

白色矮星周りの岩石・水蒸気円盤の降着進化： 重元素観測から惑星組成の復元を目指して



奥谷 彩香

〈国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ayaka.okuya@nao.ac.jp

惑星の組成はその形成・進化を理解するうえで重要だが、太陽系外惑星の固体組成は観測的な制約が難しくいまだ明らかではない。組成推定の新たな観測対象として、白色矮星大気のリチウムやその周囲のダストが注目されている。これらの起源はかつて星周りに存在した（小）惑星であるとされており、上記の観測から（小）惑星の組成を復元できる可能性がある。我々はその実現を目指して、岩石天体や氷天体の破片が白色矮星周りに作るダスト・ガス円盤の星への降着を計算した。その結果、氷を少量含む天体を起源とする円盤では、水蒸気からのガス抵抗によって岩石ダストの落下が加速し、その反作用で水蒸気降着が抑制されることで観測を再現しうることが明らかになった。本稿では、惑星科学に関わる白色矮星の観測および理論研究の課題をレビューし、上記の研究成果を紹介する。

1. 太陽系外惑星の固体組成

1995年に人類史上初となる太陽系外惑星が発見されて以来、5,000個を超える系外惑星が発見されてきた。系外惑星の姿は多様であるが、その半径・軌道周期に着目して分類を行うと、地球の数倍以下の惑星半径を持つ短周期惑星が宇宙に遍在することが明らかになった[1]。これらの惑星は質量の大部分を固体が占めると考えられ、我々の住む地球のような岩石惑星を含む可能性がある[2]。これら固体惑星の性質や起源を明らかにすることは、「地球は宇宙において特別な存在か?」という人類の根源的な問いの解明につながる極めて重要な課題である。

惑星の性質やその形成・進化史を明らかにする上で、惑星の内部組成は重要な情報である。惑星は若い星を取り巻く原始惑星系円盤中で固体物質が合体・成長して形成される。そのため、その組

成は材料となる固体物質が存在した形成当時の円盤の環境や物質輸送の過程を強く反映している。また、最終的な惑星組成は、その後の天体同士の衝突進化や惑星内部の熱進化の影響を受けて決まる。一方、惑星の内部組成は地表の溶融や脱ガスを通じて大気の形成やその組成、プレートテクトニクスなどを通じて表層環境を支配しうするため、惑星上での生命の居住可能性にも直接的な関わりを持つ。

しかしながら、系外固体惑星がどのような物質で構成されているのかは大きな謎である。惑星の内部モデルより導かれた質量・半径の対応関係から、その組成を推定する試みが盛んに行われているが(e.g., [3, 4])、1つの物理量から組成を一意に確定することは不可能であるという根本的な問題がある[5, 6]。というのは、惑星は鉄コア、岩石マントル、水氷の層、大気などの複数成分で構成されている可能性があり、こういった成分の組

み合わせや割合を変えることで、同じ質量・半径の解が導かれうるためである。なお、質量・半径関係から惑星の大気・バルク組成の組み合わせがいくつか提示されていた場合、透過分光観測から大気組成を調べてバルク組成を制約するという手段もある。しかし、大気中に雲やヘイズが存在して大気分子の吸収特徴を覆い隠している惑星も多く (e.g., [7]), 現段階ではバルク組成の特定にまでは至っていない。

この問題を解決しうる新たな切り口の一つ^{*1}として、我々は白色矮星大気の高元素とその周囲のダストに注目してきた。これらはかつて星周りに存在した固体の惑星・小惑星が破壊されて降り積もったものだと解釈されている [10]。したがって、白色矮星の大気およびその周囲の高元素の観測から、その起源となった惑星・小惑星の組成を明らかにできる可能性がある。小惑星サイズの天体が合体・成長して最終的には惑星へ成長していったと仮定すると、系外小惑星の組成を明らかにすることは、惑星の材料物質を制約することにつながるだろう。高元素が検出された白色矮星は既に1,000個を超え、観測から惑星組成を復元する理論的枠組みが整えば、すぐにでも統計的な議論を開始できる状況にある。そのためには、どのような天体がどのように高元素を供給しているか明らかにすることが不可欠だ。本記事では、白色矮星の観測とそれに基づく理論研究の現状・課題をまず解説し、降着天体の組成復元を見据えて、相変化する複数成分の円盤から星表面への質量降着をモデル化した我々の研究 [11] について紹介する。

2. 白色矮星系の惑星

図1に、白色矮星大気中の高元素および星周囲のダスト・ガス円盤の観測を手掛かりに推測され

ている白色矮星周りの惑星系の概観を示す。以下では、その詳細を一つずつ説明していく。

2.1 白色矮星大気の高元素観測

0.8-8 M_{\odot} の星は後期主系列進化の末に、「白色矮星」と呼ばれる高温な中心核を残す。白色矮星の質量は太陽程度であるが、そのサイズは太陽の1/100倍程度と小さく、重力が非常に強い。そのため、軽い元素であるH/Heは星表層にとどまるが、それよりも重い元素は星深部に向かって速やかに重力沈降する。特に、年齢 $\sim 10^7$ 年以降の冷えて暗くなった白色矮星では、輻射による浮揚が高元素に働かなくなるため、常にクリアなH/Heの表層を持つはずである [12]。より低温な年老的白色矮星では、対流層が発達することで重力沈降の速度が低下するが、沈降のタイムスケールは白色矮星の寿命 ($\sim 10^{10}$ 年) と比べると依然として非常に短い。具体的には、Hを大気主成分とする白色矮星での沈降時間は 10^2 - 10^4 年、Heを大気主成分とする白色矮星では 10^2 - 10^6 年程度の範囲にあると見積もられている [13]。

