# 特集「若い惑星および周惑星円盤・衛星形成研究最前線」 ガス惑星・褐色矮星・超低質量星の質量降着に 関する観測的研究

橋本 淳<sup>1, 2, 3</sup>

2024年6月14日受領, 査読を経て2024年7月27日受理

(要旨) ガス惑星の質量降着率は,言い換えれば惑星の質量成長率であり,最終質量を決める惑星の基本的な物理パラメータである.これまで惑星の降着率は,星の降着モデルから外挿して導出されてきたが,近年では惑星の降着モデルも提案されている.しかし,降着中の惑星の観測例は限られており,どちらのモデルを惑星に適用したほうが良いかについてはよくわかっていない.また,星と惑星の中間に当たる褐色矮星についても、どちらのモデルが適切かはわかっていない.さらに、どの物理量が2つのモデルを切り分けるのかなど,検証すべきことがまだまだある.本論文では,これまでの降着中の惑星質量天体の観測について概観し、私が現在取り組んでいる,2つのモデルを若い褐色矮星や超低質量星に適用した結果についても述べる.最後に今後の展望についても述べたい.

### 1. 質量降着中の惑星質量天体

ガス惑星および衛星の形成母体はそれぞれ原始 惑星系円盤と周惑星円盤と考えられている[1,2]. 形 成中の惑星は原始惑星系円盤の物理構造を変化さ せ[3],円盤進化に影響を与える.一方,惑星は原始 惑星系円盤からガスとダストの供給を受け,惑星大 気が影響を受ける[4].同時に周惑星円盤にも原始惑 星系円盤からガスとダストが供給され[5],衛星形成 にも影響があると考えられる.このように,惑星およ び衛星形成,原始惑星系円盤および周惑星円盤の 進化は密接に関連しており,共進化の関係にある.

原始惑星系円盤に埋もれた惑星候補天体,言い 換えれば惑星の軌道長半径が原始惑星系円盤の半 径より内側のものは直接的手法および間接的手法で 多数報告されている(表1).直接的手法の例として は,惑星からの赤外線放射を直接観測する手法な どが挙げられる.一方で間接的手法の例としては, 惑星を直接見るのではなく,惑星の重力によって乱 された原始惑星系円盤のガスの運動を観測する手 法などがある.表1に私が知る限りの20天体ほど挙 げたが,ほとんどの候補天体は確定的な存在ではな く,今後の確認観測が必要である.確定的な存在と 書いたが,その基準にコンセンサスはおそらくまだな いと理解している.ここでは独断で次の3つの基準を 満たす惑星を確定的な惑星と呼ぶことにする:(1)異 なる研究グループによる再現のある天体,(2)異なる 観測装置/解析手法による検出のある天体,(3)最近 の観測でも否定されていない天体.これらの基準を 満たす天体はPDS70となる.PDS70については,芝 池氏による同特集記事を参照されたい.

さて、今回のお題は質量降着についてである.ガ ス惑星の質量降着率は、言い換えれば惑星の質量 成長率であり、最終質量を決める惑星の基本的な 物理パラメータである.質量降着率は、水素のバル マー連続光や輝線(主に波長656.3 nm<sup>1</sup>のHa)の 観測から見積もられてきた.だが、惑星におけるHa

<sup>1.</sup>自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター 2.自然科学研究機構 国立天文台 3.総合研究大学院大学 jun.hashimto@nao.ac.jp

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>本記事では真空波長ではなく空気中での波長を用いる. 波長 変換はIAU標準変換式に従う[33].

