

原子惑星系円盤の化学進化における円盤風の影響

石本 大貴 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

本研究の目的は、円盤の散逸機構として近年提唱されている円盤風の効果を取り入れた化学反応計算を行うことによって、円盤風が円盤の化学進化に与える影響を調べ、円盤風が観測的に検証可能であるかを調べることである。化学反応計算の結果、円盤風の効果によって分子の多い円盤中層領域から分子の少ない円盤上層領域にかけて分子の存在量が増加した。これは、円盤上層の高温領域に中層からの水素分子が供給され、これにより中性-中性反応が進んだためである。また、その結果を用いた輻射輸送計算の結果、円盤風の影響を受ける輝線は主に高励起の赤外線として観測される輝線であった。これは、赤外線を主に放射する高温領域において分子量が増加したためである。また、輝線強度は大きくなるが、速度プロファイルはあまり大きな変化は見られなかった。最近の $\text{CO} 4.7\mu\text{m}$ 輝線の高分散赤外線観測により示唆された、高速度でワイドアングルの円盤風の速度分布を用いて輝線の輻射輸送計算を行った結果、円盤風の影響が無い場合には円盤のケプラー回転のためにダブルピークの速度プロファイルを持つものが、シングルピークになるという結果になり、高分散赤外線観測を再現する結果となった。さらに、同じ速度分布を用いて (サブ) ミリ波輝線の計算を行った結果、(サブ) ミリ波輝線もシングルピークとなることが分かった。(サブ) ミリ波輝線は赤外線輝線よりも赤道面に近い領域をトレースするため、本研究の結果と今後の電波干渉計 ALMA の観測結果を比較することにより、円盤風駆動点付近の速度構造や、ひいては円盤風による円盤ガス散逸率に制限が与えられると期待される。

1 Introduction

地球を始めとする惑星はどのようにしてできたのか、という問題は天文学の中でも非常に興味深く、理論、観測の両面から精力的に研究が行われている。現在の標準的な惑星形成過程は京都モデルなどによって説明できる (Hayashi et al. 1985)。しかし、おおまかな過程はわかっているが、その過程間の詳細については完全に理解されていない。惑星の形成を考える上で原始惑星系円盤の進化の理解は必須である。

原始惑星系円盤の進化に関する大きな問題として、円盤のガスがいつ、どのようにして散逸するか、というものがあ。その散逸過程としてはいくつか考えられていて、円盤中の物質は回転しているので、周りの物質との摩擦によって角運動量を円盤外側に輸送し、物質を円盤内側の中心星へ粘性降着させるといった考えや、中心星からの紫外線によって円盤上層のガスを温め、中心星の重力を振り切って散逸させるという光蒸発などがあるが、様々な観測を矛盾なく説明する散逸機構は今のところ分かっていない。本

研究ではその散逸機構として近年提唱された円盤風について着目する。

円盤風の理論的研究は古くから行われており、代表的なものとしては定常状態を考えている解析解で、磁気遠心力によってガスを加速させる X ウインドが挙げられる (Shu et al. 1994)。本研究で採用している円盤風のモデルは 3 次元 MHD シミュレーションによって形成されるものと考えている (e.g. Suzuki & Inutsuka 2009)。この円盤風は、円盤内の MRI によって増幅された磁場による磁気圧でガスを円盤上層に向かって飛ばすというモデルである。

円盤風を観測的に示唆する研究として、Pontoppidan et al. (2011) などがある。これは、高精度位置観測により、円盤内の位置とそこでの速度を調べることにより、円盤内でどのような運動をしているかを知ることができるというものである。原始惑星系円盤はケプラー回転していると考えられているが、図 1 は CO の赤外線観測であるが、円盤内での運動がケプラー回転によるものだけだとすると、フラックス

はダブルピークとなり、位置スペクトルは反対称になるという特徴がある。しかし、原始惑星系円盤の中には、フラックスはシングルピーク、位置スペクトルは非対称となるものが見つかっている。これらの円盤はケプラー一回転だけでは説明できないが、ケプラー一回転に円盤風のモデルを加えると、このスペクトルが説明できることがある。例えば、AS 205N という T タウリ型星の周りにある原始惑星系円盤の場合、ある焦点から広い角度で放射状に円盤風が出ているとした場合、このモデルは観測結果とよく合っていると考えられる。