ところが、年齢 $\sim 10^7$ 年以降の白色矮星の大気を分光観測すると、単独星として存在する白色矮星の約25-50%という高確率で高元素の吸収線が検出される [14]。この高元素汚染は、その沈降時間を大幅に超える白色矮星年齢 $\sim 10^{10}$ 年まで普遍的に検出されていることから、高元素が星外部から長期間にわたって供給され続けていると解釈されている。その起源として最有力視されているのが、惑星や小惑星の降着である。実際、測定された高元素組成は揮発性元素の枯渇を示しており、惑星を構成するような固体物質の元素組成に類似した傾向を持つ [10]。

この説に則り、白色矮星大気の高元素組成が降着天体の組成に等しいと仮定して、岩石を構成す

^{*1} 別の可能性として、主系列星まわりを短周期で蒸発しながら公転する固体コアの「解体惑星」の分光観測がある [8]。解体惑星の観測から惑星組成を推定する方法については、過去の天文月報におけるSPICA特集 [9] に詳しく紹介されているので、興味がある方はご参照いただきたい。

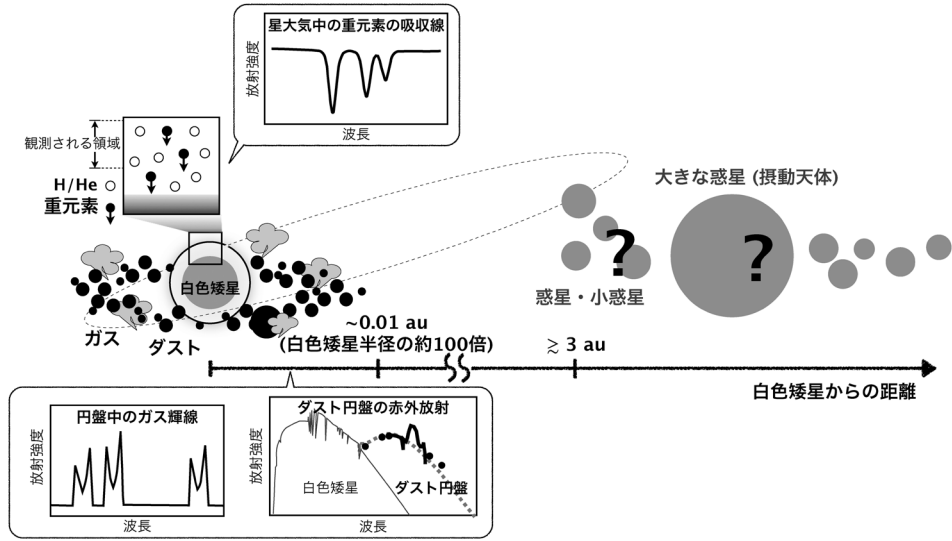


図1 白色矮星大気中の重元素およびその周囲のダスト・ガスの特徴を引き出す観測と、それらを供給していると考えられる遠方惑星系の概略図

る主要元素 (Mg, Si, Fe, O) や固体化合物を構成するその他の元素 (Al, Ca, Cなど) に着目した組成推定が行われてきた。特に、太陽系内の天体や隕石の組成との比較が盛んに行われている [10, 15-18]。それらによると、降着天体は、隕石中に見られる Ca と Al に富む高温凝縮物 (Ca-Al-rich inclusion) や炭素/酸素比が1を超えるような環境で凝縮するとされる炭素化合物よりも、むしろ Mg, Si, Fe, O が質量の大部分を占める地球のバルク組成に近いことが主張されている。さらに、地球のコア、マントル、地殻などに似た元素組成を持つものも一定数存在することから、天体の分化/未分化についての議論も始まっている [19]。

一方、カイパーベルト天体や彗星のような氷に富んだ天体が降着している系は、現状ではごく少数であると考えられている。He を大気主成分とする白色矮星では、それよりも軽い H は重力沈降しないため、過去に水/氷が降着した可能性*2

を示す [22]。水素は多くの系で検出されているものの、高温の白色矮星で水素が降着物質に占める質量割合を推測したところ、約 1/1000 以下という低い値が報告された [23]。一方で、観測された金属元素に酸化物として割り振った後に余る酸素の存在は、現在進行中の水/氷降着の証拠となりうる (e.g., [24])。しかし、このような余剰酸素が検出された系は现阶段で数個にとどまっている。

2.2 重元素の降着過程：何がどのように落ちてくるのか？

前節で述べたように、白色矮星大気中の重元素組成をもとに、太陽系外の固体惑星・小惑星またはその構成物質の組成を推定しうる可能性がもたらされた。これを組成推定法として確立するためには、天体が元素レベルに分解され、星表面へと降着するまでの過程を明らかにする必要があるだろう。

その手掛かりとなるのが、重元素汚染された白色矮星の周りにしばしば観測されるダスト円盤の

*2 He を主成分とする白色矮星大気中の H は星自身を起源とする可能性もあり [20]、降着天体起源の H との完全な切り分けはできていない。しかし、星の大気進化の理論予測では説明できないほど多量の H を含む白色矮星が複数見つかったことや、重元素の検出率と H の検出率に相関関係が見られることから [21]、降着天体由来の H が少なからず寄与していると考えられている。

存在である [25, 26]. 惑星・小惑星は星近傍で潮汐破壊され、その破片は星周囲にダスト円盤を作ると考えられている。ダストの熱放射は赤外超過として観測され、共通して~1000 Kの波長にピークをもつ [27, 28]. 平衡温度を仮定すると、ダストは白色矮星半径の数10倍程度の近傍領域に分布していることになる。そのようなダストは、巨星期に星に飲み込まれるか惑星状星雲期に強い恒星風によって吹き飛ばされてしまうため、白色矮星期になって新たに供給されたものであるとするのが自然である。さらに、円盤の外縁はロシュ限界^{*3}付近に位置すると推測されること [29] や、複数の円盤で波長10 μm 付近にシリケート鉱物特有のフィーチャーが観測されていることから [27, 28, 30], 小惑星の潮汐破壊による円盤形成説が強く支持される。解体途上にある小惑星のトランジットも複数の系で観測され始めている [31-33].

