

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2016

課題番号：23540266

研究課題名(和文) 星・惑星系形成過程における揮発性物質の組成、同位体比、気相・固相分配

研究課題名(英文) Volatile molecules in the formation of stars and planetary systems: abundances, isotopes and gas/ice ratios

研究代表者

相川 祐理 (Aikawa, Yuri)

筑波大学・計算科学研究センター・教授

研究者番号：40324909

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：当初の目標は、星・惑星系形成時における星間物質の進化について(1)同位体比異常の獲得と喪失(2)円盤形成時の衝撃波化学(3)円盤氷線近傍の化学を明らかにすることであった。(1)については分子の重水素比について分子雲形成時から原始惑星系円盤まで包括的にモデルを構築できた。(2)については氷が昇華するための密度と衝撃波速度の条件を明らかにした。(3)については一酸化炭素の氷線に付随するN₂H⁺などの存在度変化を数値解および解析解で明らかにした。水の氷線近傍においてガス・ダストの速度差によって生じる元素組成の変化については指導学生の修士論文で調べたが、今後さらに研究を進め論文にまとめる必要がある。

研究成果の概要(英文)：We studied the evolution of interstellar matter in the star- and planetary system-formation, focusing on (1) enhancement and reset of isotope ratios, (2) shock chemistry at the disk formation, and (3) chemistry around the snow lines in protoplanetary disks. On the first topic, we succeeded in constructing a comprehensive model on the evolution of molecular D/H ratio (especially water) from molecular cloud formation to protoplanetary disks. Secondary, we evaluated the critical velocity of colliding flows for the ice desorption as a function of gas density. On the third topic, we performed numerical calculations of molecular evolution in disks, and obtained analytical formulas of abundances of major ion molecules, including N₂H⁺, which is considered to be a tracer of CO snow line. We also investigated the variation of elemental abundances (e.g. C/O ratio) caused by the gas-dust decoupling around the snow line; it is summarized as a student's Master thesis work, but needs further studies.

研究分野：理論天文学

キーワード：星間化学 星形成 原始惑星系円盤

1. 研究開始当初の背景

(1) ALMA 運用開始

惑星系は、半径 100AU 程度の原始惑星系円盤の中で、固体物質の集積によって生まれる。2011 年に初期運用を開始する大型電波干渉計 ALMA は惑星系形成の研究に飛躍的な進展をもたらす。近傍の星形成領域において、既存の電波干渉計の空間分解能が 50AU 程度以上であるのに対し、ALMA は本運用時には数 AU の分解能を持ち円盤内を詳細に観測できるのである。半径 50AU というサイズは、太陽系との類似だけで重要というわけではない。この半径以内では、質量降着、衝撃波、原始星からの加熱により、顕著な物質科学的变化が予想されるのである。ALMA はサブミリ波も含む幅広い波長をカバーし、円盤の低温部分から高温部分まで連続的に調べることができる。

(2) 惑星系形成における揮発性物質

水素、炭素、窒素、酸素などから構成されるガス、氷、有機物等の揮発性物質の円盤内での組成や同位体比を理解することは以下のような、天文学的、惑星科学的な視点から重要である。

(i) 円盤構造・進化の観測指標：円盤ガスの観測には一酸化炭素などの分子輝線が用いられるが、その存在度（主要構成物質である水素に対する存在比）は円盤内で様ではない。円盤の構造を観測的に探るには、ガス組成の空間分布を理解することが不可欠である。また円盤は部分電離しており、電離度と磁場の空間分布が円盤の進化に大きな影響を与える。円盤の電離度は、宇宙線や X 線照射によって駆動されるガスと固体微粒子の化学反応で決まり、イオン分子が観測的指標となる。

(ii) 太陽系物質進化の履歴：太陽系物質の研究では揮発性元素の同位体比が重要な指標となっている。例えば、地球の水は $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ 比は 10^{-4} であり、太陽系近傍の元素同位体比 ($\text{D}/\text{H}=10^{-5}$) よりも有意に高い。このような同位体比異常は一般に低温下での化学反応で起こるので、高い重水素比は惑星系形成のどこかの段階で 30K 程度の低温で生成された水の寄与によると考えられている。

