



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	惑星系での氷ダストの昇華
Author(s)	小林, 浩; 木村, 宏; 渡邊, 誠一郎 他
Description	2章 惑星形成と氷微粒子
Citation	低温科学, 66, 65-71
Issue Date	2008-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/34713
Type	departmental bulletin paper
File Information	KOBAHIRO.pdf





惑星系での氷ダストの昇華



小林 浩, 木村 宏 北海道大学, 渡邊誠一郎 名古屋大学, 山本 哲生 北海道大学

歳をとった (10^7 – 10^9 年) 星のまわりでは, μm サイズの微小粒子 (デブリ) の円盤 (デブリ円盤) が観測されている. このように星をとった星の周りでは, 惑星がすでに形成されている可能性は高い. 本研究では, デブリ円盤の内縁に注目して, デブリの昇華によりどのような内縁ができるかを調べた. また, 内縁の起源の違いにより位置や形状にどのような起源を持つかを分類した. 観測の進歩により, 太陽系外の惑星系において昇華リングの観測が可能になり, この昇華によるリングの有無が太陽系外の惑星系での惑星の存在を示すことになるだろう.

1 はじめに

宇宙には, 恒星の周りを惑星が公転している, 惑星系の存在が明かにされてきている. このような惑星系において, 惑星に在るであろう「宇宙人」の存在は非常に興味深い. しかし, 「宇宙人」からのシグナルを関知することは難しいだろう (私が知らないだけで, すでに関知されているのかも知れないが). 太陽系では8つの惑星が太陽の周りを公転していると「定義」され, 太陽系以外では最大5つの惑星を持つ惑星系が発見されている. まだ他の惑星で宇宙人どころか生命を発見することも難しいが, 200個以上の惑星が発見されている. 惑星系以外にも, ダスト (塵) が作る星の周りの円盤構造が観測されていて, 惑星系の情報を与えてくれる. 太陽系以外の「宇宙人」からのシグナルは期待できないが, 「宇宙塵 (うちゅうじん)」は惑星系の重要な情報を与えてくれる.

諺にもあるように大きな惑星も塵が積もり形成される. 太陽系のようにすでに惑星ができてしまった惑星では, 惑星ほどではないが大きな天体達が衝突して壊れて, 小さな塵を再び排出する. 惑星は直接惑星からの光を観測することは難しいが, このような塵は明るいため中心星からの光の反射光や熱輻射を直接観測できる. このような塵の分布が新たな惑星系の情報を与える.

本研究では, この固体微粒子の分布が昇華の効果によりどのような影響を受けるかを調べた. その結果をその他の効果と組み合わせることにより, このような固体微粒子の円盤を恒星の周りの惑星の存在や位置を予測する.

2 デブリ円盤とは

惑星系の形成の標準的なモデルを簡単に紹介する. (1) 分子雲コアと呼ばれる比較的密度の濃いガスの集まり

が, 重力的に収縮して恒星ができる. この時に恒星の周りにガスと固体微粒子からなる円盤が形成される. この円盤は中心の恒星の質量に比べるとずっと軽い ($1/100$ 程度) が, 惑星系はこの円盤の中で生まれる. この円盤は原始惑星系円盤と呼ばれ, 若い星の半数以上が原始惑星系円盤を持つことが観測により確認されている. (2) この原始惑星系円盤の中で固体の固体微粒子が集まり 1 – 10 km 程度の微惑星が形成される. (3) 微惑星が衝突・合体を繰り返して成長し, 原始惑星と呼ばれる 100 – $10,000$ km サイズの天体が作られる. (4) 原始惑星同士が合体成長して固体のみで作られた地球型惑星が形成される. 地球の 10 倍程度まで大きくなった原始惑星は強い重力でガスを捕獲し木星型惑星を形成する. (1)–(4)の過程を経て惑星系は出来上がる.

