

原始惑星系円盤の化学反応と H₂O スノーラインの検出に向けて

野津 翔太 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

Abstract

原始惑星系円盤において、中心星近傍は高温のため H₂O はダスト表面から脱離し気体となるが、遠方では低温のためダスト表面に凍結する。この境界が H₂O スノーラインであり、ダストの合体成長で惑星を作る際 H₂O スノーラインの内側では岩石惑星が形成される。一方外側ではダストの総量が増加するため、重力で周りのガスを大量に集める事が可能となり、ガス惑星が形成される。太陽質量程度の前主系列星周りの円盤の温度分布を計算すると、H₂O スノーラインは中心星から数 AU 程度に存在するとされている。だが系外惑星系の場合空間分解能が足りず、撮像観測による H₂O スノーラインの検出は困難であった。

一方最近 Spitzer や Herschel で円盤から放射される H₂O 輝線を検出できるようになった。異なる波長の H₂O 輝線の強度比を用いて H₂O スノーラインの位置を見積もる研究もなされつつあるが、円盤の温度分布のモデルに依存するものであった。しかし今後波長分解能の高い分光観測が可能になれば、輝線スペクトルの速度プロファイルを解析する事で、モデルに依存せず H₂O スノーラインを同定できると考えられる。

そこで本研究では、このような観測で H₂O スノーラインを同定する方法を提案する。具体的にはまず原始惑星系円盤の化学反応計算を行い、H₂O の存在量とその分布を調べた。すると H₂O スノーラインの内側の円盤赤道面付近だけでなく、円盤上層部の高温領域でも H₂O ガスの存在量が多い事が分かった。またその結果を元に、円盤から放出される H₂O 輝線の輻射輸送計算を行い、近赤外線からサブミリ波までの複数の輝線のプロファイルの特徴を調べた。すると放射係数が小さく励起状態のエネルギーが高い複数の輝線のプロファイルを分光観測で調べる事で、H₂O スノーラインを検出できると分かった。この解析結果、及び将来の分光観測との関係についても議論する。

1 Introduction

1.1 原始惑星系円盤とは

原始惑星系円盤とは、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)でできた円盤である。この円盤内ではダスト同士の合体成長により、地球や木星などの惑星が形成されると考えられている。標準的な惑星形成過程は、主に太陽系形成の研究を通じて構築された京都モデル (Hayashi et al. 1985) によって説明される。一方近年観測が飛躍的に進み、多様な太陽系外惑星が数多く発見されてきている。また、原始惑星系円盤自体も近年赤外線 (e.g., Subaru/HiCIAO) やサブミリ波 (e.g., SMA, ALMA) を用いた撮像観測により詳細な観測がなされつつある (e.g., Muto et al. 2012; Fukagawa et al. 2013)。その中で、これまでのモデルでは説明できない多様な太陽系外惑星の形成を説明するモデルの構

築に向け、理論的研究も盛んに進められている。

また、原始惑星系円盤内ではガス中やダスト表面で様々な化学反応が生じるが、それに伴い様々な分子種が生成される。その中には有機物、H₂O などが含まれる (e.g., Caselli & Ceccarelli 2012)。次節以降では、特に H₂O に着目し議論をすすめる。

1.2 H₂O スノーラインと、惑星形成における氷ダストの役割

原始惑星系円盤内部において、誕生直後の中心星の近くは星からの光で高温となり、H₂O が円盤中に漂うダスト表面から脱離して気体となる。一方星から遠い所は光が弱く低温となり、H₂O がダスト表面に凍結する (Hayashi et al. 1981)。この境界が H₂O スノーラインであり、ダスト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。一方外側ではダストの総量が増加

する。そのためダストの合体成長で巨大な岩石コアが出来て、重力で周りのガスをたくさん集める事が可能となり、木星や土星の様なガス惑星が出来ると考えられている。すなわち、 H_2O スノーラインは、地球型惑星と巨大ガス惑星の形成領域の境界と考えられている。

円盤赤道面における H_2O スノーラインの位置は、太陽質量程度の前主系列星 (T タウリ型星) 周りの円盤の場合、中心星から数 AU 付近と考えられている。しかし中心星からの放射強度、円盤中のダストサイズやその分布など、円盤の物理構造を変える事でその位置は変化する。そのため、太陽系外の原始惑星系円盤の観測から H_2O スノーラインの位置を決める事で、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事が出来ると考えられる。

1.3 H_2O 輝線の観測と H_2O スノーライン

原始惑星系円盤の観測から H_2O スノーラインを決定する場合、まずは円盤の撮像観測から情報を得る事が考えられる。しかし太陽系外惑星系の場合中心星から数 AU 付近の撮像観測は、空間分解能が足りず難しい。