周白色矮星円盤は星表面への物質降着の最終過程を担う。ダストは星に近づくと高温になり、最終的には昇華しガスとなって星に降着すると考えられる [34, 35]. 実際、ダスト円盤が観測された系で、円盤の回転で生じるドップラーシフトによってダブルピークを示すガス輝線が検出されている [36, 37]. 主にCa, Mg, Feなどの難揮発性元素の輝線が検出されており、これらの元素は星大気中でも観測される。なお、ピークの波長のずれをもとにガスの中心星からの距離を求めると、ガスはダスト円盤と同じ軌道領域に共存することが示されている [38, 39]. ガスは小惑星の破片同士の高速度衝突によっても生じている可能性がある [40].

では、降着円盤の起源である惑星・小惑星はそもそもどこからやって来るのか。上述したように、巨星期において中心星の半径は膨張し、最大で

1 auを超える [41]. 星に飲み込まれた惑星は完全に蒸発／破壊されるとすると、数auより外側の遠方領域の天体のみが白色矮星時代まで生き残ることになる。生き残った天体は、中心星の質量損失によって軌道半径が2-3倍ほど大きくなる。このような白色矮星周りの遠方惑星系は未だ発見されていないが、力学シミュレーションに基づく、微惑星帯近傍に惑星が存在すれば、小惑星は惑星からの重力散乱を受けてその何割かが星に接近する軌道を取るようになる [42-44]. やがて小惑星の近点がロシュ限界内に入ると、天体は潮汐破壊されて降着円盤を形成すると期待される。なお、摂動源となる惑星は、木星サイズの重い惑星ではなく地球質量の数倍程度の軽い惑星の場合に、観測された降着率の時間進化をよく再現する [44].

以上のシミュレーションの結果、多様な軌道領域から白色矮星近傍に天体が供給されることが明らかとなった。すなわち、スノーラインより内側に位置する岩石天体も、スノーラインより外側の岩石と氷の混合天体（以降、氷天体と表記）も重元素の起源となる可能性がある。星大気の高質量元素やガス円盤の組成は前者と整合的である。しかし、星に近いほど天体同士の衝突進化による質量損失が大きくなるので、岩石微惑星帯で現在観測されている典型的な重元素の降着率を再現しようとする、太陽系の小惑星帯の 10^2 - 10^4 倍という非常に大きな質量が要求される [45, 46]. 一方、後者の氷微惑星帯であれば、衝突進化が穏やかで十分な質量を白色矮星期まで残しうするため [47], 力学進化的な観点からはむしろ起源としてもっともらしい。組成と力学それぞれが支持する供給源の不一致は、白色矮星分野における大きな謎として残されている [48]^{*4}. 起源天体の位置の制約

^{*3} 惑星の自己重力が主星からの潮汐力よりも大きく、惑星が潮汐破壊されずに主星に近づける距離の限界のこと。ロシュ限界は主に惑星・主星の密度および主星の半径に依存し、白色矮星周りにおける岩石天体のロシュ限界は0.01 au付近に位置する。

^{*4} この謎を解決する可能性として、中心星の後期主系列期における光度上昇によって、氷天体の水が散逸するかどうか調べられた。しかし、幅広い軌道領域において、天体は光度上昇を経ても初期に獲得した水量の大部分を保持していることが天体の内部進化の理論計算により示されている [49].

は、その傍に摂動源として存在するより大きな惑星の位置の制約にも関わるため、スノーラインに対する惑星系全体の空間分布を明らかにする上でも解決すべき重要な課題である。

白色矮星の観測から惑星組成を正しく復元し、上記の起源論争に決着をつけるためにも、様々な組成の天体が形成した円盤が、星表面にどのような重元素汚染をもたらすか明らかにする必要がある。その第一歩として、我々は岩石天体および氷天体を起源とする降着円盤のモデル構築に取り組んだ。なぜなら円盤内の降着過程によって、円盤から星表面へ降着するフラックスの組成は円盤の初期組成（天体組成）とは異なる可能性があるからだ。特に、小惑星を構成する主要な固体物質である岩石と氷は昇華点が異なるため、ダストとガスで降着過程が異なる可能性がある。

3. 降着円盤モデルの構築

本章では、まず先行研究の岩石1成分の円盤モデルとその問題点を説明する。続いて、我々の構築した岩石・氷成分の円盤モデルとその計算結果を紹介し、星大気中で観測されている重元素の降着率および組成との比較を行う。

3.1 先行研究の円盤モデルと課題

星表面への質量降着率は、円盤内でのガス／ダスト降着過程を明らかにする上で重要な指標である。観測より推測される降着率^{*5}は 10^6 - 10^{11} g/sの範囲に及ぶ [51, 52]。一方、白色矮星近傍の強い放射環境下では輻射圧が効率的に角運動量を奪うため、Poynting-Robertson (PR) 効果が主要なダスト落下メカニズムの一つだと考えられているが、その降着率には $\sim 10^8$ g/sという上限値が存在する可能性が理論的に示されている [53]。これは、円盤を持つ系で典型的とされる $10^8 - 10^{11}$ g/sという高い観測降着率 [27] を説明できない。

