

太陽系外惑星・褐色矮星大気の詳細解析に向けた 水素・ヘリウム大気中の高温メタン吸収線幅の研究

(Experimental Study of Hot CH₄ Spectral Line Broadening in H₂ and He Environment
for the Atmospheres of Substellar Objects)



細川 晃

総合研究大学院大学
2025.03 博士 (理学)

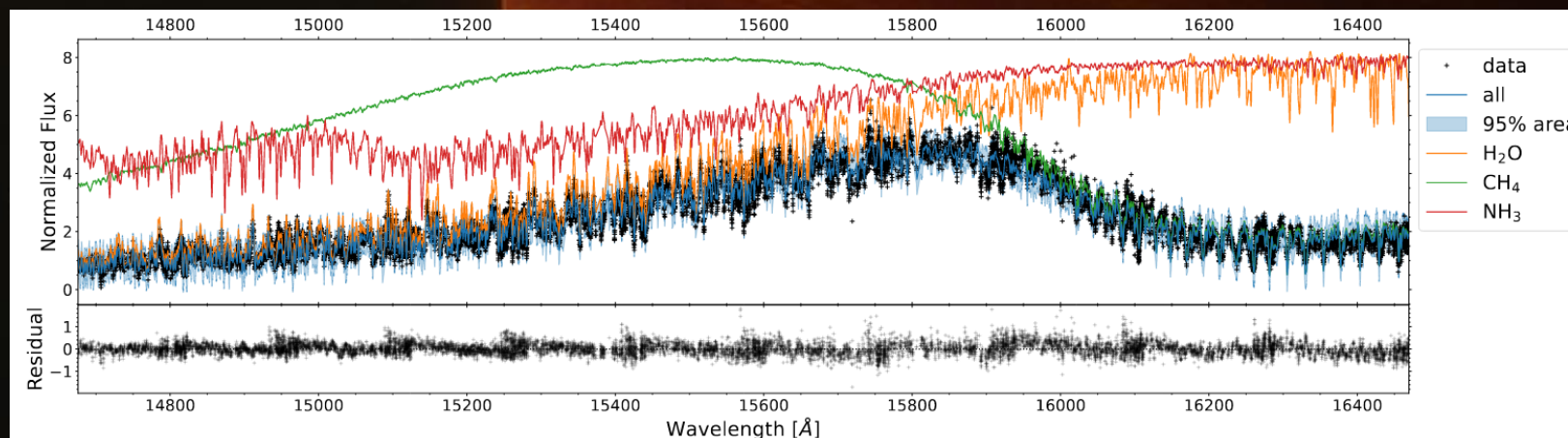


国立天文台 JASMINEプロジェクト
特任研究員 (2025.04 ~)

共同研究者：小谷 隆行, 河原 創, 川島 由依, 増田 賢人, 高橋 葵, 吉岡 和夫

背景：系外惑星・褐色矮星について

- すでに惑星約300天体の大気スペクトルが解析され、 CH_4 , CO , H_2O などの分子検出に成功
→高分散スペクトルの解析により、大気組成・温度構造の推定や惑星形成・進化へ制限 (ex. C/O, metallicity)
- 若いガス惑星や褐色矮星が高分散分光観測の主なターゲット
 - 高温のため強い自己輻射
 - H_2 & He が主体の還元的大気をもつ
- CH_4 はこれらの大気で主要な構成分子の一つ (e.g. Oppenheimer et al., 1995)
 - $T < \sim 1000\text{K}$ の大気環境で強い吸収
 - C/Oなど惑星形成・進化を探るための鍵となる

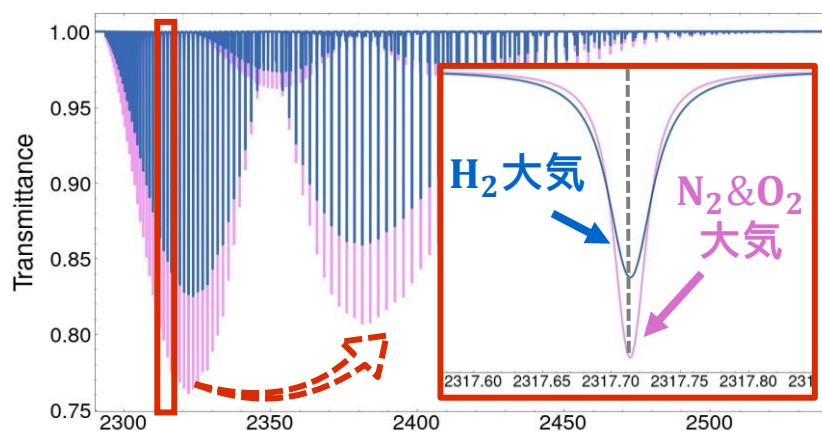


褐色矮星 (Gl 229 B) の観測スペクトル & best-fitモデルスペクトル
(Kawashima et al., 2025)

背景：吸収線の圧力幅について

- 圧力に比例する線幅広がり（圧力幅）が大気スペクトル中の吸収線形状で支配的
 - 圧力幅パラメーター (γ_{ref}, n) は背景大気分子やエネルギー準位によって異なる
 - 圧力幅の精度が分子存在量, C/O などの推定結果に影響

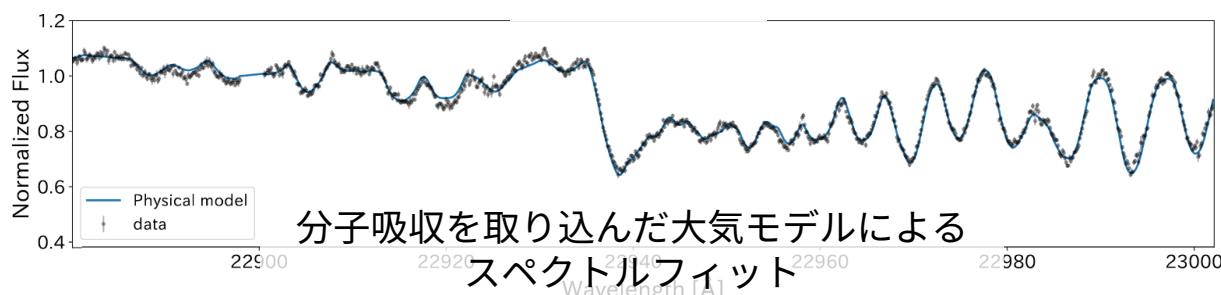
→ガス惑星や褐色矮星の解析には**高精度なH₂&He大気の圧力幅データが必要**



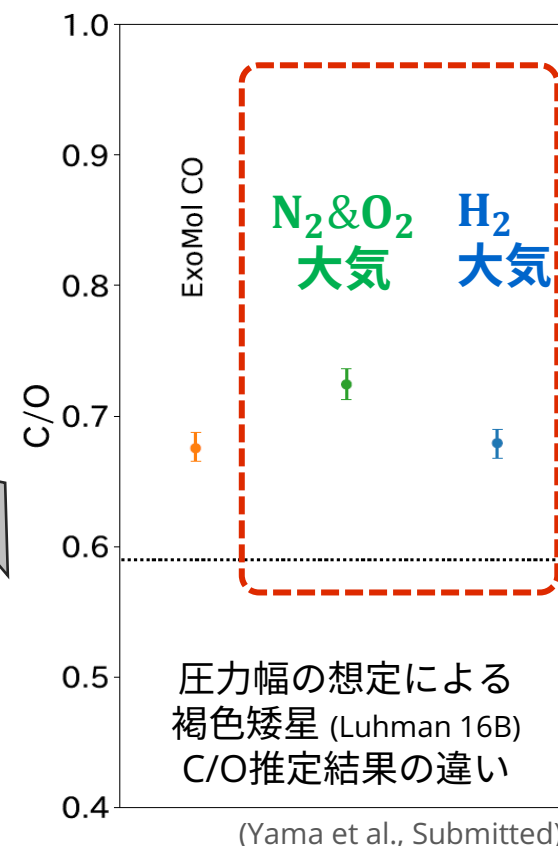
COの吸収スペクトル

吸収線圧力幅 (半値半幅):

$$\gamma_{T,P} = \gamma_{ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{-n} \left(\frac{P}{1atm} \right)$$



