



Title	初期原始惑星系円盤化学構造進化
Author(s)	永原, 裕子
Citation	低温科学, 78, 115-125
Issue Date	2020-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.78.115
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77773
Type	departmental bulletin paper
File Information	14_p115-125.LT78.pdf



初期原始惑星系円盤化学構造進化

永原 裕子¹⁾*

2019 年 10 月 31 日受付, 2019 年 11 月 28 日受理

原始惑星系円盤の進化は惑星形成の場であり, その進化解明は天文学, 惑星科学における重要課題の一つである. しかし, 望遠鏡による観測, 円盤進化の物理モデル, 隕石や彗星塵からえられる実証的なデータの間には多くの不整合があり, それらを統合的に理解することが求められている. 本研究では原始惑星系円盤進化の物理と化学をつなぐ試みの一つとして, 固体微粒子の運動を追跡し, 粒子の化学進化を調べた. その結果, 円盤は初期は化学的に不均質であるが, 10^5 年程度の間には物質の移動・混合が進行し, 以後はほとんど均質になることがわかった. 本研究の結果は, 惑星が異なる化学組成を持つためには 10^5 年程度の間には急速に集積・合体しなくてはならないことを示しており, 観測による若い円盤の多様な構造形成とも調和的である.

Evolution of chemical structure of a protoplanetary disk

Hiroko Nagahara¹

The evolution of protoplanetary disks is one of the most intensely debated issues in astronomy and planetary science, since the disk is the formation site of planets. There are numerous inconsistencies and missing links among physical models of disks, astronomical observations, and evidence from meteorite studies. In the present work, a new model was developed combining physics and chemistry in a protoplanetary disk to solve these inconsistencies. We investigated the chemical evolution of protoplanetary disks with a special interest on the transportation of dust particles in a spatially and temporally changing disk. We found that planets with different chemical compositions should have been formed in the early stage of disk evolution ($\sim 10^5$ years); otherwise, the solid materials in the disk, and thus the resultant planetary system, would become chemically homogeneous. The early formation of planetesimals (and planets) is consistent with recent observation of protoplanetary disks with structures that are thought to have been formed by the interaction between the disk and large planets.

キーワード: 原始惑星系円盤, 固体物質, 移流-拡散, 化学組成

Protoplanetary disk, dust, advection-diffusion, chemical composition

1. はじめに

恒星は分子雲において高密度のガス塊 (分子雲コア)

が重力収縮することにより誕生する. その際, 原始星 (形成中の星) の周囲には角運動量をもつガスと塵 (ダスト) が円盤状の構造を形成し, 惑星はその円盤中で塵が効率的に集積して形成される. 観測により, 通常, 原始惑星系円盤と呼ばれるのは, 中心星の年齢が数 100 万年程度で, 分子雲からのガスの降着が終了した円盤である. この進化段階は天文学においてはクラス II と呼ばれる. ガスが収縮をはじめてから 100 万年以下で, 分子雲からのガスの降着が続いている段階は, ガスの量によりクラス 0 あるいはクラス I と呼ばれ, 原始星周囲では円盤形成が続いている. 円盤は 1000 万年程度の時間で消滅す

*連絡先

永原 裕子

東京工業大学地球生命研究所

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1-IE-19

e-mail: nagahara@elsi.jp

1) 東京工業大学地球生命研究所

Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan

る。初期の200-300万年から1000万年の間に、原始惑星系円盤のサイズ（空間的広がり、あるいは半径）は大きくなることが観測により明らかにされている。Najita and Bergin (2018) は星形成の活発な牡牛座領域のクラス0およびクラスIの円盤観測結果をまとめ、文献によるクラスIIの30以上の円盤と比較した。クラス0の円盤の半径は数10 AUから200 AU（1 AUは太陽から地球までの距離）であったものが、クラスII天体の円盤は大きいもので半径数100 AUまで拡大しているおり、その広がり方は初期に半径10 AUから50 AUの円盤が粘性により拡散したと考えた場合の広がり方とほぼ調和的で、古くより理論的に示されてきた粘性拡散モデル（Hartmann et al., 1988）を支持しているように見える。すなわち、原始惑星系円盤の中では初期の数100万年の間に、大部分の物質（水素とヘリウムからなるガスと1%程度の塵）は中心に移動し原始星を成長させたが、ごく少量の物質は角運動量を担って外側に移動し、円盤は薄く広がっていったということである。分子雲コアは重力収縮が始まった当初は10 Kという極低温であるが、重力エネルギーの解放によりコア中心の温度は上昇してゆく。円盤内においても中心星に近いほど重力エネルギーの解放による加熱が効き、中心から外側に受かって温度が顕著に低下するという温度勾配ができる。すなわち、粘性により内側から外側に移動する物質は、内側の高温領域で獲得した物質の化学的特徴を持ったまま低温領域に移動する。したがって、原始惑星系円盤では時間・空間とともに化学的特徴の異なる物質が混在すると予想される。

近年のALMAによる高分解能の観測により、きわめて多くのクラスIIの原始惑星系円盤に渦巻き状構造や同心円状構造が発見された（たとえば、Nomura et al., 2016; Andrews et al., 2016; Fedele et al., 2018）。このような構造の成因はいろいろなアイデアが出されているが、質量が天王星程度より大きな惑星と円盤との重力的な相互作用という説が有力である。すなわちクラスIIに至る以前（100万年より早期）に大きな惑星が形成されること、惑星形成が円盤内の複数箇所ですべて同時進行的に起こることなどが示唆されているのである。この結果を受け、現在はクラス0あるいはクラスIの若い円盤の観測が精力的に進められている。

他方、われわれの太陽系に関しては、原始惑星系円盤中で形成されたと考えられる様々な物質や小天体の作られた年代について、隕石が貴重な情報を提供してくれる。それらの情報は、実際に起こったことは、単純なモデルや天文観測からだけでは理解しきれないより複雑な現象

であったことを示している。隕石として手に入る物質のうち最古のものは、45.672億年前に形成されたCAIといわれる難揮発性成分のみからなる物質で（Amelin et al., 2010）、それから200万年程度の後には、小天体（半径100 km程度以下）中で融解して金属が岩石成分から分離したり、コアを形成したりした天体も作られていた（Amelin, 2008）。内部が融解した小天体、およびコンドライトとよばれる集積したものの融解にいたらず冷却固化した小天体の形成は1000万年後くらいまで継続していたと考えられる（たとえば、Bouvier et al., 2011; Hellmann et al., 2019）。それらの小天体は、化学的にはそれぞれ異なっており、原始太陽系円盤は時間・空間により様々な成分から成る天体を作り得たことがわかる。このように隕石からは天体の構成要素や天体が形成された年代やマグマ活動のおきた年代に関する情報は得られる。しかし残念ながら、それらが原始太陽系円盤のどの位置でのできごとなのかの情報は得られない。