#### 表1: 原始惑星系円盤に埋もれた惑星候補を有する天体および惑星の兆候.

天体名	近赤外線	$H\alpha$	ダスト	ガス	渦状椀	速度場	子午線流	青方偏移	SO ガス	ダスト *	参考
	熱放射	放射	CPD	CPD		ねじれ		SiS ガス		$L_4$ , $L_5$ 点	文献
PDS 70	~	~	~							~	[6-9]
AB Aur	~	~			~						[10-12]
HD 169142	~				~		1	1	1		[13-15]
HD 100546	~								1		[16, 17]
MWC 758	√				$\checkmark$						[18]
Elias 2-24	√			$\checkmark$							[19]
TW Hya			√		$\checkmark$				√		[20-22]
AS 209				$\checkmark$		~					[23]
HD 163296						~	1			~	[24-26]
DoAr 25						~					[27]
IM Lup						$\checkmark$					[27]
Elias 2-27						$\checkmark$					[27]
GW Lup						$\checkmark$					[27]
HD 143006						$\checkmark$					[27]
Sz 129						$\checkmark$					[27]
WaOph 6						$\checkmark$					[27]
HD 97048						$\checkmark$					[28]
CI Tau						$\checkmark$					[29]
HD 142527			√								[30]
LkCa 15										√	[31]
RIK 113			√		~	$\checkmark$					[32]

\* ラグランジュL4および L5点に集積したと考えられているダストの ALMA観測例.

表2:原始惑星系円盤に埋もれていない降着中の惑星と自由浮遊惑星.

天体名	質量降着率	赤外超過	ALMA による	主星との射影距離	主星の年齢	参考
	(太陽質量/yr)		ダスト CPD	(au)	(Myr)	文献
2MASS J0249-0557 c*				1950	25	[37]
Cha 110913-773444 <sup>†</sup>		$\checkmark$			2	[38]
Delorme 1(AB) b	$3 \times 10^{-11}$			84	30-45	[39]
DH Tau b	$3 \times 10^{-12}$			330	2	[40]
GSC 06214-00210 b	$1 \times 10^{-11}$	$\checkmark$		110	10	[40]
KPNO Tau 4	$8 \times 10^{-12}$				2	[41]
OTS 44	$8 \times 10^{-12}$	$\checkmark$	$\checkmark$		2	[42]
SR 12 c	$8 \times 10^{-12}$		$\checkmark$	1100	2	[43]
TWA 27 $B^{\ddagger}$	$5 \times 10^{-12}$			50	10	[44]
TYC 8998-760-1 b	$4 \times 10^{-10}$			160	17	[45]
σ Ori の7 天体 *		$\checkmark$			3	[46]

\* Hαの検出はあるものの, 質量降着によるものか彩層活動によるものか決着ついていない.

† Hαの観測はないが,赤外超過があってダスト円盤は存在しているので,質量降着している可能性が高い.

‡ TWA27Bの質量は5木星質量で惑星質量であるが、主星との質量比が約0.2であるため、IAUが定めた惑星の基準(主星との質量比約0.04以下)を満たさない[47]. TWA27Bは、惑星は原始惑星系円盤の中で生まれるという一般的な惑星形成の描像ではなく、星形成過程におけるパイナリー形成と同じプロセスで生まれた可能性があるため、大文字・B'と表記されている.

の検出例は、表1を見ると2例しかない<sup>2</sup>.もう少し 制限を緩めて、原始惑星系円盤に埋もれていない惑 星、つまりその軌道長半径が原始惑星系円盤の半 径より外側のものや自由浮遊惑星も含めれば、質量 降着中の惑星は他にも存在する(後述).

惑星は原始惑星系円盤の中で生まれるので,原始 惑星系円盤に埋もれた惑星の質量降着について知 りたいわけだが,最近の数値計算によると,原始惑 星系円盤から直接惑星に降着するガスは降着流の 数%程度で、大部分は周惑星円盤に降着するという 報告がある[35]. この描像から類推すると、惑星へ の質量降着のほとんどは周惑星円盤を介して起こっ ている可能性がある.よって、原始惑星系円盤に埋 もれていない惑星でも、その質量降着を調べること で、原始惑星系円盤に埋もれた惑星の質量降着を理 解する代用になると考えられる.原始惑星系円盤に 埋もれた惑星の降着シナリオとしては他に、周惑星 円盤を介さずに、原始惑星系円盤から直接惑星に球 対称もしくは極域に降着するシナリオが提案されて いる[36].しかし観測サンプル数が少なく詳細は不 明である.

原始惑星系円盤に埋もれていない降着中の惑星 と自由浮遊惑星を表2にまとめた.報告されている 質量の中央値が15木星質量以下を取り上げたので,

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Haよりもさらに励起順位の低いLya ( $\lambda$  = 121.5 nm) はよ り明るい.しかし,Lyaを含むライマン系列は星周および星間空 間の中性水素に吸収されるため[34],我々が観測可能な最も明 るい水素輝線はHaとなる.降着中のホットジュピターがあると して、その視線速度が大きければ中性水素の吸収波長からず れるため,Lyaの観測は可能かもしれない.



