

原始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 理学研究科 宇宙物理学教室 M2

共同研究者：野村 英子(京都大学), D.Heinzeller(Meteorological Service of New Zealand Ltd), C.Walsh, T.J.Millar(Queen's University Belfast)

Abstract

原始惑星系円盤は惑星形成の場であり、その物理、化学進化の理解は惑星系形成の理解へとつながる。近年では観測技術の向上により、赤外線や電波によって様々な分子輝線が観測されている。また、観測により原始惑星系円盤は 10^6 年程度で散逸すると考えられている。その散逸機構としては中心星への粘性降着や中心星からの光蒸発があるが、観測を矛盾なく説明する機構は分かっていない。本研究では円盤の散逸機構の1つとして考えられている円盤風を考慮に入れた原始惑星系円盤の化学反応計算を行い、円盤風が化学進化に与える影響を調べた。その結果、円盤風によって円盤中層部から円盤上層部にかけて分子の存在量が増加した。また、円盤風による面密度の増加率を調べた結果、今回の円盤風のモデルでは30AU付近で円盤風による影響が最も大きくなり、散逸時間が 10^6 年を超えると急に円盤風の影響が大きくなることが分かった。また、輻射輸送計算の結果、高励起の輝線が円盤風の影響で強くなることがわかった。

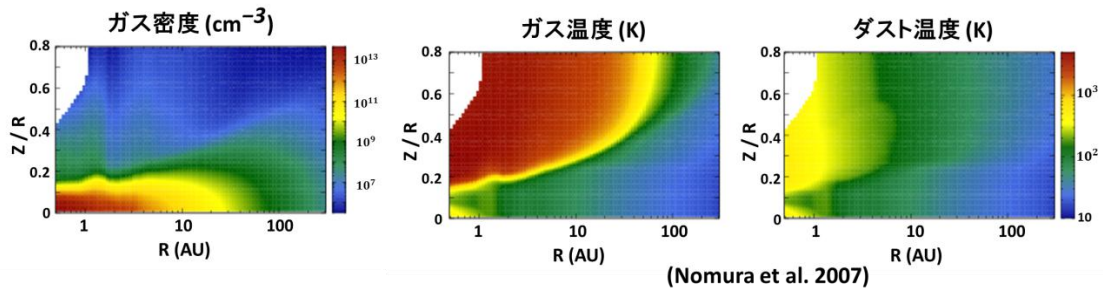
1. Introduction

原始惑星系円盤(以下、円盤とする)からの分子輝線観測は観測機器の性能向上により、ここ十数年で活発に行われるようになり、観測的理解は進んでいる。ALMAなどの大型電波望遠鏡により、今後も様々な分子輝線の発見が期待されている。化学理論モデルによる計算には温度や密度などの物理量が関係しており、理論と観測を比較することによって化学、物理両面の理解が高まると考えられる。本研究ではMRI乱流によって駆動される円盤風という運動を取り入れた化学進化計算を行った。その結果と観測を比較することで、円盤内で円盤風という運動が実際に起こっているかどうかを調べるができる。それにより、

円盤内でMRIが起こっているかどうかや、電離度についての情報が得られると考えられる。

2. 円盤モデル

化学反応計算には温度や密度の情報が必要になるが、本研究では Nomura et al.2007 の結果を用いる。中心星は典型的な T タウリ型星を仮定し、 $M_* = 0.5M_\odot$, $R_* = 2R_\odot$, $T_* = 4000K$ とする。ガス密度は鉛直方向の静水圧平衡、ガス温度は局所熱平衡、ダスト温度は局所輻射平衡を仮定し、それぞれ以下ようになった。



3. 化学反応ネットワーク

本研究での基礎方程式は以下ようになる。

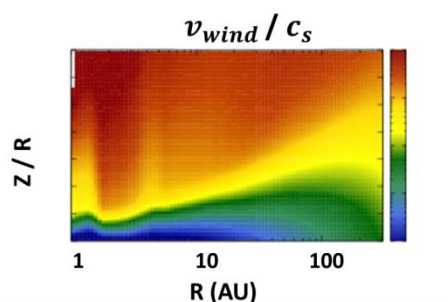
$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} = \sum_{\beta,\gamma} k_{\alpha\beta\gamma} n_\beta n_\gamma - \sum_{\beta} k_{\alpha\beta} n_\alpha n_\beta - (k_\alpha^{ads} - k_\alpha^{des}) n_\alpha - \frac{\partial(v_{wind} n_\alpha)}{\partial z} \quad \dots \quad \textcircled{1}$$