一方、近年 Spitzer (近-中間赤外線) や Herschel (遠赤外線) などの宇宙望遠鏡を用いて、円盤から放射される H_2O 輝線を検出できるようになった。温度依存性や波長の異なる様々な H_2O 輝線の強度比を用いて、 H_2O スノーラインの位置を見積もる研究もなされつつあるが (e.g., Zhang et al. 2013)、これらは円盤の温度分布のモデルに依存するものであった。

しかし今後波長分解能の高い分光観測が可能になれば、輝線強度だけでなく輝線の速度プロファイルの情報 (e.g., 輝線プロファイル中の高速度成分が、円盤内側からの寄与) を用いて、モデルに依存せず H_2O スノーラインを同定できると考えられる。本研究では、このような観測で H_2O スノーラインを同定する方法を提案する。なお輝線の速度プロファイルの解析から円盤内側の構造を探る研究としては、 H_2O 以外に例えば CO の $4.7\mu m$ の振動回転輝線を用いた研究 (Pontoppidan et al. 2008) などがある。

解析手法の概略を述べると、まず原始惑星系円盤の物理構造モデルを仮定した上で、 H_2O スノーラインの位置を仮定するのではなく、与えられた物理構

造の元で円盤の化学反応計算を行い、円盤中の H_2O の分布や H_2O スノーラインの位置を求めた。その後 H_2O 輝線の輻射輸送計算を行い、輝線強度のみならず輝線プロファイルから H_2O スノーラインの情報が得られるか確かめた。具体的な解析手法は次章以降で述べる。

2 Methods & Results

2.1 原始惑星系円盤の物理構造

円盤での化学反応計算を行う際には、各場所での温度、密度、主星からの紫外線放射などの物理量が必要になる。本研究では原始惑星系円盤の物理モデルとして、Nomura & Millar (2005) に、X 線加熱を加えたモデル Nomura et al. (2007) を使用した。まず中心星は質量 $M_* = 0.5M_\odot$ 、半径 $R_* = 2.0R_\odot$ 、有効温度 $T_* = 4000K$ の典型的な T タウリ型星 (Kenyon & Hartmann 1995) とし、その周りの円盤は定常、軸対称を仮定した。また、円盤中のダストのサイズ分布や組成のモデルは Nomura & Millar (2005) と同じものを用いており、ダストの最大サイズは $10\mu m$ とした。(詳細は Walsh et al. (2010, 2012) も参照。)

なお 1 章でも述べたように、中心星からの放射強度や円盤中のダストサイズやその分布など、円盤の物理構造を変える事で H_2O スノーラインの位置は変化する。そこで我々はこの物理モデルを採用した場合だけでなく、円盤中でのダストの合体成長を考慮したモデル (ダスト最大サイズが $10cm$)、及び中心星として典型的な Herbig Ae 星 ($M_* = 2.5M_\odot$ 、 $R_* = 2.0R_\odot$ 、 $T_* = 10000K$) を考えたモデルを採用した場合についても、現在計算を進めている。ただ今回は紙面及び発表時間の都合上、以下では典型的な T タウリ星かつダスト最大サイズが $10\mu m$ のモデルを採用した場合の計算結果を説明する。図 1 はこのモデルを用いた際の円盤のガス温度分布を表している。

2.2 原始惑星系円盤の化学反応計算

原始惑星系円盤内の化学反応計算の際、反応係数として UMIST Database for Astrochemistry (Rate06) の値を用いる (Woodall et al. 2007)。化学種の数には 375、気相中での化学反応の数は 4346 である。また、ガス・ダスト間の相互作用という事で、ダスト表面へ