図1: (上段): 磁気圏降着の概念図. 星と惑星では輝線放射メカニズムが異なると考えられている. 星の場合, 降着流から輝線が発せられ, ショッ ク領域から水素連続光が発せられている. 一方で惑星の場合, 降着流からの輝線は弱く, ショック領域から輝線が主に発せられている. ま た, 惑星におけるショック領域からの水素連続光は弱い. (下段): 星(左) と惑星(右) の可視光スペクトルの比較. 水素連続光の1つである バルマー連続光(波長364.6 nm以下) と輝線を点線で囲った. 波長370 nm付近からバルマー連続光があるように見えるが, 高励起の水素 輝線が密集しているためそう見えている. また, 惑星のバルマー連続光ははっきりと確認するのは難しい. 星のH8輝線(中) は, 輝線中心か ら赤方偏移した吸収が見られ, 輝線が降着流から発せられていることの根拠と考えられている[54]. これらの図はESOアーカイブからVLT/ Xshooterのデータを用いて作成した.

GQ Lup B, CT Cha B, およびFU Tau B などの 褐色矮星質量の伴星は含まれていない. 質量降着が 確認されている天体数は,原始惑星系円盤に埋もれ ていない惑星と自由浮遊惑星まで含めても私の知る 限り20天体程度である(PDS70bc惑星とAB Aur b惑星も含む).

## 2. 星および惑星の質量降着の描像

前主系列星の質量降着は磁気圏降着によって説明されてきた(図1; [48]). このモデルではまず, 星からの輻射で10<sup>3</sup> K以上の高温になった原始惑星系円 盤内縁が, 星の磁場によって剥ぎ取られる. この時ガスは磁場に沿って星に落下するが, 自由落下速度程度に加速しているため, 粘性加熱により10<sup>4</sup> K ほどに 加熱される.このような高温環境では水素分子が原 子に解離し、衝突励起によってHaなどの輝線(束縛 -束縛遷移線)を発する.さらにガスが星に衝突する と、今度はショックエネルギーによってガスは10<sup>5</sup> K 以上に加熱され電離する.その後、電離水素が自由 電子と再結合する際にバルマー連続光などの水素連 続光(自由-束縛遷移線)を発する.

一方で,惑星が磁気圏降着しているかはよくわ かっていない.前述のように,原始惑星系円盤から 直接惑星に降着している可能性もあるが,ここでは 周惑星円盤を介して磁気圏降着していると仮定す る.この場合,惑星に十分な磁場が存在するかが磁 気圏降着かのカギとなるだろう.これについては, 近赤外線高分散分光の観測から惑星の自転速度が breakup speedの10%程度であることが観測的に



図2:星(赤や紫) と惑星(青や緑) モデルにおける輝線強度比の違い(青山氏提供;同氏による同特集記事を参照). 横軸はHβ/Hγで同じだが, 縦軸は左から右に向かってより高励起輝線を用いている. 励起準位がより離れた輝線を使うことで,プロットの左下付近で2つのモデルの 解離が大きくなるため,モデルを切り分けることができる.

示されており[49],磁場ブレーキが有効に機能する だけの惑星磁場が存在している可能性がある.よっ て,惑星においても,星と同様の磁気圏降着を仮定 するのは妥当だろう<sup>3</sup>.

このように質量降着のメカニズムは星と惑星で同 じと仮定できるが、惑星の輝線の発光メカニズムは 星のそれとは異なると青山氏ら[53] は提案してい る.星の場合、輝線は降着流から主に発せられると 考えられているが[54]、惑星の場合、その降着流は 低温のため、降着流からの輝線は弱く、ショック領 域から主に発せられると仮定されている[53].また、 星の場合、水素連続光は主にショック領域から発せ られると考えられているが[55]、惑星の場合の水素 連続光は星のそれより弱いことが実際の観測スペク トルからわかる(図1下段右).

