

集積期の原始巨大ガス惑星からの 水素輝線放射強度の理論的推定

青山雄彦¹、生駒大洋¹、谷川享行²

¹東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

²一関工業高等専門学校

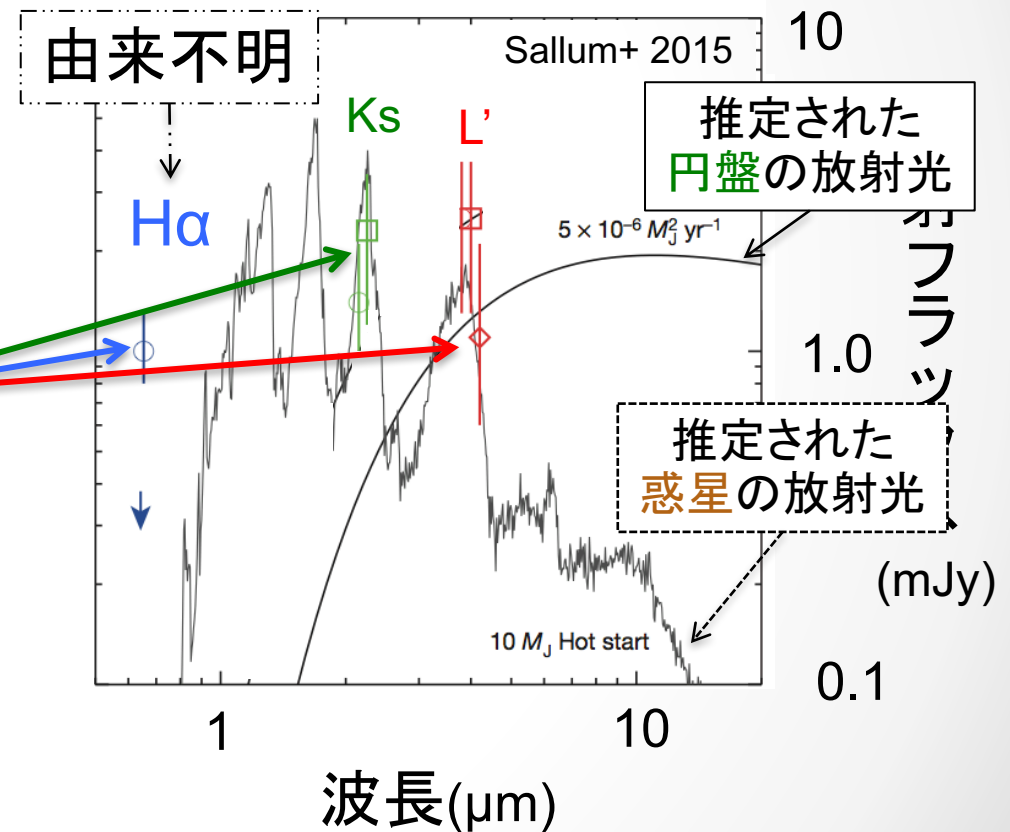
1. 背景

1-1. ガス集積期の巨大ガス惑星観測

撮像された形成中の惑星



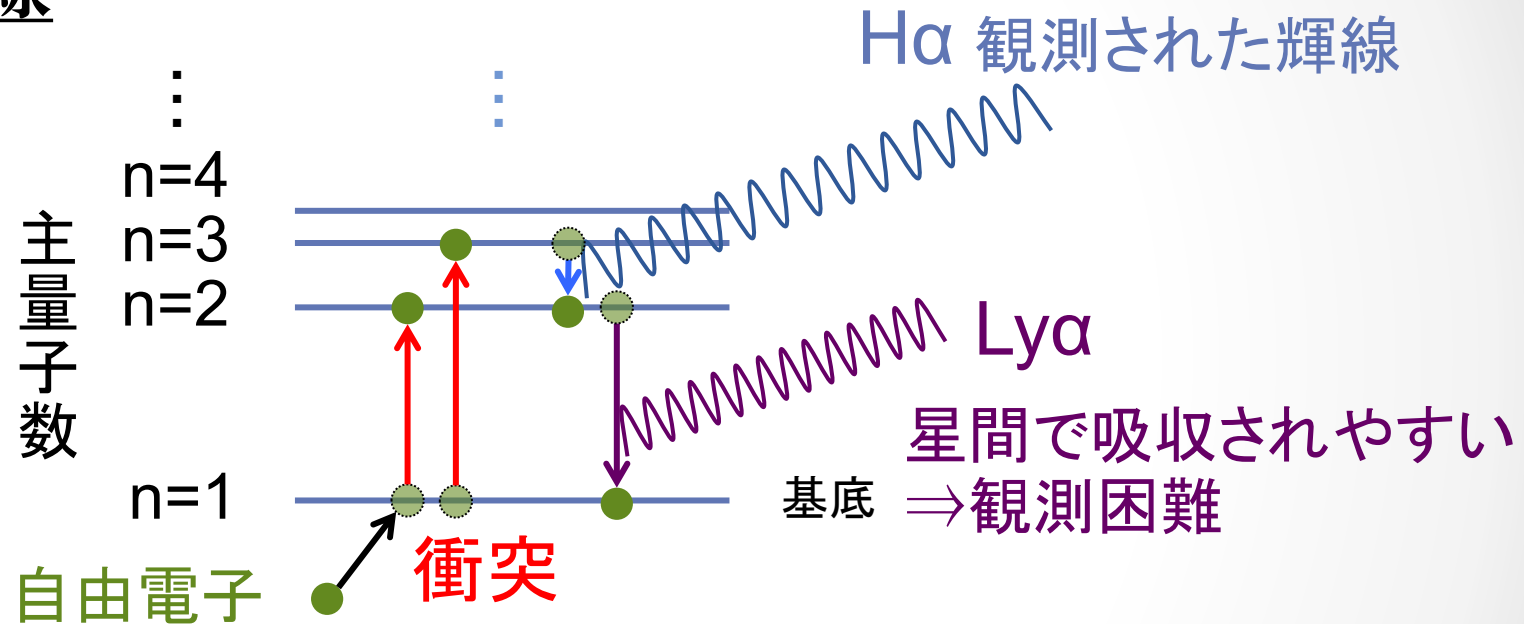
放射スペクトルの観測と理論



- ✓ 赤外光 ⇒ 理論的解釈あり
- ✓ H α 輝線 ⇒ 理論的解釈なし

1-2. 水素輝線

電子準位と輝線

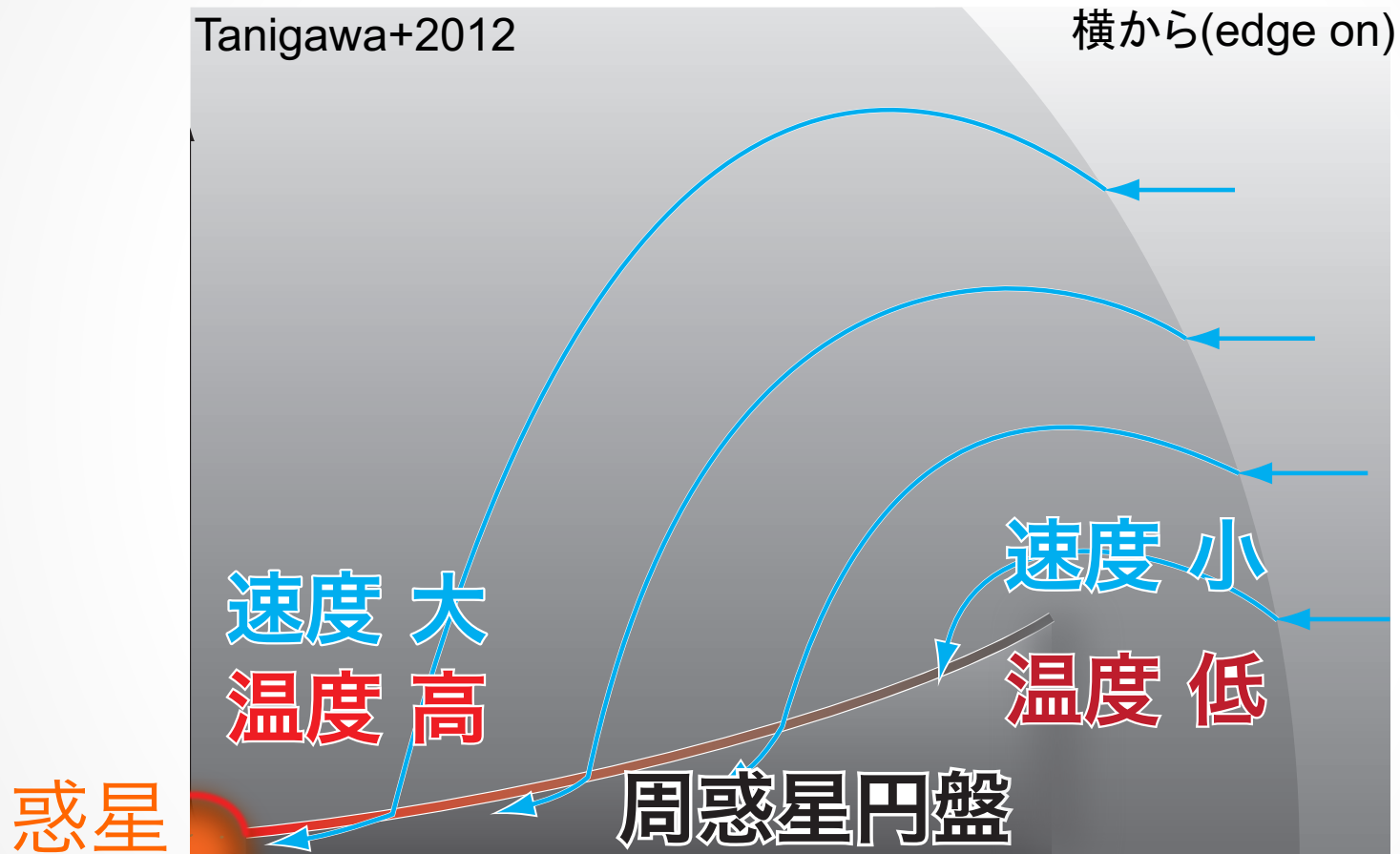


⇒ 高温 ($> 10^4 \text{K}$) が必要

惑星・周惑星円盤の黒体温度は高々数千K

⇒ 瞬間的な加熱現象が必要

1-3. 鉛直降着流と衝撃波



