

特集「新・惑星形成論」

木星・土星の最新の内部構造と形成シナリオ

堀 安範^{1,2}

2021年12月24日受領, 査読を経て2022年1月25日受理

(要旨) 探査機 CassiniおよびJunoのその場観測によって、木星および土星の大気構造や組成、内部構造に関する理解が深化した。短周期ガス惑星の存在や直接撮像による遠方ガス惑星の発見とともに、Type II型惑星移動、そして円盤不安定シナリオの再考と小石集積モデルの台頭に見られるように、木星および土星の形成および軌道進化に対する理論も急速に進展している。そこで、本稿では、最新の観測結果から明らかになった木星および土星の姿を紹介しながら、太陽系のガス惑星形成の現状および未解決な諸問題を整理する。

1. 木星および土星

太陽系最大の惑星、木星と土星。太陽系の惑星全体の質量の90%以上を担う木星と土星は、水素およびヘリウムを主成分とするガス惑星である。木星には特徴的な大赤斑・白斑が見られ、4つの巨大なガリレオ衛星が存在している。土星は衛星タイタンと巨大なリング構造を持つ。異なる衛星環境や環構造を有する木星・土星は、これまでにPioneer 10号, 11号, Voyager1号, 2号, Ulysses, New Horizonsのフライバイ, Galileo, Cassini, Juno探査機によるその場観測が実施されている。

1.1 大気組成

木星および土星に代表されるガス惑星は、水素・ヘリウム主体の外層(エンベロープ)と氷(例: H_2O , CH_4 , NH_3)および岩石成分(鉄やシリケート)の中心核(コア)から構成される。水素・ヘリウムの外層

では、対流圏界面が0.1-1bar付近に位置し¹[1]、木星・土星内部はほぼ対流層となっている。JunoおよびCassini探査機による重力場情報(奇数次の重力モーメント: J_3, J_5, J_7, J_9)から、木星および土星を特徴づける東西方向の帯状風はおよそ 10^5 bar、大気の深さで3000km [3]、9000km [4]まで広がっていると推定されている。

大気組成に関する情報は1-100bar付近の深さまでに限定されるが、木星・土星の大気は原始太陽系星雲の元素組成に比べて、重元素(H, He以外の元素)に富むと示唆されている。Voyager IRAS, Galileo Probe 質量分光計そして Junoマイクロ波分光計のデータから、木星大気はC, N, S, P, 希ガス(He, Neは除く)が太陽組成に比べて、およそ2-5倍豊富である[5]。Galileo探査機が異常に乾燥した領域に突入したため、 H_2O 存在量を正確に決定出来ていなかったが、探査機Junoのマイクロ波観測によって、赤道域での H_2O 存在度すなわちO/H

1.アストロバイオロジーセンター

2.国立天文台 ハワイ観測所
yasunori.hori@nao.ac.jp¹短周期ガス惑星の場合では、対流圏界面はより深い場所まで及んでおり、100-1000bar付近に位置しており、それより上空は等温領域が広がる[2]。

比が原始太陽系星雲の元素組成に比べて約2.7倍高いことがわかった[6]. 一方、探査機による直接測定がなく、土星の大気組成に対する理解は木星大気に比べて乏しいが、地上からの赤外・電波観測でC, N, P, Sは太陽組成に比べて、数倍程度多いとされている². 木星大気中のH(D/H), C(¹³C/¹²C), N(¹⁵N/¹⁴N), 希ガスHe(³He/⁴He), Ne(²⁰Ne/²²Ne), Ar(³⁶Ar/³⁸Ar), Xe(^{128-134,136}Xe/Xe)の同位体比は太陽組成に近い値を示している. 土星に関してはH, C, N(上限値)の同位体比のみ決定されているが、木星同様に太陽組成に近い値となっている[7].

1.2 水素・ヘリウム外層と金属水素

木星・土星の内部は超高压(1-100Mbar)かつ高温(数 10^3 - 10^4 K)環境にあるため、水素およびヘリウムの高压物性(warm dense matterと呼ばれる)が重要となる. とりわけ、水素は圧力電離して、金属水素として振る舞う. 金属水素の存在は古くから理論的に予言されていた[8]. 二段ガス銃[9,10], 爆縮実験[11]やレーザー誘起衝撃波圧縮による高压実験[12]および第一原理計算に基づいた分子動力学計算[13,14]から、水素はおおよそ100GPa以上、数1000Kで1次相転移(プラズマ相転移)し、金属化するとされている³. 木星および土星は双極子成分が卓越した固有磁場を有している([16]のFig.1参照). ガス惑星内部では、コア中の氷成分(例. H₂Oはイオン水状態)もダイナモ駆動の磁場生成に寄与するが、導電性流体の金属水素が対流運動によって、ダイナモを誘発することで磁場生成を担っている. 現在の木星の表面磁場強度は、Junoの観測から2-20 Gauss[17], 一方の土星はCassiniの磁力計データから、0.21 Gauss程度と推定されている[18].