# 3. 水素輝線モデルの適用例

上記の描像に基づき,水素輝線強度を説明する モデルが星と惑星で構築されてきた[53,56].では, これらのモデルを使い分ける必要はあるだろうか? 我々が興味あるのは,惑星の成長率,つまり質量降 着率である.具体例は§5で示すが,質量降着率が小 さくなるほど,2つのモデルから導出される降着率の 乖離が大きくなる.一般に降着天体となる星や惑星 の質量と降着率は比例関係にあるため,惑星の降着 率はより小さくなることが予想される.よって,惑星 質量天体では2つのモデルで降着率が1桁以上異な る可能性があり,星のモデルから外挿して惑星の降 着率を導出すると降着率が大きく異なる結果となり うる.

2つのモデルを切り分けるには、輝線強度比を用 いる.図2(青山氏提供;同氏による同特集記事を 参照)は横軸にH $\beta$ ( $\lambda$  = 486.1 nm)とH $\gamma$ ( $\lambda$  = 434.1 nm)の比を取り、縦軸にはH $\beta$ とH $\delta$ ( $\lambda$  = 434.1 nm)およびH8( $\lambda$  = 388.9 nm)の比をそれ ぞれ星と惑星のモデルでプロットした.どちらのモ デルでも、水素の多くは励起準位が低いため、励起 準位が低くて準位の近い輝線強度比を用いると、2 つのモデルは縮退して切り分けられない(図2左のH

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>自転速度がbreakup speedの50%ほどの惑星も報告されて おり[50], 磁場が弱い惑星も存在するだろう. そのような惑星で は磁気圏降着ではなく境界層降着[51] しているかもしれない. 高棹氏ら[52] によって惑星が境界層降着している場合の水素 輝線の強度および形状の数値計算が行われており, 輝線の時 間変動と高分散分光が惑星の降着プロセスを理解するカギと なり得る. 詳細については高棹氏らによる同特集記事を参照さ れたい.

β/Hδ).一方,準位差が大きくなる輝線強度比Hβ /H8を用いると、プロットの左下付近で2つのモデ ルの乖離が大きくなる(図2右).この付近の物理パラ メータを見ると、惑星モデルでは低速度のショックガ スからの輝線であり、星モデルでは高温の降着流か らの輝線ということになる。前者だとショックエネル ギーが小さいため、励起準位の低い水素がより多く 存在することを意味する。一方で後者はその逆の状 態になる.よって、準位の差が大きな輝線強度比を用 いることで、2つのモデルを切り分けることが可能と なる<sup>4</sup>.

最初に輝線強度比を用いて,惑星におけるモデル の切り分けを行ったのは,Betti氏らである[57]<sup>5</sup>. Betti氏らはDelorme1 (AB)b惑星(12-14木星質 量)において,近赤外線のパッシェン系列とブラケッ ト系列を観測し,その質量降着が惑星モデルで説明 できることを示した.PDS70に付随する惑星におい ても,Ha以外の輝線の検出が試みられたが,まだ 成功していない[59,60].ちなみにJWSTやVLTを 用いて,PDS70のPaa(1.875 μm)とBra(4.051 μm)の観測はあるものの[61,62],確実な輝線の検 出かどうかはさらなる検証および追観測が必要な印 象である.その他の惑星においても多輝線の観測は 行われているものの[40,63],同時観測ではないなど の理由により,惑星においてモデルの切り分けを系 統的に行った研究はまだない.

#### 4. 褐色矮星と超低質量星への適用例

ガス惑星において,前述のDelorme 1(AB)b惑 星の例のみではあるが,惑星モデルで輝線強度比を 説明できることが分かった.しかし,星と惑星の中間 にある褐色矮星はどちらのモデルになるか,2つのモ デルの境界を物理量は何か,といった疑問がわいて くる.そこで,私はアーカイブデータを用いて,質量降 着中の褐色矮星と超低質量星96天体(質量範囲0.02 太陽質量から0.1太陽質量)に対して、輝線強度比を 調べた.本当は惑星も含めて調査をしたかったが、 前述の理由により惑星の多輝線観測データが不十分 なため、今後の研究課題とする.対象天体は星形成 領域にある褐色矮星と超低質量星で、孤立した天体 である.§3で述べたように、降着モデルは星でも惑 星でも同じ磁気圏降着を仮定しているので、原始惑 星系円盤に埋もれているかいないかは大きな問題で はないと考えている.観測データはSDSS、VLT/ XShooter, Keck/LRISのアーカイブデータを用い た.これらの観測データは幅広い波長範囲をカバー しているため、多数のバルマー線を同時に取得可能 である.よって、輝線強度の時間変動による輝線強 度比の不定性はない.

