

# 原始惑星系円盤の化学反応と、 $\text{H}_2\text{O}$ スノーラインの分光観測による検出可能性

野津 翔太 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

## Abstract

太陽質量程度の前主系列星周りの原始惑星系円盤 (以後、'円盤') の場合、円盤赤道面における  $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインは、中心星から数 AU の位置に存在する。従って、撮像観測によって  $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインを検出する事は、空間分解能が足りない為に困難である。一方で円盤はほぼケプラー回転しているため、輝線のドップラーシフトの解析から輝線放射領域の中心星からの距離の情報が得られる。そこで高分散分光観測を行い、得られた  $\text{H}_2\text{O}$  輝線のプロファイル形状を解析すれば、円盤内の  $\text{H}_2\text{O}$  ガス分布に制限をかけ、 $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインの位置を同定できると考えられる。

我々はこれまで、円盤中の  $\text{H}_2\text{O}$  の存在量とその分布を化学反応計算で調べてきた。またその結果を用いて、近赤外線からサブミリ波までの多数の  $\text{H}_2\text{O}$  輝線のプロファイルの計算を行い、分光観測による  $\text{H}_2\text{O}$  スノーライン決定の可能性を調べてきた。その結果、アインシュタインの A 係数が小さく励起エネルギーが大きい複数の輝線プロファイルを高分散分光観測で調べる事で、 $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインを同定できる事を報告した。

本研究では、新たに化学反応計算においてダスト表面反応を導入した場合と、ダストサイズを成長させた場合について  $\text{H}_2\text{O}$  の存在量とその分布を調べ、その結果を元に  $\text{H}_2\text{O}$  輝線のプロファイルを計算した。まずダスト表面反応を導入した場合は、円盤赤道面の  $\text{H}_2\text{O}$  スノーライン内側では  $\text{H}_2\text{O}$  ガスの存在量が増加する一方、円盤外側の表層部の高温領域では減少した。その結果、A 係数が小さな輝線の放射強度が数倍程度増加し、かつその増加量は波長が短い輝線ほど多い事も分かった。また、円盤外側の表層部の高温領域からの寄与が小さくなった事で、A 係数がより大きな輝線も  $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインの決定に使える可能性が示された。一方ダストサイズを成長させた場合は、円盤外側の表層部の高温領域の  $\text{H}_2\text{O}$  ガス存在量が増加する事が分かった。更に、将来の高分散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 (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) でできた円盤である。この円盤内ではダスト同士の合体成長、その後の円盤ガスの捕獲により、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、円盤自体も近年赤外線 (e.g., Subaru/HiCIAO) やサブミリ波 (e.g., ALMA) を用いた観測により、詳細な構造の研究がなされつつある (e.g., Muto et al. 2012; Fukagawa et al. 2013; Partnership et al. 2015)。その中で、従来の惑星形成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、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、 $\text{H}_2\text{O}$  などが含まれる (e.g., Caselli & Ceccarelli 2012)。次節以降では、特に  $\text{H}_2\text{O}$  に着目し議論をすすめる。

### 1.2 $\text{H}_2\text{O}$ スノーラインと、惑星形成における氷ダストの役割

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、 $\text{H}_2\text{O}$  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、 $\text{H}_2\text{O}$  がダスト表面に凍結する (Hayashi et al. 1981)。この境界が  $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインであり、ダストの合体成長で惑星を作る際、 $\text{H}_2\text{O}$  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ほか、ダスト表面が  $\text{H}_2\text{O}$  分子に覆われる事で粒子の合体成長が促進される。そのためダストの合体成長で巨大な

岩石コアが形成され、重力で周囲のガスを大量に捕獲する事が可能となり、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、 $\text{H}_2\text{O}$  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言える。

円盤赤道面における  $\text{H}_2\text{O}$  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分布、中心星への質量降着率など、円盤の物理構造を変える事でその位置は変化する (e.g., Oka et al. 2011)。そのため、太陽系外の円盤の観測から  $\text{H}_2\text{O}$  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 $\text{H}_2\text{O}$ 輝線の観測と $\text{H}_2\text{O}$ スノーライン

円盤の観測から  $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインを決定する場合、まずは撮像観測から情報を得る事が考えられる。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。