①式第 1、2 項は化学反応により化学種が増減する項である。反応係数は UMIST Database for Astrochemistry (Rate06)を使用し、化学種は 375 種、化学反応数は 4346、化学反応はすべて気相中の反応を仮定している(Woodall et al.2007)。初期元素存在量は酸素リッチ、低金属量を仮定している(Graedel et al.1982)。

①式第 3、4 項はガス-ダスト相互作用の項である。ガス-ダスト相互作用としては、ダストへの吸着 ($k_\alpha^{ads} \propto T_{gas}^{-1/2}$)、ダストからの熱的脱離 ($k_\alpha^{des} \propto \exp(-E_{bind}/T_{dust})$) 及び非熱的脱離 (紫外線、宇宙線) を考えている(Hasegawa et al. 1992)。本研究での化学反応はすべて気相中の反応を仮定しているが、例外として水素分子形成のダスト表面反応 ($H + H \rightarrow H_2$) も考慮している。これは、水素分子は化学反応の起点となる重要な分子であり、正確な存在量を求めることは重要であるからである。低密度の円盤中では気相での水素分子は反応で生じる熱エネルギーを他に渡せないため形成されにくい、ダスト表面反応なら熱エネルギーをダスト表面に渡せるため、気相よりも水素分子を形成しやすい。

①式第 5 項は本研究の特徴である円盤風の項である。この項は、化学種が v_{wind} で鉛直上向きに飛ばされるという移流であるとした。 v_{wind} は円盤の典型的な年齢であるとされる 10^6 年で円盤風によって円盤面密度が散逸するという仮定において、 v_{wind} を求めた ($\Sigma/\dot{\Sigma} =$

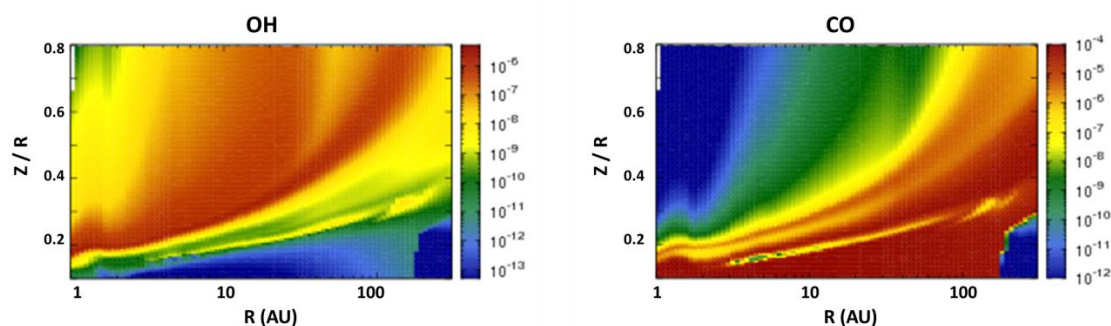
$\Sigma/\rho v_{wind} = 10^6 \text{yr}$)。 v_{wind} は以下のようになった。



以上の計算を 10^6 年まで計算した。

4. 円盤の化学構造(円盤風なし)

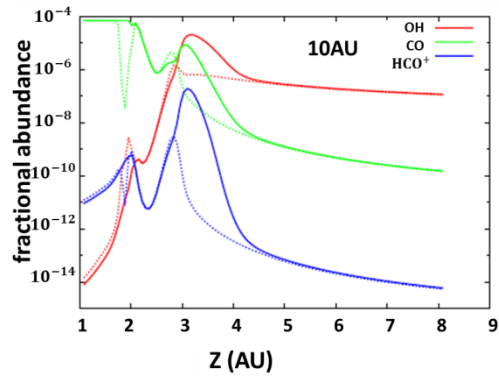
まずは円盤風の効果(①式第 5 項)がないとき、円盤の化学構造がどのようになっているかを示す。以下は CO と OH についての fractional abundance の分布である。



円盤の化学構造は大きく分けて 3 つの領域に分類することができる。円盤上層は中心星からの紫外線や X 線による解離や電離によって分子は少ない。ただし、CO、OH、CN などの解離エネルギーの低い分子は多い。円盤中層は紫外線は弱く、温度も比較的高いので、分子は多い。円盤下層は温度が低く、ダスト表面に凍結するので分子は少ない。ただし、CO などの昇華温度の低い分子は多い。