(iii) 惑星大気の起源：地球型惑星は微惑星と呼ばれる岩や氷の集積で形成されたと考えられる。円盤内の揮発性元素がどの程度氷や有機物などの固体に取り込まれたかが、やがて生まれる惑星大気の材料を決めることになる。

2. 研究の目的

惑星形成は円盤形成から固体成分の集積、ガスの散逸までの多様な過程を含むため、そこでの揮発性物質進化についても未だ多くの課題が残されている。本研究では、特に ALMA での高空間分解能で検証可能となる、以下の 3 つの課題を中心に研究を行う。

同位体比異常の獲得と喪失
円盤形成および惑星大気形成における衝撃波化学
スノーライン近傍の分子組成

3. 研究の方法

理論計算を主な研究手段とするが、理論の結果をもとに ALMA 等の観測での検証も行う。

4. 研究成果

同位体比異常の獲得と喪失
重水素濃縮には水素分子のオルソ(o) / パラ(p)比が大きな影響を及ぼすことが近年明らかになってきた。重水素濃縮はいくつかの発熱交換反応によって起こるが、 o-H_2 が多いと逆反応が起きやすくなり濃縮が妨げられるのである。また、重水素の主要なキャリアである水分子は可視減光度 3 mag 程度の比較的柱密度の低い分子雲でも検出されている。これは水分子が分子雲の比較的早い段階ですでに形成されていることを示唆する。そこで本研究では、当初の研究計画を少し拡張し、分子雲形成時から原始惑星系円盤までの分子の重水素比の変化を包括的に調べた。

分子雲形成過程を一次元衝撃波モデルで近似し、そこでの組成進化を数値計算で調べた。水素分子の o/p 比は時間とともに減少し、可視減光が 3 mag に至る頃には 10^{-3} 以下まで低下した。また水の重水素比は、光解離の影響で 10^{-4} - 10^{-3} 程度になった。この結果は、水の重水素比が他の分子に比べて低いことと整合的である。

その後紫外線から十分遮蔽され低温状態が続くと時間とともに重水素濃縮が進行する。分子雲コアと呼ばれる高密度段階に至る

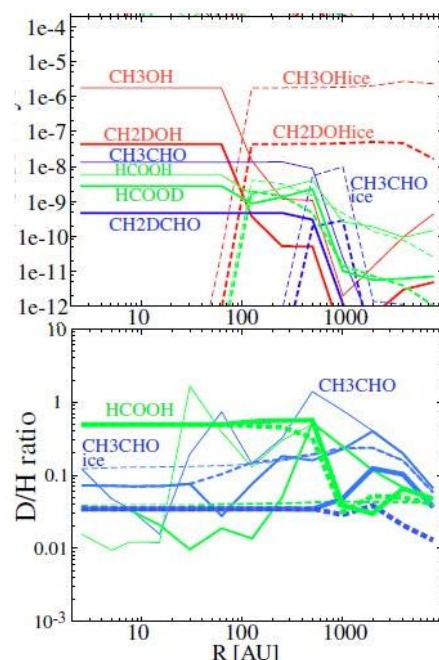


図1: 原始星コアにおける大型有機分子の存在度と重水素比

と、一酸化炭素分子の星間塵への凍結によって濃縮はさらに顕著になる。我々は、分子雲コアから原始星コアに至るまでの分子進化を球対称モデルでシミュレートすることにより、分子雲コアで生成された分子の高い重水素比が、その後原始星周囲で大型有機分子などが生成される際に娘分子に引き継がれることを示した。また、原始星コアの進化が進み温かい領域が広がるにつれて、大型有機分子や炭素鎖分子が増加すること、炭素鎖分子の生成はコア密度がある程度低下した後の方が顕著になることもわかった。例として、原始星誕生後 9×10^4 年後の原始星コアでの大型有機分子の存在度と重水素比の分布を図1に示す。