ガス惑星内部では、水素とヘリウムは一樣混合しているわけではない[19]. 数100GPa以上の高压下では、水素とヘリウムの混和状態は熱力学的に不安定となり、相分離が起きる[20,21]. 水素・ヘリウムの混合層が不混和状態となると、水素と分離したヘリウムは液滴として沈降する. この時、Ne, Ar, Kr, Xe

といった希ガスのうち、沈降するHe液滴へNeが選択的に溶解するため[22], 上層大気でNeの枯渇が起きる[23]. 実際、Galileo探査機の測定から木星大気中のHeやNeの存在度は太陽組成に比べて低い[24]. また、Voyager赤外分光計の観測データから、土星大気でもHe存在度が太陽組成より低いとされている[25].

He液滴の沈降に伴って解放される重力ポテンシャルエネルギーはガス惑星の内部熱源候補と考えられている[26]. ガス惑星は輻射で宇宙空間へ熱を放出することで、時間とともに冷却していく. 冷却に伴い、ガス惑星の大気は重力収縮(ケルビン・ホルムヘルツ収縮)する. 現在の土星はこの標準的な熱進化モデルの予想よりも高い光度を維持しており、熱史の矛盾を解決するアイデアとしてH/He分離が有力視されている[27-30]. 他には、土星内部の二重拡散対流⁴の存在が土星の冷却を遅くした可能性も提案されている[31]. 近年、ガス惑星内部は全対流ではなく、二重拡散対流が卓越している可能性が示唆されており[32-34], 二重拡散対流を適用した木星および土星の熱進化の検討が進んでいる[35,36].

表1: 木星のコア質量および重元素量

モデル	コア質量	外層の重元素量	総重元素量	状態方程式
Wahl et al. (2017)[46]	10-23	5-15	24-33	[41,43]
Debras & Chabrier (2019)[47]	-	-	25-30 (40-45)	[44]
Miguel et al.(2016)[42]	8-16	20-34	-	[43]
-	11-17	2-7	-	[41]

各値の単位は地球質量. 論文中で未掲載の値は - とした. 前者の2つのモデルは巨大な低密度コア, 後者は従来のコアモデルのケースに対応.

1.3 木星および土星のコア

木星および土星の重力場(重力モーメント)は、内部の密度分布を知る手掛かりとなる[37]. 低次の重力モーメントは物質の中心集中度, すなわち中心核(コア)の情報, そして高次項は外側の密度情報を反映する. とりわけ、木星および土星のコア質量の決定精度は、重力モーメントの観測精度と高压下での水素・ヘリウムの状態方程式(例. 温度・圧力の関数でのエントロピー, 密度, 自由エネルギー)の不定性に依

²天王星や海王星の大気については、CH₄でのC/H比のみ決定されている.

³水素の金属化は一次相転移ではなく、連続的な変化であると主張する機械学習ベースの分子動力学計算の結果[15]もある.

⁴二重拡散対流とは、温度勾配的には対流不安定であるが、組成勾配の存在によって対流安定が維持され得る状態で、組成勾配が小さい時に生じる対流現象である.

存している[38].

惑星形成理論の観点から、分厚い水素-ヘリウム外層を獲得するためには、木星や土星深部には、重力源となる大きなコアの存在(およそ地球質量の約10倍)が予想されていた[39]. 一方、内部構造理論から推定される木星のコア質量は近年、二転三転している。かつては、木星のコアは地球質量の8倍以下と推定された[40]. しかし近年、1.1節で述べたJunoによる重力場の高精度観測と1.2節で述べた水素・ヘリウムの状態方程式の理解の深化によって、地球質量の8-17倍の大きなコア説が優勢となってきた[41,42](表1参照). 一方、土星のコア質量はH/He分離が起きる圧力条件および自転周期の決定精度に依るが、地球質量の5-20倍程度とされていた[45].