10^7 – 10^9 年程度の年齢の星では, スペクトルを見た時の赤外線スペクトルの超過として, 固体微粒子からの熱輻射が観測されている. このような円盤はデブリ円盤と呼ばれている. 10^7 – 10^9 年程度という年齢を惑星形成の標準モデルに照らし併せてみると, (3)–(4)の状態で惑星がすでにできているか, ほとんど完成している可能性が高い. デブリ円盤中ではガス成分はほとんどない. このような星の周りでは, 固体微粒子は中心星の年齢に比べて非常に短い時間で消失する. そのため, 観測される固体微粒子は常に生成されており, 微惑星のような大きな天体が壊れてできた破片 (デブリ) だと考えられている. これがデブリ円盤と呼ばれる結縁である. また, デブリ円盤の一部は高分解能の観測により中心星に近い内側で穴が開いていることが観測されている. デブリ円盤の分布はいくつかの効果によって影響を及ぼされる. 次の章でこの効果について説明する.

3 デブリ円盤の分布に影響をおよぼす効果

デブリ円盤で見つかっている小さな固体微粒子（デブリ）は、この章で述べる輻射圧や Poynting-Robertson 効果、惑星による重力散乱により、中心星の年齢よりもずっと短い時間で消失する。そのため、原始惑星系円盤中にあった固体微粒子がそのまま残っていたのではなく、一度、微惑星サイズまで成長してから壊れてできたデブリだと考えられている。微惑星からできたデブリが中心星の周りを円盤状に分布するデブリ円盤が電波から可視光までの様々な波長で観測されている。この章では、このようなデブリ円盤の分布に影響を及ぼす効果について述べる。

3.1 衝突

微惑星間の相対速度が表面脱出速度よりずっと大きくなると、微惑星間の衝突は破壊的になり、破片をばらまくようになる。数 100 km サイズの原始惑星や他の恒星が惑星系の近傍を通り過ぎることによって、微惑星間の相対速度は表面脱出速度を越えるほど大きくなる。そのような重力摂動がある（あった）場所で十分な数密度の微惑星帯が残っていれば、微惑星は衝突により破片をばらまく。そして、その破片同士が衝突してさらに小さいデブリを生成し、デブリ円盤で観測されている。

3.2 輻射圧と Poynting-Robertson 効果

固体微粒子は中心星からの光子を吸収し運動量をもらい、輻射圧を受ける。輻射圧はミクロンサイズのダストには非常に大きな力で、中心星からの重力と同じ程度の大きさにもなる。しかし、輻射圧は重力と同じように中心星からの距離の自乗に反比例している。ダストのサイズが変わらない限りは、輻射圧はダストの角運動量を変化させないため、軌道を変えない。中心星の重力が小さくなくても、天体はケプラーの法則に従い中心星の周りを円または楕円軌道で公転する。輻射圧が大きくなっても、中心星重力を越えない限りは、中心星の周りを公転する。

一方、Poynting-Robertson 効果は、ダストが中心星の周りを公転しており、中心星から差し込む光も有限の速度を持っていることから起こる。そのため、力の大きさはダストの公転速度と光速の比を輻射圧にかけた程度の大きさになる。地球の軌道（1 天文単位）では、Poynting-Robertson 効果による力は輻射圧の 10^{-4} 程度である。非常に小さな力だが、輻射圧とは違いダストの軌道角運動量を減らすために、ダストは螺旋軌道を描き、中心星に向かって落下していく。

3.3 惑星

惑星が存在すると、惑星の強い重力により周りの天体は跳ね飛ばされる。そのため、惑星の周りに惑星の重力圏（ヒル半径）の 7-8 倍の太さの溝ができる。また、惑星と固体微粒子の公転周期が整数比の場所では、固体微粒子は比較的安定に存在できる。このような共鳴は、平均運動共鳴と呼ばれ、共鳴に固体微粒子が集まるためデブリ円盤に塊上の構造を作ることになる。