図3は、96天体のHβに対するHyおよびH8の輝



図3:質量降着中の褐色矮星と超低質量星96天体のプロット. 17天体が惑星モデル(丸印),60天体が星モデル(四角印), 残りの19天体(バツ印)がエラーバーが大きいなどの理由 で両方のモデルの上にプロットされている.この図はVLT/ Xshooter, Keck/LRIS,およびSDSSのアーカイブデータ を用いて作成した.モデル図は青山氏提供(図2).

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>もっと高励起準位の輝線を使えばよいのかというコメントがあ ると思うが、高励起ほど輝線強度は弱くなるため、エラーバーが 大きくなり、逆にモデルを切り分けられなくなる.特に惑星の場 合、輝線強度はさらに弱いため、8 m望遠鏡ではH7かH8が限 界という印象がある.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>前主系列星において, 観測された輝線強度比と星モデルを比 較した研究は, 理論研究が進展した1990年代後半にすでに行 われている[58].



図4:惑星モデル上にプロットされた17天体(赤)と星モデル上の60天体(青)を,質量降着に関連する4つの物理量(質量,質量降着率,降着光度, 無限遠からの自由落下速度)でプロットした.星モデルと惑星モデルを切り分ける境界は見当たらない.この図はVLT/Xshooter, Keck/ LRIS, およびSDSS のアーカイブデータを用いて作成した.

線強度比をプロットした. 17天体が惑星モデル,60 天体が星モデル,残りの19天体はエラーバーが大き いなどの理由で両方のモデルの上にプロットされて いる,もしくは外れ値でどちらのモデル上にもプロッ トされない.分類の判断基準は,輝線強度比の1シグ マのエラー範囲がモデルの軌跡上にあるかである. ただし,エラーが10%以下のプロットは,強制的にエ ラーを10%と仮定した.この理由は,モデル軌跡の すぐ近くの,エラーの小さなプロットが外れ値に分類 されることを避けるためである.

惑星モデル上にプロットされた17天体のうち,10天 体が超低質量星,7天体が褐色矮星である.いくつ かの星や褐色矮星の降着が惑星モデルで説明され たとしても,驚くべきことではないだろう.過去にも前 主系列星の輝線強度比を星モデルと比較した研究 があり,星モデルでは説明できない輝線強度比を示 す前主系列星がいくつか報告されている[58].星や 褐色矮星の降着が必ずしも星モデルで説明されるわ けではないようだ.また,両モデルから外れたプロッ トが存在する理由としては,輝線は降着由来だけで はないため,天体の彩層活動,円盤風,ジェット/ア ウトフローなどの寄与があると考えられる.

次に惑星モデル上にプロットされた17天体と星モ デル上の60天体について,質量降着に関連する4つ の物理量(質量,降着光度,質量降着率,無限遠から の自由落下速度)に対して境界があるかを調べた. 図4に示すように,境界は見当たらない.§3の図2の 説明で述べたように,輝線放射領域の温度が輝線 強度比において重要だと思われるが,これら4つの 物理量は温度とは直接関連がないのかもしれない. 今のところ,境界を決める物理量が何かはよくわか らない.

他にも興味深いことが2点わかったので報告して おく.まずは輝線強度比の時間変化についてであ る.TWA27A(表2;世界初の直接撮像惑星を保有 する主星[64])は4回観測されている(2006,2007, 2010,2012年).図5にプロットしたように、2010年は 惑星モデル上にプロットされ、それ以外は星モデル上 にプロットされる.時間変化の原因はよくわからない が、2010年は何らかの理由で降着流の粘性が弱まっ て摩擦熱エネルギーが減少したなどして、降着流か らの輝線が弱まり、相対的にショック領域からの輝 線が強くなったのかもしれない.