最近、探査機Junoでもたらされた高精度な重力場情報によって、木星内部には最大で木星半径の半分程度の巨大かつ低密度なコアが存在する可能性が示唆された[46,47](表1参照). また、土星内部の脈動(gモード)によって励起されたC環の波動パターンの解析から、土星内部でも同様に、土星半径の60%程度の低密度なコアが存在する可能性が指摘された[48].

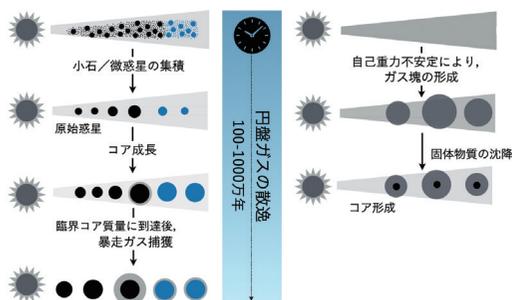


図1: ガス惑星の形成モデルの概念図。
(左) コア集積モデル, (右) 円盤不安定シナリオ.

2. ガス惑星の形成モデル

ガス惑星の形成モデルとして、コア集積モデル(core-accretion)と円盤不安定シナリオ(disk instability)の2つが提唱されている。前者は種となるコア形成からガス集積のプロセスを辿るビルド・アップ型で、ガス惑星形成の標準シナリオとされている。後者は周囲の原始惑星系円盤ガスの重力不安定

から直接、ガス惑星を作り出すシナリオで、分子雲から原始星が誕生する状況と類似している。木星および土星の形成シナリオとしては、前者のコア集積モデルが広く受け入れられてきた。

2.1 コア集積モデル

コア集積モデルに関わるプロセスは、固体物質(微惑星または小石/塵)の降着と原始惑星系円盤ガス(水素・ヘリウムに富むガス)の獲得である。ガス惑星の形成領域は中心星から遠く離れた低温環境とされているため、岩石成分に加えて、雪線(揮発性分子が凝縮する温度環境となる中心星からの距離)以遠では氷成分(例、 H_2O や CO_2)も固体材料として利用される。潤沢な材料物質(氷と岩石)を掻き集めることで、コア惑星の成長は促進される。

コア集積モデルではコアの成長に伴い、周囲の原始惑星系円盤ガスが降着し始める。円盤ガス由来の大気量はコア質量とともに増加する。この時、大気中を通過する微惑星または小石/塵をガス抵抗で減速させて効率的に捕獲することで、固体コアの成長はさらに加速する。やがて、コア質量が臨界値(臨界コア質量)に到達すると、周囲の円盤ガスを暴走的に捕獲し始める[49,50]。この臨界コア質量は典型的には地球質量の10倍程度とされている[39]。臨界コア質量は大気の熱的構造に左右されるため、円盤ガスの温度や密度、固体降着に伴う加熱およびオパシティに依存する[51]。暴走ガス捕獲段階では、獲得した大気自身の重力収縮が更なる円盤ガス降着を促し、大量の円盤ガスを獲得して分厚いエンベロープを持つガス惑星が誕生する。ガス惑星の最終質量は、自身の重力の影響で形成された周囲のガス円盤中の空隙によるガス流入の律速・停止[52]あるいはガス円盤自体の消失[53]に左右される。

近年、固体材料として小石サイズのダスト粒子(pebble)が目ざされている(詳細は小林浩氏の本特集記事参照)。ストリーミング不安定で形成された多数の微惑星と無数の小石が存在する状況では、ガス抵抗の影響を受けやすい小石サイズの固体粒子は大気を持つ微惑星に効率的に捕獲される。質量増加した微惑星はさらに大気を獲得し、より多くの小石を捕獲する。大気が存在が正のフィードバックをもたらし、微惑星は短時間で暴走成長そして寡占成長を

経て、大きなコアとなる。こうした形成シナリオは小石集積 (pebble accretion) モデルと呼ばれている [54].