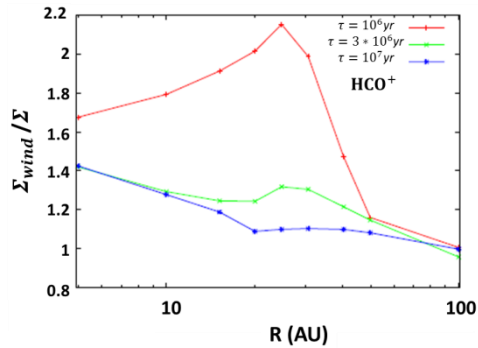
5. 円盤風の影響

円盤風の効果を入れたとき、分子の存在量がどのように変化するかを示したものが、以下の図である。これは 10AU での結果で、破線は円盤風なし、実線は円盤風ありの結果である。



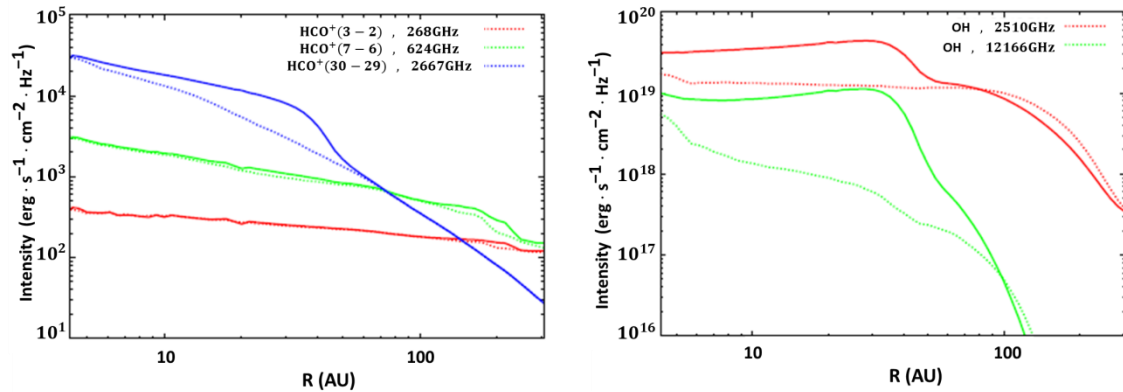
円盤上層は紫外線やX線による光化学反応が支配的で、光化学反応のタイムスケールが円盤表面と比べて長い円盤中層から上層にかけて円盤風の影響が強くなり、fractional abundanceが増加している。

次に、円盤風による各半径での面密度の変化をみると、20AU付近で面密度の変化量が大きくなった。特に、高温ガス中で生成されやすいOH、H₂Oの変化が大きくなっている(H₂ + O → OH + H, OH + H₂ → H₂O + H)。また、円盤風の影響は散逸時間が10⁶年を超えると急に大きくなる。



6. 輻射輸送計算

5.で得られた存在量をもとに、1次元輻射輸送計算を行った。エネルギー準位のデータはLeiden Atomic and Molecular Databaseを用いている。



低励起の輝線はほとんど円盤風の影響を受けず、高励起の輝線は面密度と同様に 30AU 付近で大きく変化している。低励起の輝線は主に温度の低い円盤下層からの寄与が大きく、高励起の輝線は主に温度の高い円盤上層からの寄与が大きい。円盤風によって存在量が変わったのは中層から上層にかけての温度の高い領域なので、OH などの赤外線で見える分子の輝線強度が強くなっている。

7. まとめ

本研究をまとめると、以下ようになる。

- ・ 円盤風の効果を入れた化学反応計算を行い、円盤風が原始惑星系円盤に与える影響を調べた。
- ・ 円盤中層から上層にかけて fractional abundance が増加した。
- ・ 円盤風による化学進化への影響は 30AU 付近で最大となる。
- ・ 円盤風の影響は散逸時間が 10^6 年を超えると急に大きくなる。
- ・ 円盤風によって主に赤外線で見える輝線が強くなる。

[参考文献]

1. Heinzeller et al. ApJ, 731, 115 (2011)
2. Suzuki & Inutsuka ApJ, 691, L49 (2009)
3. Walsh et al. ApJ, 722, 1607 (2010)