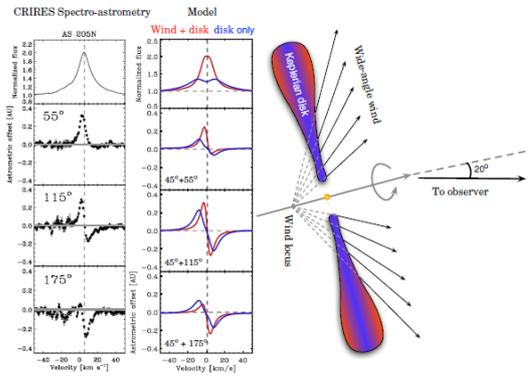


図 1: 観測を説明するための円盤風モデル (Pontopidan et al. 2011)

近年活発に行われている原始惑星系円盤からの分子輝線観測によって、円盤内の化学構造や運動状態を知ることができるようになった。これらの観測結果を説明するためには、詳細な円盤化学の理論モデルも必要になってくる。本研究の目的は、原始惑星系円盤の化学進化に円盤風の効果を取り入れ、その結果を分子輝線観測と比較することで円盤風を観測的に検証することである。

2 Methods

化学反応計算を行うためには、その場所での温度や密度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) を使用する。まず、中心星は質量 $M_* = 0.5M_\odot$ 、半径 $R_* = 2R_\odot$ 、有効温度 $T_* = 4000\text{K}$ 、光度 $L_* =$

$0.87L_\odot$ の典型的な T タウリ型星とし (Kenyon & Hartmann 1995)、その周りの円盤は定常、軸対称を仮定する。

原始惑星系円盤内の化学反応を計算するために、反応係数として UMIST Database for Astrochemistry (Rate06) を用いる (Woodall et al. 2007)。但し、計算時間を減らすために、フッ素 F とリン P を含む化学種とその反応は除いている。F と P を除いても残りの反応には大きな影響はない (Walsh et al. 2010)。化学種の本数は 375、化学反応の本数は 4346 である。初期元素存在量は酸素リッチ、低金属量な元素存在量のモデルを仮定した (Graedel et al. 1982)。

本研究の化学反応計算で解く方程式は式 (1) である。

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} = \sum_{\beta, \gamma} k_{\alpha\beta\gamma} h_\beta n_\gamma - \sum_{\beta} k_{\alpha\beta} n_\alpha n_\beta \quad (1)$$

$$- (k_\alpha^{ads} - k_\alpha^{des}) n_\alpha - \frac{\partial(v_{wind} n_\alpha)}{\partial z} \quad (2)$$

ここで、 n_α は分子の数密度であり、右辺第 1 項、第 2 項はそれぞれ化学反応による化学種 α の生成と分解で、 n_α は分子の数密度であり、右辺第 3 項、第 4 項はそれぞれダスト表面への吸着とダスト表面からの脱離で、右辺第 5 項が円盤風による移流の効果である。

右辺第 5 項目の円盤風による移流項によって化学反応計算に円盤風の効果を入れている。本研究で用いる円盤風の数密度分布は、Suzuki & Inutsuka (2009) の結果は使わず、簡単なモデルによって速度分布を求める。まず、原始惑星系円盤の典型的な年齢が 10^6 年ということから、円盤風によって円盤中のガス成分が 10^6 年で散逸すると考える。

$$\frac{\Sigma}{\dot{\Sigma}} = \frac{\Sigma}{\rho v_{wind}} = 10^6 \text{yr} \quad (3)$$

ここで、 $\Sigma = \int_{-\infty}^{\infty} \rho dz$ はガス面密度である。この式は、すべての半径でガスが円盤風によって飛ばされるフラックスが一定であることを表している。一定の半径の下では、 v_{wind} の鉛直方向の依存性は密度に反比例するような速度分布である。

本研究では原始惑星系円盤中の分子の輝線が観測されるとき、どのくらいの強度で観測されるかを知るために輝線の輻射輸送を計算する。

観測される分子輝線は有限の線幅を持つが、その主な原因はドップラー効果である。観測者から見て

輝線を放出している分子が運動していると、ドップラー効果によって本来の振動数からずれた振動数の輝線が観測される。それぞれの分子は運動をしているため、線幅は広がって見えるが、全体の輝線強度は変わらない。