2.2 円盤不安定シナリオ

円盤不安定シナリオでは、原始惑星系円盤のガスが圧力勾配や潮汐力に打ち勝ち、自己重力を介して、円盤ガスに生じた密度揺らぎが増幅される。やがて、密度波による渦状機構が生成され、渦状腕の高密度領域が自己重力で分裂そして崩壊することで、ガス塊が数千年から数万年という短期間で誕生する [55]. 円盤不安定シナリオで形成されるガス惑星は円盤ガスの組成を反映する。この時、密度波で掃き集められた固体微粒子がガス塊内部で合体成長して深部へ沈降 [56] し、コアを形成する [57]. 沈殿した重元素成分で形成されるコアの大きさは、材料のもととなる微惑星および固体塵サイズに依るが、重力崩壊で誕生するガス惑星で、地球質量の10倍以下のコアが形成され得る。重力不安定でもコアありのガス惑星形成が可能であることから、円盤不安定シナリオとコア集積モデルのハイブリッドによるガス惑星 (木星・土星) 形成 [58] やガス塊の潮汐剥ぎ取りによる巨大惑星形成 [57] も提案されている。直接撮像で発見された HR8799 周りの4つの遠方ガス惑星 [60, 61] はコア集積モデルでは説明困難であることから、円盤不安定起源説が有力と考えられている。また、近年、ALMAでの原始惑星系円盤のmm波連続光観測によって5au以遠でのギャップやリングの多重構造が発見されており [62]、遠方惑星の存在を示唆する証拠とされている。こうしたことから、遠方

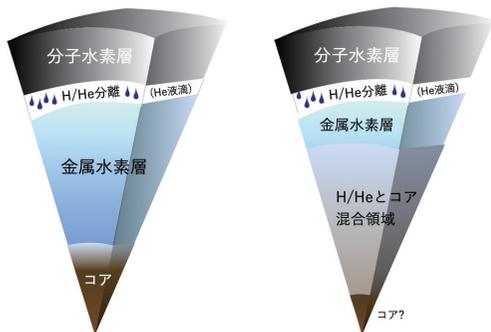


図2: 木星および土星の内部構造モデル。(左) 従来を描像, (右) 探査機 Juno および土星の環振動の観測結果 (1.3節) に基づいた最新の描像。

ガス惑星の形成モデルとしての円盤不安定シナリオに対する理解の重要性も高まっている。

3. 木星と土星の形成シナリオ

3.1 木星および土星の巨大な低密度コア?

木星および土星の内部構造は水素・ヘリウム主体の外層と氷および岩石成分のコアの層構造 (玉ねぎ構造) が慣習的に仮定されてきた [63]. 図2の左図は従来のガス惑星の内部構造モデルを表している。外側から中心に向かって、分子水素・ヘリウム層、金属水素層、そして氷および岩石のコアとなっている。水素の金属化付近では、H/He分離が起き、He液滴の沈降が起きているとされている。

従来の内部構造モデルに対して、1.3節で述べた通り、木星・土星ともに惑星半径の50%程度まで広がった巨大かつ低密度なコアの存在の可能性が指摘された (図2の右図参照)。コアの低密度化は氷・岩石成分のコア物質 (例、 H_2O や珪酸塩鉱物) と水素・ヘリウム外層 (とりわけ金属水素層) の大規模混合を意味する。

コア-水素・ヘリウム外層の構造を持ったガス惑星内部での物質拡散によって、ガス成分の水素・ヘリウムとコア物質の部分的な混合自体は起きる。超高压 (>100 GPa)・高温環境 (>数1000K) では、圧力電離した水素は金属水素として振る舞う。分子動力学計算によると、木星や土星深部の圧力・温度条件 (>10,000 K) では、氷成分の H_2O [64] や岩石成分の MgO [63] および SiO_2 ($MgSiO_3 \rightarrow MgO + SiO_2$) [66], Fe [67] は金属水素に溶解する。金属水素と H_2O , MgO , SiO_2 , Fe の混合は熱力学的に期待されるが、コア表面付近の圧力と温度条件で実現されるため、惑星半径の半分を覆う領域での熱力学的な物質混合はあまり期待できない。コア付近での水素・ヘリウムガスとコア物質の単純な混合だけでは、惑星半径の50%を占める巨大な汚れたコアの起源は説明困難といえる。

別のアイデアとして、形成の最終段階での原始ガス惑星への巨大な天体衝突によって、コア物質と水素・ヘリウム層が力学的に大規模混合し、広範囲に汚れたコアが誕生したというシナリオが提唱されて

いる[68,69]. 高速かつ巨大な衝突天体を想定すると, 探査機Junoによる重力場の観測データと整合的な木星の内部密度分布が再現され得る. しかし, 衝突起源説の懸案点として, 激しい天体衝突イベントの発生確率自体は高くないと予想される. 巨大で低密度なコア形成を引き起こす天体衝突が木星と土星の両方で起きる確率となると, さらに低くなる. そこで, 他のアイデアとして, 形成段階での固体物質とガスの共降着によって, ガスと重元素の混合した玉ねぎ型のコア構造が形成した可能性[70]が提案されている. ガス惑星内部の活発な対流活動でコア表面の組成勾配は均一化の影響を受けやすい[71,72]ため, 前述のアイデアのいずれかで誕生したとしても, 巨大な低密度なコア構造が数十億年間, 維持できるかが課題となる.

