

低質量原始星エンベロープと円盤の化学進化： H₂O スノーラインと中心星 X 線放射

野 津 翔 太

〈理化学研究所 開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: shota.notsu@riken.jp



円盤形成期の原始星天体の化学組成の理解は、私たちが住む太陽系の物質的環境の起源に迫るうえでも極めて重要です。そして構造形成が進む中で原始星天体の化学的多様性がいつ・どのような(外的)環境要因により生じるのかという点については、いまだ十分には理解されていないものの、理論計算や観測を通じた研究が進みつつあります。本稿では原始星天体の化学進化を理解するうえで重要な構造の一つである“H₂O スノーライン”と関連する様々な分子の組成、そしてそれらに対する“中心星 X 線放射”の影響に着目し、筆者らの理論モデル計算研究と関連する観測的研究の概要、将来に向けた展望などをご紹介します。

1. 原始星天体の化学的多様性

星間分子雲(おおむね質量の99%がH₂などの分子ガス, 1%が固体ダスト(塵))の中で特に密度の高い領域(分子雲コア)が100万年程度の時間をかけて重力収縮することで, 原始星が形成されます。その際原始星(Class 0, I)の周りには外側に緩やかに回転する降着エンベロープ, そして内側に速く回転する原始星円盤が形成されます。図1に, 円盤形成期の原始星天体の概略図を示します。原始星近傍からは回転軸方向にアウトフローが吹き出します。その後質量降着が落ち着き前主系列星(Class II)となり, 円盤(原始惑星系円盤)の進化も進む中でダスト進化や微惑星・惑星形成が進み, やがて惑星系が形成されます。これら一連の星・惑星形成過程は, 様々な構造形成の過程であるとともに, 分子雲で観測される星間物質から複雑な分子や物質が作られていく化学進化の過程でもあります。そのため円盤形成期の原始星天体の化学組成の理解は, 私たちが住む太陽系の物質的環境の起源に迫るうえでも極めて重要です。

1980年代以降, 赤外線・電波観測の進展に伴い, 星・惑星形成領域の物理・化学的環境の理解は徐々に深まってきました。そして2010年頃には低質量原始星を取り巻くエンベロープガス(半径 $r \sim 1,000$ au(天文単位)スケール)の観測を通じ, 原始星天体の化学組成にHot Corino Chemistry(飽和有機分子が豊富)とWarm Carbon-Chain Chemistry(WCCC, 不飽和有機分子が豊富)といった多様性があることがわかってきました[1, 2]。さらに2010年代にはアルマ望遠鏡(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計, ALMA)の本格稼働に伴い, 原始星エンベロープ内縁やその中に埋もれた原始星円盤($r \sim 10-100$ auスケール)の詳細な観測が可能になり, エンベロープスケールから円盤スケールまでの物理・化学的描像が明らかにされつつあります(例えば[3, 4])。これらアルマ望遠鏡による観測などを通じて見えてきた原始星天体の化学的多様性については, 本アストロケミストリー特集の大屋瑤子氏・大小田結貴氏の記事でも様々な有機分子の空間分布の話題などについて詳しく解説されていますので, そち

らもぜひご覧ください。

ここで、分子雲から原始星エンベロープ、円盤と構造形成が進む中で化学的多様性がいつ・どのような(外的)環境要因(温度・紫外線放射場・電離率・構造進化のタイムスケールなど)が関係して生じるのかという点については、いまだ十分な理解には達していないものの、理論計算(例えば[5])や観測を通じた研究が進みつつあります。最近では、外部からの紫外線環境の違いに伴い Hot Corino 天体が分子雲内部、WCCC 天体が分子雲の縁付近に多く分布している可能性を示唆した観測結果[6]や、同一分子雲内の Hot Corino 天体間でも有機分子組成に大きな差があることを発見した観測結果[7]なども報告されています。

そのような中で筆者らは、これまで環境要因としてあまり着目されてこなかった中心原始星のX線放射に注目し、X線放射が低質量原始星エンベロープの電離率、そして化学組成に与える影響を調べた理論モデル計算研究を実施しました[8]。

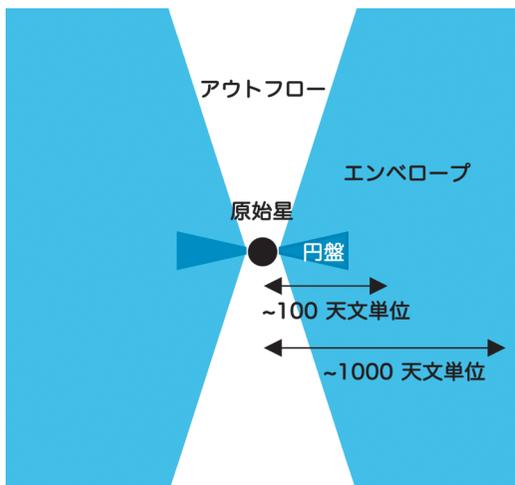


図1 円盤形成期の原始星天体の概略図。

その結果、原始星エンベロープ内縁の H_2O 及び関連分子の組成や、原始星天体の H_2O スノーライン位置の見積もりなどに影響を与えることがわかってきました。そこで本稿では、筆者らを取り組んだモデル計算(化学反応ネットワーク計算)の結果と関連する観測的研究の概要をご紹介します。ここで、将来研究に向けた展望として観測的検証の可能性や電離率を介した原始星天体の物理・化学進化への影響などについて議論します。次章ではモデル計算研究の導入として、原始星天体の H_2O スノーラインと観測で示唆される H_2O 分子の破壊についてご説明します。