分子吸収を取り込んだ大気モデルによる
スペクトルフィット



(Yama et al., Submitted)

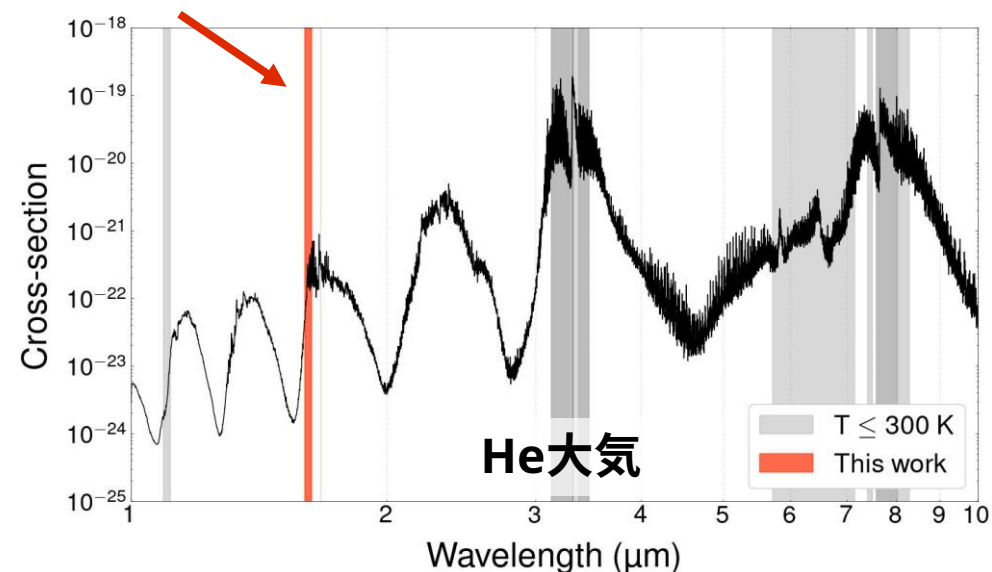
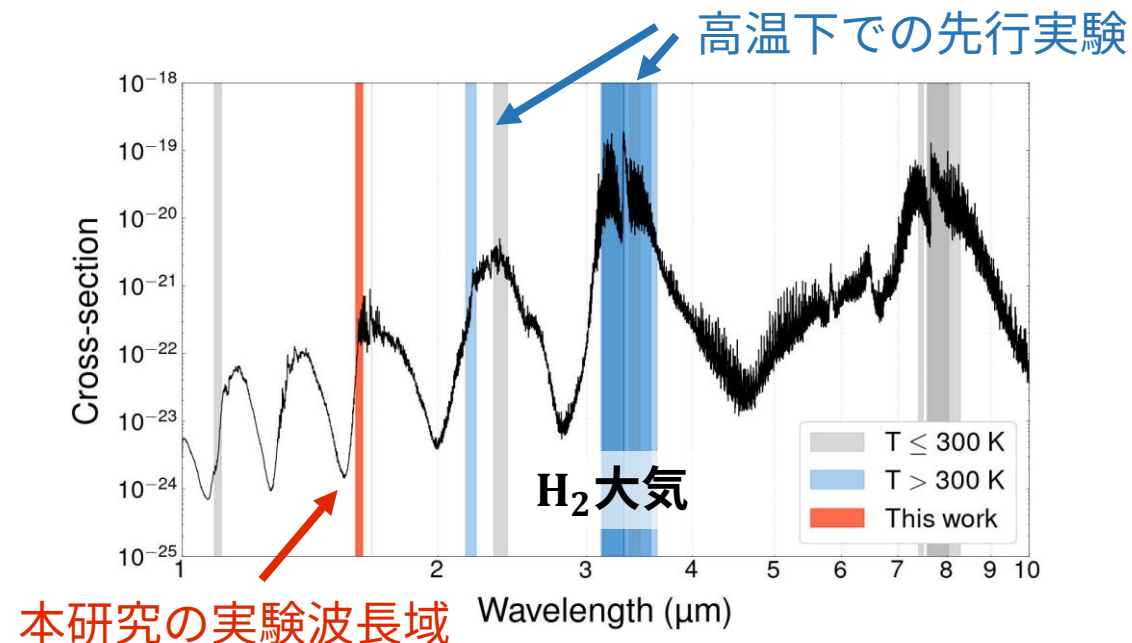
背景：先行研究の状況

- 既存の分子データベース (ex. ExoMol, HITEMP)
→ 地球大気下 or
H₂/He大気 (常温以下) での測定値を適用

- CH₄における各背景大気での圧力幅の測定状況

- H₂ & He混合大気：データなし
- H₂背景大気：
λ < 2 μmの波長域では T > 300 K でのデータなし
- He背景大気：
全波長において T > 300 K のデータは存在せず