TWA27Aでは、2010年と2012年はスペクトルが 得られており(速度分解能55.6 km/s),図5にHyの 輝線プロファイルをプロットした.降着流から発せら れた輝線の場合,図1下段中のような,赤方偏移した 吸収を受けた輝線になると期待される[54].一方で ショック領域からの輝線は対称的になると予想され ている[53].2010年と2012年のデータは、どちらも 対称なガウシアン形状をしており、輝線形状に違い はない.これまでの前主系列星の観測でも、降着流 における輻射輸送の効果(光学的厚みと温度)や幾 何学的効果(軌道傾斜角など)によっては、必ずしも 赤方偏移した吸収が観測されるわけではないことが わかっている[54].輝線放射メカニズムを切り分ける



図5:TWA27Aの輝線強度比のプロット(2006, 2007, 2010, 2012年)およびそのスペクトル(速度分解能55.6 km/s). この図はVLT/ Xshooter とKeck/LRIS のアーカイブデータを用いて作成した.

には、輝線プロファイルよりも輝線強度比を比較する 方が効率的のようだ.

もう一点興味深いのは、TWA27Aのショック速度 (v0) が想定よりも小さいことである. 惑星モデルに よると、ショック速度は自由落下速度と同程度と予 測している.よって、ガス円盤の内縁半径が既知の 場合,ショック速度と降着天体の半径から降着天体 の力学的質量を導出できる。TWA27Aは恒星の進 化モデルとの比較から質量および半径が約0.03太陽 質量と約0.3太陽半径と見積もられている[65]. 一方 で図5のプロットでは、2010年のTWA27Aのショッ ク速度はおよそ40 km/sと見積もられ、0.3太陽半 径を用いると、<br />
無限遠からの自由落下を仮定すると 力学的質量は約0.001太陽質量となる.力学的質量 が大きく異なる理由としては、おそらくガス円盤の内 縁半径が小さく、自由落下速度も小さい可能性があ る. ガス円盤の内縁半径は、ガス圧力と降着天体の 磁場の釣り合いで決まる[38].惑星モデルから降着 天体の力学的質量を見積もるには、ガス円盤の内縁 半径を見積もる必要があるだろう. ガス円盤の内縁 半径はしばしば降着天体の半径の5倍と仮定される が[38]. それでも自由落下速度は無限遠の場合と比 較して10%ほどしか減少しないので、力学的質量は その2乗の25%ほどしか変わらない.ちなみに前述 のDelorme 1 (AB)b惑星(12-14木星質量) におい ては、輝線強度比の解析からショック速度は90-150 km/sと見積もられ[57], 無限遠からの自由落下を仮 定すると力学的質量は約5-9木星質量となるため、や はり小さく見積もられる.

#### 5. 質量降着率の違い

質量降着におけるモデルの使い分けの重要性は, 見積もられる質量降着率の違いにある.惑星モデル 上にプロットされた17天体は,惑星モデルから質量 降着率を導出すべきであろう.従来は星モデルから 見積もられていたので,これら17天体について2つ のモデルで見積もった質量降着率の違いを図6にプ ロットした.質量降着率が大きい場合には,2つの違 いは大きくないが,質量降着率が小さい場合,違い が大きくなる.図4に関して,今回のデータの範囲で は,この違いを考慮しても惑星モデル上にプロットされ る天体の降着光度と質量降着率はせいぜい1 dex程 度しか大きくならないため,傾向が変わることはない.

一般に、質量降着率は降着天体の質量に比例す るため、惑星はより小さな質量降着率となり、モデル の違いよって見積もられる質量降着率の違いはさら に大きくなることが予想される.実際、TWA27B(表 1)では、惑星モデルで質量降着率を見積もったほう が約50倍大きくなっている[44].この違いは、星モ デルではバルマー連続光から質量降着率を見積もっ ているのに対し、惑星モデルでは輝線から見積もっ ていることに起因する.詳細については青山氏の当 特集記事を参照されたい.質量降着率の小さな天体 では、バルマー連続光よりも輝線の強度が強いため [40]、星モデルでは正しく質量降着率を導出できな い可能性がある.よって、輝線メカニズムを正しく判 断し、適切なモデルを用いて質量降着率を見積もる 必要がある.