さらに我々は、Tomida et al. (2010) や Tsukamoto et al. (2015) の3次元輻射流体モデルを用い、球対称ではわからない円盤形成過程での組成進化も調べた。その結果、Class I 天体で検出されている Hot Corino 分子が first core の段階でも存在すること、水やメタノールなど分子雲段階で豊富に作られる安定分子はそのまま円盤に取り込まれるが、大型有機分子は形成中の円盤内で生成される成分も多いこと、硫黄系の分子は特に円盤に取り込まれてからの変化が大きいことを示した。例として図2に形成中の円盤内での硫黄系分子の分布を示す。

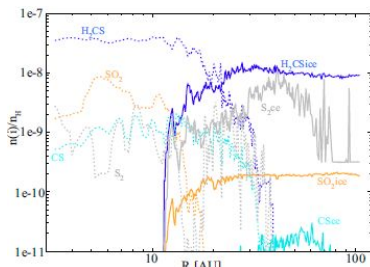


図2：形成中の円盤内での分子組成分布

エンベロープからの質量降着が終わり、Class II と呼ばれる段階に至った円盤内では、X線や宇宙線によって部分電離されており、分子雲と同様イオン-分子反応などによる組成進化が進む。また円盤内は磁気回転不安定性による乱流状態にあると考えられている。そこで、円盤内の物質、特に水の重水素比が乱流拡散のある円盤内でどのように変化するかを数値計算によって調べた。その結果、水は円盤表面での光解離で壊され、半径20AU程度の領域では 10^{-4} 程度の重水素比をもつ水が再形成される可能性があること、中心面の温度が水の再生成に適さない温かい領域では、水のスノーラインの外側でも水氷が著しく減少する可能性があることを示した。また、一酸化炭素や窒素分子などがより揮発性の低い分子に変化する時間スケールや乱流拡散による大型有機分子の生成領域や分布の変化も明らかにした。

また、これらの理論研究をもとに観測結果の解釈に貢献することで観測的研究者と共同研究を行った。

円盤形成および惑星大気形成における衝撃波化学

円盤形成期と考えられる Class 0-I 天体の観測で SO 輝線がリング状に分布していることが示された。これが円盤への質量降着による衝撃波での分子の昇華で説明できるかどうかを調べるべく、様々な分子が昇華するために必要な衝撃波前のガス速度と密度の条件を数値計算で明らかにした(図3)。

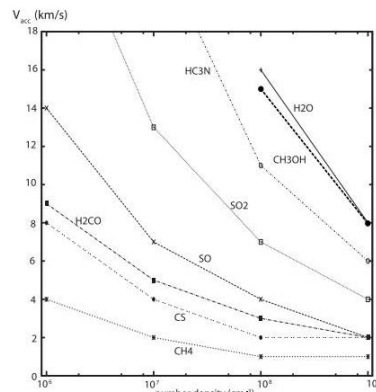


図3：衝撃波による昇華条件

また、野辺山電波観測所で行われている星形成領域の輝線サーベイで検出された PN 分子について、その生成過程を衝撃波化学モデルを用いて調べた。PN 以外の P 分子が検出されなかったことから、衝撃波によって脱離した P 原子または PH_3 と N 原子の反応によって PN が生成されたことが分かった。

スノーライン近傍の分子組成

当初は水のスノーライン近傍での化学を目標にしていたが、これは中心星から数 au 以内に存在し、現状では観測が難しい。代わりに、より昇華温度が低く炭素の主要なキャリアである一酸化炭素(CO)のスノーラインに観測的研究の注目が集まっている。実際 N_2H^+ 輝線のリング状の分布が観測で見つかり、 N_2H^+ の主要な反応相手が CO であることから、リング内縁が CO スノーラインなのではないかと議論されている。しかし N_2H^+ の親分子である窒素分子(N_2)と CO の揮発性は同程度で、CO スノーラインの外側では N_2 も凍っていると考えられる。そこで、 N_2H^+ などのイオン分子の存在度変化を数値解および解析解で明らかにした。その結果、たとえ CO と N_2 の昇華温度が全く同じであっても、CO 存在度と電離度で決まる条件を満たす場所で N_2H^+ の存在度がピークを持つことが分かった。