2. 原始星天体の H_2O スノーラインと H_2O 分子の破壊

星・惑星形成領域において、 H_2O 分子はガスの冷却やダストの合体成長過程で重要な役割を果たすほか、複雑な有機分子へと至る化学反応の鍵となる分子の一つです。原始星周囲のエンベロープや円盤において、内側は中心星からの光や質量降着に伴い高温になるため、 H_2O 分子はダスト表面から脱離して気体となります。一方遠方では低温となり、 H_2O 分子はダスト表面に凍結します。この境界のことを“ H_2O スノーライン”と呼びます[9]。 H_2O スノーラインの内外でダストの組成(岩石/氷)が変化することで、微惑星・惑星形成過程や地球への水の起源に影響を与えるとされるため、その位置や年齢による進化を観測的に決定することは極めて重要です[10-12]。しかし、Class II天体の原始惑星系円盤赤道面において H_2O スノーライン位置はおおむね $r \sim 1-10$ au程度となるため、空間分解能を考慮すると水のガスや氷の直接的な空間解像観測は難しいのが現状です*1。

*1 Class II天体については、 H_2O スノーライン前後でダストサイズ・面密度が急激に変化するという理論予測に基づき、ダスト熱放射の高解像度撮像観測で H_2O スノーライン位置を探る手法が提案されています(詳しくは奥住聡氏の解説記事[10]をご覧ください)。一方別の手法として筆者らは理論モデル計算を通じ、原始惑星系円盤の赤道面付近から放射される水輝線の速度プロファイルの解析を通じ H_2O スノーラインの位置を同定する手法を示し、アルマ望遠鏡や将来の中間赤外線・遠赤外線望遠鏡による観測も提案しています[13-16]。こちらの詳細は筆者らによる解説記事[11, 12]もご覧頂ければ幸いです。

ここで、惑星形成が進むClass II天体に比べ若い原始星(Class 0, I)天体では中心原始星の放射が強く質量降着率も大きいため[17], 周囲のエンベロープや円盤内の温度も上昇し, H₂Oスノーラインがより外側($r \sim 10-100$ au)に位置します*². そのためClass 0原始星では近年の*Herschel*宇宙望遠鏡の観測, そしてPdBI*³やアルマ望遠鏡などの電波干渉計の観測により, H₂Oスノーライン内側からの水輝線放射が捉えられています(例えば[19-22]). これらの観測結果によると, 複数の低質量Class 0原始星周りのエンベロープ内縁+円盤(半径 $r < 100$ au, 温度 $T > 100$ K)において, 分子雲のH₂O氷組成(水素原子数密度比で $\sim 10^{-4}$)と比べH₂Oガス分子組成が著しく低いこと($< 10^{-6}$)が示唆されています. この結果は, Class 0原始星の近傍の高温領域において, 何らかの過程によりH₂O分子が破壊されていることを示唆しています.

また, Class 0天体に比べて原始星近傍の円盤形成が進んだClass I原始星天体に対しても最近NOEMAとアルマ望遠鏡を用いた水輝線観測が試みられましたが, 観測した5天体すべてで未検出に終わり, H₂Oスノーライン内側のH₂Oガス組成の上限値は $\sim 10^{-7}-10^{-5}$ と見積もられています[23]. Class I天体についてはエンベロープ内側領域での原始星円盤形成がより進んでいますので, 円盤内の光学的に厚いダスト放射によりH₂Oガス放射が隠される効果も合わせて考える必要はありますが, Class 0天体と同様にH₂O分子破壊の効果が寄与している可能性も無視できないところです.

それでは, 原始星天体においてガス中でのH₂O分子の破壊はどのような過程で起きているのでしょうか. ガス中でのH₂O分子の破壊反応を考える際, まずは紫外線による光解離反応が考えられます. しかし紫外線光子は原始星のごく近傍のガスに吸収されてしまうため, $r \sim 100$ auの空間スケールにおいてH₂O分子の破壊を引き起こすことは困難です*⁴.

そのような中で2000年代中頃, Pascal Stäuber氏やEwine F. van Dishoeck氏らが原始星エンベロープの化学構造計算を通じ, 原始星の強いX線放射がH₂O分子の破壊に寄与している可能性を示しました[25, 26]. しかし, 用いた化学反応計算モデルに不十分な点が多かった(具体的には, 主にガス中の反応のみに着目しており, 詳細なガス・ダスト相互作用や, ダスト表面での分子生成反応などが含まれていなかった)点や, H₂Oの代わりに酸素原子を保持する分子やH₂Oと化学的に関連の深い分子(HCO⁺, CH₃OHなど, 詳細後述)の組成が十分に調べられていなかった点などがあり, X線放射が化学組成に与える影響は理解が進んでいませんでした.

そこで筆者らはガス・ダスト化学反応ネットワーク(例えば[13, 14, 27])にX線関連の化学反応を加えたうえで, 低質量Class 0原始星周りのエンベロープの詳細な化学構造計算を行い, H₂Oや関連分子組成のX線放射に対する依存性などを調べました[8]. 次章ではまず筆者らが実施した理論モデル計算の概要をご紹介します.

*² 元々“スノーライン”は原始惑星系円盤の赤道面の凍結・昇華境界に対して定義されたもの[9]ですので, 原始星エンベロープにおいては“昇華半径(sublimation radius)”などと異なる呼び方がされている場合もあります. 本稿では筆者らのモデル計算論文[8]や関連が深い先行研究(例えば[18])の記述に倣い, 原始星エンベロープ内の凍結・昇華境界についても“スノーライン”という表記を用いています

*³ Plateau de Bure Interferometer, 現在はNOEMA(Northern Extended Millimeter Array)と呼ばれています.

*⁴ 原始星エンベロープの詳細な2次元構造を考慮した場合, アウトフローに伴う空洞(Cavity)領域では紫外線光子をより遠方まで届けることが可能となりますが[24], Cavityに沿ったごく僅かな領域でしか分子の破壊が進まないため, 観測的傾向を説明するには不十分です.