さらに重要なことは、円盤内のミクロン以下のサイズのダストが合体成長によってセンチメートル程度以上になってから半径100 km以下の天体が形成されるまでの過程は、今後いかに観測技術が高度化されようが、われわれは直接見ることができないということである。観測でとらえられるのは、センチメートル以下の細かいダストからの熱放射と、半径が数1000 km程度以上となり重力的に円盤ガスに影響を及ぼすようになった天体である。ましてや、個々の天体の化学的特徴を詳しく観測することは難しい。他方、円盤観測とは別に、形成期より後の系外惑星の観測も精力的に進められており、質量と半径の関係からどのような（固体、氷、ガスのいずれが主か）惑星であるかを知る試みも多くなされているが、それらの数字は大きな誤差を伴う上、形成過程を知るとは難しい。さらには、直接観測により高層大気組成を知ることにも進められているが、天体全体の化学組成には直結しない。従って、原始惑星系円盤における物理過程と化学過程が複雑に相互作用しながら進む小天体形成は、理論的な研究によりその全体像を理解しなくてはならない。

本論では、原始惑星系円盤の初期の物質の移動、円盤の温度構造の変化、温度による物質の安定性の関係から、円盤内がどのような化学的進化をとげたかをモデルを用いて検討する。モデルにより、隕石に記録される太陽系形成時の化学的情報と天文観測で得られる空間情報を結びつけることができる。原始惑星系円盤形成時（すなわちクラス0あるいはクラスI）の円盤サイズや質量、さらにその時間変化などは、現在観測や理論的研究が進め

られている段階であり、詳細は今後の観測を待たなくてはいいけない。われわれが入手することの可能な唯一の情報である隕石から得られる化学的および年代についての情報と比較することにより、原始惑星系円盤の初期条件、物質移動がどのように進んだかなどを明らかにすることが本研究の目的である。隕石情報の最大の欠点は、それが形成した場所がわからないということであり、モデルの検証にあたってはそのことに注意を払う必要がある。

2. 原始惑星系円盤の温度と物質

原始惑星系円盤の物質の状態（固体、液体、気体）や化学変化を支配する要素は温度と密度（気体が主である系においては圧力と見なすことができる）であるが、低圧の環境下では液体は準安定な条件下でしか存在せず、固体と気体の間における相変化、すなわち昇華と凝縮というプロセスが主である。低圧下では固体/気体の相境界は圧力に対する依存性は小さく、物質の状態や化学変化は主として温度により支配されていると見なすことができる。すなわち、原始惑星系円盤の温度構造が円盤進化とともにどのように変化したかがもっとも重要な要素である。他方、原始惑星系円盤の温度には、ダストの熱放射が影響する。温度構造を正確に決定しようとするダスト種、サイズ、空間密度等を決定しなくてはならず、しかしそれは温度に依存するということになる。さらに、円盤の厚さ方向（半径と垂直な方向）の構造を考えた場合、上層の希薄な領域ではダストとガスは熱平衡にないため、温度と物質の関係はことさらに複雑である。円盤進化における温度構造について観測と理論を結びつける試みは古くよりあるが（たとえば Boss, 1998; Cassen, 2001）、ある特定の条件下での研究であるなど、全体的理解には不十分である。

3. モデル

本研究では、初期の原始惑星系円盤の化学進化を、古典的な1次元粘性加熱円盤モデルに基づく移流-拡散方程式により検討する。1次元粘性加熱円盤モデルでは、円盤構造を半径方向の1次元で考え、物理条件は中心星からの距離のみに依存すると考える。また、円盤の差動回転により重力エネルギーが熱エネルギーに変換されることにより円盤は加熱される。このモデルは、最初はブラックホールや中性子星周囲の降着円盤の進化について考えられたものである。粘性をもたらすものは乱流であるが、その乱流を担う物理については議論が続いており

十分には理解されていない。そこで一般に、粘性係数をパラメータとして扱う。乱流のために円盤中で角運動量輸送やガスとダストの拡散がおこり、円盤の内側から外側にダストが移動することを可能にする（Gail, 2001, 2004）。このことが原始惑星系円盤の化学にとっては多様性をもたらす重要なプロセスとなる。

本研究では、移流-拡散方程式を Ciesla (2011) の考え方にのっとり Lagrange 型で記述し、一つ一つの粒子の移動を経時的に追跡する。乱流による粒子の拡散はランダム・ウォークとして確率的に扱うことができる。なお、個々の粒子に着目せず、円盤全体の構造進化を考えたい場合は、方程式は Euler 型で記述され、Lagrange 型で円盤全体の進化を検討する場合は、多くの粒子を扱って Euler 型の計算との整合性をとる必要があり、その妥当性については Ciesla (2011) により検証されている。個々の粒子の移動を追跡することで、円盤の化学的進化を考えることが可能となる。星形成にともなう円盤の進化では、大部分の質量は星を形成するために中心方向（形成中の恒星）に移動し、一部の質量は角運動量を担って外側に移動する。しかし個々の粒子に着目すると、ランダム・ウォークによって、一方的に内側あるいは外側に移動するもの、内側に移動した後外側に移動したり、その逆であったり、行きつ戻りつを繰り返したりと、多様であることがわかる。円盤に温度構造があるため、移動にともない個々の粒子はさまざまな温度を経験することになる。温度変化に対応して粒子がどのように化学組成を変化させるかを厳密に記述しようとする、原始惑星系円盤中に存在するすべての物質の昇華様式、昇華速度、凝縮速度を円盤内で変化しうる温度範囲全般にわたって知らなくてはならない。しかし実験的にそれらが決定されている物質やパラメータ範囲はかぎられているため（Nagahara, 2018）、本研究では、粒子は基本的に最高温度で獲得した化学組成を維持すると仮定する。

粒子の運動にともなう移動と、温度変化にともなう化学変化を追い、ある瞬間ある場所に存在するすべての粒子の化学組成を足し合わせると、その場の固体成分の化学組成が決定されることになる。

以下では上述のモデルの詳細を述べる。

円盤進化の基本的な考え方は、面密度の変化は内側への正味の物質移動であるという単純な質量保存の関係である。円盤表面は原始太陽（表面温度 = 4000 K を仮定）に照らされ、円盤表面からの放射冷却と太陽照射、および粘性降着による加熱の釣り合いで赤道面温度が決定すると考える。粘性降着などについては Ciesla (2010a) によるパラメータを用いて、円盤面密度と温度の時間変化を