4 これまでのデブリ円盤の分類

中心星の光度が太陽の 0.4 倍以上の星を考えた時、小さいデブリは輻射圧が中心星重力に匹敵するほど大きくなる。そのため、小さいデブリは系外に飛ばされてしまう。デブリ衝突の時間が Poynting-Robertson 効果による移動時間に比べて短い時には、Poynting-Robertson 効果による移動はせずにデブリは衝突を繰り返し、どんどん小さくなり最終的に輻射圧が大きくなり系外に飛ばされて消失する。このようなデブリ円盤を「衝突支配デブリ円盤」と呼ぶ。円盤の光学的厚さが 10^{-5} の場合にデブリ円盤は「衝突支配デブリ円盤」となる。「衝突支配デブリ円盤」では、デブリの母天体である微惑星帯よりも太陽に近い内側の領域には、デブリは入り込まない。つまり、微惑星帯の内側の境界が、デブリ円盤の穴の位置になる。

一方、円盤の光学的厚さが 10^{-5} より小さい場合は、デブリは小さくなると Poynting-Robertson 効果により中心星に向かって落下する。このようなデブリ円盤を「移動支配デブリ円盤」と呼ぶ。この「移動支配デブリ円盤」では、デブリ母天体の微惑星帯からデブリは落下し、微惑星帯の内側に空いていた穴をデブリが埋めてしまう。その結果、デブリの分布は中心星からの距離によらず一定の面密度となる。

「移動支配デブリ円盤」の穴はまだ高分解の観測では観測されていないが、将来観測可能になるだろう。「移動支配デブリ円盤」に穴があった場合は、惑星の存在を示す可能性がある。しかし、惑星以外の効果でも穴は開くため注意深く選別しなくてはならない。次の章から氷の昇華による穴を開ける機構について調べる。このような、メカニズムの違いが、穴の位置や温度、構造（穴の形）にどのような影響をもたらすのかがわかれば、穴を開けた原因が特定できるだろう。

5 氷の昇華モデルとデブリの運動方程式

「移動支配デブリ円盤」でのデブリの分布を調べるために、デブリの軌道の進化を調べる。デブリが生成される領域は中心星から遠くはなれているため氷は凝固している、そのためデブリの主成分は氷である。デブリが Poynting-Robertson 効果によって内側に落下する時、中心星に近付くため主成分の氷が昇華する。昇華にともないデブリの軌道は変化する。温度 T で半径 s の球形のデブリの昇華によるサイズ変化は以下の式で表される。

$$\frac{ds}{dt} = -\sqrt{\frac{\mu m_u}{2\pi k T}} \frac{P_v}{\rho}, \quad (1)$$

ここで、 $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ は氷の密度、 $\mu = 18$ は水の平均分子量、 m_u は原子質量単位、 k はボルツマン定数である。また、 P_v は氷の飽和蒸気圧であり以下で表される²⁾。

$$\log P_v = -\frac{2445.5646}{T} + 8.2312 \log T - 0.01677006 T + 1.20514 \times 10^{-5} T^2 - 3.63227, \quad (2)$$

飽和蒸気圧はデブリの温度 T に対して非常に敏感な関数である。温度は中心星からの放射によりデブリに入射するエネルギー、デブリの熱放射によってでていくエネルギー、昇華による潜熱の釣合によって決まる。

また、デブリの運動方程式は以下のように表される³⁾。

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{GM_\star}{r^2} \left[(1-\beta) \hat{\mathbf{r}} + \beta \left(\frac{2}{c} \mathbf{v}_r \hat{\mathbf{r}} + \frac{v_\theta}{c} \hat{\boldsymbol{\theta}} \right) \right], \quad (3)$$