3. 原始星エンベロープの物理構造と 化学反応ネットワーク計算

3.1 原始星エンベロープの物理構造

原始星エンベロープの化学反応ネットワーク計算を行う際は、各半径での密度・温度・中心星からのX線放射などの物理量の情報が必要となります。本研究 [8] では典型的な低質量Class 0原始星エンベロープの1次元球対称温度・ガス密度モデル (図2参照) を採用しました*5。この際、密度が異なる2種類のエンベロープ物理モデルを採用することで、X線が化学組成に与える影響の密度依存性の議論につなげています (なお本稿ではスペースの都合上、基本的にIRAS 4Aモデルの結果に絞って紹介します)。その後、得られた密度モデルのもとでX線吸収のエネルギー依存性も考慮し、各半径でのX線フラックス $F_X(r)$ とX線電離率 $\xi_X(r)$ を算出しました (算出方法の詳細は論文 [8] をご覧ください)。この際中心原始星のX線スペクトル形状を仮定した上で、X線光度 L_X をパラメータとして $0, 10^{27}\text{--}10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ の範囲で変化させることで、X線強度に対する化学組成の依存性を調べています。

ここで原始星のX線放射に関して、進化が進んだClass I, II原始星については過去のX線宇宙望遠鏡の観測により、典型的には $L_X \sim 10^{28}\text{--}10^{31} \text{ erg s}^{-1}$ 程度であると報告されています。しかしClass 0原始星のX線放射については周囲の密度の高いエンベロープによる吸収に阻まれ観測が困難なこともあり、観測・理論の双方からこれまで理解が十分に進んでおらず、またそのような事情もあって化学構造の議論でもX線放射はあまり考慮されていませんでした。しかし最近HOPS 383という

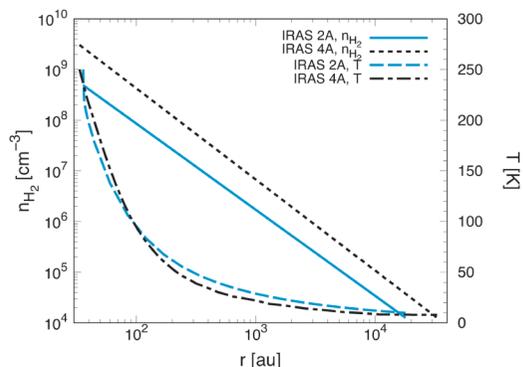


図2 低質量Class 0原始星エンベロープの1次元球対称物理構造モデルにおける、水素分子数密度 $n_{\text{H}_2}(r)$ (縦軸の単位は cm^{-3})、温度 $T(r)$ (縦軸の単位はK)の半径分布。横軸 r は中心原始星からの半径 (単位はau (天文単位)) を表します。

Class 0原始星の2-8 keV帯の観測 [29] で $L_X = 4 \times 10^{31} \text{ erg s}^{-1}$ の原始星X線フレアが観測されたほか、理論的にも高棹真介氏らの研究 [30] で磁気圏構造のないClass 0原始星でも強いX線放射が可能であると提案されるなど、近年研究が進みつつある状況です。これらの進展も踏まえ、上記の光度 L_X の値の範囲を設定しました。

図3に、得られたX線フラックス $F_X(r)$ とX線電離率 $\xi_X(r)$ の半径分布を示します。エンベロープの外側では、距離 r が大きくなることに加えX線吸収の効果を受けて、X線フラックスとX線電離率の値が小さくなっています。またX線電離率に着目すると、強いX線放射の元ではエンベロープ内縁においてX線電離率が宇宙線電離率 ($\xi_{\text{CR}}(r) = 10^{-17} \text{ s}^{-1}$) を上回っており、後述する化学反応においてもX線による電離や解離の効果が重要であることを示しています。

3.2 化学反応ネットワーク計算

次に3.1節で得た物理構造モデルのもとで、原

*5 今回採用したNGC 1333-IRAS 2A (以下、IRAS 2A, 低密度)とNGC 1333-IRAS 4A (以下、IRAS 4A, 高密度)の1次元球対称エンベロープ温度・密度モデルは、Kristensen et al. (2012) [28]において過去のIRAS 2AとIRAS 4Aの連続波観測をフィッティングする形で作られ、*Herschel*宇宙望遠鏡の分子輝線観測データのモデリングなどで用いられています。なお得られたガス密度モデルから、ガス・ダスト質量比=100を仮定してダストの空間分布を算出しています。さらに、ガス温度=ダスト温度としています。

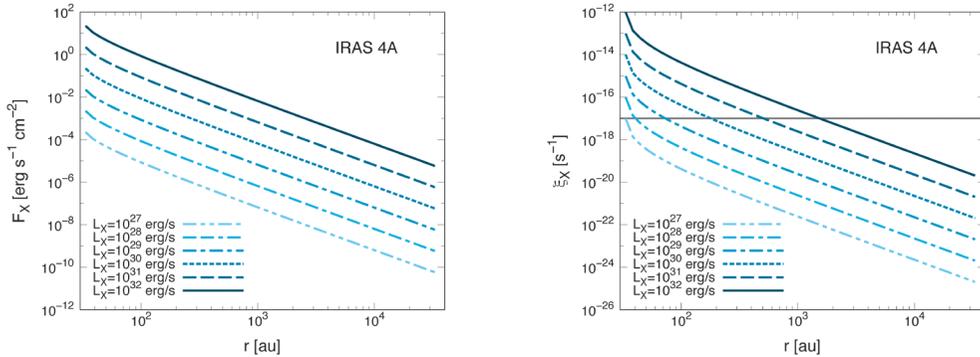


図3 IRAS 4Aモデルにおける、X線フラックス $F_X(r)$ (左図、縦軸の単位は $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$)とX線電離率 $\xi_X(r)$ (右図、縦軸の単位は s^{-1})の半径分布。右図の灰色横線は宇宙線電離率 ($\xi_{\text{CR}}(r) = 10^{-17} \text{s}^{-1}$) を表します。線の種類・色の違いは、X線光度 L_X をパラメータとして $0, 10^{27}\text{--}10^{32} \text{erg s}^{-1}$ の範囲で変えた場合の分布の違いを表しています。X線光度 L_X の値と線の種類・色の対応関係については、図4,7と共通です。

始星エンベロープの化学反応ネットワーク計算を実施し、分子組成の半径分布を求めました [8]. ここで化学反応ネットワーク計算*6は、ガス中およびダスト表面上での化学素過程とガス・ダスト間の相互作用を列挙した反応速度式 (反応ネットワークモデル) を数値的に解くことで化学組成の時間発展を得るもので、分子雲や原始星エンベロープ、原始惑星系円盤の化学構造とその進化過程を調べるうえでよく用いられています (例えば [5, 13, 14, 27, 34]).