視線方向 (ここでは z 軸方向とする) に速度 v_z で運動している分子から放出される輝線の振動数の変化は

$$\nu - \nu_0 = \frac{\nu_0 v_z}{c} \quad (4)$$

で表される (Rybicki & Lightman 1986)。ここで、 ν_0 は静止系での振動数、 c は光速である。

観測される輝線強度は、

$$F_{ul} = \int_{-z_\infty}^{z_\infty} n_u(r, z) A_{ul} \frac{h\nu_{ul}}{4\pi} \exp(-\tau_{ul}(r, z)) dz \quad (5)$$

となる。ここで、 $n_u(r, z)$ は励起の状態が u である分子の数密度、 A_{ul} は状態 u から l へと自発的に遷移する確率を表すアインシュタインの A 係数、 h はプランク関数、 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、 $\tau_{ul}(r, z)$ は光学的深さである。 $A_{ul}\nu_{ul}$ については、Leiden Atomic and Molecular Database のデータを用いる。

3 Results

原始惑星系円盤の化学反応計算の結果得られた分子の存在量は以下ようになった。存在量は、水素に対する割合で表している。動径方向は 4AU から 305AU まで、鉛直方向は動径との比が $z/r = 0.8$ となるまで計算した。計算は典型的な原始惑星系円盤の年齢である 10^6 年まで計算した結果である。

$r = 10$ AU での存在量の鉛直方向の変化を示しているのが図 2 である。点線は円盤風なし、実線は円盤風ありの結果を示している。円盤風の影響により、分子の多い中層領域がより上層へ広がっていることが確認できる。上層は中心星からの UV 放射によって分子が解離される光化学反応が支配的な領域である。この光化学反応のタイムスケールよりも円盤風のタイムスケールが短くなっている領域が円盤風の影響が表れている領域だと考えられる。

原始惑星系円盤内には様々な分子が存在しているが、それらの分子を形成するための起点となる分子が H_2 である。 H_2 は円盤上層では UV で解離されてしまうが、円盤風によってより上層へ広がることができる。広がった領域は温度が 300K 程度あり、分子の多い中層よりも温度が高いことが重要である。化学反応は温度の依存性が高く、高温ほど反応は起こりやすくなる。中層領域の温度 (~ 100 K) では活性化エネルギーのある反応や吸熱反応は起こりにくいので、反応は主に分子とイオンの反応であるが、円盤風によって広がった領域では $O + H_2 \rightarrow OH + H$ 、 $OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$ 、 $C + OH \rightarrow CO + H$ 、 $CO + H_3^+ \rightarrow HCO^+ + H_2$ などの中性同士の反応が効率よく起こる。

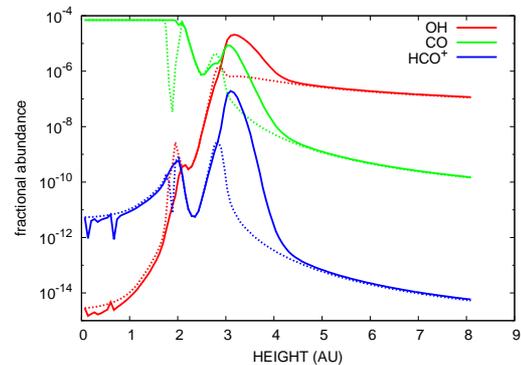


図 2: 鉛直方向の円盤風の影響

化学反応計算の結果得られた分子の存在量を用いた輻射輸送計算により、観測される分子輝線強度は以下ようになった。円盤風により分子存在量が変わったために主に赤外線輝線強度が大きくなっているが、多くの輝線の形にあまり変化は見られなかった。(サブ)ミリ波で観測される輝線では輝線強度は主に低速度成分に集中し、赤外線で観測される輝線では主に高速度成分に集中するような分布となった。ケプラー速度の遅い円盤外側は温度が低く、ケプラー速度の速い円盤内側は温度が高いため、このような分布になっていると考えられる。(サブ)ミリ波の CO と HCO^+ の輝線を比べてみると、CO のほうがシングルピークに近い分布をしている。CO は円盤外縁の領域でも存在量が大きいため、その領域からの寄与が大きいと考えられる。