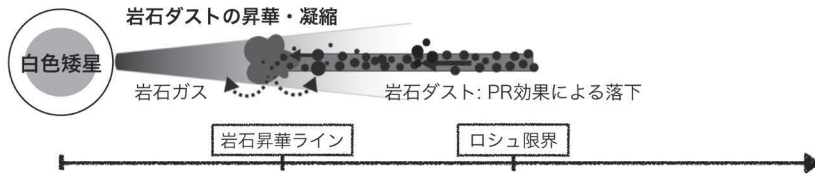
そこで、PR効果による降着に加えて、岩石ダストが昇華して生じる岩石ガスからの空気抵抗によって、ダスト落下が促進されるというアイデアが提唱された [34, 35]。岩石ガスは円盤内側および外側に粘性拡散し、昇華ライン外側の岩石ダストに空気抵抗を与えて角運動量を引き抜き、中心星方向へと落下させる。このガス抵抗によるダスト落下は、原始惑星系円盤における微惑星形成の障壁としてよく知られている (e.g., [54])。白色矮星円盤では、逆にこの現象を利用して降着率を上げようという試みである。ダスト落下の加速により昇華ラインに到達するダストが増加すると、そこで生成する岩石ガスも増加し、ガス抵抗によるダスト落下がさらに加速する。結果、暴走的な降着率上昇が起こり、 10^8 - 10^{11} g/sという高い観測降着率が再現されるようになる。

このアイデアの本質は、ダストとガスの共存だ。上記のモデルでは昇華ライン外側でのガスの再凝縮は考慮されていない。しかし、再凝縮はガスを除去し、両者の共存を解消しうる。そこで、我々は凝縮を扱える岩石ダスト／ガス円盤モデルを構築し、(1) 10^8 g/s以上の降着率が実現可能か調べた。次節で詳細を述べるが、その答えは否である。

一方で、仮に、昇華温度の低い揮発性物質由来のガス（例えば水蒸気など）が円盤中に含まれていれば、水蒸気からの空気抵抗を通じて降着率が上がる可能性があるかもしれない。2章で紹介したように、力学計算では岩石天体のみならず氷天体が星近傍に送り込まれる可能性が示されており、氷天体は水蒸気を供給する。ただし、岩石ダスト／ガス・水蒸気円盤の進化を調べる際には、(2) 星の大気組成が岩石構成元素に富んでいるという観測事実にも注意を払う必要がある。(2) を実現する鍵は、ダストからガスへの反作用 (e.g., [55]) にある。空気抵抗によってダストが

^{*5} 白色矮星の対流層における重元素沈降と星外部からの降着が定常状態にあると仮定し、観測より得られた各元素の対流層中の質量を沈降時間で割ることで降着率が推測される [50]。対流層中の各元素の質量は、白色矮星大気のスเปクトル中の各元素の吸収線と大気モデルを用いて求められる。

(a) 岩石天体が作る円盤



(b) 氷天体が作る円盤

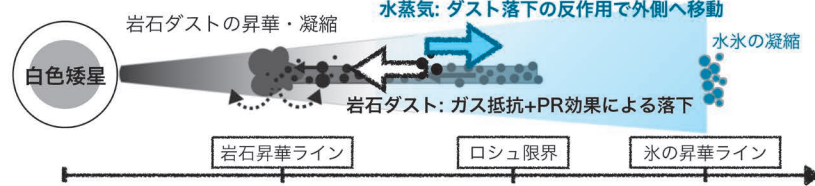


図2 岩石天体および氷天体を起源とする円盤の進化モデルの概要

失った角運動量をガスである水蒸気が受け取ることで、その降着が抑制されるかもしれない。水蒸気を含む円盤においては、(1)と(2)を同時再現する可能性を調べていく。

3.2 円盤モデル

岩石天体を起源とする円盤では、天体の潮汐破壊によって岩石ダストがロシュ限界内にばら撒かれ、ダストはその内側に位置する岩石の昇華ラインに到達すると岩石ガスになる。氷天体を起源とする円盤では、水氷の昇華ラインはロシュ限界より外側に位置する^{*6}ため、氷の破片は水蒸気として円盤に供給されるとする(図2)。これらダスト・ガスの進化を追うにあたって、原始惑星系円盤のスノーラインを跨ぐ氷ペブルの輸送モデル[56, 57]を参考にしたが、固体天体を起源とする周白色矮星円盤と原始惑星系円盤との最大の違いは、H/Heの背景ガスが存在しないことである。そのため、昇華・凝縮がガス円盤の有無を支配し、岩石ガス/水蒸気の密度分布がガス抵抗によるダスト落下速度に直接影響を与える。加えて、ダスト密度がガスの密度よりもはるかに大きい

ため、ダストからガスへの反作用は無視できず、ガスの移流速度や密度分布に影響を与え、巡ってはダストの落下速度を再び変化させる。

したがって、白色矮星周りの円盤の進化を解明するためには、共進化する岩石ダスト/ガス・水蒸気の密度分布・速度構造を自己無撞着に解くことが本質的に重要である。具体的には、昇華・凝縮によるソース・シンク(湧き出し・吸い込み)項を含む動径1次元の移流拡散方程式を各成分について解き、面密度の時間発展を計算した。ガスのシンク量は、その面密度に対応する圧力がその場の温度における飽和蒸気圧を上回っている場合、超過分をダストとして凝縮させるように計算する。

ガス抵抗によるダストの落下速度およびガスの移流速度は、両者の角運動量交換に基づいて求める。ダストの落下速度は、この速度にPR効果による落下速度を足して決定する。角運動量交換の効率は、交換に関わる領域内にあるダスト・ガス密度比で表される。ダスト・ガス密度比が大きいほどダストからガスへの反作用が強くなる。これにより、ガスは角運動量を得て内向き移動速度が

