PR0198

# 原始惑星系円盤における揮発性物質の進化

○古家健次 [1]
([1] 国立天文台)

惑星は原始惑星系円盤の中で生まれ、その初期組成を獲得する。炭素、窒素、酸素などの惑星の材料として重要な揮発性元素は、円盤内の物理環境(温度・密度など)によって主要な分子種や気相・固相(氷)間の分配が変化する。そのため、円盤内の気相と固相の組成は場所によって異なり、円盤内で惑星がいつ・どこで・どのように形成されるかに依存して、形成される惑星の組成も異なると考えられている [1]。ジェイムズ・ウェッブ望遠鏡による観測で系外惑星大気組成が制約され、惑星大気組成と円盤組成を比較することで、惑星形成過程の理解が進むと期待されている。そのような研究には円盤組成の詳細な理解が必須である。本講演では、アルマ望遠鏡による原始惑星系円盤の観測及び発表者らによる円盤理論モデルを基に、円盤の揮発性物質の進化に関する最新の理解を紹介する。特に i) 円盤外側領域(CO 雪線以遠)においてガス中から炭素・及び酸素が徐々に失われ、相対的に窒素に富んだ組成になること、ii)円盤赤道面の氷組成の進化、特に $H_2O$ 氷の水素及び酸素同位体組成の進化について紹介したい。

**円盤表層のガス組成 :** 近年のアルマ望遠鏡による原始惑星系円盤の分子輝線観測で、円盤内に存在する様々な気相分子が検出され、さらにそれらの空間分布まで明らかになってきた。しかし、分子輝線観測は通常、円盤の表層領域(図 1 の破線より上部)を見ており、惑星が形成される円盤赤道面の組成を直接観測することは困難である。一方で、円盤ガスは乱流状態にあると考えられており、乱流による拡散輸送と氷ダストの赤道面への沈殿を介して円盤表層と赤道面の間で物質のやりとりがある。したがって、物質輸送が表層と赤道面の組成に与える影響を理論的に理解しておくことで、観測可能な円盤表層組成から赤道面組成を制約することができると期待される。

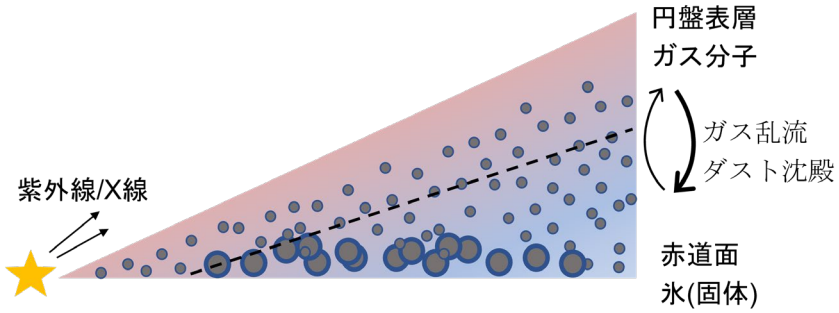


図 1　原始惑星系円盤内の物質分布

発表者らは、気相・固相化学反応、乱流および氷ダストの赤道面への沈殿による物質輸送を考慮した、これまでになく精密な円盤物理化学モデルを構築した[2]。その結果、乱流拡散により円盤表層のガス分子が赤道面に運ばれ、赤道面の低温ダスト上に $H_2O$,

CO, $CO_2$ 氷として凍結することで、時間と共に円盤表層ガスは中心星組成に対し炭素・酸素に乏しくなる一方、窒素は揮発性の高い $N_2$ 分子として存在するため凍結しづらく、ガスは相対的に窒素に富んだ組成になることが明らかになった。円盤の分子輝線観測からも、100 万年より年老いた円盤ではガス中の CO が少なく、また年老いた円盤の方が $N_2H^+$/CO フラックス比が高いということが分かっており[3]、上のモデル予測と整合的である($N_2H^+$分子は $N_2$ 分子から生成されるため、$N_2$ 量の良い指標である)。すなわち、円盤ガスは中心星組成と異なる元素組成を持つことが分かってきた。

**円盤赤道面の氷組成:** これまでの観測により、$H_2O$ 分子は星間分子雲や原始惑星系円盤、そして太陽系の彗星・隕石まで、星・惑星系形成領域で普遍的に存在することが分かっている。近年、分子雲から円盤までの各進化段階における HDO/$H_2O$ 存在量比がいずれも彗星のそれに似通っていることや[4]、HDO/$H_2O$ 存在量比に加え、$D_2O$/HDO 存在量比も考慮した議論[5]などから、太陽系の母体となった分子雲で生成された水が円盤に輸送され、現在に至るまで彗星中に残っていると考えられている。

一方で、円盤表層では活発に同位体分別が生じていることがアルマ観測より分かっており、また前述のように、円盤表層から酸素が乱流拡散で運ばれ氷として赤道面に凍結する。したがって、円盤内で赤道面の水氷の同位体組成が変化しうるため、その影響を評価しておくことは重要である。そこで、[2]のモデルに水素同位体分別および酸素同位体分別過程を組み込み、水氷の同位体組成の時間発展を調べた。その結果、円盤表層で生成される希少同位体(D と $^{18}O$)に富む水氷が赤道面に運ばれるだけでは、彗星の水氷で観測される希少同位体の濃縮度を説明するのは難しいことが分かった。すなわち、円盤モデルからも彗星水氷(の少なくとも一部)は分子雲起源であることが支持される。

また円盤赤道面の氷組成($H_2O$ 氷に対するマイナー分子種の存在量)については、従来、中心星からの輻射が遮蔽された円盤赤道面では化学反応タイムスケールが長く、円盤形成時の初期組成が保存されると考えられてきた。発表者らのモデルからは表層から運ばれた CO, $CO_2$ 分子等が凍結することで赤道面の氷組成が時変動するという新たな描像が得られた。

以上のように、氷ダスト沈殿とガス乱流拡散を介した物質輸送により円盤表層と赤道面の物質進化が駆動されるという描像が見え始めており、その詳細な理解を基に、惑星組成の理解につなげていきたい。

[1] Öberg, K. et al. 2011, The Astrophysical Journal Letters, 743, L16 [2] Furuya, K. et al. 2022, The Astrophysical Journal, 938, 29 [3] Anderson, D. et al. 2019, The Astrophysical Journal, 881, 127 [4] Tobin, J. et al. 2023, Nature, 615, 227 [5] 古家健次, 2021, 遊星人, 30(1), 4-13

Evolution of volatiles in protoplanetary disks

*K. Furuya[1] ([1]National Astronomical Observatory of Japan)