- ✓ 惑星近傍では高温($>10^4\text{K}$)になりうる
- ✓ 即座に冷却するため黒体放射には影響しない

1-4. 目的

イントロまとめ

- ガス集積期の巨大ガス惑星からのH α 輝線が観測された
- 観測された水素輝線の発生メカニズムは解明されていない
- 鉛直降着流に伴う衝撃波加熱が有力な候補である

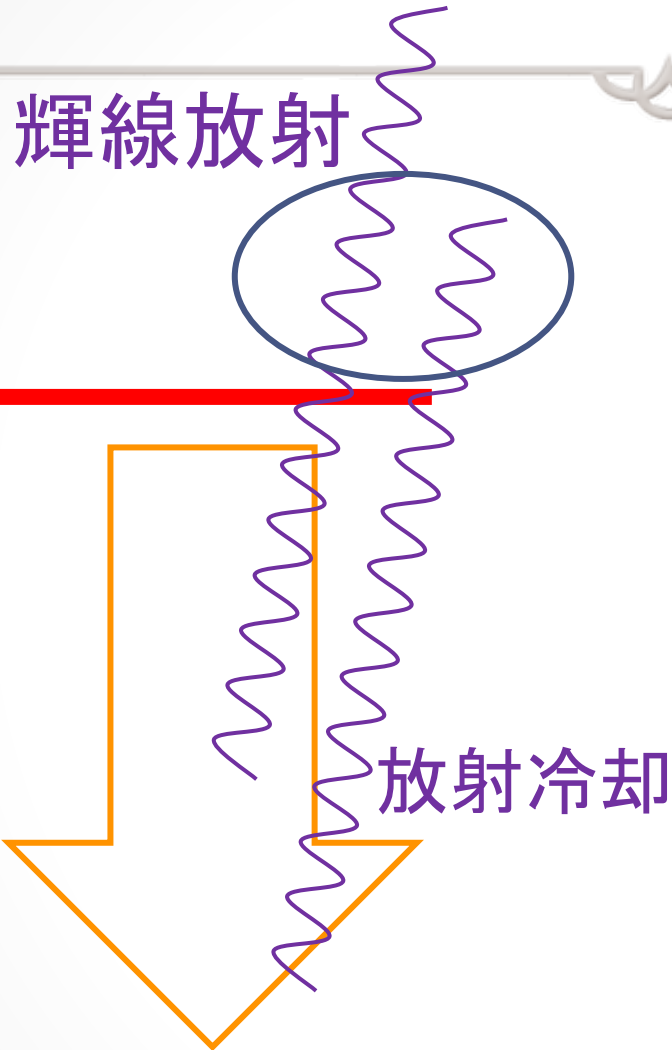
目的

- 衝撃波による水素輝線の放射プロセスを究明する
- 鉛直降着流による水素輝線強度を定量する
- 水素輝線の観測強度から、形成環境を制約する

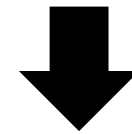
2. 手法

2-1. モデル

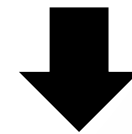
1次元流



衝撃波

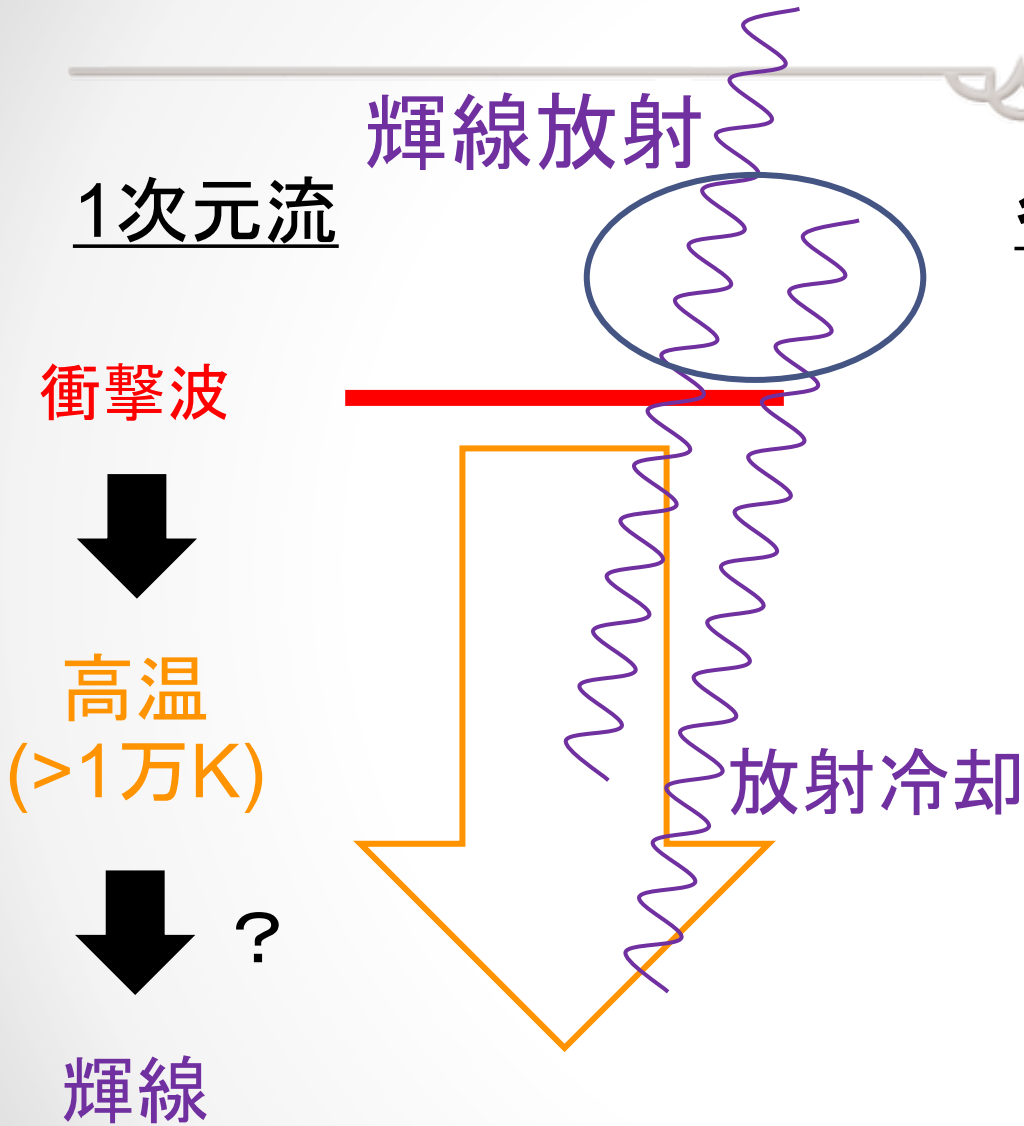


高温
(>1 万K)