→ 地上望遠鏡からの観測スペクトルにも適用可能で、
強い吸収帯のある λ = 1.6 μm 付近を実験的に測定



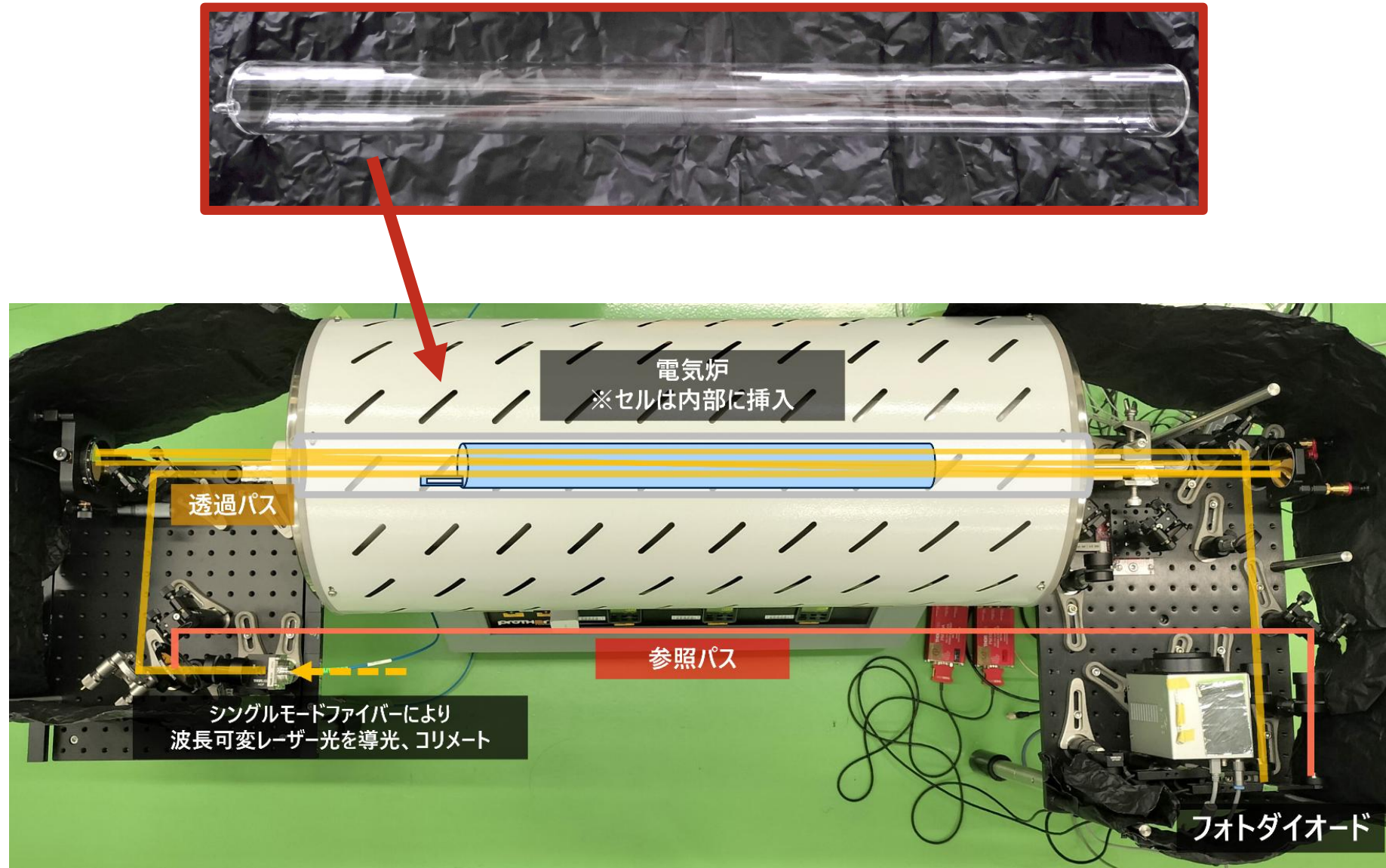
研究目的

H₂&Heが大気を占めるガス惑星・褐色矮星の大気解析でバイアス源となる
吸収線の圧力幅パラメーター (γ_{ref}, n) を正確にする

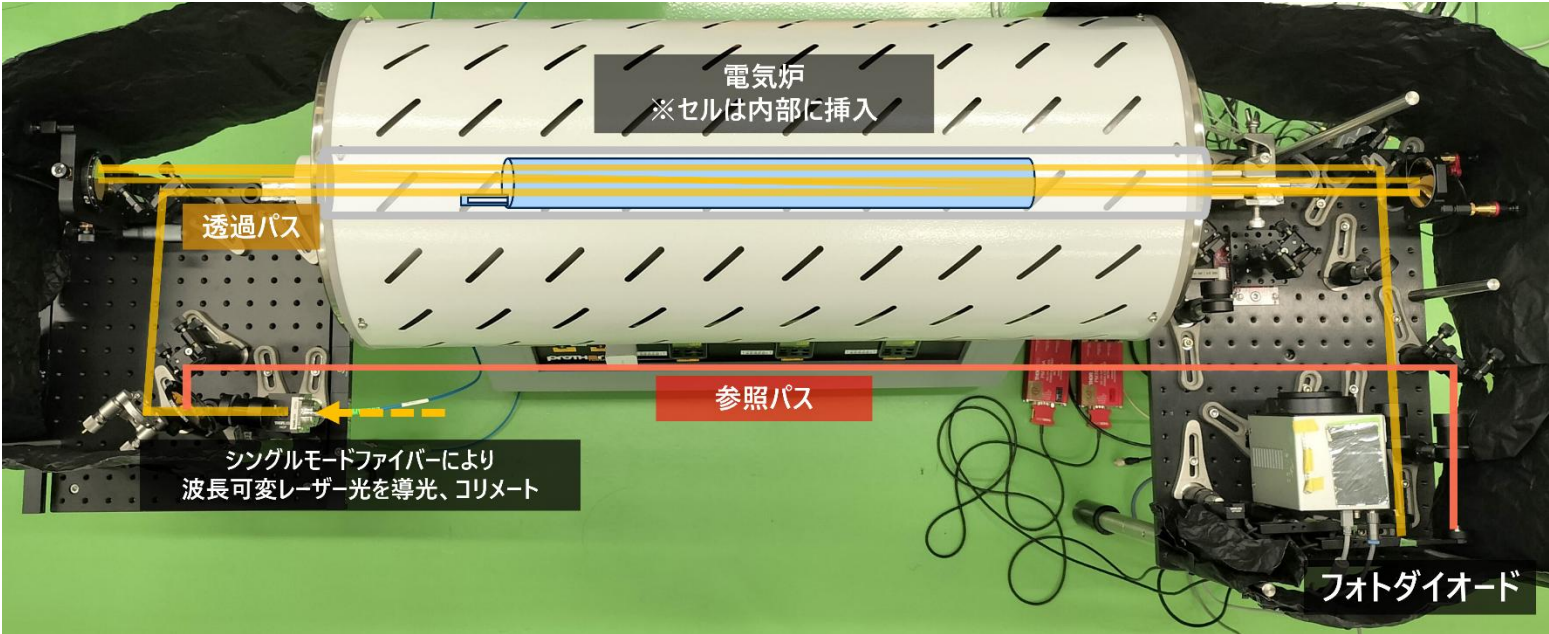
研究のゴール

H₂&He中における、CH₄の $\lambda \sim 1.6 \mu\text{m}$ 吸収線帯のスペクトルを
複数の温度・圧力で測定し、吸収線ごとに γ_{ref} & n を推定
エネルギー準位 ($=J_{\text{lower}}$) に沿った経験値を求める

高温CH₄吸収スペクトルの測定：実験装置について



高温CH₄吸収スペクトルの測定：実験装置について



装置諸元

測定温度 (※代表温度)	297, 500, 700, 1000 K
圧力	0.43 - 1.43 bar
波長	1600 - 1630 nm
レーザー線幅	< 100 kHz
波長確度	<±10 pm (=0.01 nm)
コリメート ビーム直径	2.85 mm
波長分解能	R ~ 640000 ($\Delta\lambda=0.0025\text{nm}$)
フォトダイオード	Thorlabs S132C (Ge)
CH ₄ 混合比	10%, 100%
背景大気 の 混合比	H ₂ : He= 84:16 ※太陽組成 (Lodders+2003)