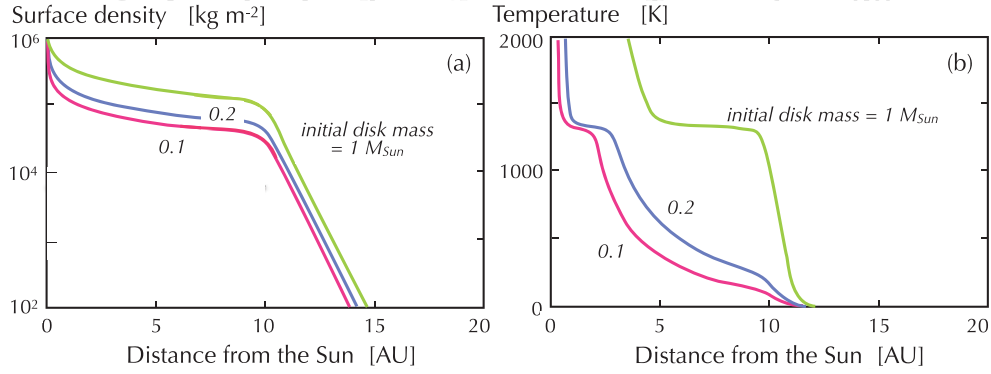


図1：原始惑星系円盤の初期状態。(a) 面密度, (b) 温度。
円盤は最初 10 AU の拡がりを持ち、0.1, 0.2, 1 太陽質量の場合についての結果を示してある。面密度の図において 10 AU より外側までカーブがかかっているのは、計算においてそれ以降で急激に面密度が低下する指数関数的関数を用いているためである。

太陽からの距離の関数として求める。次に、質量保存を考えることで、原始惑星系円盤進化を記述する基本的な 1 次元移流－拡散方程式を円筒座標を用いて以下のように表す (Gail, 2001; Cuzzi et al., 2003)。

$$\frac{\partial \Sigma_i}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Sigma D \frac{\partial \Sigma_i}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r \Sigma_i), \quad (1)$$

ここで Σ_i は成分 i の円盤内の面密度、 r は太陽からの動径方向の距離、 D は拡散係数、 v は動径方向の移動速度である。この式は円筒座標であるため、この式を $r^2 = x^2 + y^2$ (r は中心星からの距離、 x は動径方向、 y は動径方向に垂直な方向) の関係を用いて直交座標に直し、個々の粒子の次の瞬間の位置を、円盤全体の中心方向への移動とガス抵抗、面密度勾配の効果、拡散速度勾配の効果を含めたものとして表す。この式にもとづき個々の粒子の時間変化を追うことで、それぞれの粒子の経験する位置、温度や面密度といった物理条件を追跡できる。この方法は Ciesla (2010b, 2011) により Particle Tracking Model と名付けられている。

最後に、物質の化学的状態は、熱平衡にあるガスとダストの関係であると考え、化学平衡計算によりある温度における物質の化学組成を決定する。ただし、温度が低いにもかかわらず移動により化学平衡が成立するのであればダスト移動を追跡する必要はなく、最終的な面密度分布と温度分布さえわかればよいことになってしまう。しかし、隕石からは高温で形成された物質と低温で形成された物質が混在することがよく知られており、高温で形成された物質が低温に移動した場合に化学反応は効率的には進行せず、高温状態で獲得した化学組成が保持されている。このことは原始惑星系円盤の化学進化を考える上でもっとも重要な点で、円盤内の化学的不均質を作

り出すプロセスに他ならない。本研究では、ダストの初期組成を円盤半径により決定される温度における化学平衡計算により決定する。その後粒子の経路を追ひ、経験した最高温度における化学平衡の組成に変化するものとする。時間とともに円盤全体の温度は低下するため、多くのダスト粒子の化学的性質は初期の位置、あるいは円盤進化の早い段階で経験した最高温度により決定されることになる。

一次元円盤モデルでは、面密度、温度は太陽からの距離の関数であり、それらは初期の円盤サイズと円盤の質量に依存する。本研究では初期円盤半径が 10, 20, 50, 100 AU、円盤質量が太陽の 0.05–0.5 倍の場合について検討した。円盤形成後には周囲の分子雲からの質量降着はないものとし、円盤の粘性係数 α (粘性応力と圧力の関係を表すパラメタ) は 0.001、ダストサイズは 1 ミクロンとし、合体成長によるダストの成長や破壊による細粒化は考慮しない。ダスト種は、ケイ酸塩、金属、有機物、氷を考え、それぞれ独立の粒子とし、相変化のカイネティクスは考慮しない。低温におけるケイ酸塩成分は太陽系元素存在度をもつ未分化なものとし、高温では平衡計算による化学組成をもつものとする。

4. 結果

4.1. 初期状態

円盤の初期状態は、円盤のサイズ (空間的拡がり) と円盤質量に依存する。初期半径 10 AU の場合の面密度分布と温度分布を図 1 に示す。なお、初期の面密度分布は 10 AU を境に外側でゼロではなく、それ以降では指数関数的に減少する関数を仮定しており、10 AU で面密度カーブが急激に折れ曲がっているように見えるのはそ