一方、近年 Spitzer (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  $\text{H}_2\text{O}$  輝線を検出できるようになった (e.g., van Dishoeck et al. 2014)。温度依存性や波長の異なる様々な  $\text{H}_2\text{O}$  輝線の強度比を用いて、 $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインの位置を見積もる研究もなされているが (Zhang et al. 2013)、円盤の温度分布のモデルに依存するものであったほか、中心部に穴が空いた円盤 (遷移円盤) での研究であった。

ここで円盤はほぼケプラー回転をしているため、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る。この輝線のプロファイル形状の解析から、輝線放射領域の中心星からの距離の情報が得られる。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  $4.7\mu\text{m}$  の振動回転輝線を用いた、円盤の内部構造の研究 (e.g., Pontoppidan et al. 2008) が挙げられる。そこで、今後波長分解能の高い分光観測が可能になれば、 $\text{H}_2\text{O}$  輝線のプロファイル形状の解析を通じ、モデルに依存せず典型的な円盤において  $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインを同定できると考えられる。

我々はこれまで、このような観測で  $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインを同定する方法の詳細を調べてきた。解析手法の概略を述べると、 $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインの位置を仮定するのではなく、与えられた典型的な円盤の物理構造の元で化学反応計算を行い、円盤中の  $\text{H}_2\text{O}$  の分布や

$\text{H}_2\text{O}$  スノーラインの位置を求めた。その結果を元に、近赤外線からサブミリ波までの多数の  $\text{H}_2\text{O}$  輝線のプロファイルの輻射輸送計算を行い、分光観測による  $\text{H}_2\text{O}$  スノーライン決定の可能性を調べてきた。その結果、アインシュタインの A 係数が小さく励起エネルギーが大きな複数の輝線のプロファイルを高分散分光観測で調べる事で、 $\text{H}_2\text{O}$  スノーラインを同定できる事を報告した (e.g., 2014 年天文夏の学校 star-a6, Notsu et al. 2015)。

本研究では、新たに化学反応計算においてダスト表面反応を導入した場合と、円盤内のダストサイズ成長を考慮した場合について  $\text{H}_2\text{O}$  の存在量とその分布を調べ、その結果を元に  $\text{H}_2\text{O}$  輝線のプロファイルを計算した。具体的な解析手法と解析結果は次章以降で述べる。なお今回は紙面の都合上、ダストサイズ成長を考慮した場合の解析結果の解説は省略する。

## 2 Methods & Results

### 2.1 原始惑星系円盤の物理構造

円盤内の化学反応計算を行う際には、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る。本研究では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  $T_* = 4000\text{K}$  の典型的な T-tauri 星とし、その周りの円盤は定常、軸対称を仮定した。また、円盤中の元素組成やダストサイズ分布は Nomura & Millar (2005) と同じモデルを用いており、ダストの最大サイズは  $10\mu\text{m}$  である (詳細は Walsh et al. (2010, 2012) も参照)。図 1 はこのモデルの場合の円盤のガス温度分布図である。

なお 1 章で述べた様に、中心星からの放射強度や円盤中のダストサイズ分布など、円盤の物理構造を変える事で  $\text{H}_2\text{O}$  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、中心星として典型的な Herbig Ae 星を考えたモデルや、円盤中でのダストサイズ成長を考慮したモデル (ダスト最大サイズが  $10\text{cm}$ ) を採用した場合についても解析を行っている。なお 1.3 章に記載の通り、紙面の都合上これらの解析結果の解説は省略する。

### 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)

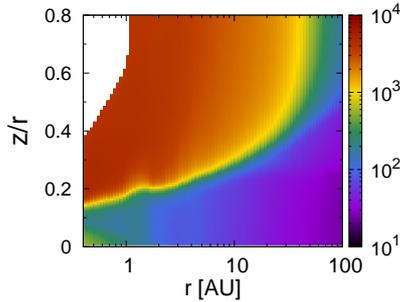


図 1: 円盤のガス温度分布 (単位は K)。横軸は円盤半径 (AU)、縦軸は円盤の赤道面からの高さ/円盤半径。

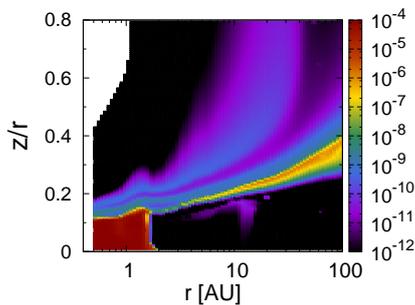


図 2: 円盤の H<sub>2</sub>O の組成分布 (H<sub>2</sub>O 分子の数密度/全 H 原子の数密度)。横軸、縦軸は図 1 と同様。

の値を用いた (Woodall et al. 2007)。なお計算に含んだ化学種の数は 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して、ダスト表面への化学種の凍結や、熱的・非熱的脱離の過程も合わせて考えた。そして、今回は新たにダスト表面反応 (Hasegawa et al. 1992) を考慮した場合の計算も行った (これら化学反応計算の詳細は、Walsh et al. (2010, 2012) を参照。)