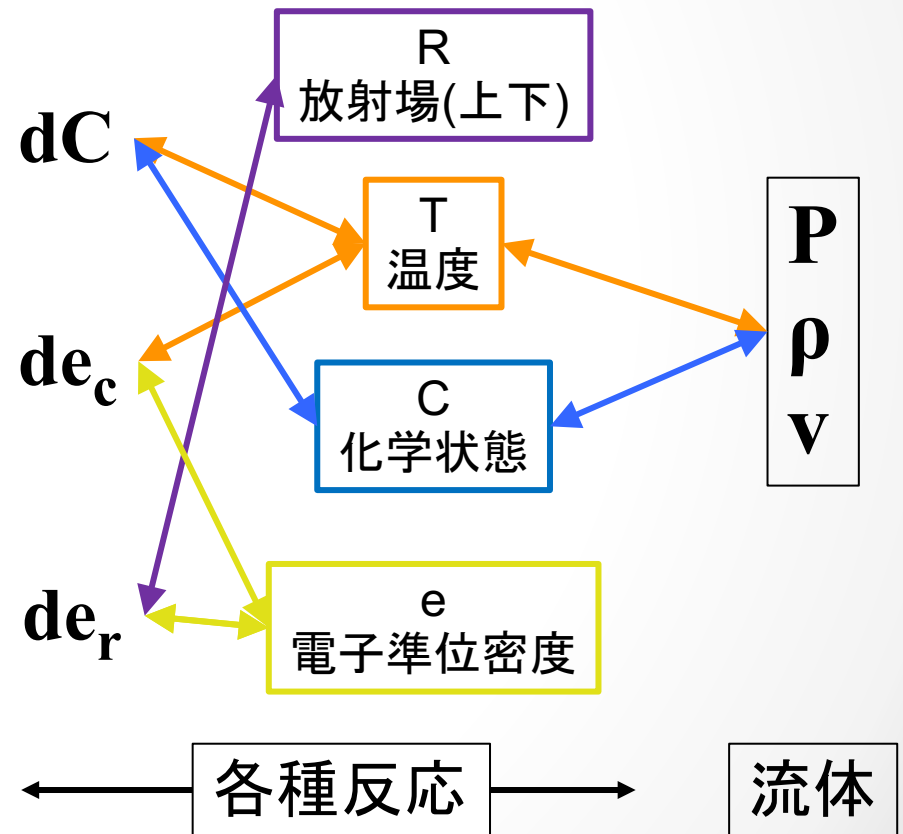


輝線

2-1. モデル



各パラメータの依存関係



(放射輝線強度 \rightleftharpoons 衝撃波面での上向き放射場)

2-2. 基礎方程式1

- 質量フラックス保存 $\rho v = \rho_0 v_0$
初期値(添字0)
- 運動量フラックス保存 $\rho v^2 + P = \rho_0 v_0^2 + P_0$
強い衝撃波 ($P_0/P \ll 1$)
- エネルギー方程式 $\frac{DE}{Dt} = (-\Lambda + \Gamma) + \frac{p + E}{\rho} \frac{D\rho}{Dt}$

	冷却(Λ)	加熱(Γ)
H ₂ 分子結合	解離	再結合
H電子遷移	励起	脱励起
分子輝線 (CO, OH, H ₂ O)	放射	吸収：Hのみ

2-3. 基礎方程式2

H, He, C, Oからなる33化学種

○ 化学反応

$$\frac{dn_i}{dt} = \sum_{j=1}^{33} \sum_{k=1}^{33} \left(K_{jk} n_j n_k + \sum_{l=1}^{33} K_{jkl} n_j n_k n_l \right)$$

○ 水素の電子遷移反応 中性水素の10準位+イオン

$$\frac{dn_{H_i}}{dt} = \sum_{j=1}^{10} \left[\overset{\text{自由電子衝突}}{K_{ji} n_{H_j} n_e} - \overset{\text{自由電子衝突}}{K_{ij} n_{H_i} n_e} + \overset{\text{自然遷移}}{A_{ji} n_{H_j}} - \overset{\text{自然遷移}}{A_{ij} n_{H_i}} \right]$$

$$+ \overset{\text{吸収・誘導放射}}{F_{ij} (B_{ij}^{abs} n_j - B_{ij}^{ind} n_i - B_{ji}^{abs} n_i - B_{ji}^{ind} n_j)} - \left. \frac{dn_{H^+}}{dt} \right|_i$$

イオン反応
(次ページ)

○ 放射場

$$\frac{dF_{ij}(v_0, n_0, t)}{dt} = \left[\overset{\text{自然遷移}}{A_{ij} n_{H_i}} + \overset{\text{吸収・誘導放射}}{F_{ij} (B_{ij}^{ind} n_i - B_{ij}^{abs} n_j)} \right] \times E_{ji} v dt$$

2-4. 基礎方程式3

○ 水素イオン反応

$$\frac{dn_{\text{H}^+}}{dt} = \sum_{j=1}^{10} \left[\overset{\text{自由電子衝突}}{K_{j\text{H}^+} n_{\text{H}^+ j} n_e} - \overset{\text{自然遷移}}{K_{\text{H}^+ j} n_{\text{H}^+} n_e} A_{\text{H}^+ j} n_{\text{H}^+} n_e + F_{\text{H}^+ j} \left(B_{\text{H}^+ j}^{\text{abs}} n_j - B_{\text{H}^+ j}^{\text{ind}} n_{\text{H}^+} n_e \right) \right]$$