ここで、 β 放射圧によってデブリが受ける力と中心星重力の比、 $\mathbf{r}$ がデブリの位置ベクトル、 $\hat{\mathbf{r}}$ と $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ はデブリの軌道面上の単位ベクトルでそれぞれ、 $\mathbf{r}$ に沿ったベクトルと垂直なベクトル、また、 v_r と v_θ はデブリ速度の $\mathbf{r}$ と $\boldsymbol{\theta}$ 方向成分。大括弧の中の、第1項が重力と放射圧を足した項である。第2項は Poynting-Robertson 効果によってデブリが受ける力である。力の大きさは、第1項が第2項に比べて、 10^4 倍以上大きい。デブリのサイズが変化しない時、 β は一定である。この時、第1項による力でデブリはケプラーの法則に従い円軌道か楕円軌道をとる。昇華によりデブリが小さくなると第1項は小さくなっていく、この時デブリの軌道はケプラーの法則にしたがった閉じた楕円軌道ではなくなり、軌道が外側に移動する。一方、第2項は軌道を内側に移動させる。どちらの効果も、デブリが中心星の周りを公転する時間に比べてずっと長い。

以上の式を同時に積分することで、デブリの軌道進化とサイズ進化を明かにする。

6 デブリの軌道進化

最初に、デブリの軌道進化のイメージを得るために完全吸収体のデブリによる軌道進化を示す。図1に示すようにデブリの軌道進化には3つのステージがある。最初のステージでは、デブリはほとんど P-R 効果により落下する。このとき、デブリのサイズ減少率は小さい。そのため、グラフを左に向かって移動する。次のステージでは、サイズ減少率が大きくなる。その結果、輻射圧が増加して、デブリの運動エネルギーも増加する。デブリの運動エネルギーの増加は、デブリの軌道長半径を増加させる。一方、Poynting-Robertson 効果はデブリの軌道長半径を下げる。2つの効果が釣り合って、デブリは長時間このステージを経験する。ここで、この場所を昇華領域と呼ぶ。このステージでは、離心率は小さく、軌道が安定しているため、この場合はサイズ減少率の時間変化が小さい。この安定したサイズ減少率が軌道を安定化させる。最後のステージでデブリは楕円軌道化し、系外に

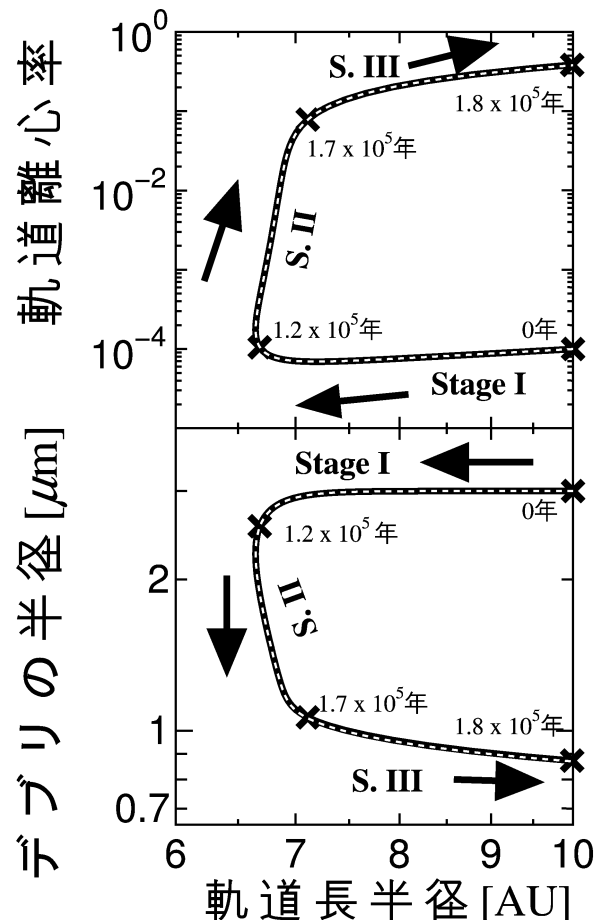


図1：デブリの軌道離心率とデブリ半径に対する軌道長半径の変化。初期の軌道長半径を 10 AU、軌道離心率を 1×10^{-4} 、デブリの半径 $3 \mu\text{m}$ とした。