高温CH₄吸収スペクトルの測定：実験装置について

干渉によるスペクトル上の周期変動（フリンジ）対策

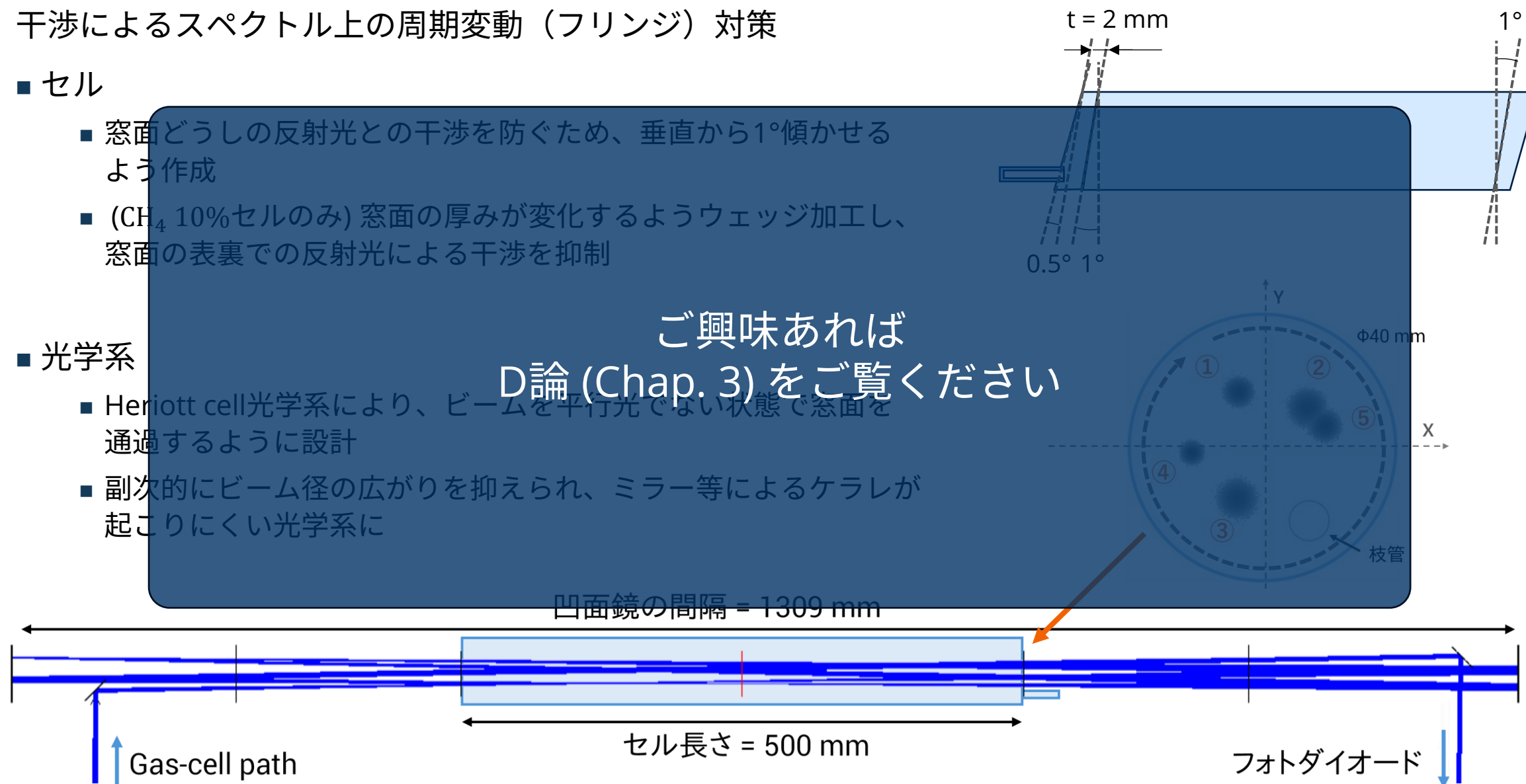
■ セル

- 窓面どうしの反射光との干渉を防ぐため、垂直から1°傾かせるよう作成
- (CH₄ 10%セルのみ) 窓面の厚みが変化するようウェッジ加工し、窓面の表裏での反射光による干渉を抑制

■ 光学系

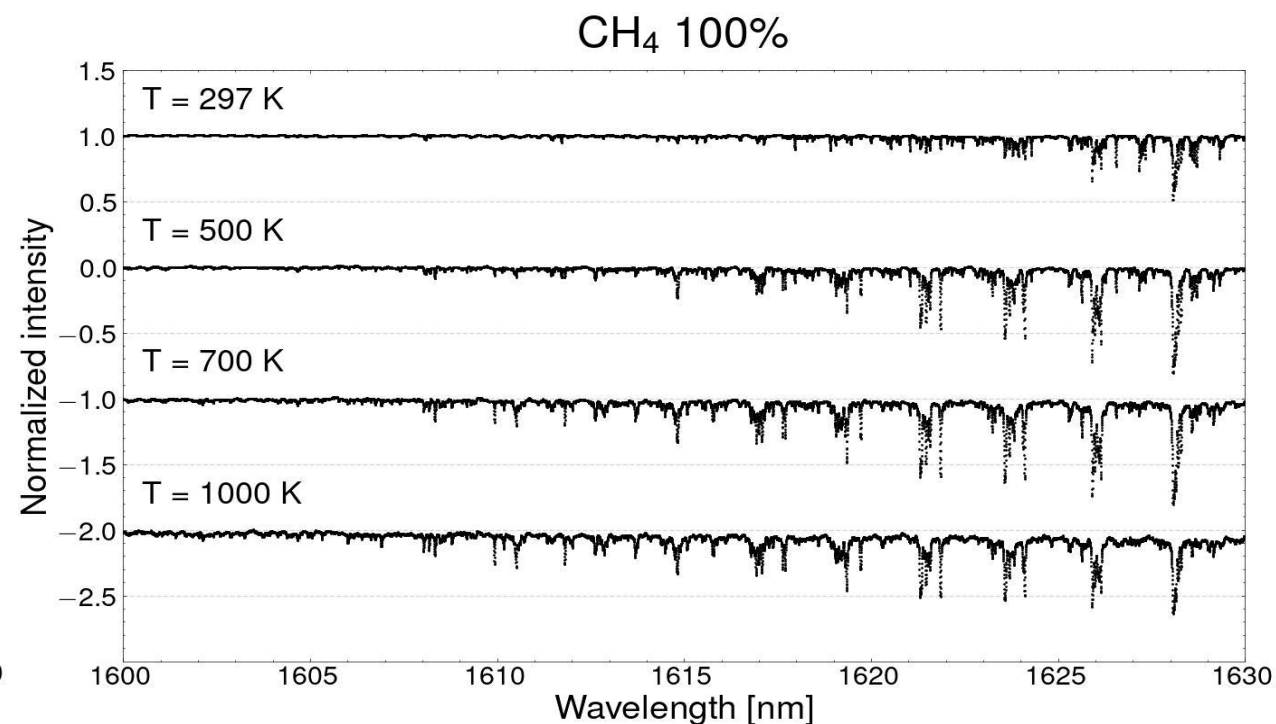
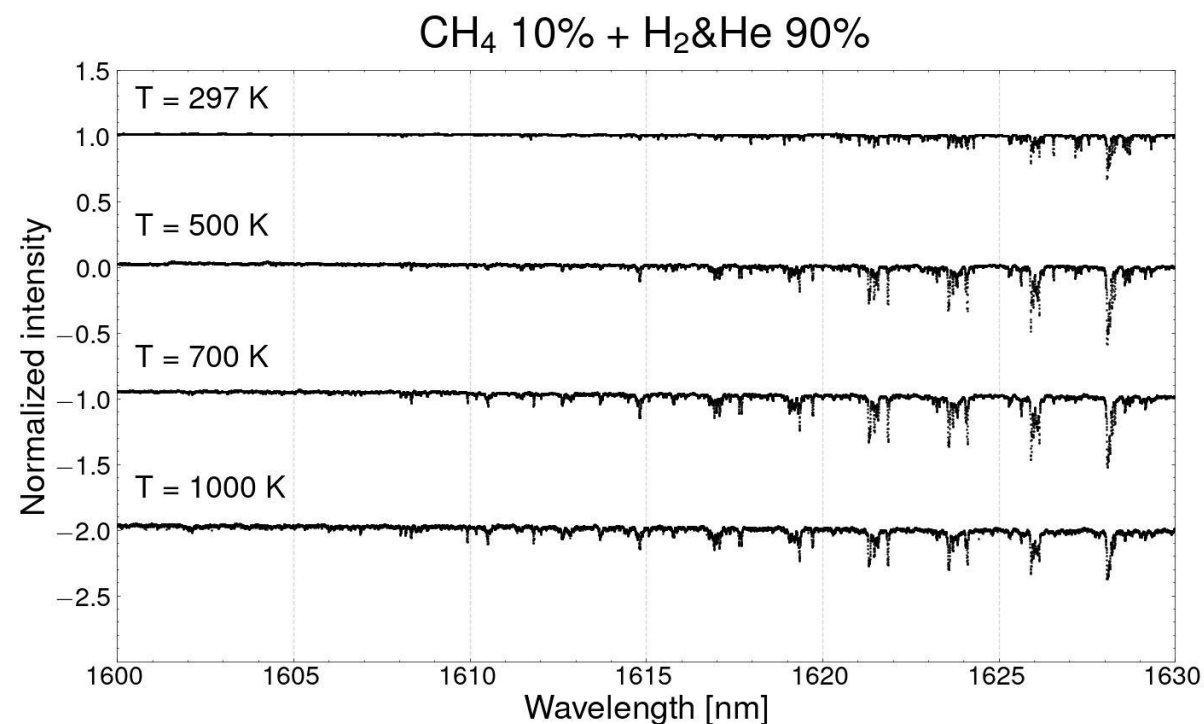
- Herriott cell光学系により、ビームを平行光でない状態で窓面を通過するように設計
- 副次的にビーム径の広がりを抑えられ、ミラー等によるケラレが起こりにくい光学系に