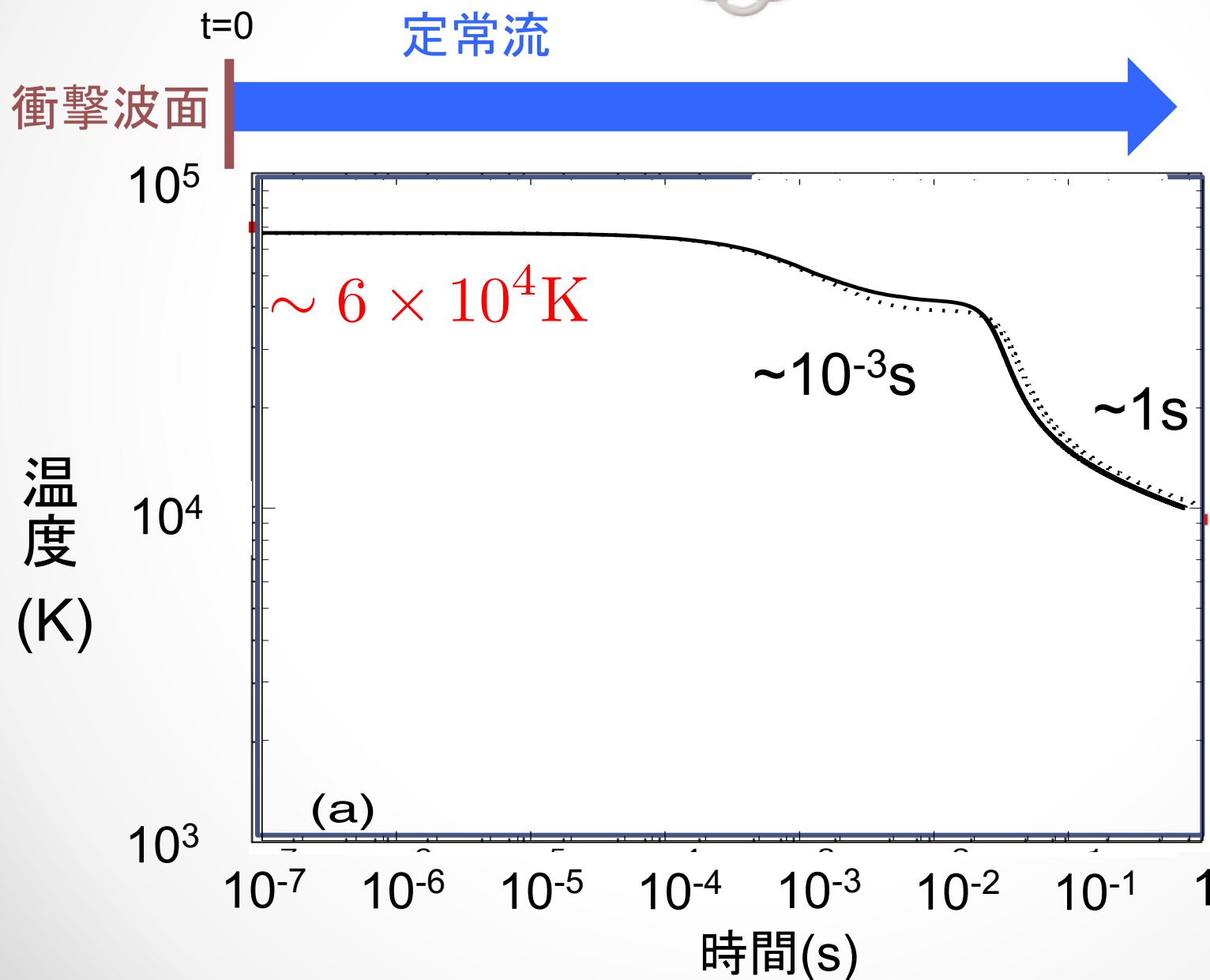
○ 電離連続放射場

$$\frac{dF_{\text{H}^+ j}(v_0, n_0, t)}{dt} = \left[A_{\text{H}^+ j} n_{\text{H}^+} n_e + F_{\text{H}^+ j} \left(B_{\text{H}^+ j}^{\text{ind}} n_{\text{H}^+} n_e - B_{\text{H}^+ j}^{\text{abs}} n_j \right) \right] \times E_{j\text{H}^+} v dt$$