以上から, 巨大な低密度コアを持つ木星および土星の内部構造の描像が正しいとすると, 木星・土星の形成シナリオ構築に対する大きな制約条件となる.

3.2 木星および土星の重元素リッチな大気

木星および土星大気は太陽組成と比較して, 揮発性元素(CNOPS)や希ガス(Ar, Kr, Xe)に富んでいる. 太陽組成は水素・ヘリウム主体の原始惑星系円盤ガス組成を反映するとみなすと, 太陽組成からのズレは形成過程による希ガスおよび揮発性元素の大気濃集を意味する. 反応性の乏しい希ガスを取り込むプロセスとして, 氷雪線以遠での揮発性元素の非晶質への吸着[73], 希ガスの結晶氷[74], 氷水のクラスレート[75,76]が挙げられる. 前者では大気での揮発性元素の均一な濃集, 後者の2つでは不均一な濃集が予想される. いずれのケースでも, 木星・土星の重元素リッチな大気を説明するためには, 現在の木星および土星軌道より遠方の低温環境(N_2 , Ar)の雪線以遠[77]で形成された氷水の供給が必要となる. 木星大気での酸素存在度が高い事実は揮発性元素の直接的あるいは間接的供給源が氷物質とみなす描像と整合的である. 但し, 探査機Junoで得られた赤道域のO/H比(太陽組成の約2.7倍[6])が木星全体の組成比を代表していると仮定すると, 氷水クラスレート起源説で期待される H_2O 量よりは遥かに少ない[73]. 加えて, 大気のリッチな重元素供給源の主な担い手が(小石ではなく)氷微惑星[78]とすると,

現在の木星エンベロープの重元素量を説明するためには, 初期に固体材料が豊富な原始惑星系円盤あるいは, 木星は初期に遠方領域で形成されて内側へ移動した可能性を考える必要がある[79].

別のアイデアとしては, 木星および土星の形成後期段階では, 周囲のOB型星からの遠紫外線や極端紫外線照射による円盤ガスの光蒸発が起きていたシナリオが提唱されている[80]. 低温環境で凝縮した希ガスの氷粒子が内側領域で昇華し, 円盤ガスに解放されるが, 光蒸発過程では水素やヘリウムの軽元素のみが選択的に逃げ出す. その結果, 木星や土星は, 重元素が残存した円盤ガスを降着することになったというアイデアである. 最近では, フレアアップしたガス円盤の影で生じた低温環境で木星や土星が誕生することで, 希ガスや揮発性元素に富む小石(または微惑星)を獲得したとするアイデアも提案されている[81](詳細は大野和正氏の本特集記事参照).

いずれのシナリオでも, 希ガスやその他の揮発性元素を含む氷生成と供給が重要な鍵を握る. 同時に, 土星や天王星, 海王星の大気での重元素汚染が期待され, 天王星および海王星では揮発性元素のより高い濃集が予想される[82]. 将来の土星(の主に希ガス)および氷惑星の大気組成の測定は, 太陽系の巨大惑星の形成場所および形成過程に迫る貴重な手がかりとなる.

3.3 木星および土星のその場形成と軌道移動

最初の太陽系外惑星の発見となったペガサス座51番星周りの惑星は, 公転周期が約4.2日の短周期ガス惑星(ホットジュピター)だった[83]. 中心星近傍でのガス惑星形成は困難なことから, ホットジュピターの存在は, ガス惑星の軌道移動を示唆する結果となった[84]. ガス惑星は自身の重力で周囲のガス円盤に空隙を作る. その結果, 中心星へ質量降着する円盤ガスに引き摺られながら, 中心星方向へ落下して行く[85]. これはタイプII型惑星移動(Type II migration)と呼ばれる.