ご興味あれば
D論 (Chap. 3) をご覧ください



高温CH₄吸収スペクトルの測定：スペクトル取得結果

- 推定したい吸収線周辺を8条件のスペクトルから抜き出し、各温度・圧力条件での吸収線モデルと比較
- 惑星大気モデルツール ExoJAX (Kawahara et al. 2022) をベースに、推定コードを開発
- Hamiltonian Monte Carlo (HMC)法により圧力幅 $\gamma_{\text{ref}, n}$ を含むパラメータをサンプルし、ベイズ推定した

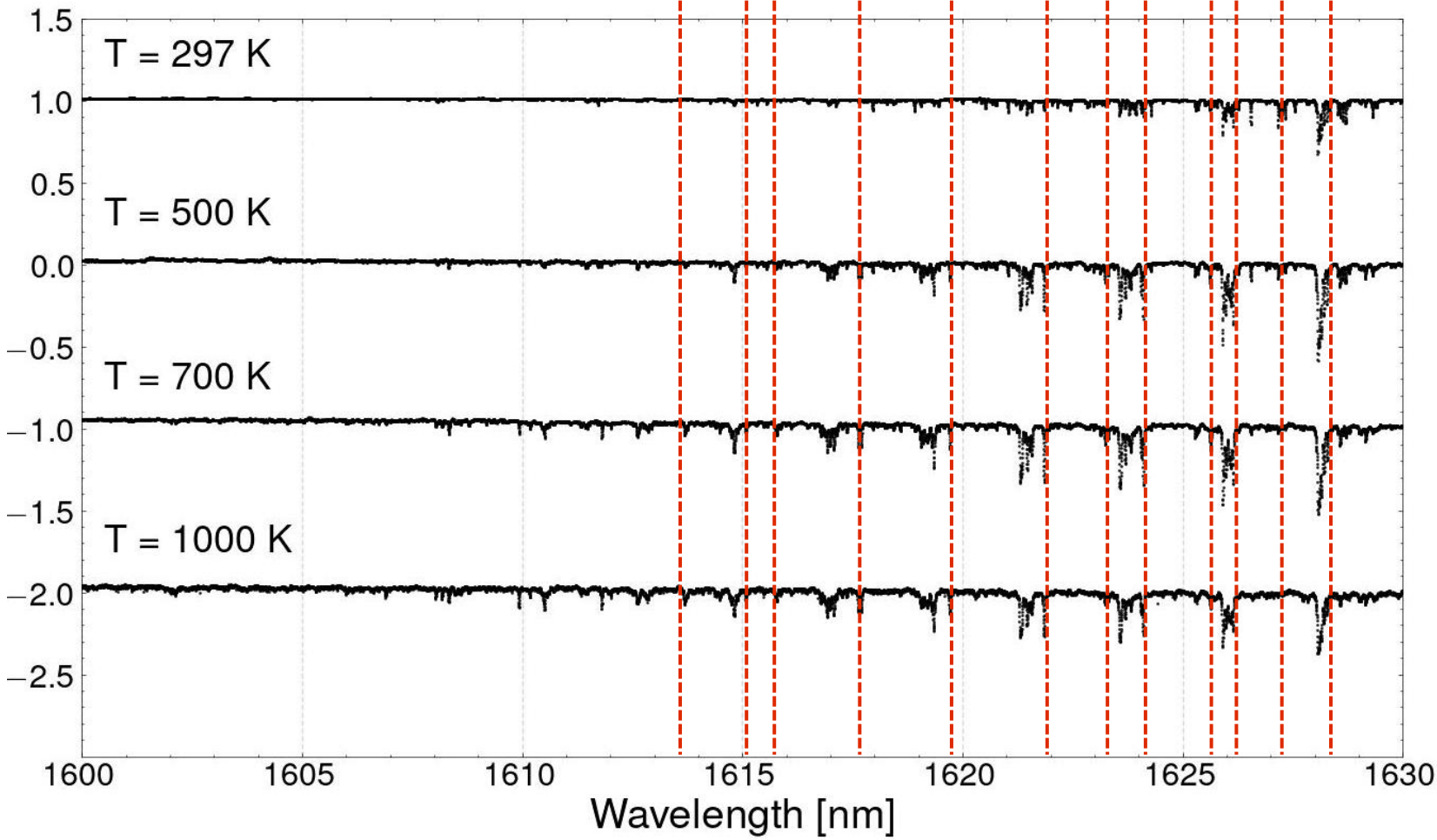


(Hosokawa et al., 2025)