図6:星モデルと惑星モデルから見積もった質量降着率の違い.降 着率が小さい場合,2つのモデルの降着率の違いが大きくな る.縦軸の誤差が大きいが、星モデルで輝線強度を降着光 度に変換し、さらに質量降着率に変換する際に0.3 dex以上 のエラーが含まれるためである.この図はVLT/Xshooter, Keck/LRIS,およびSDSSのアーカイブデータを用いて作成 した.

## 6. まとめと今後の展望

降着中の惑星質量天体は、観測数が限られている ため、降着メカニズムや輝線放射メカニズムはまだ完 全には理解されていない. 輝線放射メカニズムにつ いて、星と惑星の物理状態を仮定してそれぞれモデ ルが構築されているが、どちらを惑星の輝線放射を よく説明するかは統計的にわかっていない、そこで、 惑星より重い天体だが、96天体の褐色矮星と超低質 量星(0.02から0.1太陽質量)において輝線放射メカ ニズムを調べたところ、96天体中17天体が惑星モデ ルで説明できることが分かった.このことから推測 するに,惑星質量天体でも星モデルでその輝線放射 メカニズムを説明できる天体が存在するだろう. 質量 降着率の小さな惑星質量天体では. 惑星モデルと星 モデルから見積もられる質量降着率が大きく異なる と予想されるため、輝線放射メカニズムを切り分ける ことは重要である.

今後の観測の展望について,原始惑星系円盤に 埋もれた惑星に質量降着を探すには,可視光(Haな ど)での高コントラスト観測が必要となる.表1に挙 げた天体の多くは,可視光での高コントラスト観測に は主星が暗くて適していない.しかし、すばる望遠 鏡に搭載された、現在アップグレード中の極限補償 光学装置SCExAOを用いれば. 主星が暗くてもH aでの高コントラスト観測が可能になると期待してい る.一方で.原始惑星系円盤に埋もれていない降着 中の惑星と自由浮遊惑星に関しては、地上観測、口径 6.5 m宇宙望遠鏡 IWST. 2023年に打ち上げられた ばかりの広視野宇宙望遠鏡Euclidなどによって、星 形成領域に惑星質量天体が多数見つかり始めてい る[66-68]. それらが降着しているかは今後の観測を 待つ必要があるが、すばる望遠鏡に搭載された多天 体分光装置PFSによるHaなどの分光観測に期待し たい.特に減光の大きな惑星質量天体では、赤外線 で観測可能なIWSTが力を発揮するだろう.現状で は降着中の惑星質量天体は20天体程度だが、5年後 には200天体程度かそれ以上になっていることに期 待したい.

## 謝辞

原稿を注意深く隅々まで読んで頂き,有益なコメ ントを下さった匿名レフリー,図2および図3のモデ ル計算をしてくださった青山雄彦氏,本特集原稿の 執筆機会を与えてくださった遊星人編集長の三浦均 氏,編集の野津翔太氏に深く感謝を申し上げます. また本研究はJSPS科研費JP23K03463の助成を受 けています.

# 参考文献

- [1] 小林浩, 2022, 日本惑星科学会誌遊星人 31, 114.
- [2] 芝池諭人, 2019, 日本惑星科学会誌遊星人 28, 313.
- [3] Bae, J. et al., 2023, ASPC 534, 423.
- [4] Oberg, K. et al., 2011, ApJ 743, 16.
- [5] 谷川享行, 2011, 日本惑星科学会誌遊星人 20, 262.
- [6] Keppler, M. et al., 2018, A&A 617, 44.
- [7] Benisty, M. et al., 2021, ApJ 916, 2.
- [8] Haffert, S. et al., 2021, NatAs 3, 749.
- [9] Balsalobre-Ruza, O. et al., 2023, A&A 675, 172.
- [10] Currie, T. et al., 2022, NatAs 6,751.