太陽系の木星および土星も軌道移動を経験したかもしれないと言われている. 太陽系4つの巨大惑星が現在の位置で誕生したとすると, 天王星と海王星を作るには数億年から数十億年かかり, 大気獲得

する前に周囲のガス円盤が散逸してしまう。そこで、2つの氷惑星が太陽に近い場所で誕生した後、何らかの理由で現在の位置まで移動したアイデアが提案された。海王星の外向き移動は海王星以遠天体、とりわけ散乱天体の軌道分布や海王星と冥王星の公転周期が3:2平均運動共鳴の関係にある観測事実と整合的である。

4つの巨大惑星の軌道再配置のために考案されたのがニース・モデルである[86]。木星・土星はほぼ現在の位置に存在し、天王星・海王星は現在の天王星の軌道よりも内側で誕生した状況を想定する。近接した4つの巨大惑星の軌道は重力相互作用による摂動で振動する。やがて、木星と土星が2:1の平均運動共鳴の位置関係を通り過ぎる時、系は突然、力学的に不安定な状態へ移行する。木星や土星に比べて、質量の小さな天王星や海王星は外側へ弾き飛ばされる。小惑星帯や海王星以遠の小天体の一部も軌道不安定の影響で地球軌道付近まで運ばれる。この出来事は海王星の外側移動および約38億年前の月表面への小天体の大量衝突(後期重爆撃)を定性的に再現する[87]。ただし、ニース・モデルの大前提といえる、4つの巨大惑星の初期配置が恣意的である点が大きな懸念材料となっている。

4つの巨大惑星が狭い軌道間隔に並ぶ配置は、グランド・タック仮説の枠組みが提案されている[88](詳細は萩原正博氏の本特集記事参照)。中心星方向へタイプII型惑星移動を開始した木星が火星軌道付近に到達した時、後方から追いついた土星に3:2の平均運動共鳴で捕獲されて、現在の位置まで引き戻されるというシナリオである。土星の外側では天王星・海王星の形成が進行しており、木星と土星のUターン後に4つの巨大惑星が狭い軌道間隔で整列することになる。木星よりも軽い土星はガス円盤に完全な空隙を開けきれず、タイプII型惑星移動よりも少し速いタイプIII型惑星移動[89]をするため、木星に追いつく。捕獲した木星と土星の空隙が重なり合う状態になることで、左右の円盤ガスから受ける重力トルクの釣り合いが崩れる。その結果、木星-土星ペアに外向きの力が働き、一緒に外側へ引き戻される[90]。グランド・タック仮説では、木星・土星の大移動の影響で火星移動付近の惑星の材料物質が枯渇し、従来の京都モデルで懸念された火星の形成

を説明が付く。しかし、そもそも、木星・土星ペアが外向き移動を開始して、現在の位置付近まで戻れるかどうかは円盤ガスの特性(例、粘性やスケールハイト)、土星の形成場所に強く依存する[91]。現実問題として、グランド・タック仮説で期待されるような木星・土星の軌道進化、そしてニース・モデルでの4つの巨大惑星の初期軌道配置が実現されるかは必ずしも自明とはいえない。

5. まとめと展望

最新の観測結果から、木星および土星は希ガスおよび揮発性元素に富む大気を持ち、惑星半径の約50%まで広がった巨大な低密度なコアを持つ可能性のあることがわかってきた。しかし、巨大な汚れたコアの起源については未だ謎に包まれており、水素・ヘリウムの状態方程式次第では汚れていない高密度コアの可能性も排除されない。木星・土星内部では、水素の金属化とそれに伴うダイナモ駆動の磁場生成、そしてH/He分離が起きている。金属水素の存在は、惑星の内部密度分布(とりわけ、コア質量推定)に影響を及ぼすため、水素の金属化の圧力・温度条件の決定と相転移の有無に対するさらなる実験的かつ理論的検証が必要といえる。H/He分離は間接的証拠として、大気中のNeの枯渇が観測されており、土星の内部熱源として寄与したことは間違いないだろう。一方で、木星および土星内部の熱輸送機構として、従来仮定されていた全対流ではなく、二重拡散対流が卓越している可能性があり、木星・土星の熱史の描像の修正が必要となっている。二重拡散対流の理解に向けては、木星および土星内部の超高圧・高温下での水素-ヘリウム層でのプラントル数や組成拡散率、さらには組成分布の情報が必要不可欠である。木星に比べて、土星の大気情報は限定的であり、天王星・海王星に至ってはVoyager 2号のフライバイ以降、探査機未到の惑星となっている。2つの氷惑星の重力場計測および大気組成は4つの巨大惑星の形成史を紐解く上で非常に貴重な情報といえる。天王星・海王星の探査として、2020年後半-30年代打ち上げ予定の探査機計画が複数提案されており(例、ODINUS, OCEANUS, MUSE, HORUS)、打ち上げからおおよそ10年から15年かけて