CH₄ 吸収線圧力幅の推定：推定する吸収線について

■ 12波長域に、合計22本の圧力幅を推定

波長域内の推定線数: 2 12 1 2 3 2 1 2 1 2 3 = 22



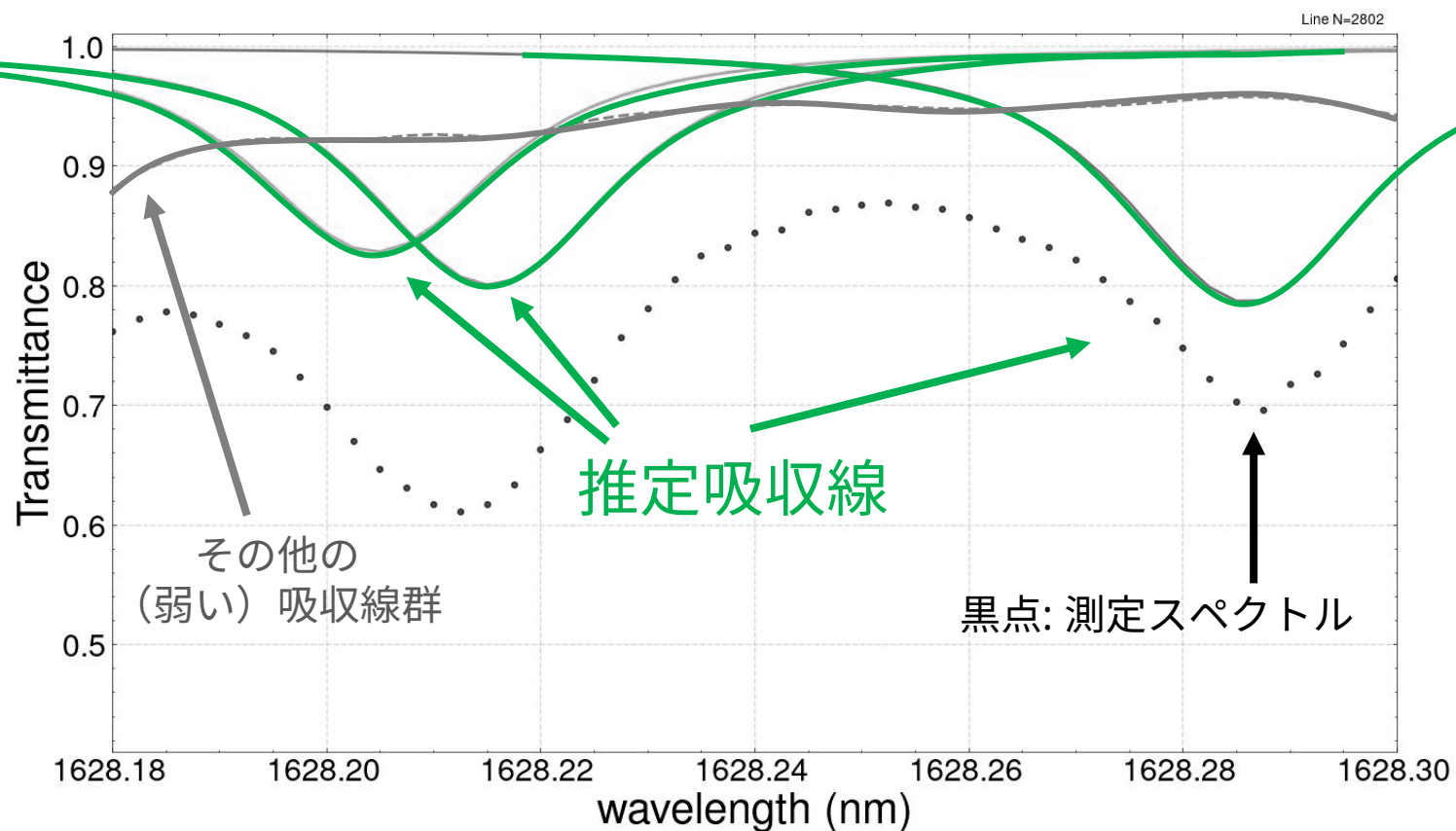
Wavenumber cm ⁻¹	<i>J</i> _{lower}	$\gamma_{\text{self,ref}}$ cm ⁻¹ /atm	$\gamma_{\text{H}_2\&\text{He,ref}}$ cm ⁻¹ /atm	<i>n</i> _{self,ref}	<i>n</i> _{H₂&He,ref}
6196.99006	20	0.056 ^{+0.006} _{-0.005}	0.050 ^{+0.008} _{-0.007}	0.56 ^{+0.05} _{-0.06}	0.36 ^{+0.12} _{-0.13}
6196.88347	20	0.048 ^{+0.009} _{-0.010}	0.041 ^{+0.011} _{-0.011}	0.51 ^{+0.09} _{-0.10}	0.29 ^{+0.19} _{-0.22}
6191.66625	19	0.046 ^{+0.006} _{-0.006}	0.053 ^{+0.013} _{-0.013}	0.57 ^{+0.12} _{-0.13}	0.84 ^{+0.24} _{-0.26}
6189.06120	19	0.051 ^{+0.006} _{-0.006}	0.039 ^{+0.009} _{-0.007}	0.59 ^{+0.10} _{-0.09}	0.16 ^{+0.24} _{-0.21}
6188.93889	19	0.035 ^{+0.006} _{-0.005}	0.025 ^{+0.007} _{-0.006}	0.50 ^{+0.14} _{-0.12}	0.09 ^{+0.28} _{-0.26}
6181.89157	18	0.049 ^{+0.002} _{-0.002}	0.039 ^{+0.003} _{-0.003}	0.53 ^{+0.04} _{-0.03}	0.32 ^{+0.08} _{-0.08}
6173.96465	17	0.045 ^{+0.003} _{-0.002}	0.032 ^{+0.003} _{-0.003}	0.60 ^{+0.05} _{-0.05}	0.25 ^{+0.12} _{-0.10}
6173.89580	17	0.049 ^{+0.002} _{-0.002}	0.041 ^{+0.003} _{-0.003}	0.62 ^{+0.04} _{-0.04}	0.43 ^{+0.08} _{-0.08}
6165.83131	16	0.055 ^{+0.003} _{-0.003}	0.040 ^{+0.003} _{-0.003}	0.53 ^{+0.04} _{-0.04}	0.23 ^{+0.08} _{-0.09}
6165.79002	16	0.047 ^{+0.001} _{-0.001}	0.034 ^{+0.002} _{-0.001}	0.56 ^{+0.02} _{-0.02}	0.17 ^{+0.04} _{-0.04}
6165.76292	16	0.048 ^{+0.003} _{-0.003}	0.036 ^{+0.004} _{-0.003}	0.40 ^{+0.06} _{-0.06}	0.09 ^{+0.15} _{-0.14}
6160.54112	15	0.061 ^{+0.003} _{-0.003}	0.045 ^{+0.003} _{-0.003}	0.63 ^{+0.05} _{-0.05}	0.23 ^{+0.08} _{-0.08}
6160.26842	15	0.066 ^{+0.005} _{-0.004}	0.043 ^{+0.004} _{-0.004}	0.58 ^{+0.07} _{-0.07}	0.16 ^{+0.11} _{-0.10}
6157.43263	15	0.052 ^{+0.004} _{-0.003}	0.032 ^{+0.002} _{-0.002}	0.65 ^{+0.05} _{-0.05}	0.13 ^{+0.07} _{-0.07}
6151.47936	14	0.049 ^{+0.008} _{-0.008}	0.043 ^{+0.005} _{-0.005}	0.87 ^{+0.14} _{-0.14}	0.62 ^{+0.14} _{-0.15}
6151.44872	14	0.064 ^{+0.006} _{-0.005}	0.047 ^{+0.004} _{-0.003}	0.66 ^{+0.07} _{-0.08}	0.37 ^{+0.07} _{-0.07}
6149.53289	14	0.059 ^{+0.002} _{-0.002}	0.045 ^{+0.001} _{-0.001}	0.61 ^{+0.03} _{-0.03}	0.33 ^{+0.03} _{-0.03}
6145.63902	6	0.077 ^{+0.001} _{-0.001}	0.059 ^{+0.001} _{-0.001}	0.65 ^{+0.03} _{-0.03}	0.41 ^{+0.06} _{-0.06}
6145.47277	6	0.080 ^{+0.003} _{-0.003}	0.056 ^{+0.002} _{-0.003}	0.75 ^{+0.04} _{-0.05}	0.21 ^{+0.12} _{-0.12}
6141.73445	13	0.055 ^{+0.004} _{-0.004}	0.040 ^{+0.005} _{-0.005}	0.66 ^{+0.06} _{-0.07}	0.28 ^{+0.12} _{-0.12}
6141.69404	13	0.058 ^{+0.002} _{-0.003}	0.043 ^{+0.003} _{-0.003}	0.65 ^{+0.03} _{-0.03}	0.31 ^{+0.06} _{-0.06}
6141.42658	13	0.059 ^{+0.003} _{-0.003}	0.043 ^{+0.003} _{-0.003}	0.62 ^{+0.03} _{-0.03}	0.26 ^{+0.05} _{-0.07}

各線の推定結果(90%信用区間)

CH₄ 吸収線圧力幅の推定：透過吸収モデルについて

■ 透過スペクトルのモデル方法

- 推定吸収線：個別にVoigt関数を仮定、関数に含まれる圧力幅をフリーパラメーターとする
- その他の線群：固定値として、分子データベース（HITEMP）の値を用いてcross-sectionを計算