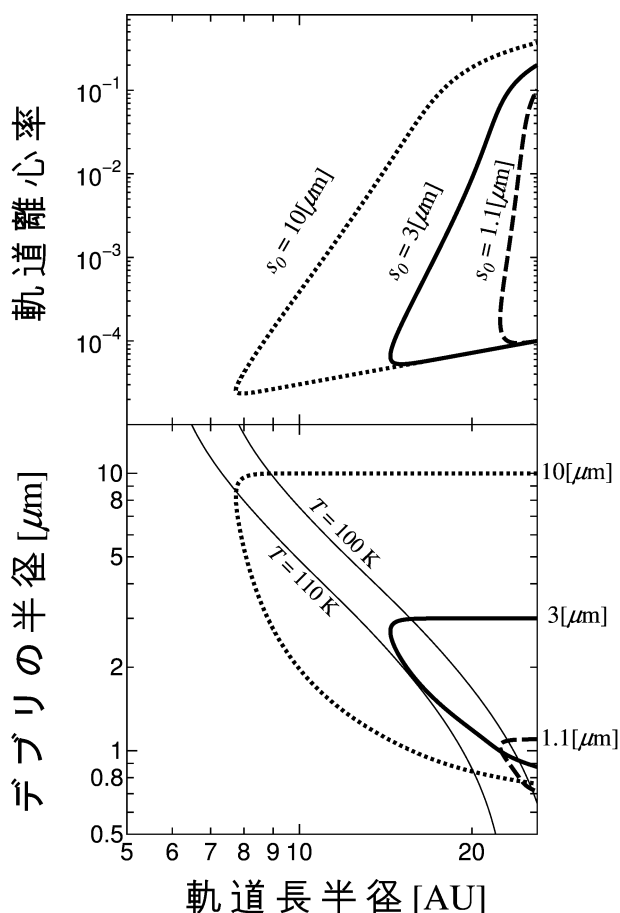


図2：デブリの軌道離心率とデブリ半径に対する軌道長半径の変化。初期の軌道長半径を26 AU、軌道離心率を 1×10^{-4} 、デブリの半径1.1 μm 、3 μm 、10 μm とした。

飛ばされる。このステージの時間は短い。デブリの軌道離心率0.1以上になると、楕円化にともない近日点がどんどん中心星に近付いていく。このことがデブリの昇華率を増加させ、短時間で輻射圧が増加し、その結果として系外に飛ばされる。

図2は、デブリの光学特性を考慮し、有機物と氷を混ぜたデブリでの軌道進化である。この場合は、熱輻射によるエネルギー放射が完全吸収体よりも小さいため、中心星から同じ距離でのデブリの温度は高くなる。デブリの温度が高くなるため昇華領域は中心星から離れる。しかし、軌道進化は似ており、3つのステージを持つ。2つ目のステージではダストは長期滞在するため、ダストが定常的に生成されているならば、デブリは昇華領域に溜る。次の章でデブリの溜る量を求める。

7 デブリの溜る量

デブリの分布を調べる。デブリは昇華領域まで、

Poynting-Robertson効果により輸送される。デブリの生成率の進化は、この輸送時間に比べてずっと長いので、デブリの生成率は一定と取り扱える。また、デブリの輸送時間は、中心星の年齢に比べてずっと長いので、デブリ円盤のいたるところで、定常状態に達していると考えることができる。そのため、ここでは定常状態のデブリの数密度分布と光学的厚さの分布を調べる。デブリの数密度は宇宙探査機でその場に行って観測する時に重要になる。一方、光学的厚さは系外からデブリ円盤を観測した時にその明るさに関係する。