筆者らが今回の計算で用いたガス・ダスト化学反応ネットワーク [8] では、ガス中の化学反応は UMIST Database for Astrochemistry (UDfA) RATE2012 の値 [35], ダスト表面反応は Ohio State University (OSU) network [36] に基づいています。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、ダスト表面からの熱的・非熱的脱離の過程を考慮しています。また、反応ネットワークにはX線光子による解離・電離反応 [27] や、光脱離過程 [37, 38] なども加えています。計算の際、ダストは球形かつ半径 $0.1 \mu\text{m}$

を仮定しています。

ここで、原始星形成前の分子雲・分子雲コア時代の化学進化は、その後の原始星天体の化学進化にも大きな影響を与えると考えられています [22]. そのため今回の研究では過去の円盤やエンベロープでの化学反応ネットワーク計算 (例えば [27]) での取り扱いに倣い、典型的な低温分子雲の化学組成をあらかじめ計算したうえで、その結果を今回の原始星エンベロープの化学反応計算の初期組成として用いるという手法を用いることで、原始星形成前の化学進化の影響を取り入れています。なお次章以降では、先行研究 [26] と同様、典型的な Class 0 原始星の年齢である $t=10^5$ 年間計算を進めた結果を紹介しています。

4. 計算結果1: H_2O 及び酸素含有分子の化学組成

図4は、化学反応ネットワーク計算で得られた結果 [8] のうち、 H_2O ガス、 H_2O 氷、 CO ガス、 O_2 ガス組成の半径分布です。

まず H_2O に着目すると、計算の結果先行研究

*6 化学反応ネットワーク計算については、古家健次氏の解説記事 [31, 32] もぜひご覧ください。また古家氏の解説記事でも言及されている通り、正確な化学素過程をモデルへ組み込むうえでも、天文学の枠を超えて室内実験や理論化学の研究者との協力も重要になりつつあります。最近では、“学術変革領域研究 次世代アストロケミストリー” [33] という枠組みでの議論も進んでいます。

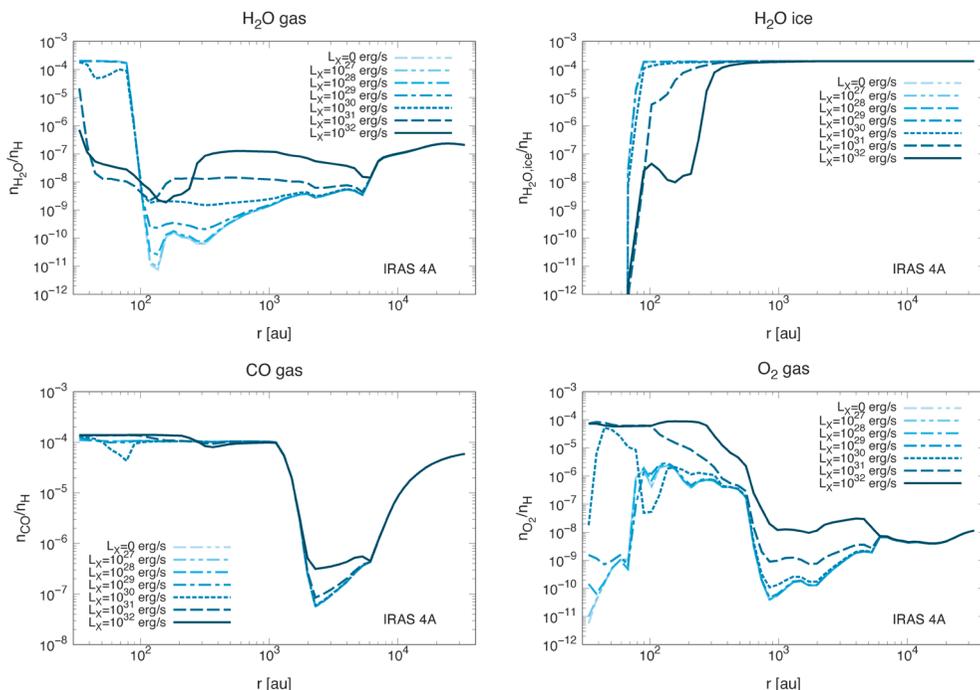


図4 IRAS 4A モデルにおける、H₂O ガス (左上図)、H₂O 氷 (右上図)、CO ガス (左下図)、O₂ ガス (右下図) 組成の半径分布。

[26] と同様の傾向として、原始星の X 線放射が比較的強い ($L_X > 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$) 場合、H₂O スノーライン ($r \sim 100 \text{ au}$, $T \sim 100 \text{ K}$) のすぐ内側で H₂O ガス分子組成が著しく減少する ($< 10^{-7}$) ことが確認できました。この際反応過程の詳細を確認すると、X 線由来のイオン・分子反応 (X 線による電離で生じた H^+ , H_3^+ , HCO^+ , He^+ などと H₂O との反応) や X 線光子による光解離反応 ($\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{OH}$) が H₂O ガス分子の破壊に効いていること、そして前者の反応の方が (特に高密度なエンベロップで) より寄与が大きいことなどがわかりました。またエンベロップ最内縁の高温領域 ($T \sim 250 \text{ K}$) では、以下に示す 2 体反応が高いエネルギー障壁 ($\sim 1,700 \text{ K}$) を超えて進むことで、H₂O

ガス組成がわずかに増加 ($\sim 10^{-6}$) しています;



一方 H₂O スノーラインの外側では、先行研究 [26] では考慮されていなかった X 線光子による光脱離反応 [37, 38] により、H₂O 分子がダスト表面からガス中に放出され、H₂O ガス組成が増加することが新たに示されました。