^{*6} 重元素汚染が観測されている白色矮星の温度範囲で、岩石の昇華ライン・ロシュ限界・氷の昇華ラインの相対的な位置関係は変わらない。本稿で紹介する計算結果は、円盤が観測される典型的な白色矮星の温度(10000 K)を仮定している。

低下し、場合によっては外向きに移動する。ただし、ダスト・ガス密度比が大きいと、ダスト粒子の落下速度も低下する。

3.3 岩石天体が作る円盤の降着

ここからは、新たに考慮した岩石ガスの再凝縮が円盤進化をどのように変えるかに着目して、岩石天体を作る円盤の面密度進化を見ていく。

図3に、凝縮なしの場合とありの場合のガス・ダストの面密度の時間発展を示す。初めに、岩石ダストのみをロシュ限界内にガウス分布において計算を開始した。ここでは、一つの天体が作った一つの円盤が降着し終わるまでを追跡する。凝縮なしの場合は、先行研究と同様に、岩石ガスが昇華ライン外側にも拡散してダストとガスが共存する。岩石ガスの面密度が増加し、ダストの速度がガス抵抗による落下速度で決まるようになると、ダストの落下・ガスの生成に正のフィードバックがかかり、岩石ガスの面密度が時間とともに上昇していく様子が見られる。

凝縮ありの場合、昇華ライン外側のガス面密度は昇華ラインから離れると急激に減少し、ダストとガスが共存しなくなる。これは、凝縮のタイムスケールがガスの拡散のタイムスケールよりも短く、昇華ライン外側のガス面密度分布は飽和蒸気圧のみによって決まるためである。飽和蒸気圧は温度の指数関数であり、温度は円盤外側に行くほど低いため、図3のような動径依存性を示す。このような非常に小さなガス面密度では、ガス抵抗によるダスト落下は無視できるほど遅い。その結果、凝縮なしの場合で見られたような時間経過に伴うガス面密度の上昇は起こらなくなる。

面密度進化から予想されるように、凝縮なしの場合では先行研究で提案された降着率の暴走的上昇はもはや起こらない。図4に、凝縮なし・ありそれぞれの場合における降着率の時間進化を示す。凝縮を入れると、降着率はPR効果の上限值 $\sim 10^8$ g/sで頭打ちとなり、円盤が降着し終わるまでその値を維持する。この結果は、粒子サイズ

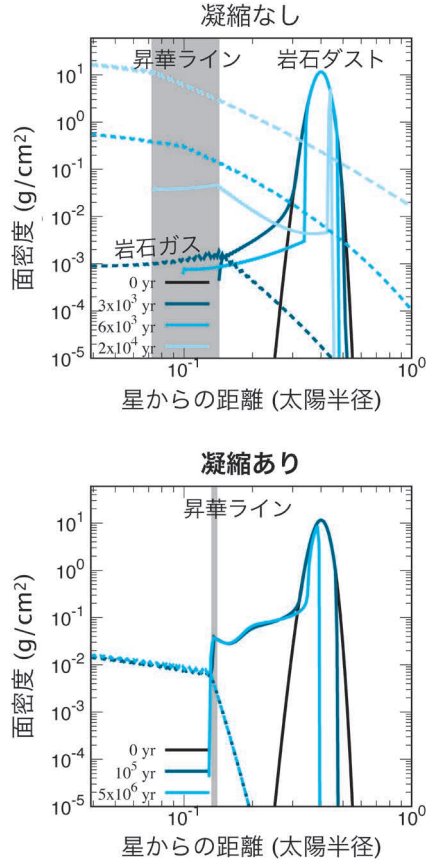


図3 岩石ガスの凝縮を考慮していない場合（上）と考慮した場合（下）の面密度進化（[11]の図3と図5（a）を改変）。実線が岩石ダスト、波線が岩石ガスの面密度を表す。

やガスの粘性係数パラメータなどに依存しないことを強調しておく。なぜなら、暴走降着の鍵である昇華ライン外側のガス面密度は、そのようなパラメータには依らず飽和蒸気圧によってのみ決まるためである。また、円盤質量を増やしても、円盤が光学的に厚い限り降着率は $\sim 10^8$ g/sを超えることはない。結論として、凝縮を考慮すると、岩石天体を起源とする円盤では、観測された高い降着率 10^8 – 10^{11} g/sの再現が困難である。

3.4 氷天体を作る円盤の降着

続いて、高降着率 10^8 – 10^{11} g/sを実現する可能性として、水蒸気を加えた円盤の進化を調べた。

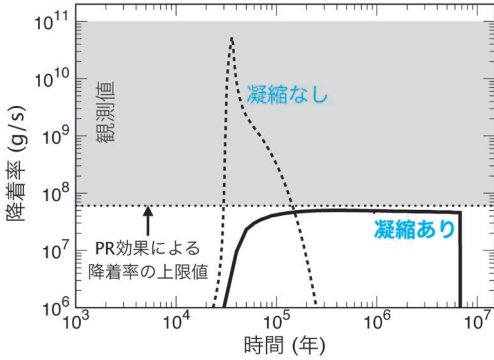


図4 岩石天体を起源とする円盤からの星表面への降着率の時間進化 ([11] の図4と図6に基づく). 実線が凝縮ありの場合、波線が凝縮なしの場合の結果を表す. PR効果による降着率の上限值を超える観測値の範囲を灰色で示す.