天王星・海王星を目指すことになる。したがって、探査機によるその場観測による天王星・海王星の詳細な情報が得られるのは早くても2030年後半から40年代になるだろう。

謝辞

今回、本稿の執筆機会をくださった奥住聡氏に感謝いたします。また、原稿を注意深く読んでいただいた谷川享行氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] Robinson, T. D. and Catling, D. C., 2014, *Nature Geoscience* 7, 12.
- [2] Fortney, J. J. et al., 2007, *ApJ* 659, 1661.
- [3] Kaspi, Y. et al., 2018, *Nature* 555, 223.
- [4] Kaspi, Y. et al., 2020, *Space Sci. Rev.* 216, id.84.
- [5] Atreya, S. K. et al., 2020, *Space Sci. Rev.* 216, id.18.
- [6] Li, C. et al., 2020, *Nature Astronomy* 4, 609.
- [7] Atreya, S. K. et al., 2016, arXiv:1606.04510.
- [8] Wigner, E. and Huntington, H. B., 1935, *J. Chem. Phys.* 3, 764.
- [9] Weir, S. T. et al., 1996, *Phys. Rev. Lett.* 76, 1860.
- [10] Nellis, W. J. et al., 1999, *Phys. Rev. B.* 59, 3434.
- [11] Knudson, M. D. et al., 2015, *Science* 348, 1455.
- [12] Loubeyre, P. et al., 2012, *Phys. Rev. B.* 86, 144115.
- [13] Mazzola, G. et al., 2018, *Phys. Rev. Lett.* 120, id.025701.
- [14] Hinz, J. et al., 2020, *Phys. Rev. Research* 2, id.032065.
- [15] Cheng, B. et al., 2020, *Nature* 585, 217.
- [16] Stanley, S. and Bloxham, J., 2006, *Icarus* 184, 556.
- [17] Connerney, J. E. P. et al., 2018, *Geophys. Res. Lett.* 45, 2590.
- [18] Dougherty, M. K. et al., 2018, *Science* 362, id.5434.
- [19] Stevenson, D. J. and Salpeter, E. E., 1977, *ApJS* 35, 239.
- [20] Schöttler, M. and Redmer, R., 2018, *Phys. Rev. Lett.* 120, 115703.
- [21] Brygoo, S. et al., 2021, *Nature* 593, 517.
- [22] Wilson, H. F. and Militzer, B., 2010, *Phys. Rev. Lett.* 104, 121101.
- [23] Roulston, M. S. and Stevenson, D. J., 1995, *EOS* 76, 343.
- [24] Niemann, H. B. et al., 1996, *Science* 272, 846.
- [25] Conrath, B. J. and Gautier, D., 2000, *Icarus* 144, 124.
- [26] Stevenson, D. J., 1980, *Science* 208, 746.
- [27] Hubbard, W. B. et al., 1999, *Planet. Space Sci.* 47, 1175.
- [28] Fortney, J. J. and Hubbard, W. B., 2003, *Icarus* 164, 1228.
- [29] Püstow, R. et al., 2016, *Icarus* 267, 323.
- [30] Mankovich, C. R. and Fortney, J. J., 2020, *ApJ* 889, id.51.
- [31] Leconte, J. and Chabrier, G., 2013, *Nature Geoscience* 6, 347.
- [32] Rosenblum, E. et al., 2011, *ApJ* 731, id.66.
- [33] Mirouh, G. M. et al., 2012, *ApJ* 750, id.61.
- [34] Wood, T. S. et al., 2013, *ApJ* 768, id.157.
- [35] Leconte, J. and Chabrier, G., 2012, *A&A* 540, id.A20.
- [36] Nettelmann, N. et al., 2015, *MNRAS* 447, 3422.
- [37] Zharkov, V. N. and Trubitsyn, V. P., 1978, *Astronomy and Astrophysics Series*, Tucson: Pachart, 1978.
- [38] Saumon, D. and Guillot, T., 2004, *ApJ* 609, 1170.
- [39] Mizuno, H., 1980, *Prog. Theor. Phys.* 64, 544.
- [40] Nettelmann, N. et al., 2012, *ApJ* 750, id.52.
- [41] Militzer, B. and Hubbard, W. B., 2013, *ApJ* 774, id.148.
- [42] Miguel, Y. et al., 2016, *A&A* 596, id.A114.
- [43] Becker, A. et al., 2014, *ApJS* 215, 21.
- [44] Chabrier, G. et al., 2019, *ApJ* 872, 51.
- [45] Helled, R. and Guillot, T., 2013, *ApJ* 767, id.113.
- [46] Wahl, S. M. et al., 2017, *Geophys. Res. Lett.* 44, 4649.
- [47] Debras, F. and Chabrier, G., 2019, *ApJ* 872, id.100.