今回の円盤風のモデルでは Pontoppidan et al. (2011) のような、円盤風がない場合だとダブルピーク velocity 分布が、円盤風を入れることによってシングルピーク velocity 分布になるということではなかった。そこで、化学反応計算の結果は本研究の円盤風モデルの結果をそのまま使い、速度分布だけ Pontoppidan et al. (2011) と同じものを使って輻射輸送を計算した。この速度分布は、本研究のモデルと違って鉛直方向だけでなく、動径方向の速度成分を持っている。その結果、図 3 のようになった。

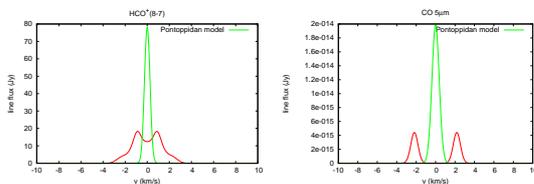


図 3: ワイドアングルな速度分布を適用した場合のラインプロファイル 左: $\text{HCO}^+(8-7)$ 、右: $\text{CO}5\mu\text{m}$

Pontoppidan のモデルを適用すると、円盤風なしだとダブルピーク velocity 分布だったものが円盤風によってシングルピーク velocity 分布となった。また、この結果は赤外線として観測される輝線ではなく、電波として観測される輝線の場合でも同様の結果となることが分かった。このことから、Pontoppidan et al. (2011) では赤外線の観測例のみであったが、ALMA による電波観測でも円盤風を検証することも可能だと考えられる。

4 Conclusion

本研究では中心星からの紫外線、X 線照射などを考慮した物理モデルに基づき、UMIST データベースを用いた詳細な化学反応計算を行った。化学反応計算の結果、円盤風の効果によって分子の多い円盤中層領域から分子の少ない円盤上層領域にかけて分子の存在量が増加した。これは、円盤上層の高温領域に中層からの水素分子が供給され、これにより中性-中性反応が進んだためである。また、その結果を用いた輻射輸送計算の結果、円盤風の影響を受ける輝線は主に高励起の赤外線として観測される輝線で、本研究の円盤風の速度分布の場合、30AU 付近で最も

輝線強度が大きく変化した。これは、赤外線を主に放射する高温領域において分子量が増加したためである。また、輝線強度は大きくなるが、速度プロファイルはあまり大きな変化は見られなかった。最近の $\text{CO}4.7\mu\text{m}$ 輝線の高分散赤外線観測により示唆された、高速度でワイドアングルの円盤風の速度分布を用いて輝線の輻射輸送計算を行った結果、円盤風の影響が無い場合には円盤のケプラー回転のためにダブルピーク velocity プロファイルを持つものが、シングルピークになるという結果になり、高分散赤外線観測を再現する結果となった。さらに、同じ速度分布を用いて (サブ) ミリ波輝線の計算を行った結果、(サブ) ミリ波輝線もシングルピークとなることが分かった。(サブ) ミリ波輝線は赤外線輝線よりも赤道面に近い領域をトレースするため、本研究の結果と今後の電波干渉計 ALMA の観測結果を比較することにより、円盤風駆動点付近の速度構造や、ひいては円盤風による円盤ガス散逸率に制限が与えられると期待される。

Reference

- Carr, J. S., & Najita, J. 2008, *Science*, 319, 1504
- Hayashi, C., Nakazawa, K., & Nakagawa, Y. 1985, in *Protostars and Planets II*, 1100
- Heinzeller, D., Nomura, H., Walsh, C., & Millar, T. J. 2011, *ApJ*, 731, 115
- Kurosawa, R., Harries, T. J., & Symington, N. H. 2006, *MNRAS*, 370, 580
- Pontoppidan, K. M., Blake, G. A., & Smette, A. 2011, *ApJ*, 733, 84
- Rybicki, G. B., & Lightman, A. P. 1986, in *Radiative Processes in Astrophysics*, New York: Wiley, 400
- Shu, F., Najita, J., Ostriker, E., Wilkin, F., Ruden, S., & Lizano, S. 1994, *ApJ*, 429, 781
- Suzuki, T. K., & Inutsuka, S. 2009, *ApJ*, 691, L49
- Walsh, C., Millar, T. J., & Nomura, H. 2010, *ApJ*, 722, 1607
- Woodall, J., Agúndez, M., MArcwick-Kemper, A. J., & Millar, T. J. 2007, *A&A*, 446, 1197