図5に、ある時刻の岩石ガス・ダストおよび水蒸気の面密度を例として示す。水蒸気は、 $30 R_{\odot}$ に位置するスノーラインまで拡散しており、ロシュ限界内に分布する岩石ダストと共存していることが一目瞭然である。これによって、ガス抵抗によるダスト落下速度がPR効果による落下速度を超えて、 $\sim 10^8 \text{ g/s}$ よりも大きな降着率が実現される(図6, 7)。一方で、岩石ダストと共存している領域の水蒸気面密度は、粘性拡散のみによって決まる面密度よりも低くなる。これはダストからの反作用によるものであり、円盤の進化期間を通じて共存領域のダスト・ガス密度比は一定の値(100程度)に自己調整される。この構造は、ダストからの反作用が進化を支配しているような円盤で共通の特徴であり、水蒸気降着の抑制を引き起こす。

円盤の初期質量と岩石・氷比を変え、岩石ガスおよび水蒸気の降着率への影響を見る。図6に、初期の岩石・氷の質量比が1の場合の降着率進化を示す。いずれの円盤質量でも、ガス抵抗によってダストの落下速度が上がり、岩石成分の降着率はPR効果による降着率の上限值より高い値を実現している。さらに、降着率は円盤質量にほぼ比例して増加する。これは、ダスト落下速度のガス

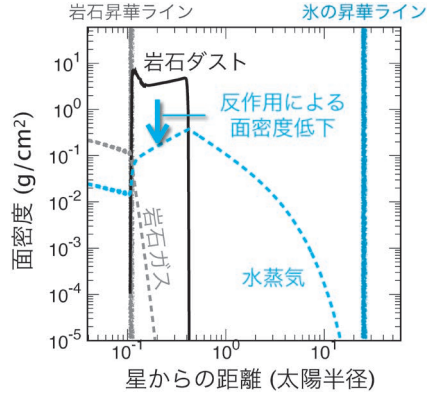


図5 氷天体を起源とする円盤の岩石ダスト(黒実線),岩石ガス(灰色破線),水蒸気(水色破線)の面密度分布のスナップショット ([11] の図8(a)を改変).ガスとダストの共存域におけるガス成分の面密度低下は、ダストからガスへの反作用が進化を支配しているような円盤で典型的な挙動である。

(主に水蒸気)の面密度依存性から来ており、水蒸気を含む円盤に特有のものである。これにより、水蒸気円盤の初期質量を変えることで、 $10^8\text{--}10^{11} \text{ g/s}$ という幅広い観測値を説明しうることが期待される。

水蒸気の降着率は、岩石円盤が降着し終わる 5×10^4 年までの期間は、岩石ガスの降着率よりも一桁ほど低い値に抑制されている。これは、岩石ダストと水蒸気が共存する領域で与えられるダストからの反作用によるものである。しかし、岩石ダストが降着しきると反作用が働かず、水蒸気の降着率は岩石の降着率を上回る。この期間の降着率は、揮発性成分に富んだ光球面を作り出してしまいうため、観測と整合的ではない。

そこで、初期の岩石・氷の質量比を10に上げた結果を図7に示す。岩石・氷の質量比が1の場合との大きな違いは、円盤進化の全期間を通じて、岩石降着率が水蒸気降着率よりも常に10倍程度*7大きい点である。これは、水蒸気円盤が枯渇するまで岩石ダストが存在し、反作用を与え続けることで水蒸気降着を抑制するためである。

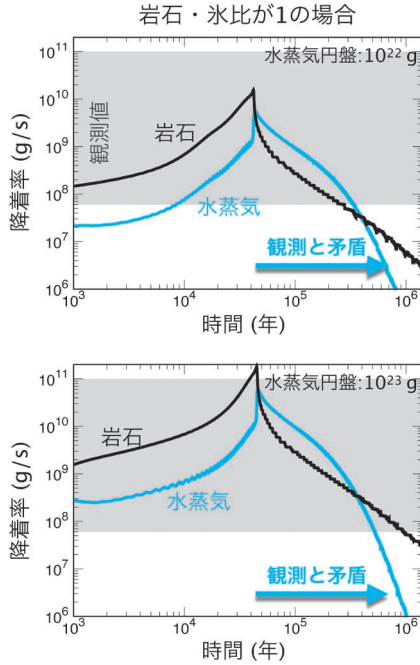


図6 岩石・氷比が1の水天体を起源とする円盤からの岩石（黒線）および水蒸気成分（水色線）の降着率の時間進化（[11]の図9を改変）。下図は、上図よりも水蒸気円盤の初期質量が10倍大きい場合の結果。図4同様、PR効果による降着率の上限値を超える観測値の範囲を灰色で示す。

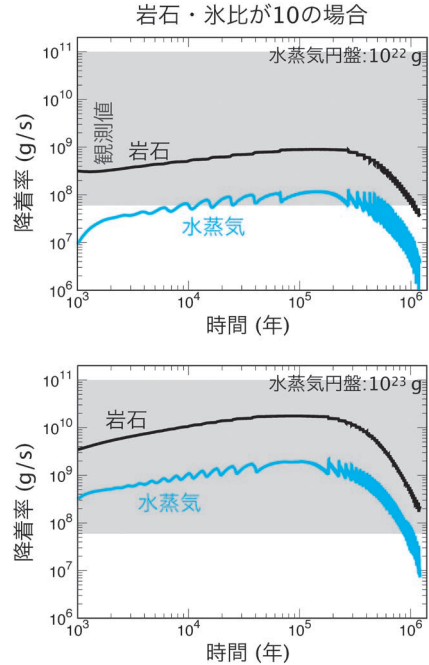


図7 岩石・氷比が10の水天体を起源とする円盤からの岩石（黒線）および水蒸気成分（水色線）の降着率の時間進化（[11]の図10を改変）。

一方、ダスト・ガス比が大きくなるために岩石の降着率はやや下がるが、ガス抵抗によるダスト落下の促進はまだ効率的であり、降着率は 10^8 g/sを超えて円盤質量依存性をもつ。なお岩石・氷の質量比をさらに上げていくと、ガス抵抗によるダストの落下速度が低下し、降着率は 10^8 g/sに漸近する。