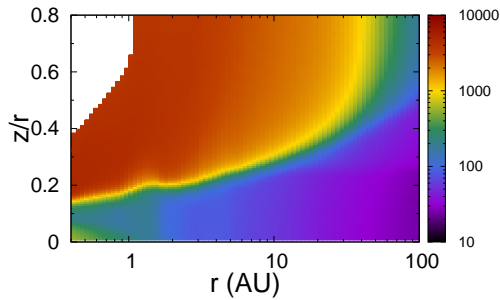


図 1: 円盤のガス温度分布 (単位は K)。横軸は円盤半径 (AU)、縦軸は円盤の赤道面からの高さ/円盤半径。

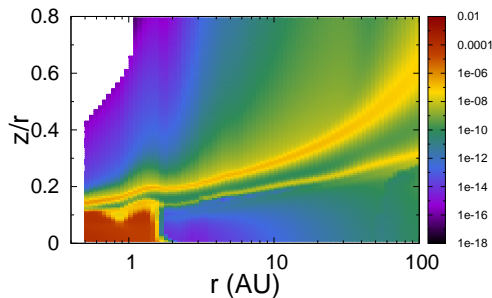


図 2: 円盤の H₂O の組成分布 (H₂O 分子の数密度/全 H 原子の数密度)。横軸、縦軸は図 1 と同じ。

の化学種の凍結や、熱的・非熱的脱離の過程も合わせて考えた。なお初期元素存在量は酸素が多く、低金属量な元素存在量のモデルを仮定した。

図 2 は計算した H₂O の組成分布の結果である。このモデルにおいては、H₂O スノーラインは 2AU 付近に存在する。また図 1 などと見比べると分かる様に、H₂O スノーラインの内側の円盤赤道面付近の高温領域だけでなく、円盤上層部の高温領域でも H₂O ガスの存在量が多い事が分かる。なお、高温領域で H₂O が多いのは、温度が高い事で気相中で H₂O を作る中性-中性反応 (中性分子同士の反応。活性化エネルギーが大きい。) が促進されるからである。

2.3 H₂O 輝線の輻射輸送計算とその結果例

前節で計算した H₂O の組成分布のデータを用い、円盤内の各点からの寄与を足し合わせた H₂O の輝線の輻射輸送計算を行う。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を足し合わせた以下の式で表される (Rybicki

& Lightman (1986))。

$$F_{ul}(r, \nu) = \int_{-s_\infty}^{s_\infty} n_u A_{ul} \frac{h\nu_{ul}}{4\pi} \phi(\nu) \exp(-\tau_{ul}) ds \quad (1)$$

ここで、u を励起状態を表す添字、l を励起前のエネルギーが低い状態を表す添字とする。この時、 n_u は励起状態にある分子の数密度、 A_{ul} は状態 u から l へと自発的に放射を出して遷移する確率を表すアインシュタインの A 係数 (放射係数)、 h はプランク定数、 ν_{ul} は状態 u から l へと遷移する時に放出する光の振動数、 τ_{ul} は光学的厚みである。 $\phi(\nu)$ は各点での輝線の速度プロファイルを表わす関数で、円盤のケプラー回転と熱運動 (音速) が原因で起きる、ドップラーシフトと輝線の広がり を考慮している。

上式から、ある視線方向の光学的厚みが十分小さい場合 ($\tau_{ul} \ll 1$)、その方向の輝線強度は A_{ul} と n_u に比例することがわかる。なお H₂O 分子のエネルギー準位や各輝線のデータベースは LAMDA (Leiden Atomic and Molecular Database: Schöier et al. 2005) のものを、また輝線の輻射輸送計算の際には RATRAN (Hogerheijde & van der Tak 2000) を改変した計算コードを使用している。現在までに A_{ul} や励起状態のエネルギー (E_u) の値が異なる H₂O 輝線を計 20 本ほど計算している。様々な波長での観測可能性を調べる為、近赤外線からサブミリ波まで様々な輝線を選んでいる。

以下計算した輝線のうち、特徴的な 2 本の H₂O 輝線のプロファイルの振る舞いを紹介する。まず図 3 は 682.9 μ m (振動数 439.3GHz) の H₂O 輝線 ($A_{ul}=2.816 \times 10^{-5} s^{-1}$, $E_u=1088.7K$) の様子である。計算の際天体までの距離 $d=140pc$ 、軌道傾斜角 $i=10^\circ$ としている。図より、H₂O スノーラインの内側 (<2AU) からの H₂O 輝線への寄与が、外側からの寄与より大きい事が分かる。このため、このような輝線を用いるとスノーラインの情報がプロファイルから読み取れると考えられる。(例えば円盤のケプラー回転を考慮すると、ピークの位置がより高速度側に存在した場合、スノーラインはより内側に存在。) 一方図 4 は 63.4 μ m (振動数 4.734THz) の H₂O 輝線 ($A_{ul}=1.772 s^{-1}$, $E_u=1070.6K$) の様子である。図より、H₂O スノーラインの外側 (>2AU) からの寄与の方が大きいので、このような輝線からは H₂O スノーラインの情報は読み取れないと考えられる。

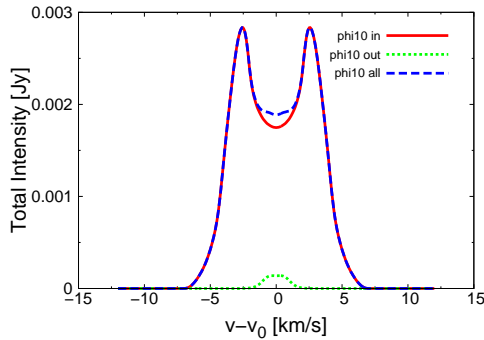


図 3: 波長 $682.9\mu\text{m}$ の H_2O 輝線の速度プロファイル。赤い直線は円盤中心から半径 2AU 以内からの放射、緑の点線は半径 2-30AU からの放射、青い破線は 2 成分を合わせた放射のプロファイル。