軌道進化の最初のステージの様に Poynting-Robertson効果だけによってダストが移動している時、数密度は中心星からの距離に反比例し、光学的厚さ τ_{eff} は中心星からの距離によらず一定である。デブリ円盤は薄っぺらい円盤構造のため、円盤の厚さで積分した数密度を考えると都合がいい。この数密度を面数密度と呼ぶ。面数密度 N_s は、光学的厚さと同様に Poynting-Robertson効果だけでダストが移動している時は、中心星の距離によらず一定である。最初のステージでデブリが作る N_s と τ_{eff} を N_{s0} と $\tau_{\text{eff}0}$ と置く。これらは、ダストの生成率に関する量で、ダストの生成率が一定なので、定数である。図3に N_{s0} と $\tau_{\text{eff}0}$ で規格化した N_s と τ_{eff} の中心星からの距離との関係を示す。両者共に20 AU程度でピークを持つ。これは、昇華領域にデブリが溜っていることによる。

デブリ円盤は光度が大きい星の周りにも、発見されている。デブリの溜る率(N_s/N_{s0} と $\tau_{\text{eff}}/\tau_{\text{eff}0}$ のピークの値)とピークの温度と位置と中心星光度 L_* との関係を図4に示した。黒点・は数値シミュレーションによって求めたピークの値と位置である。一方、実線は近似的解析計算により求めた解による、ピークの値と位置である^{4,5)}。両者は非常に良く一致している。また、点線は完全吸収体での解析解を用いたピークの値と位置で、参考のために載せた。太陽光度の100倍より小さい時は、ピークの値は、小さく数密度で3倍、光学的厚さで2倍程度である。一方、光度が大きくなるとピークの値は大きくなる。ピークの値は、デブリの光学特性が完全吸収体に近いと大きくなる。中心星光度が大きいと、輻射圧が強くなるため、Poynting-Robertson効果により落下するデブリのサイズも大きくなる。このように大きなサイズのデブリの光学特性は完全吸収体に近付くために、ピークの値は大きくなる。一方、ピークでのデブリの温度は100-110 Kで中心星光度によらず、ほとんど一定である。デブリ円盤の温度はデブリからの熱輻射を観測した時、スペクトルの赤外線ピークとして見ることができる。赤外線