以上より、初期の岩石・氷の質量比が10程度の円盤において、(1) 10^8 g/s以上の高い降着率と(2) 岩石に富んだ光球面を同時に再現できることがわかった。これは、S型小惑星のような乾いた岩石天体でもなく、カイパーベルト天体のような氷に富んだ天体でもなく、C型小惑星のよう

な少量の水を含む岩石天体が白色矮星円盤の起源となり、高い降着率を伴う汚染を引き起こしている可能性を示唆する。特に、円盤総質量が 10^{23} – 10^{24} g程度の場合で観測値が再現されたことより、VestaからCeresサイズの系外小惑星が降着しているのかもしれない。

3.5 未解決問題？：揮発性元素の観測との比較

前節で示したように、少量の水蒸気を含む円盤では(1)・(2)を同時に再現するものの、水蒸気が質量にして10%ほど含まれる。現状の白色矮星大気観測の精度ではこの10質量%ほどの水蒸気成分を測定するだけの精度はないため、これが観測的に許容されるか否かについて、今はまだ結論づけることができない。

しかし、観測から制約された水素の降着率は今

*7 岩石と水蒸気の降着率の比である10倍という値は、初期の岩石・氷の質量比から来ているのではなく、角運動量交換の効率によって決まっていることに注意。

回のシミュレーションの結果よりも一桁ほど小さい。2.1節で述べたように、13000 K以上のヘリウム大気型の白色矮星57個について、水素および重元素の降着率の平均値を求めた結果、水素の降着率は重元素の降着率の0.1質量%以下であると推定された [23]。一方、我々の計算では水蒸気成分10質量%程度が含まれるので、水素が占める割合は10質量%×2/18~1質量%となる。

水素の降着を妨げる一つの可能性として、白色矮星の高エネルギー放射の影響が考えられる。上記で取り上げた 10^4 K以上の高温な白色矮星では、黒体放射のピークが紫外波長域に存在する。水は紫外線によって水素と酸素に光解離し、水素はLyman- α 線の輻射圧によって星と反対方向へ加速されうる [58]。また、紫外線による光電離でガスが熱エネルギーを得て、散逸する可能性もある。現在、光化学反応を計算してこの可能性を調べている。

我々のシミュレーション結果と白色矮星周囲のガス円盤の観測にはさらなる不一致がある。我々の計算では、水蒸気と岩石ダストが共存する領域では、前者の面密度が後者の面密度を大きく上回る(図5)。一方、円盤観測では難揮発性元素のガス輝線は複数の系で検出されているのに対し、HやOなどの揮発性元素のガス輝線は未だ1系でしか検出されていない [59]。この不一致をめぐっては、円盤が真に揮発性元素に枯渇しているのか、それとも水蒸気/水素/酸素のガス円盤の温度や構造、または観測波長帯に起因するものなのかを明らかにする必要がある。白色矮星の放射が揮発性元素のガス円盤に与える影響を調べることで、この問題にもアプローチできるだろう。

4. まとめと今後の展開

本稿では、白色矮星大気の高質量元素観測からその起源である惑星組成を復元することを目指して、岩石天体および氷天体がつくるダスト・ガス円盤からの星表面への質量降着をモデル化した。計算の結果、少量の水を含む天体を起源とするような

円盤において、水蒸気からのガス抵抗によって岩石ダストの落下が加速し、ダストからの反作用で水蒸気の降着が抑制されることで観測を再現できる可能性が明らかになった。今後は白色矮星の放射が水蒸気に与える影響をモデルに組み込み、揮発性元素の観測との整合性をとったうえで、降着する天体の岩石・氷比を制約していきたい。

ここまで岩石ダストとして1成分のシリケートを仮定してきたが、実際はその限りではない。ダストの組成は元素レベルに分解される前の惑星の鉱物組成に等しく、光球面の元素測定に加えて、降着天体の組成に強力な制約を与える。我々は、ダスト円盤の赤外スペクトル中に現れる鉱物のフィーチャーを手掛かりに、具体的なダスト組成の制約を進めている。特に、現在稼働中の赤外宇宙望遠鏡James Webb Space Telescopeを用いた分光観測によって、ダスト鉱物組成の高精度な測定が可能になることが期待される。

白色矮星の観測は系外惑星組成を直接的に測定しうる現状唯一の手段だが、その面白さはそれだけにとどまらない。今回紹介した我々の研究によって、復元が見込まれる降着天体の組成の情報は、かつて星周りに存在した惑星系の姿とその進化史を明らかにする可能性を持つ。岩石・氷比はスノーラインに対する微惑星帯の位置を知る重要な手がかりであり、鉱物の種類および形態は小惑星のサイズやその内部の熱進化に深く結びついている。微惑星帯の位置・進化の歴史は、その近傍に摂動源として存在し、力学的な影響を及ぼし続けたより大きな惑星の位置や質量の制約にもつながるだろう。今後は、これらのピースをつなぎ合わせて、惑星・微惑星帯の空間分布、形成、進化過程などをどこまで解明できるか調べていく予定である。

重元素汚染が観測されている白色矮星は、主に2-3太陽質量の主系列星を起源とする [60]。そのような星周りでは主系列期において系外惑星の観測が困難であるため、白色矮星は中質量星周りの系外惑星系の姿を覗く新たな眼となる可能性がある。