3. 結果

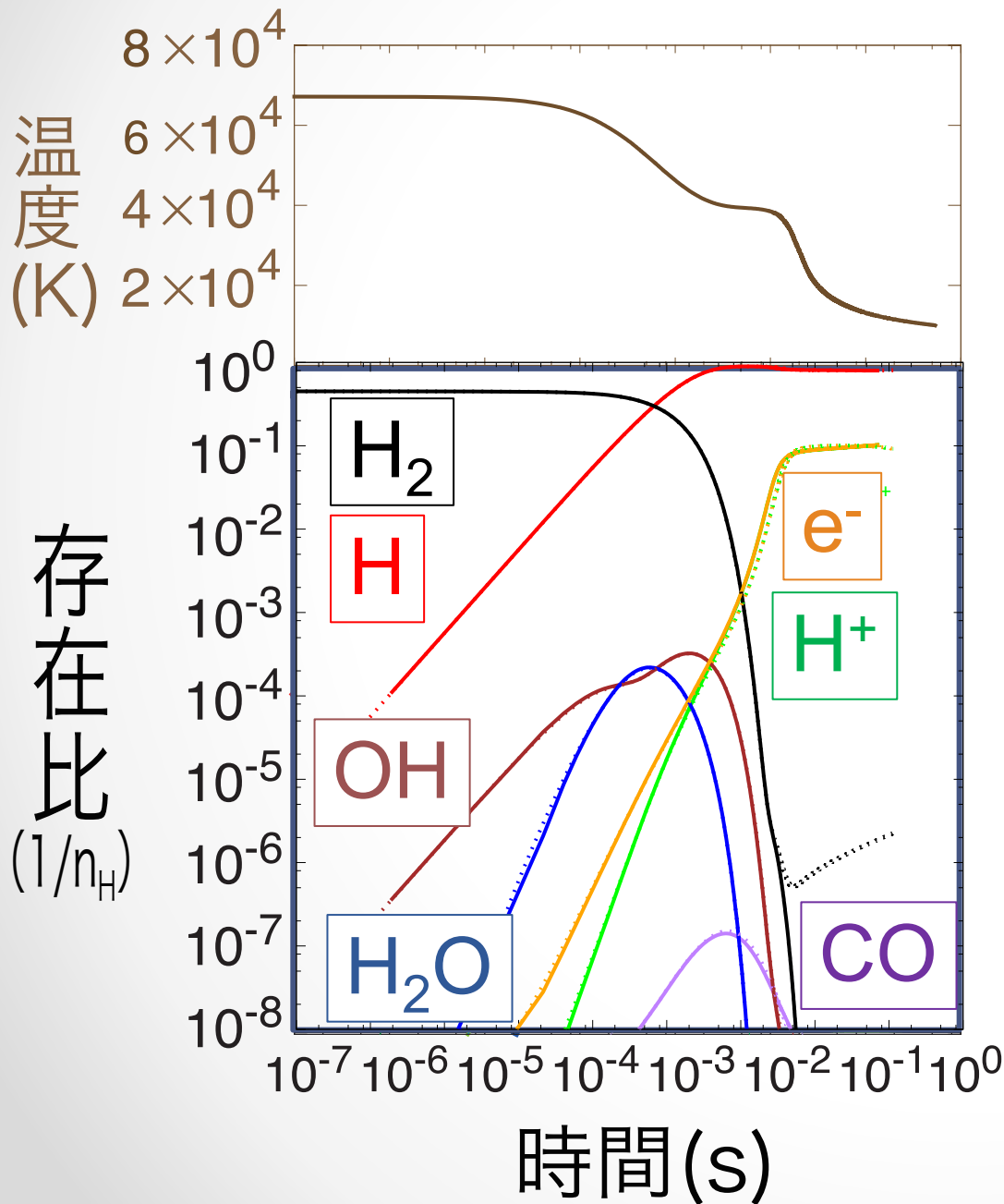
3-1. 温度の時間変化

$$v_0 = 40 \text{ km/s}$$
$$n_0 = 10^{17} \text{ m}^{-3}$$

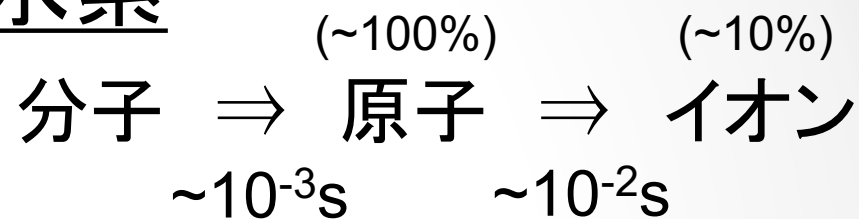


3-2. 化学種の時間変化

$v_0 = 40 \text{ km/s}$
 $n_0 = 10^{17} \text{ m}^{-3}$



水素



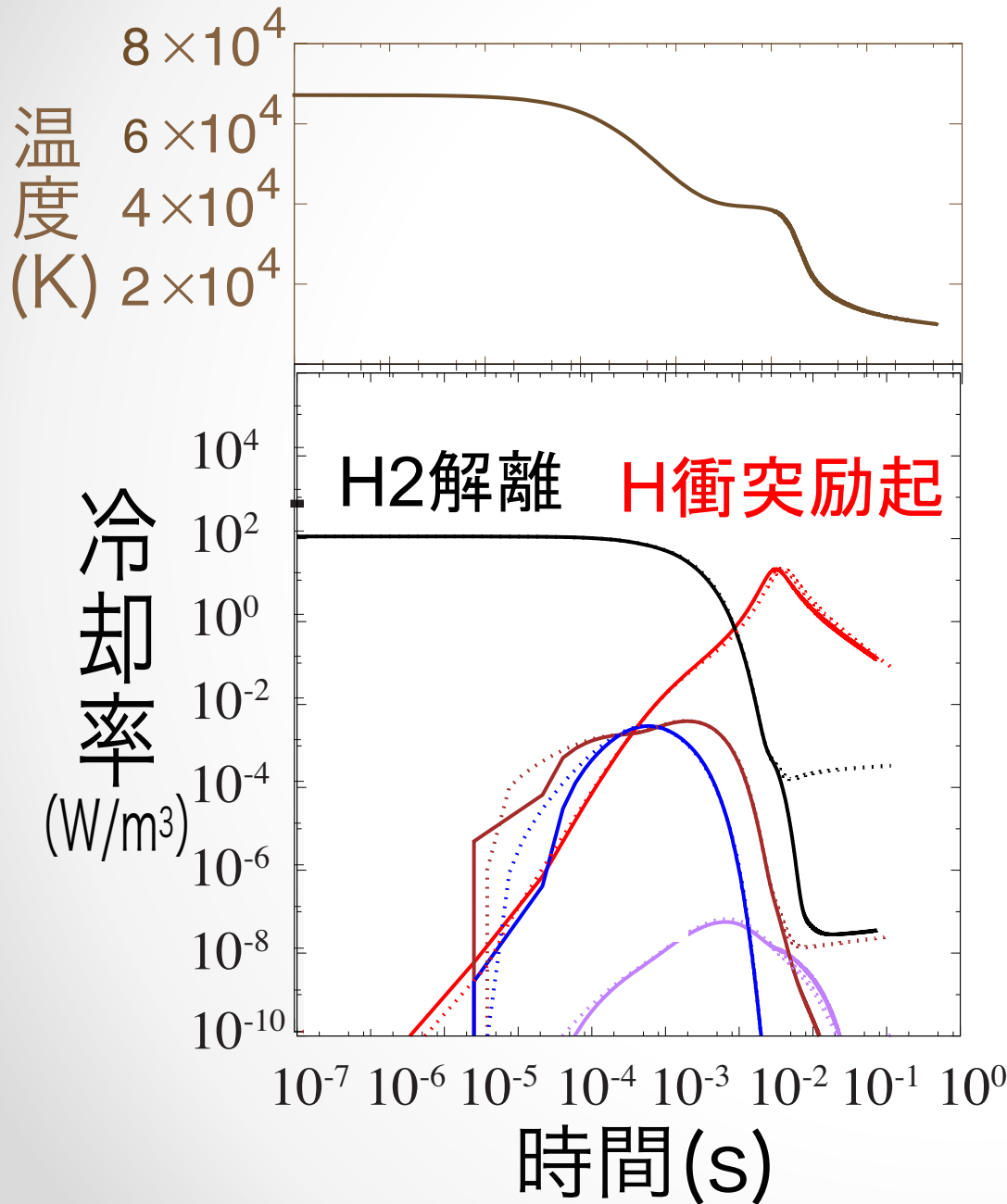
自由電子

H_2, He 由来 ($< 10^{-3} \text{ s}$)

H 由来 ($> 10^{-3} \text{ s}$)

3-3. 冷却過程

$v_0=40\text{km/s}$
 $n_0=10^{17}\text{m}^{-3}$



支配的冷却過程

H₂解離 ($<10^{-3}\text{s}$)

H励起 ($>10^{-3}\text{s}$)

エネルギーの流れ

熱エネルギー

電子との衝突

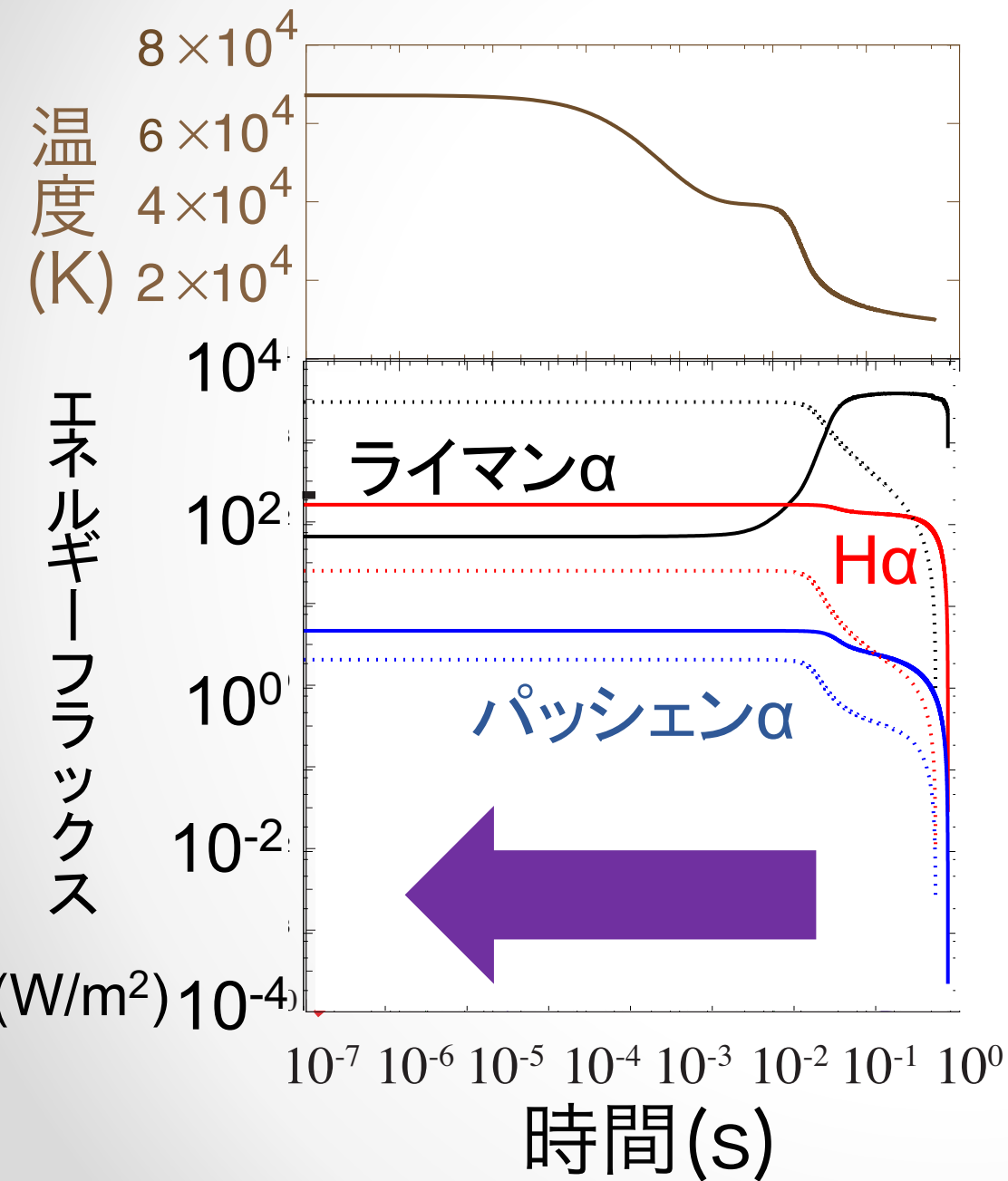
電子の準位エネルギー

放射遷移

光子

3-4. 放射場

$$v_0 = 40 \text{ km/s}$$
$$n_0 = 10^{17} \text{ m}^{-3}$$



ライマン系列

強い吸収 ($\sim 10^{-1}$ s)