次に CO ガス分子組成に着目すると、X 線放射の影響をほとんど受けず、CO スノーライン内側 ($T > 20 \text{ K}$) で 10^{-4} の組成を保持することがわかりました*7。一方で X 線光度が増加すると、O 及び O₂ ガス分子の組成が $\sim 10^{-4}$ 程度まで著しく増加し、CO と合わせて酸素原子のほとんどを保持

*7 Class II 天体の原始惑星系円盤 (年齢 $t \geq 10^6$ 年) では、典型的な宇宙線電離率 ($\xi_{\text{CR}} \sim 10^{-17} \text{ s}^{-1}$) の下で、CO ガス組成が化学進化により Class 0, I 天体の値 ($\sim 10^{-4}$) と比べ減少する ($< 10^{-6}$) 効果が知られています [34]。今回の Class 0 原始星エンベロップモデルでは、年齢が若い ($t = 10^5$ 年) ためにこの反応が十分に進まないうえ、H₂O の破壊で供給された酸素原子による CO の再生成も効率的に働き、CO の減少が見られなかったと考えています。

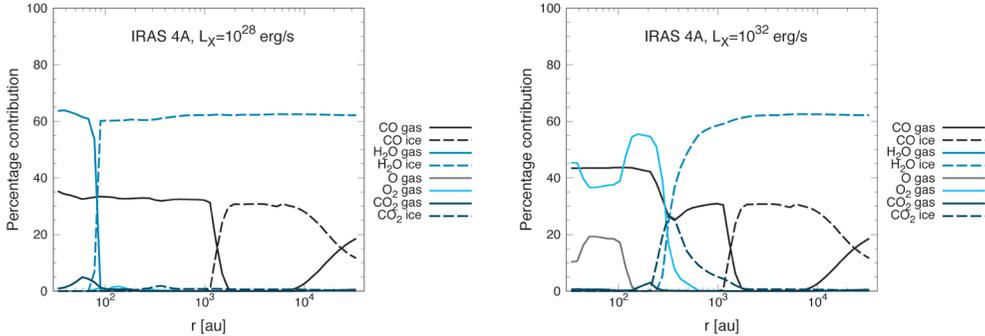


図5 IRAS 4A モデルにおける、総酸素原子組成 ($=3.2 \times 10^{-4}$) に対する主要な酸素含有分子の寄与率 (Percentage contribution) の半径分布. 左図が低X線光度 ($L_x=10^{28} \text{ erg s}^{-1}$), 右図が高X線光度 ($L_x=10^{32} \text{ erg s}^{-1}$) の場合を示しています.

することがわかりました. これは H_2O ガス分子の破壊に伴い O や OH ガス分子が豊富に生成されることに加え, 以下の2体反応による O_2 ガス分子生成過程にエネルギー障壁がなく, 温度によらず効率的に生成が進むことなどが原因であると考えられています;



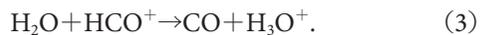
図5は, 総酸素原子組成 ($=3.2 \times 10^{-4}$) に対する主要な酸素含有分子の寄与率 (Percentage contribution) の半径分布を示しています. 低X線光度の場合は H_2O , CO がほとんどの酸素原子を保持しています. 一方で高X線光度の場合は, エンベロープ内縁部で H_2O の寄与が大きく減少し, CO , O_2 , O が主要な酸素含有分子となること, そして O_2 と H_2O の組成が一致する領域 ($r \sim$ 数百 au 付近) で CO_2 組成もやや増加することなどがわかりました.

ここまで理論モデル計算を通じ, 中心原始星のX線放射が H_2O 及びその他の主要酸素含有分子 (O_2 , O , CO_2) の組成に影響を与えることを紹介しました. ここで, 多数の原始星天体に対しこれらの分子の輝線放射の空間分解観測を行うことができれば, X線放射が化学進化に与える影響を観測的に検証することが可能となります. しかし, CO_2 については無極性分子ゆえにアルマ望遠鏡が

カバーするミリ波・サブミリ波帯に適切な輝線がありません. また酸素原子 O についてもダスト光学的厚みが大きな遠赤外線輝線が存在します. さらに酸素分子については $^{16}\text{O}^{16}\text{O}$ 輝線は地球上からの観測が困難なうえ, *Herschel* 宇宙望遠鏡での $^{16}\text{O}^{16}\text{O}$ 輝線の観測 (1天体の上限値を得たのみ [39]) やアルマ望遠鏡での $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ 同位体輝線の観測 (1天体で 3σ の放射を得たのみ [40]) といったごく限られた観測研究しか報告されておらず, 結果としてこれらの分子については原始星エンベロープでの組成について十分な情報が得られていません. そのため, これらの分子以外にX線放射が化学組成に大きな影響を及ぼす分子で, かつアルマ望遠鏡などがカバーするミリ波・サブミリ波帯で空間分解観測が可能な分子を探す必要があります. 次章ではこれらの条件を満たし, かつ H_2O 分子と化学的にも関連が深い HCO^+ ガス, CH_3OH ガス組成について議論します.