図 2 はダスト表面反応を考慮した場合の計算で得られた、H<sub>2</sub>O ガスの組成分布の結果である。H<sub>2</sub>O スノーラインは 2AU 付近に存在する事が分かる。また図 1 と比較すると、円盤赤道面の H<sub>2</sub>O スノーライン内側だけでなく、円盤外側の表層部の高温領域でも H<sub>2</sub>O ガスの存在量が多い事が分かった。なお、高温領域で H<sub>2</sub>O が多いのは、気相中で H<sub>2</sub>O を生成する反応が促進されるからである (e.g., van Dishoeck et al. 2014)。更に、これまでのダスト表面反応を考慮していない場合の解析結果と比較すると、円盤赤道面の H<sub>2</sub>O ガスの存在量が増加した一方、円盤外側の表層部の高温領域の H<sub>2</sub>O ガス量が減少した事も分かった。

### 2.3 H<sub>2</sub>O 輝線の輻射輸送計算とその結果例

計算で得られた H<sub>2</sub>O ガス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 H<sub>2</sub>O 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。

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

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、 $h$  はプランク定数、 $\nu_{ul}$  は状態 u から l へと遷移する時に放出する光の振動数、 $\tau_{ul}$  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。

(1) 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。またこれまでの研究から、 $A_{ul}$  が小さく励起エネルギーが大きい複数の輝線のプロファイルを高分散分光観測で調べる事で、H<sub>2</sub>O スノーラインを同定できる事が分かっている。これは  $A_{ul}$  が小さい輝線の場合、ガス密度が低く光学的に薄い円盤外側の表層部の高温領域にある H<sub>2</sub>O ガスからの放射の寄与が小さくなる事、そしてその結果、ガス密度が高く光学的に厚い円盤赤道面付近の高温領域である、H<sub>2</sub>O スノーライン内側からの放射の寄与の方が大きくなる事が原因である。

今回はダスト表面反応を考慮した場合について、様々な波長での観測可能性を調べるため、近赤外線からサブミリ波まで様々な輝線について計算を行った。ここでは計算した輝線のうち、63.4 $\mu$ m の H<sub>2</sub>O 輝線 ( $A_{ul}=1.772 \text{ s}^{-1}$ ,  $E_u=1070.6\text{K}$ ) のプロファイルの振る舞いを紹介する。なお計算の際、天体までの距離  $d=140\text{pc}$ 、軌道傾斜角  $i=10^\circ$  としている。この輝線は過去の Herschel/PACS による原始惑星系円盤の観測で、検出がなされている (e.g., Riviere-Marichalar et al. 2012)。これまでのダスト表面反応を考慮していない場合の解析によると、この輝線は  $A_{ul}$  が大きいので、円盤外側の表層部の高温領域からの寄与の方が H<sub>2</sub>O スノーラインの内側からの寄与よりも大きくなる事が分かっている。

図 3 はダスト表面反応を考慮した場合の H<sub>2</sub>O 輝線

の解析結果である。H<sub>2</sub>O スノーラインの内側 (半径 2AU 以内) からの H<sub>2</sub>O 輝線への寄与が、外側からの寄与より大きい事が分かり、プロファイル形状から H<sub>2</sub>O スノーラインの情報が読み取れる。これは、円盤赤道面の H<sub>2</sub>O ガスの存在量が増加し円盤内側からの輝線への寄与が増加した一方、円盤外側の表層部の高温領域にある H<sub>2</sub>O ガス量が減少したことで、円盤外側からの輝線放射量が減少したからである。なお詳細は省くが、他にも  $A_{ul}$  や波長が異なる様々な輝線について解析を行ったところ、同様の傾向が見られた。また内側からの輝線放射の増加量は、波長が短い輝線の方が大きい傾向も見て取れた。