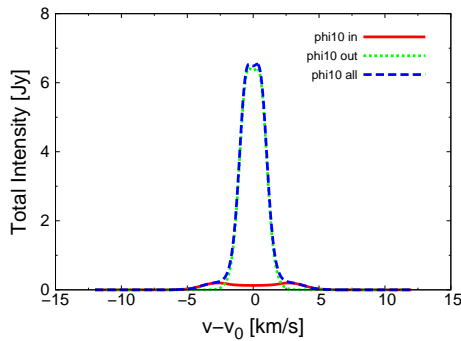


図 4: 波長 $63.4\mu\text{m}$ の H_2O 輝線の速度プロファイル。線の種類は図 3 と同じ。

3 Discussion

2.3 章で H_2O スノーラインの情報が読み取れる輝線とそうでない輝線が存在する事を確認した。この理由について以下議論を行う。

2 つの輝線の E_{ul} の値はほぼ同じであり、どちらも H_2O ガスが大量に存在する高温領域に感度がある輝線である。しかしその一方、 A_{ul} の値を比較すると、 H_2O 輝線の情報が読み取れる $682.9\mu\text{m}$ の輝線の方が値が小さい。この際 2.3 章で述べた様に、光学的に薄い所からの輝線放射の成分が A_{ul} に比例する事を踏まえると、ガス密度が小さく光学的に薄い円盤上層部の高温領域にある H_2O ガスからの放射の寄与が小さくなる。その結果、ガス密度が大きく光学的に厚い円盤赤道面付近の高温領域である、 H_2O スノーライン内側からの放射の寄与の方が大きくなり、 H_2O スノーラインの情報が読み取れるようになると思われる。一方 $63.4\mu\text{m}$ の輝線は A_{ul} が大きい

で、円盤上層部からの寄与も大きく、 H_2O スノーラインの情報が読み取れないと考えられる。

なお詳細は省くが、他の複数の H_2O 輝線のプロファイルも調べたところ、 A_{ul} が小さく E_{ul} の大きな幾つかの輝線 (e.g., 24, 57.4, $456.4\mu\text{m}$) の場合にも、 H_2O スノーラインの情報が読み取れる事が分かった。

4 Conclusion & Future Work

本研究では、原始惑星系円盤の物理構造モデルを仮定した上で、円盤の化学反応計算を行い H_2O の存在量と分布を調べた。その結果今回の条件の場合、 H_2O スノーラインは 2AU 付近と分かった他、円盤上層部の高温領域でも H_2O ガスの存在量が多いと分かった。また、その後 H_2O 輝線の輻射輸送計算を行い、 A_{ul} が小さく E_{ul} が大きい複数の輝線で、 H_2O スノーラインの存在を確認できる事が分かった。

現在は物理構造を変えた場合の計算 (cf. 2.1 章) や、観測に適した輝線探しなどを行っているが、今後は赤外線やサブミリ波での将来の観測 (e.g., TMT, ALMA, SPICA) を目指し、円盤からの H_2O 輝線の強度やラインプロファイルの予測などもさらに進めていく予定である。

Reference

- Caselli, P., & Ceccarelli, C. 2012, *A&ARv*, 20, 56
- Fukagawa, M., Tsukagoshi, T., & Momose, M., et al. 2013, *PASJ*, 65, L14
- Hayashi, C. 1981, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 70, 35
- Hayashi, C., Nakazawa, K., & Nakagawa, Y. 1985, *Protostars and Planets II*, 1100
- Hogerheijde, M. R., & van der Tak, F. F. S. 2000, *A&A*, 362, 697
- Kenyon, S. J., & Hartmann, L. 1995, *ApJS*, 101, 117
- Muto, T., et al. 2012, *ApJ*, 748, L22
- Nomura, H., & Millar, T. J. 2005, *A&A*, 438, 923
- Nomura, H., Aikawa, Y., Tsujimoto, M., et al. 2007, *ApJ*, 661, 334
- Pontoppidan, K. M., Blake, G. A., van Dishoeck, E. F., et al. 2008, *ApJ*, 684, 1323
- Rybicki, G. B., & Lightman, A. P. 1986, *Radiative Processes in Astrophysics*, New York: Wiley, 400
- Schöier, F. L., van der Tak, F. F. S., van Dishoeck, E. F., et al. 2005, *A&A*, 432, 369
- Walsh, C., Millar, T. J., & Nomura, H. 2010, *ApJ*, 722, 1607
- Walsh, C., Nomura, H., Millar, T. J., et al. 2012, *ApJ*, 747, 114
- Woodall, J., Agúndez, M., Markwick-Kemper, A. J., et al. 2007, *A&A*, 466, 1197
- Zhang, K., Pontoppidan, K. M., Salyk, C., et al. 2013, *ApJ*, 766, 82