5. 計算結果2: HCO^+ 及び CH_3OH の化学組成

HCO^+ はガス中において H_2O が存在する場合, 以下の反応を経て効率的に破壊されることが知られています;



一方 H_2O スノーライン外側などガス中に H_2O が存在しない領域では、 HCO^+ はガス中に保持され、その存在量は主に CO の電離反応で決まります。その結果、 HCO^+ ガスは H_2O スノーラインのすぐ外側にリング状に分布することが期待されます。そこでこの性質を利用して、 HCO^+ 輝線やその同位体 H^{13}CO^+ 、 HC^{18}O^+ 輝線などについて、Class 0, I 原始星天体における H_2O スノーラインの化学的トレーサーとしての有用性が議論されています [18, 41, 42]。

また CH_3OH については昇華温度が H_2O 分子と近く、スノーラインの位置がほぼ同じとなるため、Class 0, I 原始星天体において H_2O スノーライン (及び、 $T > 100 \text{ K}$ の高温領域) のトレーサーとして用いられています (例えば [43, 44])。近年のアルマ望遠鏡などでの観測により、複数の原始星天体に対して H_2O や CH_3OH ガス放射の周りにリング状に分布する HCO^+ ガス放射が検出され、その関係から H_2O スノーラインの位置を見積もる研究もなされています (例えば [18, 43, 45, 46])。図6に、Class 0 原始星 IRAS 2A の空間分解観測の結果 [18] を示します。 H_2^{18}O 輝線放射の周りに H^{13}CO^+ 輝線放射がおおむねリング状に分布しています。

なおこれらの観測の対象天体には、エンベロープと円盤の温度が質量降着率の変動に伴い時間変化する原始星天体 (FU Ori 型星 V883 Ori など) も含まれています。これらの天体については上記手法で見積もられた H_2O スノーライン位置と現在の中心星光度から見積もられた位置に違いがあることも報告されています。その結果と化学進化のタイムスケールを関連づけることで、質量降着率の変動の時間間隔に制限を加える議論なども行われています。

図7は化学反応ネットワーク計算で得られた結果 [8] のうち、 HCO^+ ガス、 CH_3OH ガス組成の半径分布です。 H_2O スノーライン内側 ($r < 100 \text{ au}$) のガス組成に着目すると、 HCO^+ につい

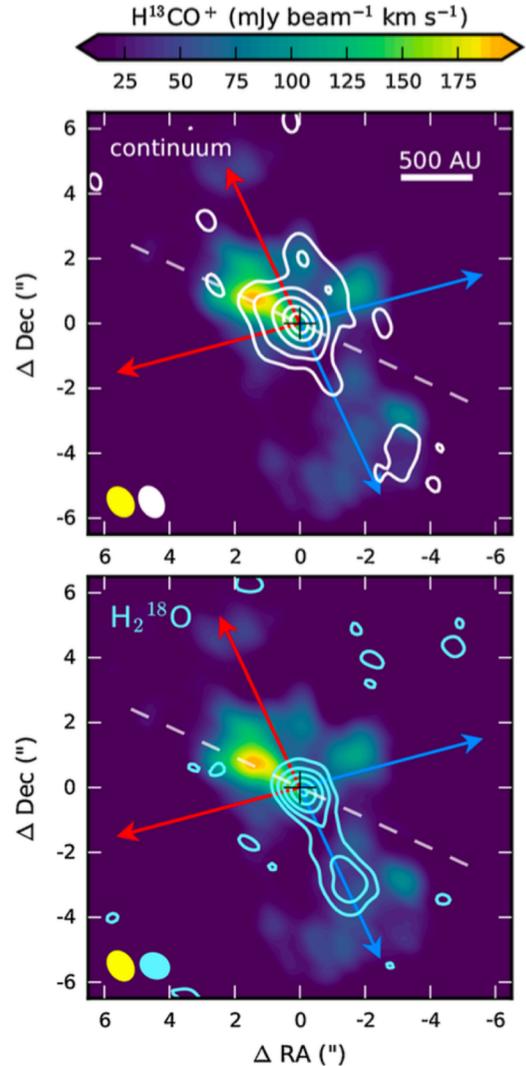


図6 Class 0 原始星 IRAS 2A の空間分解観測の結果 [18]。 H_2^{18}O 輝線放射 (下図の等高線) の周りに H^{13}CO^+ 輝線放射 (両方の図の背景塗り潰し) がおおむねリング状に分布しています。上図の等高線は連続波 (ダスト) 放射の空間分布です。図は出版社の許可を経て論文 [18] から転載しました。カラーの図については Web 版をご参照ください (van't Hoff, M. L. R., et al. 2018, A&A, 613, A29, reproduced with permission ©ESO)。

ては X 線光度が増大し H_2O ガス組成が減少すると、その組成が増加しています。その結果、上記で述べたような H_2O スノーラインの外側でリング状の

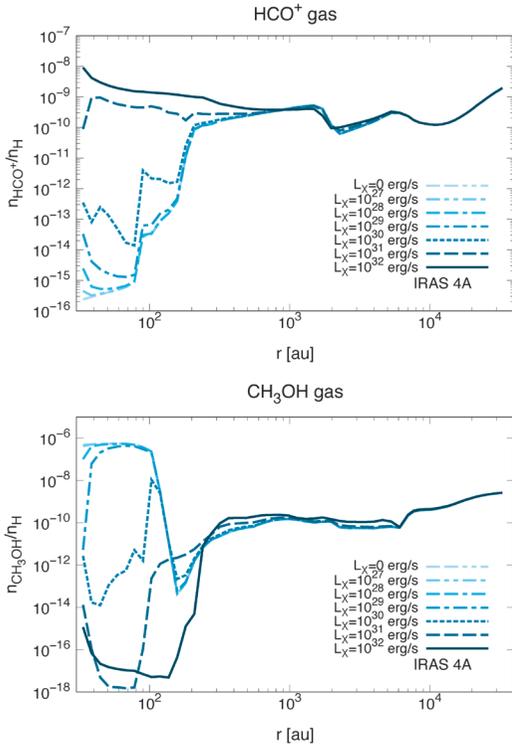


図7 IRAS 4A モデルにおける, HCO^+ ガス(上図), CH_3OH ガス(下図)組成の半径分布.