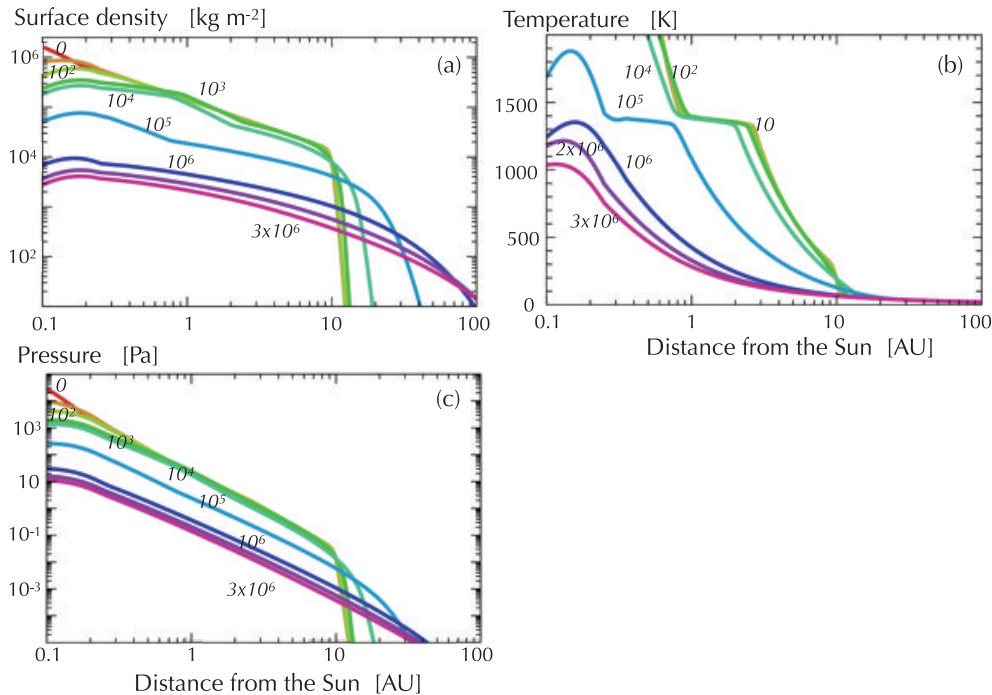


図2：原始惑星系円盤の物理的進化。(a) 面密度，(b) 温度，(c) 圧力。円盤初期サイズ 10 AU，円盤初期質量 0.2 太陽質量の場合。

カーブにつけられた数字はスタートからの時間（年）。時間とともに面密度，温度，圧力が低下するが，わずかな質量は 10 AU より外側に拡がり， 10^6 年後には 100 AU より外側まで薄く拡がっている。

のためである。円盤質量が大きくなるにつれ，面密度，温度とも高くなり，高温部分が外側まで拡がっていることがわかる。図 1(b) において 1300–1400 K あたりにプラトーがあるのは，この温度が太陽系元素存在度の系において主要な固体物質が安定に存在する境界の条件であることを表している。これよりも高温領域では固体物質（ダスト）が昇華し，ダストによる輻射冷却が効かなくなる。初期質量が 0.1 太陽質量の円盤では，現在の太陽系の火星軌道より外側あたりまで高温条件が達成しており，高温において化学平衡となる固体物質が形成される。初期円盤質量が大きくなると，現在の小惑星帯以遠（2–3 AU より外側）まで，高温物質が存在可能となることは興味深い。

4.2. 円盤進化

4.1. で述べた初期状態でスタートした円盤が時間とともにどのように進化したかを示したものが図 2 である。初期円盤質量は 0.1 太陽質量の場合を示してあるが， 10^4 年程度まではあまり大きく変化しないが，その後は顕著に面密度，温度，圧力が低下する。図 2(a) の面密度分布を見ると，円盤がどのように外側に拡がっていくかが明瞭である。 10^5 年程度から円盤全体の質量が小さくなるとともに，円盤は外側に拡がり， 10^6 年程度までの

間に顕著に拡がり，最初に 10 AU しかなかった円盤は数 10 AU 以遠まで拡がっている。温度変化をみると，100 万年では，地球軌道より内側の領域でも 500 K 以下で，氷と有機物以外のケイ酸塩や金属は化学反応が起こらない温度まで低下している。

4.3. ダストの運動

進化する円盤の中で，一つ一つのダスト粒子がどのような軌跡をたどるかを Particle Tracking Model により追跡したものが図 3 である。初期に 10 AU の位置にあった粒子 100 個それぞれが 100 万年の間にどのような条件変化を経験したかを示したものである。カラーは 1 個の粒子をあらわすが，この図では同じ色を複数回用いているため，図 3(a) 位置，(b) 温度，(c) 圧力の 3 枚の図の関係を見出すのは容易ではない。わかりやすいものとしては，たとえば，図 3(a) の図でもっとも上にある黒の粒子は，若干の行きつ戻りつはするものの，100 万年を通じて円盤外側に移動していったことがわかる。(b) の図においてはその粒子の軌跡はほとんどわからないが，円盤外側領域は一貫して低温にあり，その粒子はこの図ではほとんど底辺をはって行ったと考えられる。しかし (c) の図では，圧力の低い方へ移動した黒いカーブがその粒子であることがわかる。円盤外側のより低圧の

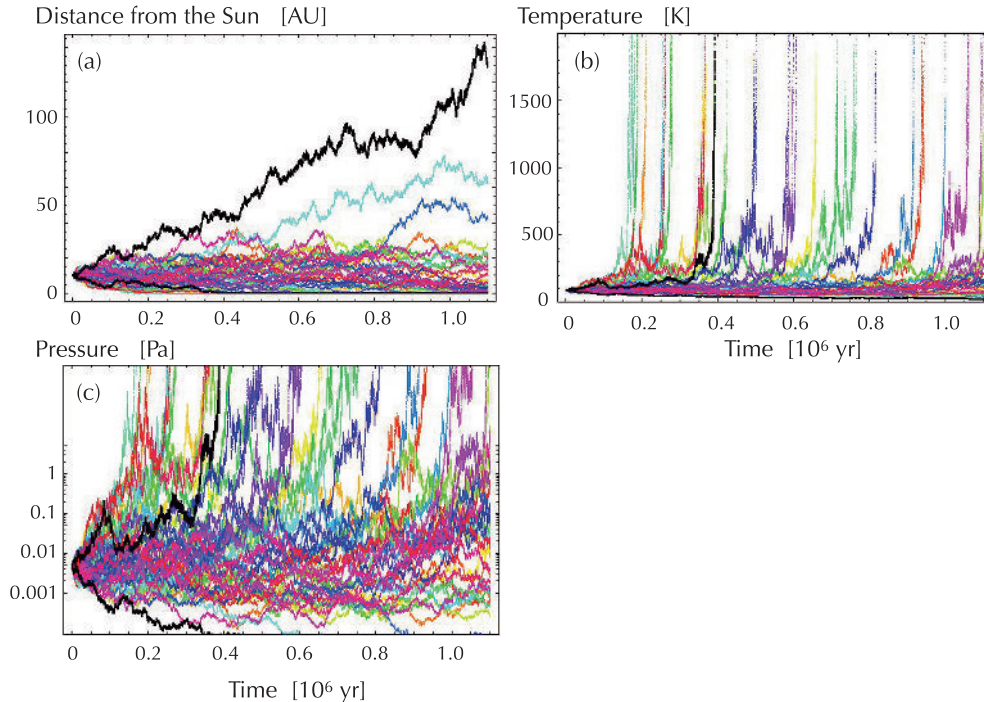


図3：原始惑星系円盤において当初 10 AU にあった個々のダスト粒子が移動により経験する物理条件。(a) 太陽からの距離, (b) 温度, (c) 圧力。円盤初期サイズ 10 AU, 円盤初期質量 0.2 太陽質量の場合。

多くの粒子は初期位置より内側に移動し、より高い温度、より高い圧力を経験する。その半分程度のものは 1500 K より高い温度となり、昇華する。外側に移動した粒子は、より低い温度、より低い圧力を経験する。