➤ 吸収の効果で、桁で弱くなる

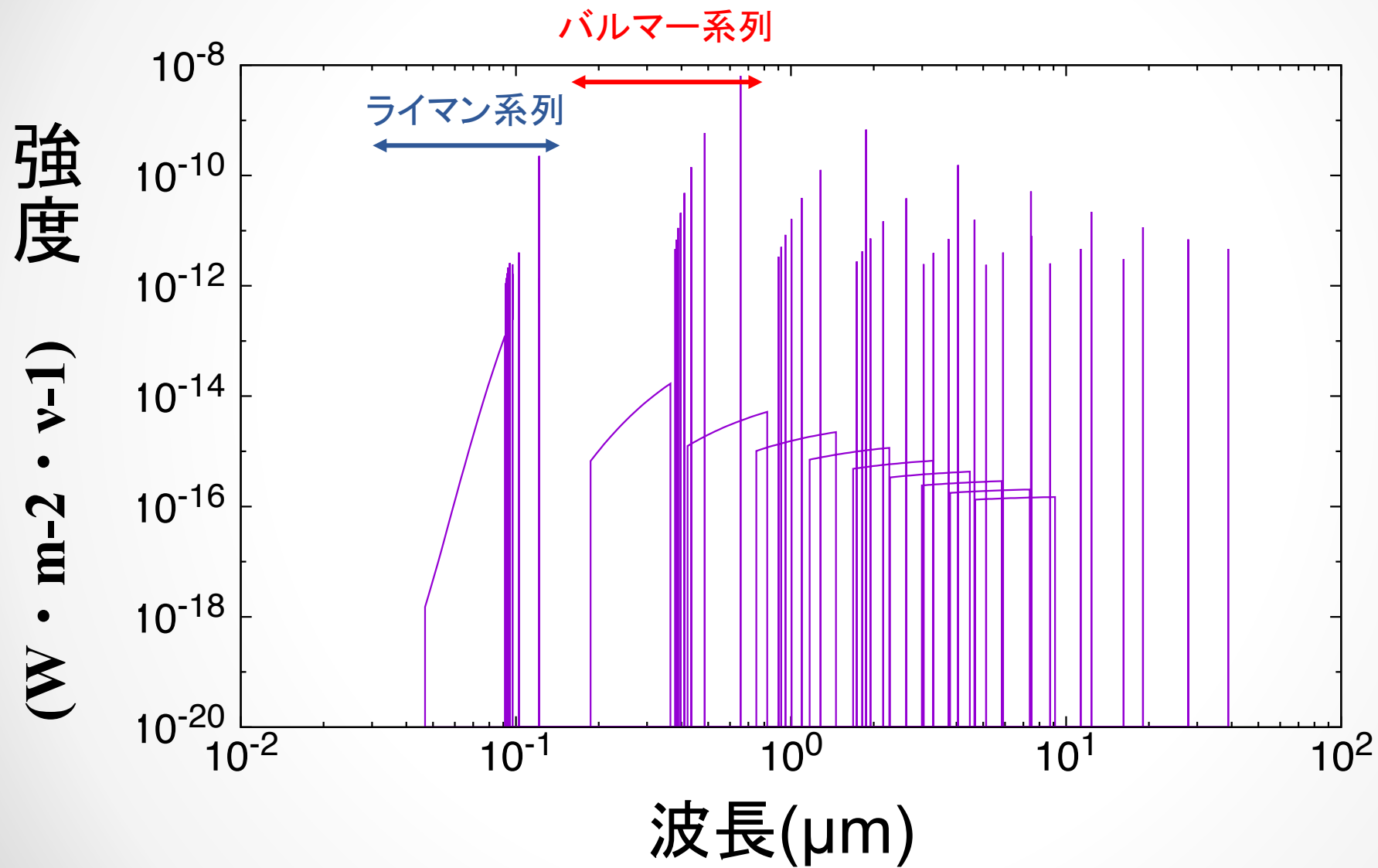
その他

ほぼ単調増加

➤ ライマン系列が弱まる分、
強くなる

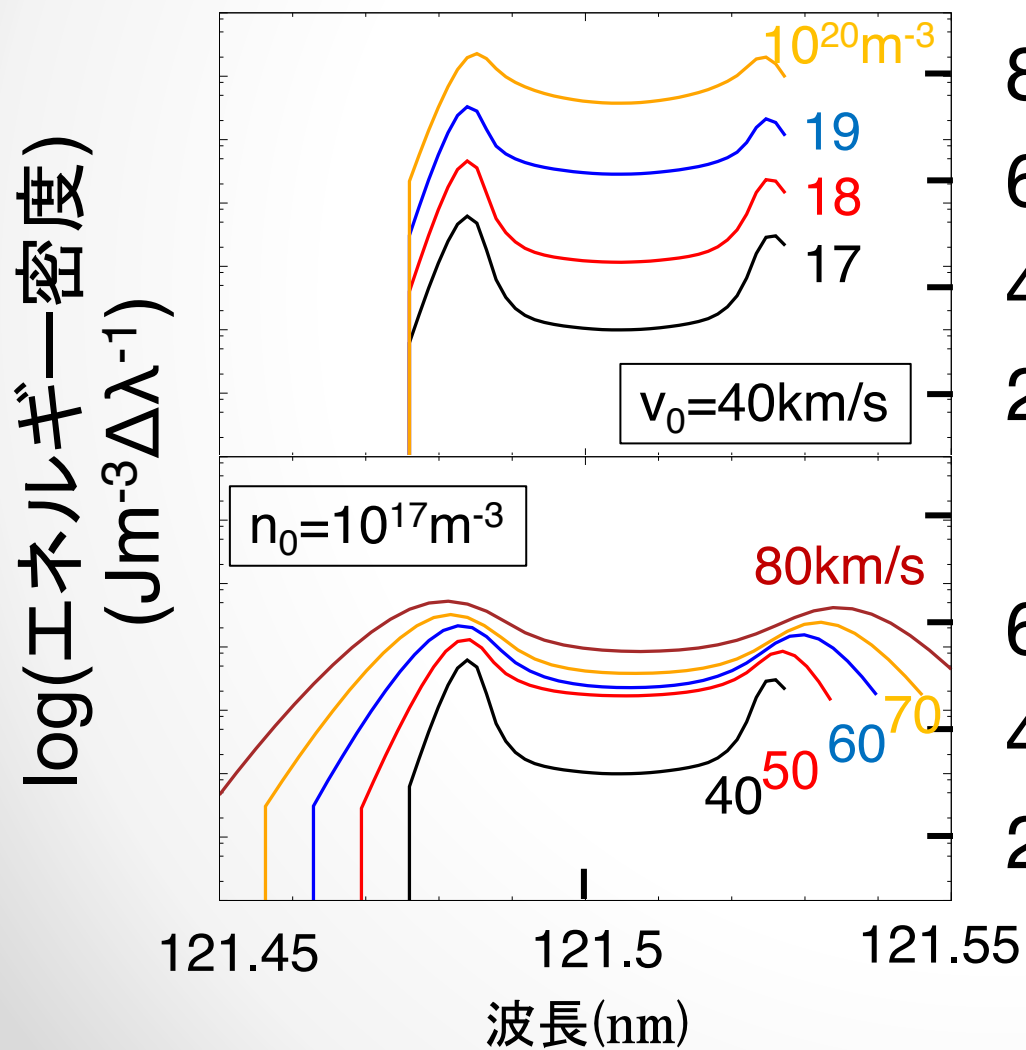
3-5. 輝線SED

$v_0 = 40 \text{ km/s}$
 $n_0 = 10^{17} \text{ m}^{-3}$

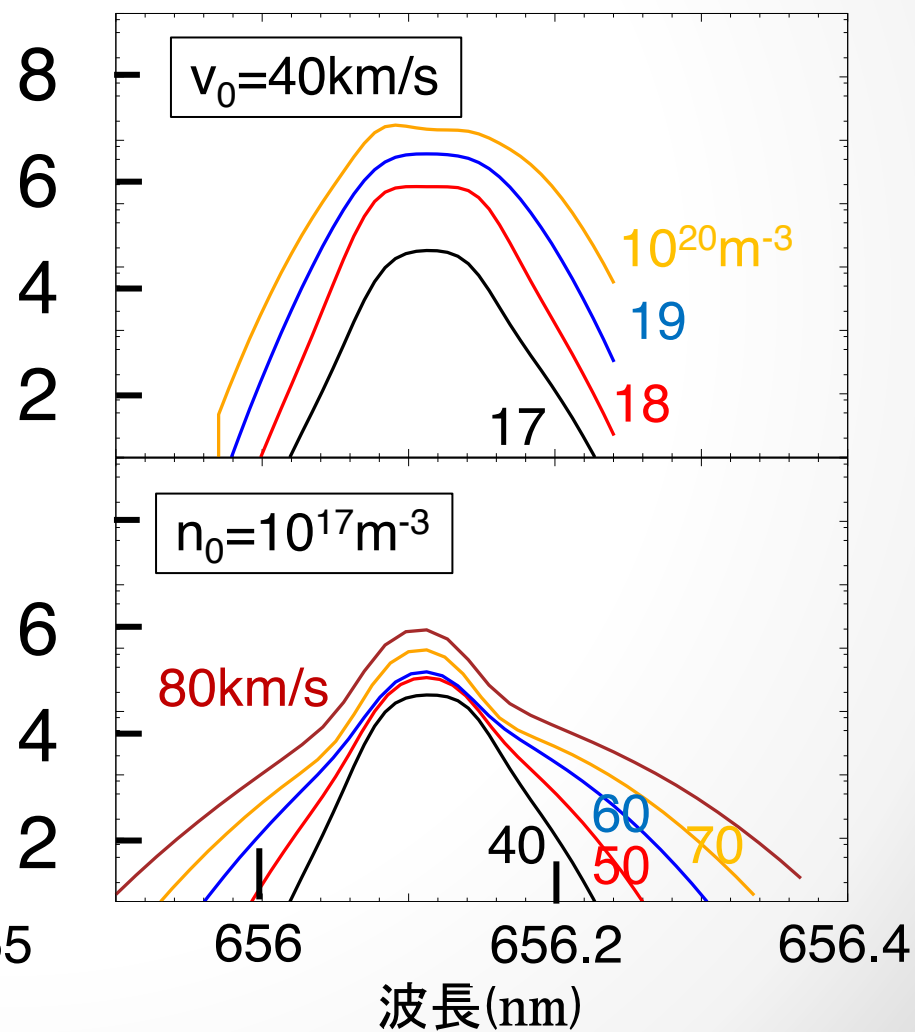


3-6. 輝線スペクトルの形状