放射を示す分布ではなく、エンベロープ全体にわたり各半径ごとの宇宙線+X線電離率で決まる組成分布を取ることになります。一方で CH_3OH についてはX線光度の増大とともに、X線光子による光解離反応などにより破壊され組成が $\sim 10^{-6}$ から $< 10^{-14}$ へと著しく減少しています。そのためX線光度が比較的高い($L_X > 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$)場合、これらの分子については H_2O スノーライントレースーとして使用するのが難しくなります。一方これらの分子の高解像度観測を通じ、エンベロープ内縁のX線電離率 $\xi_X(r)$ や中心星X線光度 L_X に制限を加えることが可能であると考えられます。

ここで図6で紹介したIRAS 2Aについては、 H_2O ガス分子組成が他の多くの天体と異なり $\sim 10^{-4}$ と H_2O 氷組成と同程度の高い値となっており [19, 20], H^{13}CO^+ も H_2O 輝線放射の外側にリング状の分布を示しています [18]. そのため

筆者らの計算結果 [8] を踏まえますと、X線光度が比較的小さく($L_X < 10^{29} \text{ erg s}^{-1}$), H_2O 分子の破壊が進んでいない天体と考えられます。その一方、最近新たに報告されたアルマ望遠鏡を用いた高解像度観測の結果 [42] によると、リング状ではなく中心集中した H^{13}CO^+ 輝線放射分布を示す原始星天体(HH 211)の存在も報告されており、X線放射が化学組成に実際に影響を与えている可能性も示唆されています。

6. 計算結果のまとめと議論

筆者らはガス・ダスト化学反応ネットワークにX線関連の化学反応を加えた上で、低質量Class 0原始星周りのエンベロープの詳細な化学構造計算を行い、 H_2O や関連分子組成の中心星X線放射に対する依存性などを調べました [8]. その結果、原始星のX線放射が比較強い($L_X > 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$)場合、 H_2O スノーライン(昇華領域)の内側でX線由来のイオン・分子反応やX線由来の光解離反応により H_2O ガス分子組成が減少すること、及び H_2O スノーラインの外側でX線由来の光脱離反応により H_2O ガス分子の組成が増加すること、さらに H_2O ガス分子の破壊に伴いO及び O_2 ガス分子の組成が著しく増加し、X線放射の影響が小さいCOと合わせて酸素原子のほとんどを保持することがわかりました。また、原始星エンベロープにおいて H_2O スノーラインの観測的指標として用いられてきた HCO^+ や CH_3OH ガス分子の組成分布についても、X線放射に対する強い依存性を示すことなどもわかりました。

今後はアルマ望遠鏡やngVLA(次世代大型電波干渉計)を用いて、より多くの原始星天体に対し HCO^+ , CH_3OH ガス輝線などの高解像度観測を行うことで、X線放射が原始星天体(の内縁部)の化学組成進化に与える影響を調べていくことが重要です。なお、ngVLAではアルマ望遠鏡より空間分解能が向上することに加え、ダストの光学的厚み(不透明度)が小さい数ミリからセンチ

メートルにかけての波長帯をカバーすることで、原始星エンベロープ内縁の高密度領域の分子ガス分布がより詳細に観測可能になると期待されています。また本稿ではスペースの都合上記述を省きましたが、昇華温度が近いことからngVLAでのH₂Oスノーライントレーサーとしての有用性が指摘されているNH₃分子についても、強いX線放射の元でガス組成が減少するという傾向が見えているため、ngVLAを用いた観測的検証が重要と考えています [47]。

今回の筆者らの計算では、中心原始星に近い領域 ($r \sim 100$ au スケール) でX線が及ぼす化学反応過程に着目し、宇宙線電離率は典型的な銀河宇宙線の電離率の値 ($\xi_{\text{CR}} \sim 10^{-17} \text{ s}^{-1}$) としました。ここで、最近のHerschel宇宙望遠鏡による原始星エンベロープの観測から、一部の原始星天体で銀河宇宙線電離率より桁程度高い宇宙線電離率 ($\sim 10^{-14} \text{ s}^{-1}$) も示唆されています [48]。これらは $r \sim 1000$ au スケールでの電離率上昇ということで、原始星ジェットに沿った衝撃波による宇宙線粒子加速などが要因として議論されています。原始星天体の電離率が化学進化のみならず物理構造進化 (質量降着やダスト進化など) にも影響を与える点を踏まえると、今後中心原始星のX線放射と宇宙線双方の効果を考慮した電離過程も重要な観点となるかもしれません。

さて、ここまで質量降着及び円盤形成期であるClass 0原始星天体のエンベロープにおける化学進化について議論してきましたが、Class II天体の原始惑星系円盤の化学組成についても円盤の電離率や初期分子組成に依存することが知られています [49, 50]^{*8}。そのため、原始星天体の化学組成とその進化をX線放射による影響も含めて詳細に調べることは、その後の円盤の化学構造、さらには惑星形成段階の化学的初期条件の決定にも関わってくると考えられます。今後も理論モデル計

算とアルマ望遠鏡、ngVLAなどによる観測を組み合わせたうえで、中心星X線放射の影響を含めた原始星天体の化学的多様性の要因に迫る研究を進めることが極めて重要です。

7. おわりに

本稿では原始星天体の化学的多様性について概観した上で、筆者らが取り組んできた“H₂Oスノーライン”と関連する様々な分子の組成、そしてそれらに対する“中心星X線放射”の影響に着目したモデル計算研究 [8] の内容を、関連する観測的研究の概要や将来に向けた展望とともに紹介してきました。一つの切り口から見た記事ではありますが、星・惑星形成過程におけるアストロケミストリー研究の重要性が少しでも伝わる記事になっていれば幸いです。

筆者自身は学部4年生の頃から、野村英子氏 (現国立天文台教授) の御指導のもと、主にClass II天体の原始惑星系円盤の化学進化とH₂Oスノーラインを専門とし、研究を行ってきました^{*1}。その後博士号取得後に、日本学術振興会海外特別研究員としてオランダ・ライデン大学に赴任する機会を得たのですが (オランダ赴任の経緯や現地での研究生活の様子については、筆者が以前執筆した記事 [51] もご覧頂ければ幸いです)、そこで所属グループの教授のEwine F. van Dishoeck氏から、原始星天体の低いH₂Oガス組成の謎について教えて頂いたことが今回のモデル計算研究に繋がり、結果として若い原始星天体へと自分自身の研究対象の幅を広げることとなりました。また、現在所属する理化学研究所坂井星・惑星形成研究室での議論や共同研究を通じ、原始星天体の化学進化に対する理解が深まったことが、今回の記事執筆でも大きく役立ちました。この場を借りて、様々な機会を与えて下さった皆様に感謝致します。