場移动到、35 万年程度でこの図では表されないほど低温領域に移動したということである。他方、もう一つの黒い粒子はまったく逆の挙動を示す。(a) の図においては、時間とともに太陽からの距離が近い方に移動し、40 万年程度で消滅している。(b) の図では、その粒子は 40 万年あたりで一気に温度が上昇し、この図の上限からはみだしてしまっている。そのことは、粒子が円盤内側の高温の場まで移動して昇華してしまったことを表している。(c) 圧力の図においても、40 万年あたりで急激に上昇している。この図では、相対的に多くの粒子が時間とともに高い温度、圧力を経験したことが示されている。すなわち、初期円盤に存在していた粒子の多くが太陽に落下し、一部のものだけが円盤外側に移動したことがわかる。

図4には、 10^3 年後から 10^6 年後のダストの分布を、もともとの位置とは無関係にダストの種類で分類した結果を示す。なお以下の図においては、初期円盤サイズ 0.2 太陽質量、初期円盤サイズ 10 AU の結果を紹介する。図4の縦軸は各半径に存在する全ダスト粒子のそれぞれの固体成分の相対比であり、絶対的な量ではないことに注意をする必要がある。初期に円盤内側は高温のため氷や有機物は外側領域のみに存在するが、時間とともにそ

れらは内側にも運搬され、逆に内側に存在したケイ酸塩や金属鉄が外側領域にも移動することになる。このモデルでは、円盤は初期に形成された後は周囲の分子雲からの物質の降着はないものとしているため、氷や有機物の存在量は絶対的に乏しい。そのため時間経過とともに、たとえ 10 AU 以遠であっても、相対的にダストはケイ酸塩や金属鉄が多く、有機物や氷は少ないという結果となっている。円盤形成後の物質の降着などがある場合は、当然外側領域では氷や有機物がより多くなるものと予想される。

原始惑星系円盤の化学的多様性を生む原因としての外側へ移動した粒子に着目し、初期位置 1, 2, 3, ---, 10 AU のダストが 100 万年の間にどのように拡がったかを示したものが図5である。4 枚の図は時間発展を示しており、カラーはダストの初期位置を示す。濃いピンクは 1 AU、薄いピンクは 2 AU、藤色が 10 AU である。縦軸は初期のダスト全量に対する割合で、円盤進化とともに量は減少するもののダストが外側に分布すること、初期位置にかかわらず、同じ程度の割合で遠方に移動していることがわかる。

以上をまとめると、原始惑星系円盤は進化とともに拡張・薄化し、初期には 1 AU や 2 AU のような内側領域

Mass fraction in dust

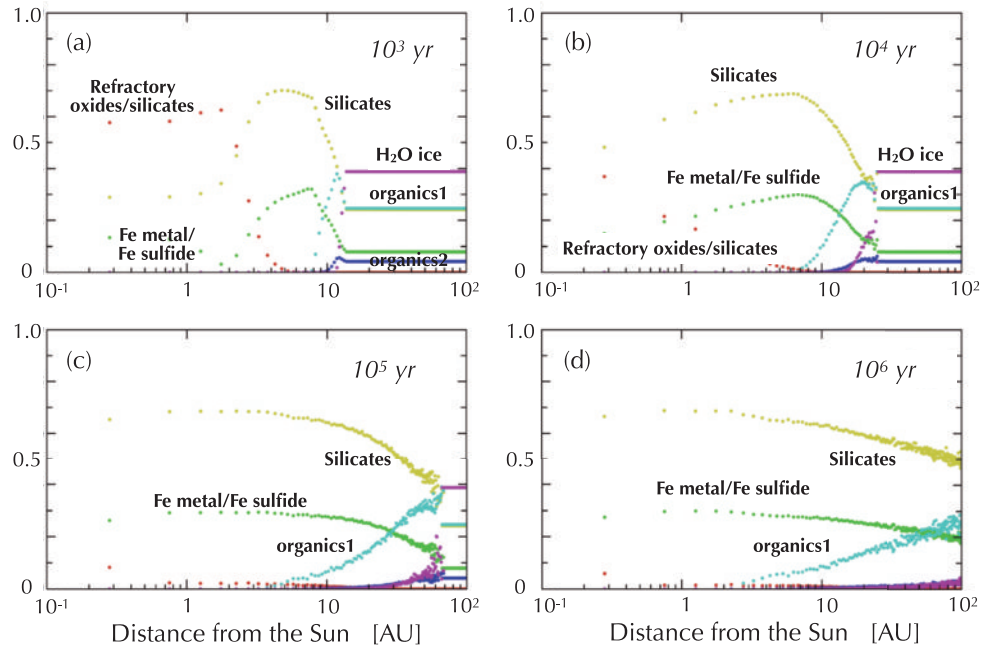


図4：原始惑星系円盤進化において存在する異なる種類の粒子の相対的割合。(a) 10^3 年, (b) 10^4 年, (c) 10^5 年, (d) 10^6 年. 円盤初期サイズ 10 AU, 円盤初期質量 0.2 太陽質量の場合.

初期には内側領域は酸化物, ケイ酸塩と金属粒子, 外側領域は氷や有機物が存在しているが, 移流と拡散の結果両者は混合し, 混合の程度は時間, 空間で変化する. 後期に外側領域で氷や有機物が減少しているのは, このモデルでは円盤形成後に外から物質は流入してこないことを仮定しているためである.

Dust mass fraction [initial dust mass]