- [11] 鵜山太智, 2023, 天文月報8月号, 416. [12] Tang, Y. et al., 2017, ApJ 840, 32. [13] Hammond, I. et al., 2023, MNRAS 522, 51. [14] Law, C. et al., 2023, ApJ 952, 19. [15] Yu, H. et al., 2021, ApJL 920, 33. [16] Currie, T. et al., 2015, ApJ 814, 27. [17] Booth, A. et al., 2023, A&A 669, 53. [18] Wagner, K. et al., 2023, NatAs 7, 1208. [19] Pinte, C. et al., 2023, MNRAS 526, 41. [20] 塚越崇, 2019, 日本惑星科学会誌遊星人 28, 207. [21] Teague, R. et al., 2019, ApJ 884, 56. [22] Yoshida, T. et al., 2024, arXiv:2407.14395. [23] Bae, J. et al., 2022, ApJL 934, L20. [24] Pinte, C. et al., 2018, ApJ 860, 13. [25] Teague, T. et al., 2019, Nature 574, 378. [26] Isella, A. et al., 2018, ApJL 869, 49. [27] Pinte, C. et al., 2020, ApJ 890, 9. [28] Pinte, C. et al., 2019, NatAs 3, 1109. [29] Rosotti, G. et al., 2021, MNRAS 501, 3427. [30] Boehler, Y. et al., 2017, ApJ 840, 60. [31] Long, F. et al., 2022, ApJL 937, 1. [32] Sierra, A. et al., 2024, arXiv:2407.16651 [33] Morton, D., 1991, ApJS 77, 119. [34] Herczeg, G. et al., 2004, ApJ 607, 369. [35] Marleau, G. et al., 2023, ApJ 952, 89. [36] Marleau, G. et al., 2022, A&A 657, 38. [37] Chinchilla, P. et al., 2021, A&A 645, 17. [38] Luhman, K. et al., 2005, ApJ 635, 93. [39] Eriksson, S. et al., 2020, A&A 638, 6.
- [40] Zhou, Y. et al., 2014, ApJL 783, 17.

- [41] Mohanty, S. et al., 2005, ApJ 626, 498.
- [42] Joergens, V. et al., 2013, A&A 558, 7.
- [43] Santamaria-Miranda, A. et al., 2018, MNRAS 475, 2994.
- [44] Marleau, G. et al., 2024, ApJ 964, 70.
- [45] Zhang, Y. et al., 2021, Nature 595, 370.
- [46] Zapatero Osorio, M. et al., 2007, A&A 472, 9.
- [47] Lecavelier des Etangs, A. et al., 2022, NewAR 9401641.
- [48] Hartmann, L. et al., 2016, ARAA 54, 135.
- [49] Bryan, M. et al., 2020, ApJ 905, 37.
- [50] Morris, E. et al., 2024, arXiv:2405.13125.
- [51] Bertout, C. et al., 1988, ApJ 330, 350.
- [52] Takasao, S. et al., 2021, ApJ 921, 10.
- [53] Aoyama, Y. et al., 2018, ApJ 866, 84.
- [54] Edwards, S. et al., 1994, AJ 108, 1056.
- [55] Calvet, N. et al., 1998, ApJ 509, 801.
- [56] Kwan, J. et al., 2011, MNRAS 411, 2383.
- [57] Betti, S. et al., 2022, ApJ 935, 18.
- [58] Muzerolle, J. et al., 1998, ApJ 492, 743.
- [59] Hashimoto, J. et al., 2020, AJ 159, 222.
- [60] Uyama, T. et al., 2021, AJ 162, 214.
- [61] Christiaens, V. et al., 2024, A&A 685, 1.
- [62] Stolker, T. et al., 2020, A&A 644, 13.
- [63] Demars, D. et al., 2023, A&A 676, 123.
- [64] Chauvin, G. et al., 2005, A&A 438, 25.
- [65] Herczeg, G. et al., 2008, ApJ 681, 594.
- [66] Miret-Roig, N. et al., 2022, NatAs 6, 89.
- [67] Pearson, S. et al., 2023, arXiv:2310.01231.
- [68] Martín, E. et al., 2024, arXiv:2405.13497.



#### 橋本 淳

自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター特 任助教.総合研究大学院大学天文科学専攻博士課 程終了.博士(理学).国立天文台特任研究員,米オ クラホマ大学研究員を経て,2015年より現職.専門 は原始惑星系円盤および形成中の惑星の観測的研 究.日本天文学会に所属.