^{*8} Class II天体の原始惑星系円盤の化学構造については、本アストロケミストリー特集の古家健次氏、相川祐理氏らの記事も是非ご覧ください。

謝 辞

本稿は、筆者らの発表した論文 [8] に基づくものです。研究着想段階から論文執筆まで支えて頂いた共著者の Ewine F. van Dishoeck 氏, Catherine Walsh 氏, Arthur D. Bosman 氏, 野村英子氏に感謝致します。また坂井南美氏及びそのほかの共同研究者の皆さまには、日頃から原始星天体の化学進化について様々な議論をさせて頂き、改めて感謝致します。筆者らの化学反応ネットワーク計算については、国立天文台 CfCA の計算サーバを使用しました。筆者は、日本学術振興会海外特別研究員制度、および理化学研究所基礎科学特別研究員制度の支援を受けています。本研究は科学研究費基金(20K22376)より支援を受けています。最後に、この記事の執筆をお声かけ頂いた編集委員の福井暁彦氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 坂井南美, 2013, 天文月報, 106, 780
- [2] Sakai, N., & Yamamoto, S. 2013, Chem. Rev., 113, 8981
- [3] 坂井南美, 大屋瑤子, 2017, 天文月報, 110, 325
- [4] Jørgensen, J. K., et al., 2020, ARA&A, 58, 727
- [5] Aikawa, Y., et al., 2020, ApJ, 897, 110
- [6] Higuchi, A. E., et al., 2018, ApJS, 236, 52
- [7] Yang, Y.-L., et al., 2021, ApJ, 910, 20
- [8] Notsu, S., et al., 2021, A&A, 650, A180
- [9] Hayashi, C., et al., 1985, Protostars and Planets II (The University of Arizona Press, Chicago), 1100
- [10] 奥住聡, 2019, 日本惑星科学会誌遊星人, 28, 285
- [11] 野津翔太, 2018, 日本惑星科学会誌遊星人, 27, 120
- [12] 本田充彦, 野村英子, 野津翔太, 2020, 天文月報, 113, 774
- [13] Notsu, S., et al., 2016, ApJ, 827, 113
- [14] Notsu, S., et al., 2017, ApJ, 836, 118
- [15] Notsu, S., et al., 2018, ApJ, 855, 62
- [16] Notsu, S., et al., 2019, ApJ, 875, 96
- [17] Oka, A., et al., 2011, ApJ, 738, 141
- [18] van't Hoff, M. L. R., et al., 2018, A&A, 613, A29
- [19] Persson, M. V., et al., 2012, A&A, 541, A39
- [20] Persson, M. V., et al., 2016, A&A, 590, A33
- [21] Jensen, S. S., et al., 2019, A&A, 631, A25
- [22] van Dishoeck, et al., 2021, A&A, 648, A24
- [23] Harsono, et al., 2020, A&A, 636, A26
- [24] Visser, R., et al., 2012, A&A, 537, A55
- [25] Stäuber, P., et al., 2005, A&A, 440, 949
- [26] Stäuber, P., et al., 2006, A&A, 453, 555
- [27] Walsh, C., et al., 2015, A&A, 582, A88
- [28] Kristensen, L. E., et al., 2012, A&A, 542, A8
- [29] Grosso, N., et al., 2020, A&A, 638, L4
- [30] Takasao, S., et al., 2019, ApJ, 878, L10
- [31] 古家健次, 2018, 天文月報, 111, 41
- [32] 古家健次, 2021, 日本惑星科学会誌遊星人, 30, 4
- [33] <https://www.next-astrochem.com>
- [34] Bosman, A. D., et al., 2018, A&A, 618, A182
- [35] McElroy, D., et al., 2013, A&A, 550, A36, <http://udfa.ajmarkwick.net>
- [36] Garrod, R. T., et al., 2008, ApJ, 682, 283
- [37] Cuppen, H. M., et al., 2017, Space Sci. Rev., 212, 1
- [38] Dupuy, R., et al., 2018, Nature Astronomy, 2, 796
- [39] Yildız, U. A., Acharyya, K., Goldsmith, P. F., et al. 2013, A&A, 558, A58
- [40] Taquet, V., et al., 2018, A&A, 618, A11
- [41] Leemker, M., et al., 2021, A&A, 646, A3
- [42] van't Hoff, M. L. R., et al., 2022, ApJ, 924, 5
- [43] van't Hoff, M. L. R., et al., 2018, ApJ, 864, L23
- [44] Lee, J.-E., et al., 2019, Nat. Astron., 3, 314
- [45] Hsieh, T.-H., et al., 2019, ApJ, 884, 149
- [46] Lee, S., et al., 2020, ApJ, 889, 20
- [47] Notsu, S., et al., 2021, ngVLA-J memo series, <https://ngvla.nao.ac.jp/researcher/memo/>
- [48] Favre, C., et al., 2017, A&A, 608, A82
- [49] Eistrup, C., et al., 2016, A&A, 595, A83
- [50] Notsu, S., et al., 2020, MNRAS, 499, 2229
- [51] 野津翔太, 2021, 日本惑星科学会誌遊星人, 30, 25

Chemical Evolution in Low-mass Protostellar Envelopes and Disks: H₂O Snowline and X-ray Radiation from Central Protostars

Shota NOTSU

Star and Planet Formation Laboratory, RIKEN Cluster for Pioneering Research, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: Understanding the chemical evolution at protostar phases is important to know the origin of the material in our solar system. In addition, various theoretical and observational studies have conducted to understand what (external) environmental factors cause the chemical diversity of protostar objects. In this article, we focus on “H₂O snowline” and “X-ray radiation from the central protostars”, and introduce the outline of our theoretical modeling studies, the related observational researches, and future prospects.