水の氷線近傍においてガス・ダストの速度差で生じる酸素/炭素比元素比の変動が組成にどのような変化を及ぼすのかについては、指導学生の修士論文で調べた。しかし、明確な観測指標を導出するには至らなかったため、今後さらに研究を進める必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 34 件)

Yoneda, H., Tsukamoto, Y., Furuya, K., Aikawa, Y. 2016 “Chemistry in a Forming Protoplanetary Disk: Main Accretion Phase”, *The Astrophysical Journal*, **833**, id.105, 17 pp (査 読 付) DOI: 10.3847/1538-4357/833/1/105

Furuya, K., Aikawa, Y., Hincelin, U., Hassel, G.E., Bergin, E.A., Vasyunin, A. & Herbst, E. 2015 “Water deuteration and ortho-to-para nuclear spin ratio of H₂ in molecular clouds formed via the accumulation of HI gas”, *Astronomy & Astrophysics*, **584**, id.A124, 18pp (査 読 付) DOI: 10.1051/0004-6361/201527050

Aota, T., Inoue, T. and Aikawa, Y. 2015 “Evaporation of Grain-surface Species by Shock Waves in a Protoplanetary Disk”, *The Astrophysical Journal*, **799**, id 141, 9pp (査 読 付) DOI: 10.1088/0004-637X/799/2/141

Furuya, K. and Aikawa, Y. 2014 “Reprocessing of Ices in Turbulent Protoplanetary Disks: Carbon and Nitrogen Chemistry”, *The Astrophysical Journal*, **790**, id.97, 15pp (査 読 付) DOI: 10.1088/0004-637X/790/2/97

Furuya, K., Aikawa, Y., Nomura, H., Hersant, F., Wakelam, V. 2013 “Water in Protoplanetary Disks: Deuteration and turbulent mixing”, *The Astrophysical Journal*, **779**, id. 11, 19pp (査 読 付) DOI: 10.1088/0004-637X/779/1/11

Aikawa, Y. 2013 “Interplay of Chemistry and Dynamics in the Low-Mass Star Formation”, *Chemical Reviews*, **113**, 8961-8980 (査 読 付) DOI: 10.1021/cr4003193

Aota, T., Aikawa, Y. 2012 “Phosphorus Chemistry in the Shocked Region L1157 B1”, *The Astrophysical Journal*, **761**, id. 74, 10pp (査 読 付) DOI: 10.1088/0004-637X/761/1/74

Aikawa, Y., Wakelam, V., Hersant, F., Garrod, R. T., Herbst, E. 2012 “From Prestellar to Protostellar Cores. II. Time Dependence and Deuterium Fractionation”, *The Astrophysical Journal*, **760**, id.40, 19pp (査 読 付) DOI: 10.1088/0004-637X/760/1/40

その他 査読付き論文 20 件
査読なし論文 6 件

〔学会発表〕(計 41 件)

1. Aikawa Yuri, “Chemical modelling of protoplanetary disks”, European Conference on Laboratory Astrophysics ECLA2016 “Gas on the Rocks”, Nov. 21, 2016, Madrid (Spain)(invited)
2. Aikawa Yuri, “Astrochemical models of water”, Forcus Meeting 15: Search for water and life’s building blocks in the universe, IAU General Assembly XXIX, Aug. 3, 2015, Honolulu (USA)(invited)
3. Aikawa Yuri “Water in protoplanetary disks: D/H ratio”, Transformational Science with ALMA: From Dust to Rocks to Planets Formation and Evolution of Planetary Systems, Apr. 8-12, 2013, Kona (USA)(invited)
4. Aikawa Yuri “Chemical models of star forming cores”, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era, Dec. 5, 2012, 箱根 (invited)
5. Aikawa Yuri “Hydrodynamical-chemical models from prestellar cores to protostellar cores”, IAU Symposium 280 “The Molecular Universe”, May 30, 2011, Toledo (Spain) (invited)

その他 36 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

相川 祐理 (AIKAWA, Yuri)

筑波大学・計算科学研究センター・教授

研究者番号：40324909

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()