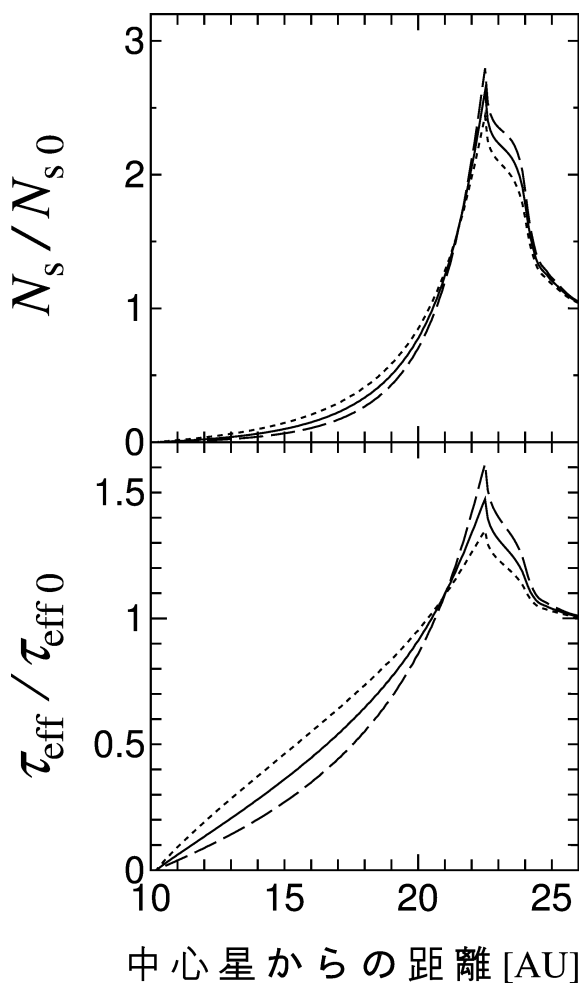


図3：面数密度 N_s と光学的厚さ τ_{eff} の分布. 26 AU で Poynting-Robertson 効果で落ちてくるデブリの面数密度 N_{s0} と光学的厚さ $\tau_{\text{eff}0}$ で規格化している. 26 AU から落ちてくるデブリのサイズ分布をベキ乗則で決めている. サイズ $[s, s+ds]$ の数密度を nds とした時, $n \propto s^{-p}$ とおいて, $p=3$ (点線), 3.5 (実線), 4 (破線) としている. ベキ指数 p は, ピークの位置や形にあまり影響を与えない.

ピークからみた温度に対する大きな制約となる. また, ピークの位置も中心星の光度に依存する. 中心星光度が小さい時にピーク位置の中心星光度依存性が小さい. これは, 取り扱っているデブリが小さいため, 熱放射の効率が悪くなり温度が上がるためである.

8 デブリ円盤の再分類

昇華の効果を考慮してデブリ円盤を再分類する. 図5がデブリ円盤の分類のイメージである. デブリ円盤の光学的厚さが大きい時は「衝突支配デブリ円盤」で穴の起源は衝突によって小さくなったデブリが輻射圧によって系外に飛ばされてできる. 一方, 光学的厚さが小さいと「移動支配デブリ円盤」になる. この円盤では穴は外的な

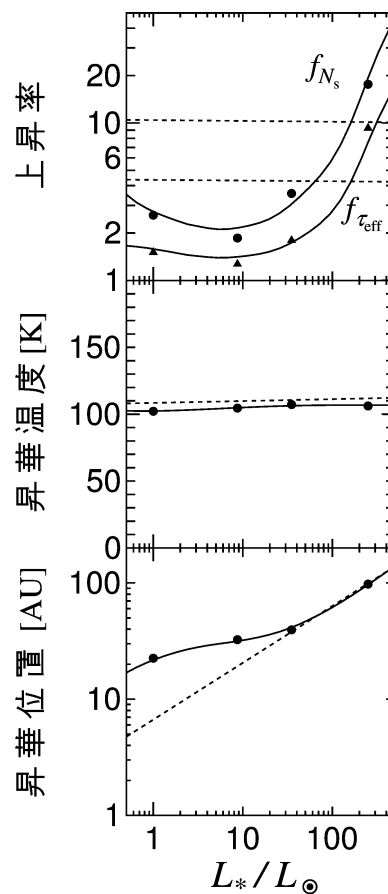


図4：面数密度 N_s と光学的厚さ τ_{eff} のピークの大きさとピークの温度と位置の中心星光度 L_* との関係. ここで, 中心星光度は, 太陽光度 $L_\odot$ で規格化されている. 黒点は図3のような数値計算を行なって得られた結果. 実線は, 近似的解析解によって得られた結果. 両者, 非常に良く一致している. また, 点線はデブリの光学特性を完全吸収体として求めたものを参考のため載せた.

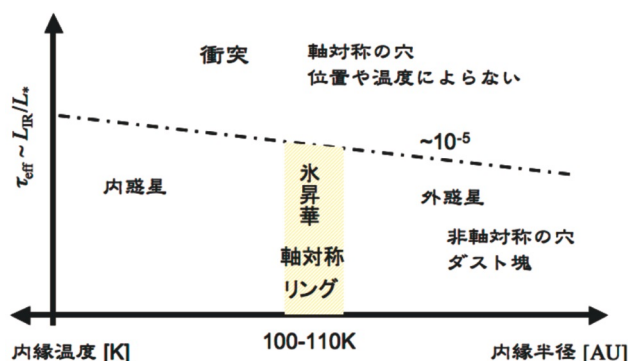


図5：デブリ円盤の内縁の位置や温度による分類.