CH₄ 吸収線圧力幅の推定：透過吸収モデルについて

- 各線の γ_{ref} & n は self, H₂&He の加算として定義

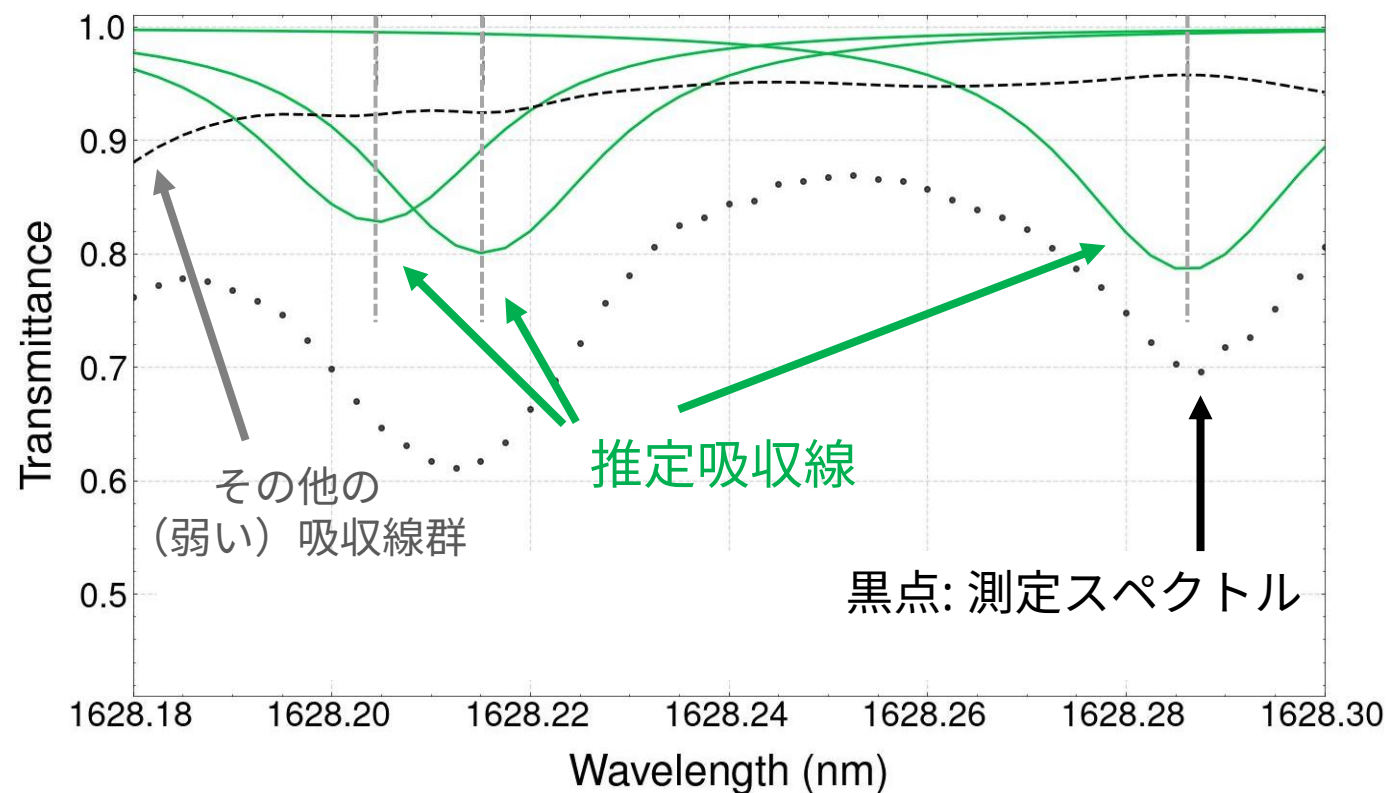
$$\gamma(P, P_{\text{self}}, T) = \left(\frac{T_{\text{ref}}}{T} \right)^{n_{\text{H}_2\&\text{He}}} \gamma_{\text{H}_2\&\text{He}, \text{ref}} (P - P_{\text{self}}) + \left(\frac{T_{\text{ref}}}{T} \right)^{n_{\text{self}}} \gamma_{\text{self}, \text{ref}} P_{\text{self}}$$

- 波長域あたりの最大フリーパラメータ数：63

※ Target line が3本ある場合

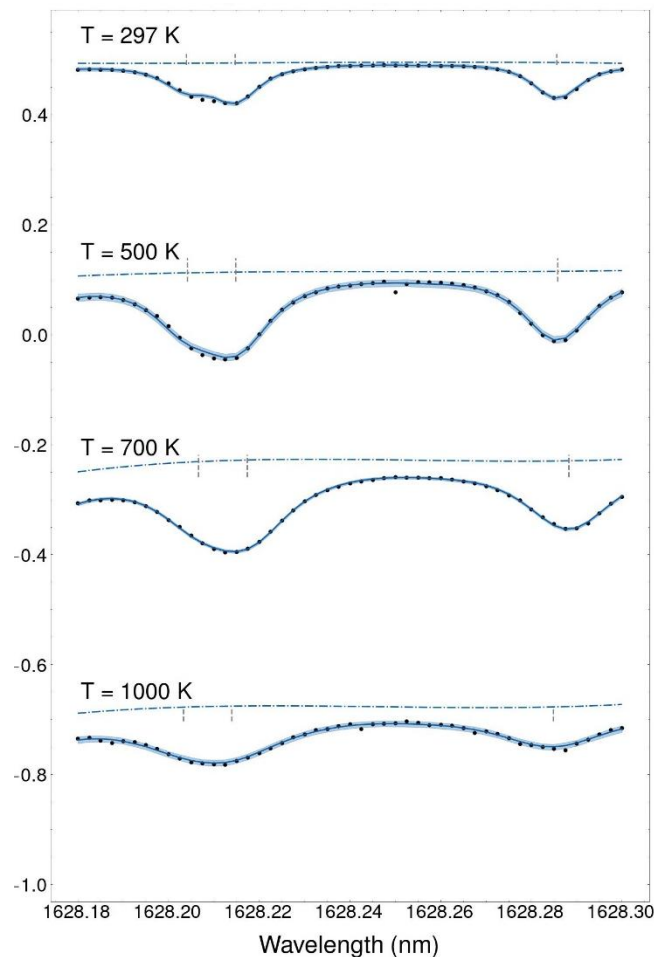
$$= 6 (v_{\text{offset}, k}, a_k, b_k, c_k, d_k, \sigma_{\text{noise}, k}) \times 8 \text{ スペクトル} + 5 (\gamma_{\text{self}, \text{ref}}, \gamma_{\text{H}_2, +\text{He}, \text{ref}}, n_{\text{self}}, n_{\text{H}_2, +\text{He}}, \alpha) \times \text{吸収線3本}$$

