾向にあり(<10⁻⁴ s⁻¹)、円盤外側の光学的に十分薄い領域からの放射強度がより小さくなる傾向があるのが理由の一つです。それに加え、para分子の存在量はortho分子の1/3程度であることと、H₂¹⁶O分子と比べH₂¹⁸O分子の数密度が1/560であることから、para-H₂¹⁸O輝線の方がより赤道面に近い領域のH₂Oガスを捉えることができるのも大きく寄与していると考えられます。

ここでpara-H₂¹⁶O輝線についてもortho-H₂¹⁶O輝線と比較すると、分子の存在量が1/3程度になります。そのためより赤道面に近い領域から輝線が放射され、かつ円盤外側からの放射が抑えられるため、励起エネルギーが比較的低い輝線でも円盤赤道面のH₂Oスノーラインを追うことが可能です。しかしH₂¹⁶O輝線の場合、励起エネルギーが数百K程度になると地球大気による吸収が比較強くなってしまふ為、ALMA等地上からの観測では検出が難しい様です。一方でH₂¹⁸O分子については地球大気での存在量が1/560と極めて少なく、天体からの輝線がほぼ吸収されない為、励起エネルギーが数百Kの輝線についても十分観測可能ということが分かりました。

ここで、より赤道面に近い高密度な領域をトレース

しているため、ダストの光学的厚みが比較的大きい場合には、ダスト連続波に輝線成分が埋もれることが心配されます。図6ではpara-H₂¹⁸O 203 GHz輝線に対して、ダスト連続波放射を加えた場合と、ダスト不透明度を10倍とすることで人工的にダスト連続波放射を強めた場合を示しました。ダスト連続波強度が増加すると輝線成分が弱くなることが示されますが、ダスト不透明度が10倍の場合でも、輝線成分は埋もれることなく見えることが確認できます。他の輝線の場合も調査した結果、波長の短い輝線やH₂¹⁸O輝線の場合にダスト連続波の影響がより大きくなることが分かりました。

6. まとめと今後

私たちは円盤の化学反応ネットワーク計算と放射輸送計算の結果に基づき、H₂O輝線プロファイルの観測から円盤内のH₂O分布、特にH₂Oスノーラインを同定する方法を調査してきました。その結果、アインシュタインA係数が小さく、励起エネルギーが比較的高い輝線のプロファイルを高分散分光観測で調べることで、円盤赤道面のH₂Oスノーラインを同定できる可能性があることが分かりました。そして、このような特徴を持つ輝線が、中間赤外線からサブミリ波までの幅広い波長帯に多数存在し、その強度は波長が短い程大きいことなどが分かりました。今回の記事ではページ数の都合で一部の結果・議論しか掲載できていないため、研究内容の詳細については私たちがまとめた[13-15]の論文を併せてご覧頂ければ幸いです。

更に円盤からのH₂O輝線検出を目指したALMA観測も提案しており、既に一つのHerbig Ae星に対して一部のデータが取得済みです(現在論文文化に向け解析中)。今後も従来のモデル計算に基づいた研究を継続すると同時に、将来のサブミリ波、中間赤外線での高分散分光観測(ALMA, SPICAなど)による円盤内のH₂Oスノーラインの同定可能性の議論や、実際の観測も更に推進していく予定です。

謝辞

本研究は日本学術振興会特別研究員(DC1)奨励費16J06887の助成を受けて行いました。本研究は、野

村英子氏, 石本大貴氏, Catherine Walsh氏, 本田充彦氏, 廣田朋也氏, 秋山永治氏, T. J. Millar氏らとの共同研究です[13-15]. また, 所属する京都大学理学研究科の佐々木貴教氏には日々研究を進める上で, 貴重な助言・サポートを頂きました. 更に査読者には, 本稿に対して有益なコメントと適切な指導を頂きました. これらの方々をはじめとする, 本研究に関わった全ての皆様に深く感謝します.

arXiv:1803.10438.

引用文献

- [1] Hayashi, C., 1981, *Progress of Theoretical Physics Supplement* 70, 35.
- [2] Hayashi, C. et al., 1985, in *Protostars and Planets II*, University of Arizona Press, 1100.
- [3] Wada, K. et al., 2013, *A&A* 559, A62.
- [4] Morbidelli, A. et al., 2016, *Icarus* 267, 368.
- [5] van Dishoeck, E. F. et al., 2014, in *Protostars and Planets VI*, University of Arizona Press, 835.
- [6] Oka, A. et al., 2011, *ApJ* 738, 141.
- [7] Honda, M. et al., 2009, *ApJ* 690, 110.
- [8] Honda, M. et al., 2016, *ApJ* 821, 2.
- [9] Carr, J. S. and Najita, J. R., 2008, *Science* 319, 1504.
- [10] Hogerheijde, M. R. et al., 2011, *Science* 334, 338.
- [11] Blevins, S. M. et al., 2016, *ApJ* 834, 152.
- [12] Pontoppidan, K. M. et al., 2010, *ApJ* 720, 887.
- [13] Notsu, S. et al., 2016, *ApJ* 827, 113.
- [14] Notsu, S. et al., 2017, *ApJ* 836, 118.
- [15] Notsu, S. et al., 2018, *ApJ* 855, 62.
- [16] Nomura, H. and Millar, T. J., 2005, *A&A* 438, 923.
- [17] Nomura, H. et al., 2007, *ApJ* 661, 334.
- [18] Walsh, C. et al., 2015, *A&A* 582, A88.
- [19] Woodall, J. et al., 2007, *A&A* 466, 1197.
- [20] Walsh, C. et al., 2010, *ApJ* 722, 1697.
- [21] Walsh, C. et al., 2012, *ApJ* 747, 114.
- [22] Hogerheijde, M. R. and van der Tak, F. F. S., 2000, *A&A* 362, 697.
- [23] Schoier, F. I. et al., 2005, *A&A* 432, 369.
- [24] Rothman, L. S. et al., 2013, *JQSRT* 130, 4.
- [25] Hama, T. et al., 2016, *Science* 351, 65.
- [26] Hama, T. et al., 2018, *ApJL* 857, L13.
- [27] Roelfsema, P. R. et al., 2018, *PASA* in press,