要因によって開く. 穴の位置が図で決まる位置にあるならば, それは昇華によって開いた穴だろう. そのような穴の縁では, ダストが溜りリングを形成しているだろう. それ以外の場所に穴があるならば, それは惑星の効果を示すだろう. このような穴は, 惑星の重力の影響で非軸

対称な（丸くない）穴を開けるだろう。また、母天体の微惑星帯の存在位置と惑星の存在位置にも制限が与えられる。昇華穴よりも内側に穴がある場合、その穴の内側に惑星が存在し、微惑星帯は実際の穴の位置と昇華穴の間にあるだろう。一方、昇華穴より実際の穴が外側にある場合は、惑星は実際の穴のすぐ内側にあり、微惑星帯はその外側に存在するだろう。

現在、発見されている多くのデブリ円盤は「衝突支配デブリ円盤」である。高分解の観測でなければ、「移動支配デブリ円盤」も観測できるようになってきた。将来、高分解の観測が可能になれば、「移動支配デブリ円盤」における、惑星の位置や微惑星帯の位置を明かにできるだろう。

参考文献

- 1) C. Dominik, G. Decin *Astrophys. J.* **598** (2003) p.626.
- 2) E. W. Washburn, International Critical Tables of Numerical Data Physics, Chemistry and Technology (Vol. III). McGRAW-HILL BOOK COMPANY, Inc. NEW YORK AND LONDON, 1992
- 3) J. A. Burns, P. L. Lamy, & S. Soter, *Icarus* **40** (1979) p.1
- 4) H. Kobayashi, S. Watanabe, H. Kimura, & T. Yamamoto, *Icarus in press* (2008)
- 5) H. Kobayashi, S. Watanabe, H. Kimura, & T. Yamamoto, submitted to *Icarus* (2008)

(2008年1月15日 改訂受付)

Sublimation of Icy Dust in Planetary Systems

Hiroshi Kobayashi
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Hiroshi Kimura
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Sei-ichiro Watanabe
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Tetsuo Yamamoto
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

abstract:

In a disk with a low optical depth, dust particles radially drift inward by the Poynting-Robertson (P-R) drag rather than are blown out by stellar radiation pressure following destructive collisions. We investigate the radial distribution of icy dust composed of pure ice and refractory materials in dust-debris disks taking into account the P-R drag and ice sublimation. We find that icy dust particles form a dust ring by their pile-ups at the edge of their sublimation zone, where they sublime substantially at the temperature 100-110K. The distance of the dust ring is 20-35AU from the central star with its luminosity $L_* \lesssim 30L_\odot$ and $65 (L_*/100L_\odot)^{1/2}$ AU for $L_* \gtrsim 30L_\odot$, where $L_\odot$ is the solar luminosity. The effective optical depth is enhanced by a factor of 2 for $L_* \lesssim 100L_\odot$ and more than 10 for $L_* \gtrsim 100L_\odot$. The optical depth of the outer icy dust disk exceeds that of the inner disk filled with refractory particles, the residue of ice sublimation, which are further subjected to the P-R effect. As a result, an inner hole is formed inside the sublimation zone together with a dust ring along the outer edge of the hole.

小林 浩

北海道札幌市北 19 条西 8 丁目
北海道大学低温科学研究所
電話 : 011-706-5486 FAX : 011-706-7142
E-Mail: hkobayas@lowtem.hokudai.ac.jp

木村 宏

北海道札幌市北 19 条西 8 丁目
北海道大学低温科学研究所
電話 : 011-706-5476 FAX : 011-706-7142
E-Mail: hiroshi_kimura@lowtem.hokudai.ac.jp

渡邊誠一郎

愛知県名古屋市千種区不老町
名古屋大学環境学研究科
電話 : 052-789-3015 FAX : 052-789-3013
E-Mail: seicoro@eps.nagoya-u.ac.jp

山本哲生

北海道札幌市北 19 条西 8 丁目
北海道大学低温科学研究所
電話 : 011-706-5474 FAX : 011-706-7142
E-Mail: ty@lowtem.hokudai.ac.jp