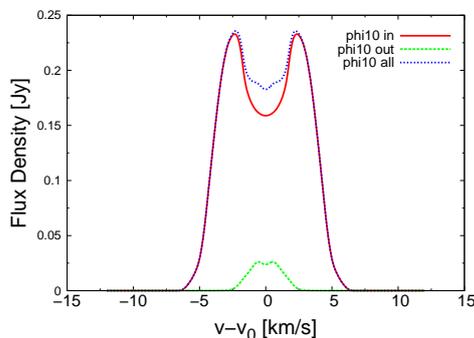


図 3: ダスト表面反応を考慮した場合の、波長  $63.4\mu\text{m}$  の H<sub>2</sub>O 輝線のプロファイル。赤い直線は円盤中心から半径 2AU 以内 (H<sub>2</sub>O スノーライン内側) からの放射、緑の点線は半径 2-30AU からの放射、青い破線は 2 成分を合わせた放射のプロファイル。

### 3 Discussion

今回の計算結果から、 $A_{ul}$  が大きい H<sub>2</sub>O 輝線も、ダスト表面反応が効率的に生じている条件下ではスノーライン同定に使用できる事が示唆される。ここで、円盤全体からの H<sub>2</sub>O 輝線の全放射量を比較すると、ダスト表面反応を考慮していない場合の計算結果の方が、円盤外側からの強い寄与が効く分放射量が大きくなっている。また従来の観測結果 (波長分解能が低くプロファイルは分解できていないが、放射量は測定されている) によると、この輝線の放射量は円盤ごとにはばらつきがある事が分かっている。ここで、ダスト表面反応を考慮した場合としていない場合でプロファイル形状も異なる事も踏まえると、将来の高分散分光観測でこの輝線のプロファイルを分解すれば、ダスト表面反応の効き方や、H<sub>2</sub>O ガス分布などに制限が加えられると考えられる。

### 4 Conclusion & Future Work

本研究では、新たにダスト表面反応を考慮した円盤の化学反応計算を行い、H<sub>2</sub>O の存在量と分布を調べた。すると今回の条件の場合、円盤赤道面の H<sub>2</sub>O スノーラインの内側の H<sub>2</sub>O ガスの存在量が増加した一方、円盤外側の表層部の高温領域の H<sub>2</sub>O ガス量が減少した事が分かった。またその結果、 $A_{ul}$  がより大きな輝線についても、H<sub>2</sub>O スノーラインの同定に使用できる可能性が示された。

今後は赤外線やサブミリ波での将来の観測 (e.g., TMT/MICHI, ALMA, SPICA/HRS) を目指し、様々な物理構造を持つ円盤における H<sub>2</sub>O 輝線の強度やラインプロファイルの予測などを、さらに進めていく予定である。

### Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04)、国立天文台、理論天文学宇宙物理学懇談会、光学赤外線天文連絡会からのご支援に感謝致します。本研究は、野村英子氏、石本大貴氏、C. Walsh 氏、本田充彦氏、廣田朋也氏、T. J. Millar 氏らとの共同研究です。これらの方々をはじめとして、本研究に関わった全ての皆様に深く感謝します。

### Reference

- Caselli, P., & Ceccarelli, C. 2012, *A&ARv*, 20, 56  
 Fukagawa, M., Tsukagoshi, T., & Momose, M., et al. 2013, *PASJ*, 65, L14  
 Hasegawa, T. I., Herbst, E., & Leung, C. M. 1992, *ApJS*, 82, 167  
 Hayashi, C. 1981, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 70, 35  
 Hayashi, C., Nakazawa, K., & Nakagawa, Y. 1985, *Protostars and Planets II*, 1100  
 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  
 Notsu, S., Nomura, H., Ishimoto, D., et al. 2015, *ASPCS in press*  
 Oka, A., Nakamoto, T., & Ida, S. 2011, *ApJ*, 738, 141  
 Partnership, A., Brogan, C. L., Perez, L. M., et al. 2015, *ApJL*, in press (arXiv:1503.02649)  
 Pontoppidan, K. M., Blake, G. A., van Dishoeck, E. F., et al. 2008, *ApJ*, 684, 1323  
 Riviere-Marichalar, P., Ménard, F., Thi, W. F., et al. 2012, *A&A*, 538, L3  
 van Dishoeck, E. F., Bergin, E. A., Lis, D. C., & Lunine, J. I. 2014, *Protostars and Planets VI*, 835  
 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