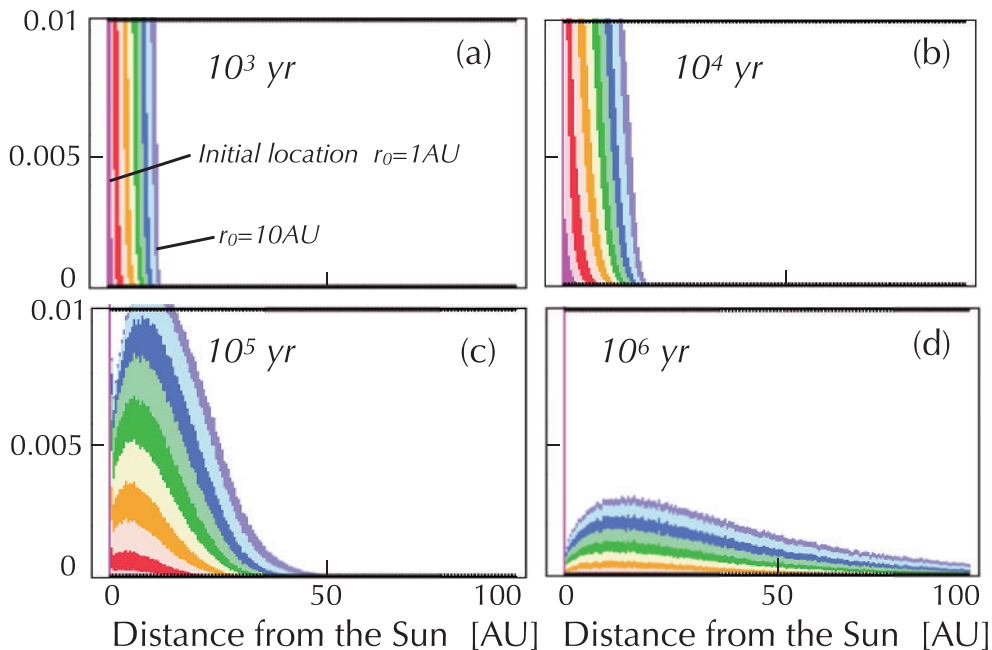


図5：原始惑星系円盤進化において拡散により外側に運ばれた粒子の時空分布。(a) 10^3 年, (b) 10^4 年, (c) 10^5 年, (d) 10^6 年. 円盤初期サイズ 10 AU, 円盤初期質量 0.2 太陽質量の場合.

色はスタートのときに存在していた位置を表し, 時間とともに量は減少するが, 遠方まで粒子が移動していることがわかる. また, スタート時の位置 1-10 AU の違いはほとんどみられない.

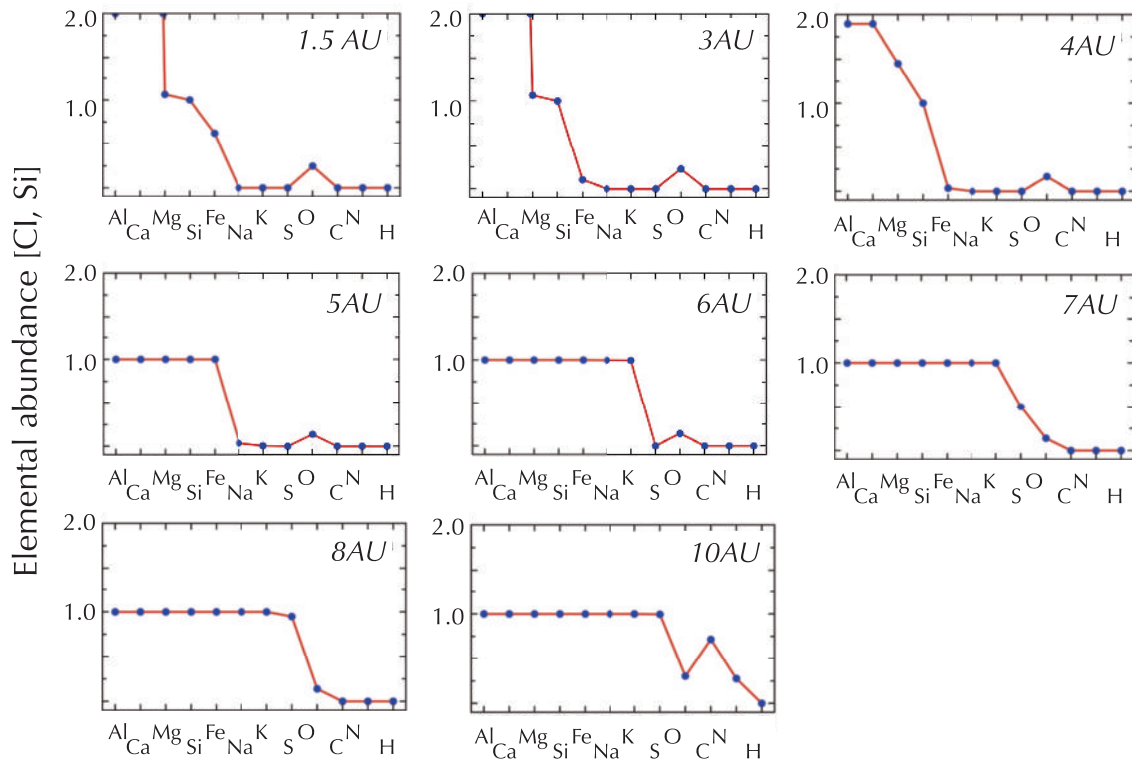


図6：原始惑星系円盤に初めに存在するダストの化学組成. 1.5-10 AU について、円盤初期サイズ 10 AU、円盤初期質量 0.2 太陽質量の場合.

横軸の元素は揮発性の順番で並べられており、縦軸の存在度はそれぞれの元素の太陽系存在度と Si の個数で規格化してある。内側領域は難揮発性元素に富み、5 AU より外側はほとんどの重元素の存在度（縦軸の値）が 1.0 で、すべて固体として存在している。

に存在していた粒子が 100 AU もの外側まで拡散しうることが明らかとなった。なお、どれだけの質量のダストが遠方に運ばれるか、それらのダストがどのような化学的性質をもっているかは、上述のとおり円盤の初期条件（円盤半径、質量）に大きく依存する。

4.4. 円盤の化学進化

原始惑星系円盤は温度・密度とも、内側が高く、外側が低いという構造をもつため、その条件でガスと化学平衡に存在するダストの化学組成も太陽からの距離の関数として変化する。固体物質の安定性の観点からは、いくつかの特徴的な温度がある。ひとつは、図1で示されるように 1300-1400 K という、主要なケイ酸塩と金属の凝縮/昇華温度であり、これ以上の温度ではほとんどの重元素（ここでは Na より原子番号の大きいものを重元素と呼ぶことにする。天文学で一般的に重元素と言う場合は H と He のみを指すのと異なる）がガスであり、この温度以下では、ほとんどが固体である。2つめは 450 K と 550 K 程度であり、有機物の安定限界である。ただし、この温度に関しては、原始惑星系円盤条件下で存在する有機物の化学構造を一意的に決定することが困難で

あること、有機物自体がわずかな温度変化で構造を多様に変えうること、加熱・蒸発実験がきわめて乏しいことなどから、不確定性が大きい。ここでは Pollack et al. (1994) および Nakano et al. (2003) の実験結果にもとづき、相対的に低温で蒸発してしまう有機物と相対的に高温で蒸発する有機物の2種類があるものと考え、それらの蒸発温度 450 K および 550 K を採用した。3つめは水の昇華温度で、全圧（太陽系元素存在度の場合、大部分は H と He の量）に応じ 140-180 K 程度の範囲である。酸素はケイ酸塩に含まれるが炭素、チッ素、水素は有機物と氷にしか含まれないため、固体物質の化学組成は場所により多様に変化する。