謝 辞

本稿の内容は、筆者の査読論文 [11] と博士論文の一部に基づいており、指導教員であった井田茂教授、共同研究者である奥住聡准教授、兵頭龍樹氏に深く感謝申し上げます。また、本稿の3.5節および4節の今後の展開は、生駒大洋教授との議論に基づくものです。最後に、本稿の執筆の機会をくださった岩崎一成氏にも御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Howard, A. W., et al., 2012, ApJS, 201, 15
 [2] Weiss, L. M., & Marcy, G. W., 2014, ApJ, 783, L6
 [3] Fortney, J. J., et al., 2007, ApJ, 659, 1661
 [4] Agol, E., et al., 2021, PSJ, 2, 1
 [5] Seager, S., et al., 2007, ApJ, 669, 1279
 [6] Rogers, L. A., & Seager, S., 2010, ApJ, 712, 974
 [7] Kreidberg, L., et al., 2014, Nature, 505, 69
 [8] Okuya, A., et al., 2020, ApJ, 901, 171
 [9] 平野照幸, 佐川英夫, 2020, 天文月報, 113, 784
 [10] Jura, M., & Young, E. D., 2014, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 42, 45
 [11] Okuya, A., et al., 2023, MNRAS, 519, 1657
 [12] Fontaine, G., & Michaud, G., 1979, ApJ, 231, 826
 [13] Paquette, C., et al., 1986, ApJS, 61, 197
 [14] Zuckerman, B., et al., 2003, ApJ, 596, 477
 [15] Zuckerman, B., et al., 2007, ApJ, 671, 872
 [16] Gänsicke, B. T., et al., 2012, MNRAS, 424, 333
 [17] Wilson, D. J., et al., 2016, MNRAS, 459, 3282
 [18] Doyle, A. E., et al., 2019, Science, 366, 356
 [19] Hollands, M. A., et al., 2018, MNRAS, 477, 93
 [20] Koester, D., & Kepler, S. O., 2015, A&A, 583, A86
 [21] Gentile Fusillo, N. P., et al., 2017, MNRAS, 468, 971
 [22] Jura, M., & Xu, S., 2010, AJ, 140, 1129
 [23] Jura, M., & Xu, S., 2012, AJ, 143, 6
 [24] Farihi, J., et al., 2013, Science, 342, 218
 [25] Zuckerman, B., & Becklin, E. E., 1987, Nature, 330, 138
 [26] Rocchetto, M., et al., 2015, MNRAS, 449, 574
 [27] Jura, M., et al., 2007, ApJ, 663, 1285
 [28] Jura, M., et al., 2009, AJ, 137, 3191
 [29] Jura, M., 2003, ApJ, 584, L91
 [30] Reach, W. T., et al., 2005, ApJ, 635, L161
 [31] Vanderburg, A., et al., 2015, Nature, 526, 546
 [32] Vanderbosch, Z., et al., 2020, ApJ, 897, 171
 [33] Guidry, J. A., et al., 2021, ApJ, 912, 125
 [34] Rafikov, R. R., 2011a, MNRAS, 416, L55
 [35] Metzger, B. D., et al., 2012, MNRAS, 423, 505
 [36] Gänsicke, B. T., et al., 2006, Science, 314, 1908
 [37] Manser, C. J., et al., 2016, MNRAS, 455, 4467
 [38] Brinkworth, C. S., et al., 2009, ApJ, 696, 1402
 [39] Melis, C., et al., 2010, ApJ, 722, 1078
 [40] Farihi, J., et al., 2018, MNRAS, 481, 2601
 [41] Iben, J., Icko, 1991, ApJS, 76, 55
 [42] Debes, J. H., & Sigurdsson, S., 2002, ApJ, 572, 556
 [43] Bonsor, A., et al., 2011, MNRAS, 414, 930
 [44] Mustill, A. J., et al., 2018, MNRAS, 476, 3939
 [45] Debes, J. H., et al., 2012, ApJ, 747, 148
 [46] Frewen, S. F. N., & Hansen, B. M. S., 2014, MNRAS, 439, 2442
 [47] Bonsor, A., & Wyatt, M., 2010, MNRAS, 409, 1631
 [48] Farihi, J., 2016, New A Rev., 71, 9
 [49] Malamud, U., & Perets, H. B., 2016, ApJ, 832, 160
 [50] Koester, D., & Wilken, D., 2006, A&A, 453, 1051
 [51] Farihi, J., et al., 2009, ApJ, 694, 805
 [52] Farihi, J., et al., 2010, MNRAS, 404, 2123
 [53] Rafikov, R. R., 2011b, ApJ, 732, L3
 [54] Adachi, I., et al., 1976, Prog. Theor. Phys., 56, 1756
 [55] Nakagawa, Y., et al., 1986, Icarus, 67, 375
 [56] Hyodo, R., et al., 2019, A&A, 629, A90
 [57] Hyodo, R., et al., 2021, A&A, 646, A14
 [58] Bourrier, V., & Lecavelier des Etangs, A., 2013, A&A, 557, A124
 [59] Gentile Fusillo, N. P., et al., 2021, MNRAS, 504, 2707
 [60] Koester, D., et al., 2014, A&A, 566, A34

Accretion of Rocky/Icy Disks around White Dwarfs: Reconstructing Planetary Composition from Metal Pollution

Ayaka OKUYA

Division of Science, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Solid composition of exoplanets is important to understand their origins, but its direct measurement is difficult. Existence of heavy elements in the atmospheres of white dwarfs suggests accretion of fragments of planetary bodies onto white dwarfs. Therefore, observations of heavy elements in their atmospheres should enable us to probe solid composition of planets. To achieve this, we have studied the accretion onto stars of gas and dust disks that are formed around white dwarfs by disruption of rocky/icy bodies. We find that disks including a small but non-negligible fraction of ice can simultaneously reproduce observed metal accretion rates through gas-drag from water vapor and observed rocky-rich stellar atmospheres due to back-reaction of dust to gas.