- [48] Mankovich, C. R. and Fuller, J., 2021, *Nature Astronomy* 5, 1103.
- [49] Bodenheimer, P. and Pollack, J. B., 1986, *Icarus* 67, 391.
- [50] Pollack, J. B. et al., 1996, *Icarus* 124, 62.
- [51] Ikoma, M. et al., 2000, *ApJ* 537, 1013.
- [52] Ginzburg, S. and Chiang, E., 2019, *MNRAS* 487, 681.
- [53] Tanigawa, T. and Tanaka, H., 2016, *ApJ* 823, 48.
- [54] Lambrechts, M. and Johansen, A., 2012, *A&A* 544, id.A32.
- [55] Boss, A. P., 1997, *Science* 276, 1836.
- [56] Helled, R. and Schubert, G., 2008, *Icarus* 198, 156.
- [57] Helled, R. et al., 2008, *Icarus* 195, 863.
- [58] Inutsuka, S. et al., 2010, *ApJL* 718, L58.
- [59] Nayakshin, S., 2010, *MNRAS* 408, L36.
- [60] Marois, C. et al., 2008, *Science* 322, 1348.
- [61] Marois, C. et al., 2010, *Nature* 468, 1080.
- [62] Huang, J. et al., 2018, *ApJL* 869, L42
- [63] Stevenson, D. J., 1982, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 10, 257.
- [64] Wilson, H. F. and Militzer, B., 2012, *ApJ* 745, id.54.
- [65] Wilson, H. F. and Militzer, B., 2012, *Phys. Rev. Lett.* 108, 111101.
- [66] Gonzalez-Cataldo, F. et al., 2014, *ApJ* 787, id.79.
- [67] Wahl, S. M. et al., 2013, *ApJ* 773, id.95.
- [68] Li, S. L. et al., 2010, *ApJ* 720, 1161.
- [69] Liu, S. -F. et al., 2019, *Nature* 572, 355.
- [70] Helled, R. and Stevenson, D., 2017, *ApJL* 840, L4.
- [71] Vazan, A. et al., 2016, *ApJ* 829, id.118.
- [72] Müller, S. et al., 2020, *A&A* 638, id.A121.
- [73] Owen, T. et al., 1999, *Nature* 402, 269.
- [74] Mousis, O. et al., 2009, *ApJ* 696, 1348.
- [75] Gautier, D. et al., 2001, *ApJL* 550, L227.
- [76] Hersant, F. et al., 2004, *Planet. Space Sci.* 52, 623.
- [77] Öberg, K. I. and Wordsworth, R., 2019, *AJ* 158, 194.
- [78] Podolak, M. et al., 1988, *Icarus* 73, 163.
- [79] Shibata, S. and Ikoma, M., 2019, *MNRAS* 487, 4510.
- [80] Guillot, T. and Hueso, R., 2006, *MNRAS* 367, L47.
- [81] Ohno, K. and Ueda, T., 2021, *A&A* 651, id. L2.
- [82] Mousis, O. et al., 2020, *Space Sci. Rev.* 216, id.77.
- [83] Mayor, M. and Queloz, D., 1995, *Nature* 378, 355.
- [84] Lin, D. N. C. et al., 1996, *Nature* 380, 606.
- [85] Lin, D. N. C. and Papaloizou, J. C. B., 1993, *Protostars and Planets III*, 749.
- [86] Tsiganis, K. et al., 2005, *Nature* 435, 459.
- [87] Gomes, R. et al., 2005, *Nature* 435, 466.
- [88] Walsh, K. J. et al., 2011, *Nature* 475, 206.
- [89] Masset, F. S. and Papaloizou, J. C. B., 2003, *ApJ* 588, 494.
- [90] Masset, F. and Snellgrove, M., 2001, *MNRAS* 320, L55.
- [91] Morbidelli, A. and Crida, A., 2007, *Icarus* 191, 158.