図6に初期円盤サイズが 10 AU の円盤における 1.5-10 AU それぞれの場合での固体物質の化学組成を示した。横軸は元素を揮発性に応じて並べたもので、揮発性とはその元素の 50% がガス、50% が固体である温度と定義している。縦軸は、それぞれの元素の固体として存在する割合を太陽系元素存在度（CI コンドライトで代表させるため CI と記述している）と Si で規格化したもので、たとえば Mg の場合は $(\text{Mg}/\text{Si})/(\text{Mg}/\text{Si})_{\text{CI}}$ という比である。分子はその距離の温度条件の化学平衡で存在する

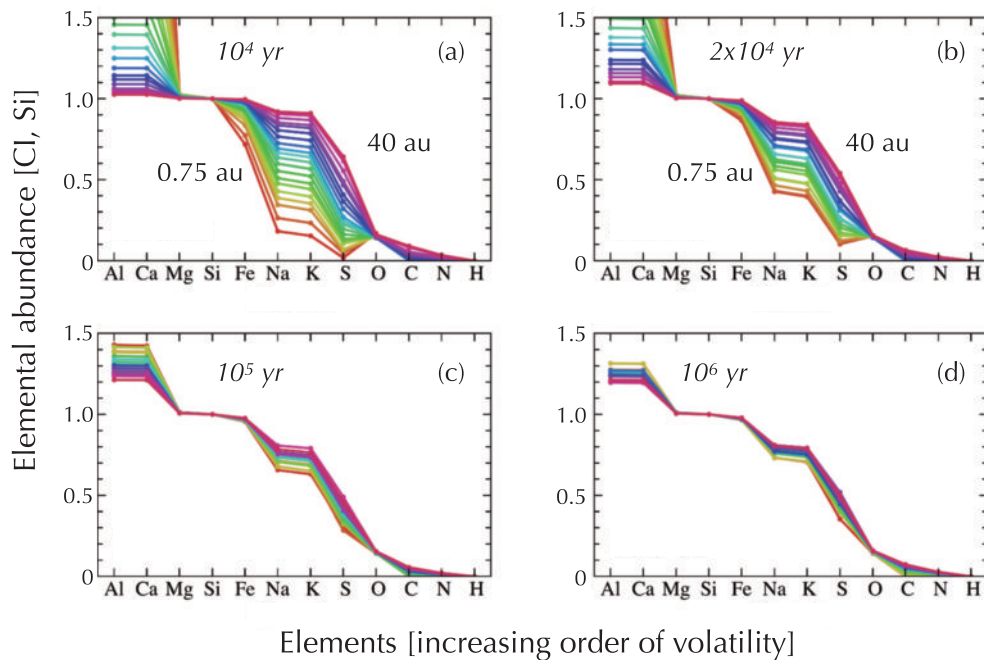


図7: 原始惑星系円盤でのダストの移流-拡散の結果, 円盤中の固体成分の化学組成分布進化. (a) 10^4 年, (b) 2×10^4 年, (c) 10^5 年, (d) 10^6 年. 円盤初期サイズ 10 AU, 円盤初期質量 0.2 太陽質量の場合.
初期円盤内は化学的不均質があるが, 10^5 年程度以降は均質となる. 異なる化学組成の惑星が形成されるためには, きわめて初期に微惑星, さらに惑星の合体成長が必要であることを示している.

固体物質全体の Mg/Si 比, 分母は太陽系元素存在度の Mg/Si 比である. この規格化は, 隕石の化学組成を示すときに用いられる方法で, それとの比較のため, ここでも同様の規格化をおこなっている. もっとも内側 1.5 AU では, Al, Ca はすべてが固体として存在するが, Si の一部が固体となっていないため, Si で規格化した Al, Ca の存在量は 1 より大きくなっている. とはいえ Mg, Si, Fe は縦軸の値が 1 に近く大部分が固体であり, それより揮発性の高い元素 (横軸がそれらより右側に示されている元素) は基本的にガスである (縦軸の値が 1 より有意に小さい). 酸素のみは一部が Mg, Si と化合して固体となっているために 0.2 程度となっている. 5 AU 以遠は, 基本的に大部分の重元素が固体となっており, 10 AU では N の大部分も固体となっている. この計算では円盤の初期半径を 10 AU と仮定しており, 円盤外縁部で分子雲条件にきわめて近い温度条件であるため, C および大部分の N は有機物として存在していることを示している. なお, H は他の元素に対して 3-4 桁以上存在量が多く, たとえ H_2O として固体になったとしてもそれは H の全量に対しては 1% 程度でしかないため, この図では常に限りなくゼロに近い値として示されている.

初期状態においてこのような化学組成をもつダスト粒

子が, モデルで説明したような移流-拡散により移動し, ある時間の後にある場所に存在する粒子の化学組成をすべて合わせると, その場の固体成分の化学組成が求まる. 図7が, 10^4 年後, 2×10^4 年後, 10^5 年後, 10^6 年後の円盤中の固体成分の化学組成を, それぞれの年代において円盤の内側 0.75 AU から外側 40 AU までをカーブの色によって示したものである. なお, この初期条件では, 図1でわかるとおり, 現在の火星軌道よりさらに外側まで高温領域が広がっているため, 図6の元素存在度パターンは右下がり (高温で安定な成分は多量に含まれているが, 揮発性の高いものほど乏しい) となっている. ちなみに, 初期円盤が大きく拡がっていたり, 円盤質量が小さかったりする場合は, 円盤全体が低温となり, 元素存在度パターンは, H, C, N, O 等の軽元素を除けば, 他の元素は存在量 1 のフラットなパターンとなる.

4 枚の図を見比べることにより, きわめて重要な結果を得ることができる. 円盤中の固体成分の化学組成は, 初期には位置による多様性があるが, 時間とともに均質化し, 10^5 年後ではほぼ一様, 10^6 年後では場所による化学的差はほとんどなくなっているのである. すなわち, 原始惑星系円盤進化のきわめて早期に微惑星が形成された場合は, 太陽からの距離により化学的に多様な微惑星が形成されうる. 10^5 年程度より後に形成された場合

は、どこで形成した微惑星であっても同じような化学組成を持つということである。10⁵年というのは惑星形成論においてはきわめて初期であり、かつ、その時期に円盤に存在していた固体物質の多くは太陽に落下してしまったはずだと考えられている。他方10⁶年後では、太陽系のいたるところ同じ化学組成の微惑星しか形成されず、ひいては同じ化学組成の惑星しか形成され得ないのである。なお、この元素存在度の傾きや、いつから円盤内部が化学的に均質になるかは、円盤初期条件や、円盤形成後の物質の集積の有無によって異なるため、この結果を隕石の化学組成と比較して太陽系の初期条件に制約を与えることは難しい。円盤形成後の物質の集積に関しては、現在精力的に観測が進められている。Sakai et al. (2014) の観測によれば、30 万年以下の若い円盤の 100 AU 程度の位置にある円盤の外側には遠心力バリアと呼ばれるショックフロントが形成されており、その外側から円盤へのガスの流入はアウトフローなどによる角運動量輸送により制限されているのかもしれない。