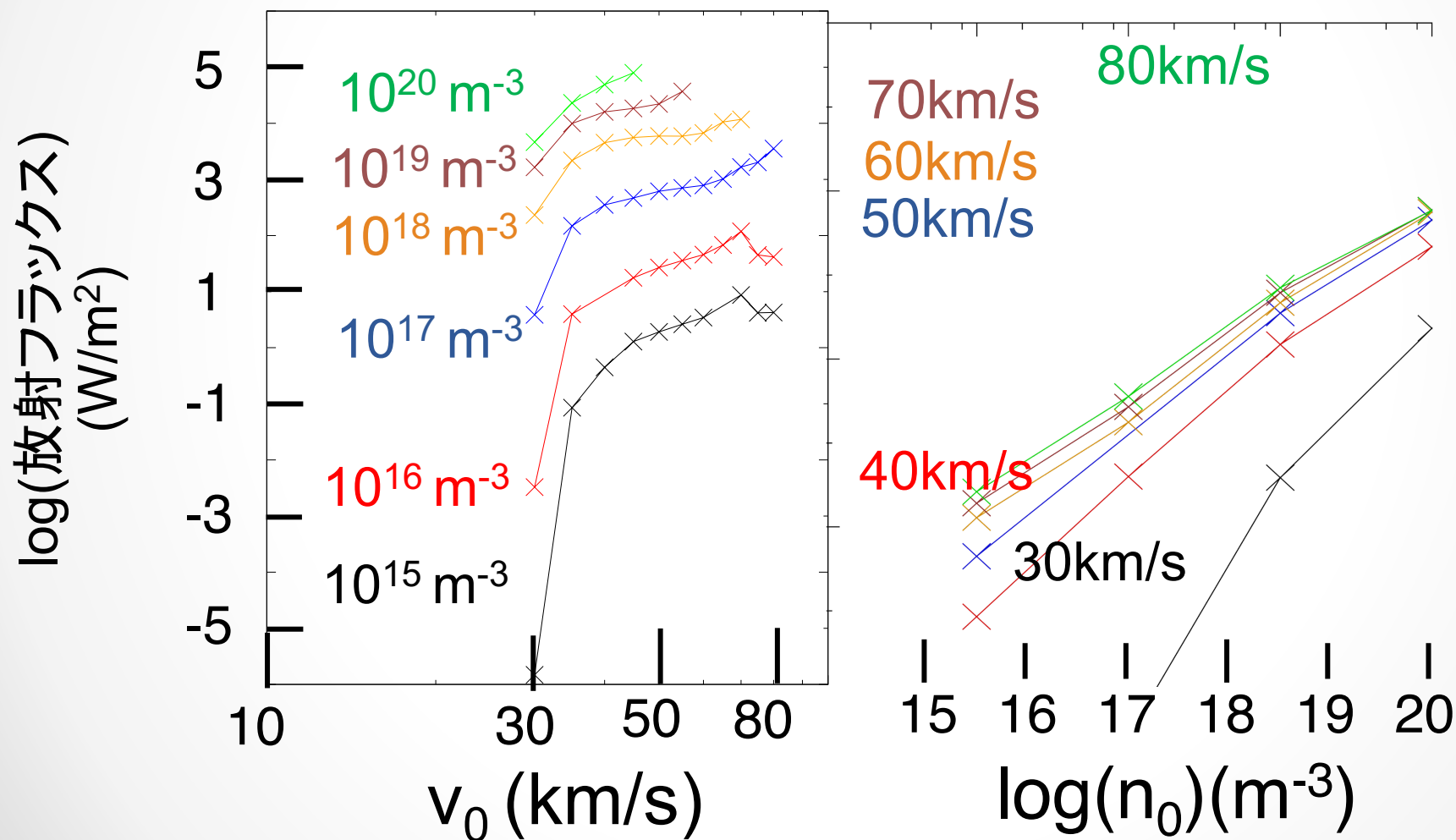
ライマン α



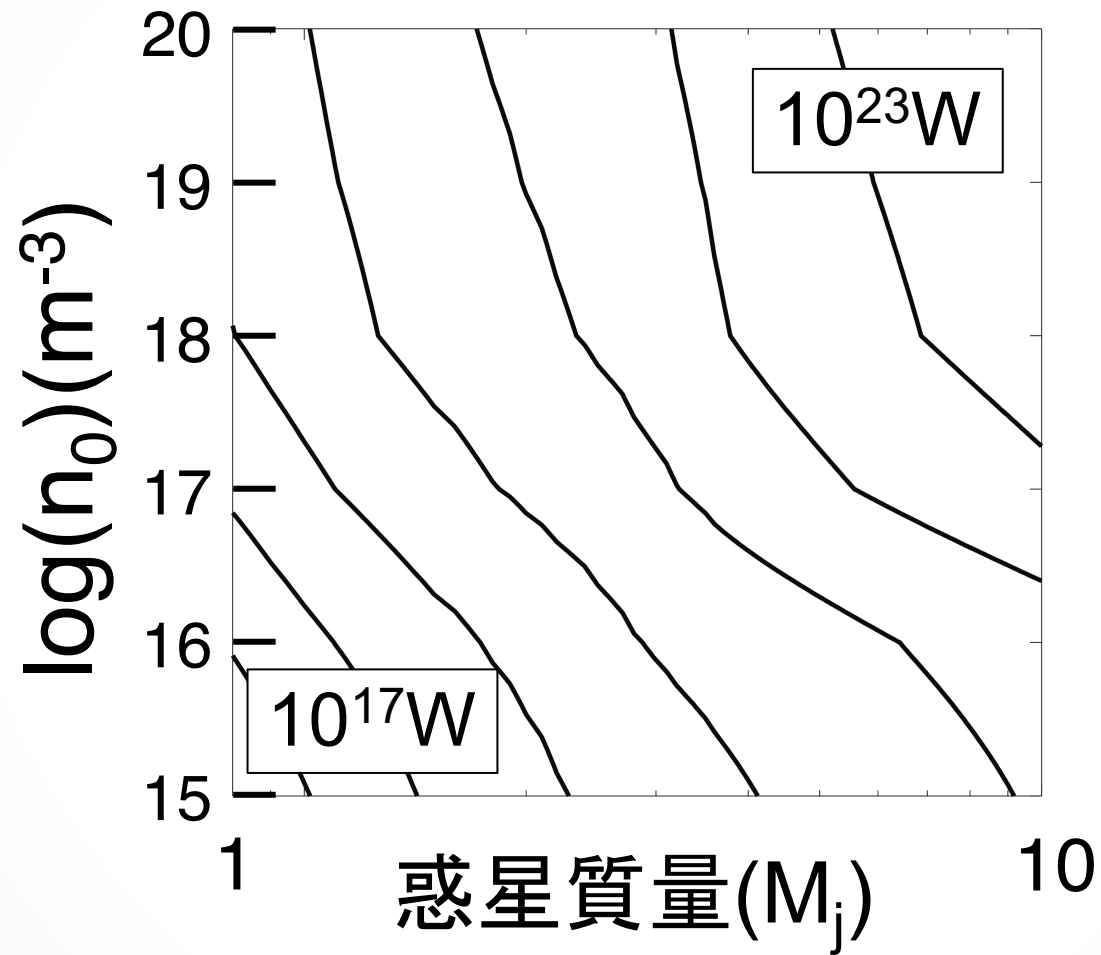
H α



3-7. パラメータ依存性

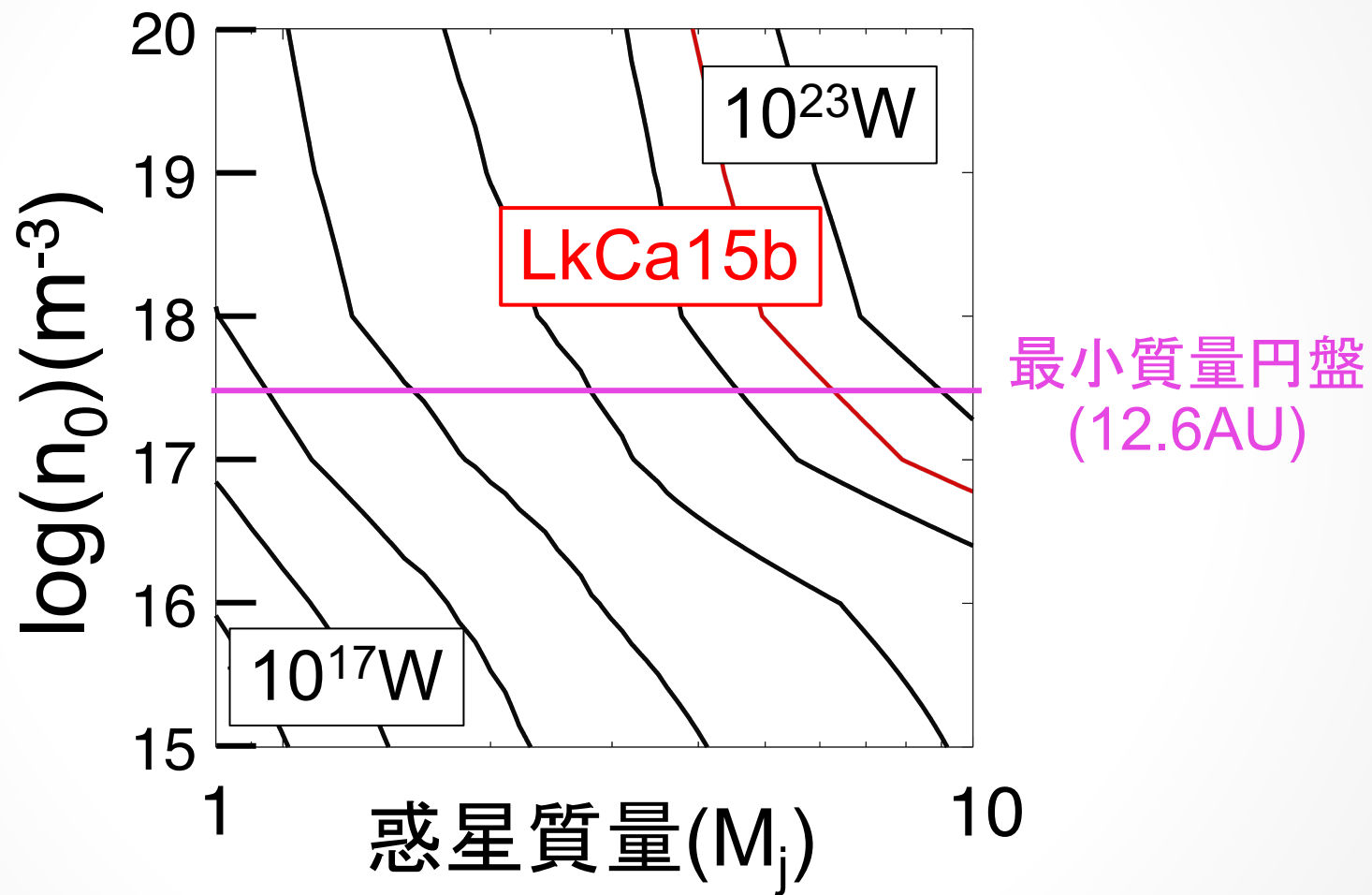


3-12. H α 輝度

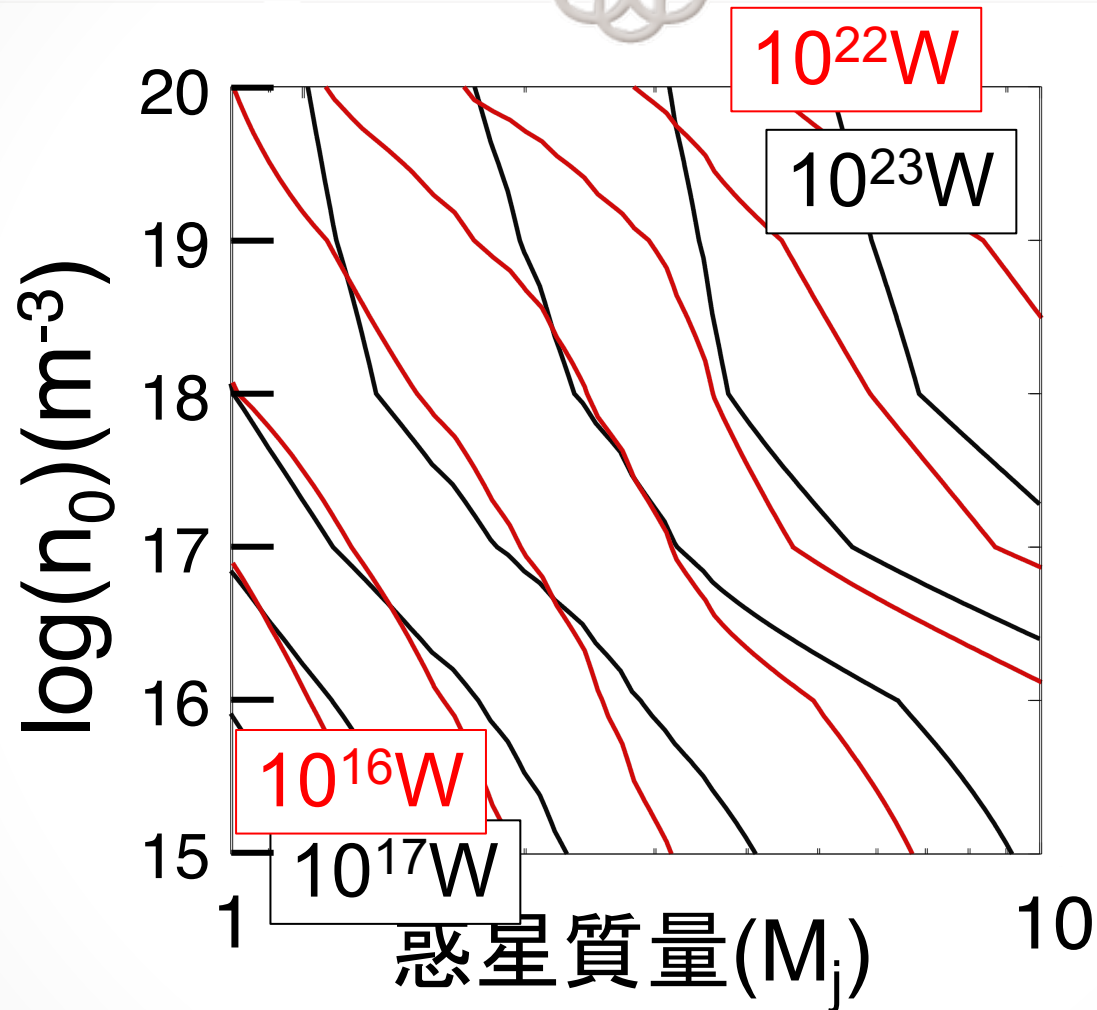


4. 議論

4-1. LkCa15b



4-2. 複数波長観測の可能性



ファクターの制度があれば縮退が解ける？

まとめ

背景

- ✓ 巨大ガス惑星へのガス集積過程を知りたい
- ✓ ガス集積中の巨大ガス惑星が観測され始めている

目的

- ✓ ガス惑星への**ガス集積環境**を制約する
- ✓ 観測されたの**H α 輝線強度**を説明する

手法

- ✓ 衝撃波後面の流体を、**化学反応**と**電子準位遷移**と同時に数値計算した
- ✓ 形成期の巨大ガス惑星からの**H α 輝線強度**を推定した

結果

- ✓ このモデルに基づくH α 強度は**観測を説明可能**であった
- ✓ 観測精度によっては、複数輝線の観測によって**惑星質量**と**ガス数密度**を**定量できる可能性がある**