5. まとめと今後の展望

本研究では原始惑星系円盤におけるダストの移流－拡散を Particle Tracking Model により追跡し、円盤の各半径領域での物理条件変化に対する固体物質の化学を重ねることで、円盤の物理的な進化と化学組成進化の結合を目指した。円盤初期条件が結果を大きく支配するため、われわれの太陽系について具体的制約を与えることは難しいが、重要な発見として、(質量やサイズについて) 一般に考えられるような原始惑星系円盤はきわめて短時間で化学的に均質になってしまうということである。

原始惑星系円盤における惑星形成に関する研究は力学的研究がほとんどである。しかし太陽系をみると、惑星や小惑星の化学組成の多様性は顕著であり、その事実が説明できなくては惑星形成論ということができない。発見された多くの系外惑星系の質量と軌道の関係と比較し、太陽系は特殊であるかもしれないという多くの指摘がなされているが、仮にそうだとした場合、太陽系の観測事実は説明されなくてはならないし、多くの系外惑星と何が異なっていたために異なる惑星系が作られたのが説明されなくてはならない。本研究は、原始惑星系円盤初期進化の物理過程と化学過程を結びつけるところにその独自性があるが、用いた物理モデルはきわめて単純なもので、これですべてが説明できるわけではない。今後、より複雑な過程も取りこんだ物理モデルと化学過程の結合を試みる必要があるであろう。

謝辞

相川祐理さんには大変丁寧に原稿を読んでいただき、有益なコメントをいただいたほか誤りを指摘していただきました。記して感謝いたします。本研究は、科研費補助金(課題番号 25108003)の助成のもとに、科研費新学術領域研究“宇宙における分子進化”の一部としておこなわれました。領域による新しいサイエンスの展開を導いてくださった香内晃氏に感謝いたします。

参考文献

- Amelin, Y. (2008) U-Pb ages of angrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 221-232.
- Amelin, Y., A. Kaltenback, T. Iizuka, C. H. Stirling, T. R. Ireland, M. Petaev, and S. B. Jacobsen (2010) U-Pb chronology of the solar system's oldest solids with variable ²³⁸U/²³⁵U. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **300**, 343-350.
- Andrews, S. M., D. J. Wilner, D. J., Z. Zhu Z., T. Birnstiel, J. M. Carpenter, L. M. Perez, X.-N. Bai, K. I. Oberg, A. M. Hughes, and A. Isella (2016) RInges substructure and a gap at 1 au in the nearest protoplanetary disk. *Astrophys. J. Lett.*, **820**, L40.
- Boss, A. (1998) Temperatures in protoplanetary disks. *Ann Rev Earth Planet. Sci.*, **26**, 53-80.
- Bouvier, A., L. J. Spivak-Burndorf, G. A. Brennecke, and M. Wadhwa (2011) New constraints on early Solar System chronology from Al-Mg and U-Pb isotope systematics in the unique basaltic achondrite Northwest Africa 2976. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **75**, 5310-5323.
- Cassen, P. (2001) Nebular thermal evolution and the properties of primitive planetary materials. *Meteorit. Planet. Sci.*, **36**, 671-700.
- Ciesla, F. J. (2010a) The distributions and ages of refractory objects in the solar nebula. *Icarus*, **208**, 455-467.
- Ciesla, F. J. (2010b) Residence times of particles in diffusive protoplanetary disk environments. I. Vertical motions. *Astrophys. J.*, **723**, 514-529.
- Ciesla, F. J. (2011) Residence times of particles in diffusive protoplanetary disk environments. I. Radial motions and applications to dust annealing. *Astrophys. J.*, **740**, 9.
- Cuzzi, J. N., S. S. Davis, A. R. Dobrovolskis (2003) Blowing in the wind. II. Creation and redistribution of refractory inclusions in a turbulent protoplanetary nebula. *Icarus*, **166**, 385-402.
- Gail, H. P. (2001) Radial mixing in protoplanetary accretion disks. I. Stationary disc models with annealing and carbon combustion. *Astron. Astrophys.*, **378**, 192-213.
- Gail, H. P. (2004) Radial mixing in protoplanetary accretion disks. IV. Metamorphosis of the silicate dust complex.

- Astron. Astrophys.*, **413**, 571–591.
- Hartmann, L., N. Calvet, E. Gullbring, and P. D'Alessio (1998) Accretion and the evolution of T Tauri disks. *Astrophys. J.*, **495**, 385–400.
- Hellmann, J. L., T. S. Kruijer, J. A. Van Orman, K. Metzler, and T. Klein (2019) Hf-W chronology of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **258**, 290–309.
- Nagahara, H. (2018) Kinetics of gas-solid reactions in the Solar System and beyond. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **84**, 461–497.
- Najita, J. R. and E. A. Bergin (2018) Protoplanetary disk sizes and angular momentum transport. *Astrophys. J.*, **864**, 168.
- Nakano, H., A. Kouchi, S. Tachibana, and A. Tsuchiyama (2003) Evaporation of interstellar organic materials in the solar nebula. *Astrophys. J.*, **592**, 1252–1262.
- Nomura, H., T. Tsukagoshi, R. Kawabe, D. Ishimoto, S. Okuzumi, T. Muto, K. D. Kanagawa, S. Ida, C. Walsh, T. J. Millar, and X.-N. Bai (2016) ALMA observations of a gap and a ring in the protoplanetary disk around TW Hya. *Astrophys. J. Lett.*, **819**, L7.
- Pollack, J. B., D. H. Hollenbach, S. Beckwith, D. P. Simonelli, T. Roush, and W. Fong (1994) Composition and radiative properties of grains in molecular clouds and accretion disks. *Astrophys. J.*, **421**, 615–639.
- Sakai, N., Y. Oya, T. Sakai, Y. Watanabe, T. Hirota, C. Ceccarelli, C. Kahane, A. Lopez-Sepulcre, B. Lefloch, C. Vastel, S. Bottinelli, E. Caux, A. Coutens, Y. Aikawa, S. Takakuwa, N. Ohashi, H.-W. Yen, and S. Yamamoto (2014) A chemical view of protostellar-disk formation in L1527. *Astrophys. J. Lett.*, **791**, L38.