- サンプル数：1000(warm-up) + 2000

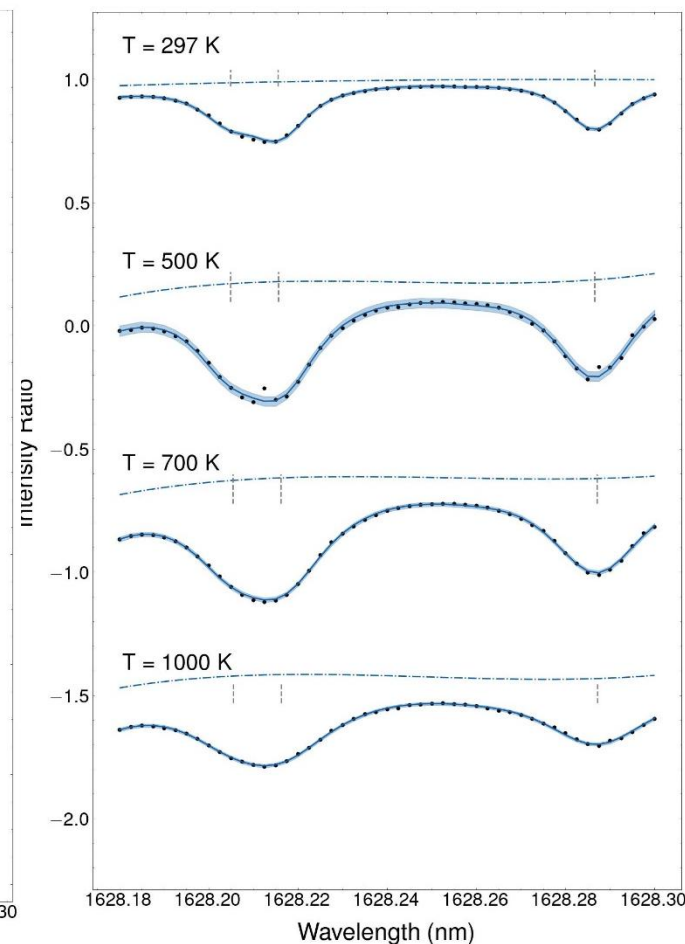


CH₄吸収線圧力幅の推定：推定結果（スペクトルフィット＆Corner plot）

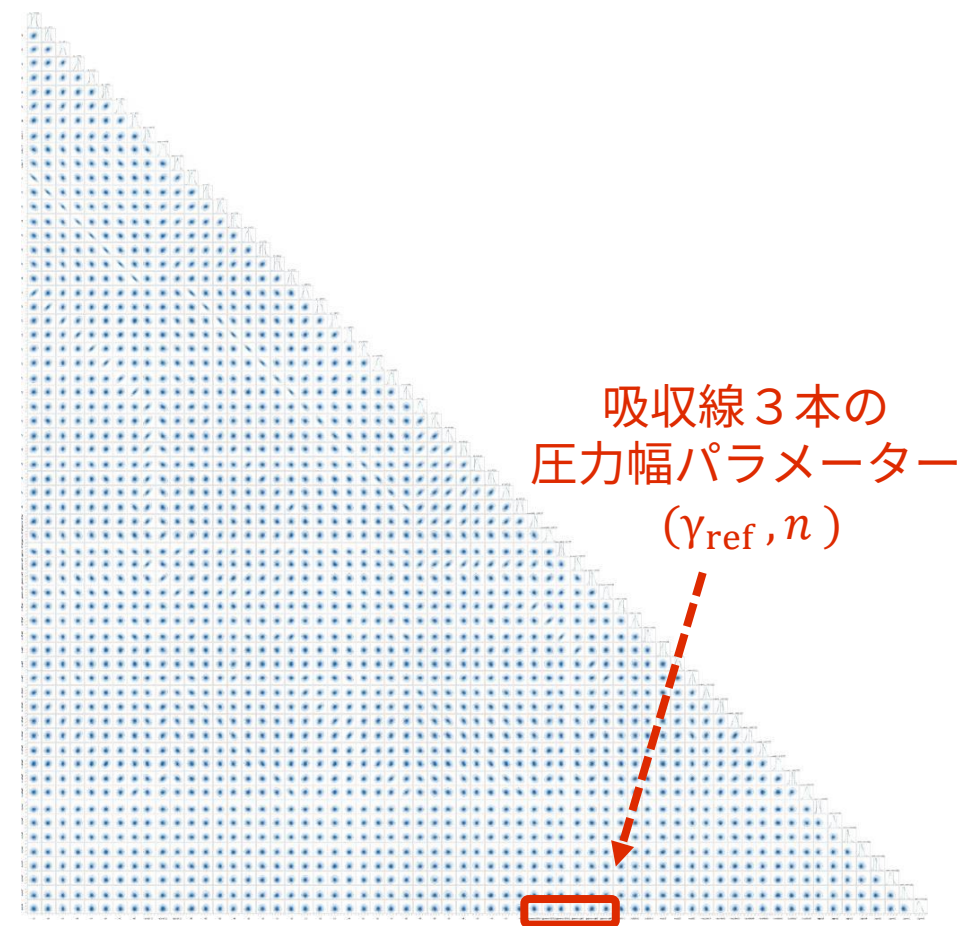
- 1つの推定波長域における、3本の線を推定したフィット結果
→同様の推定を合計12波長域で実施し、22本の圧力幅パラメーターを推定



CH₄ 10% + H₂ & He 90%



CH₄ 100%



Corner plot
(吸収線3本の圧力幅パラメータを含む)

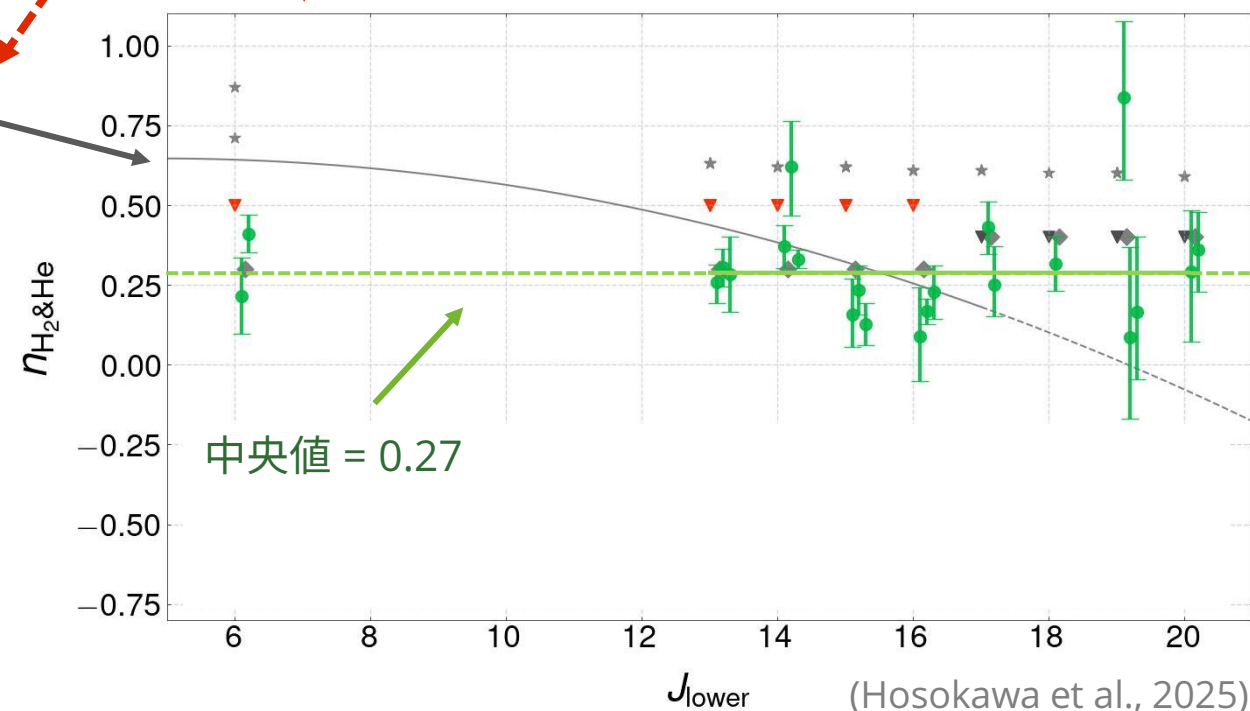
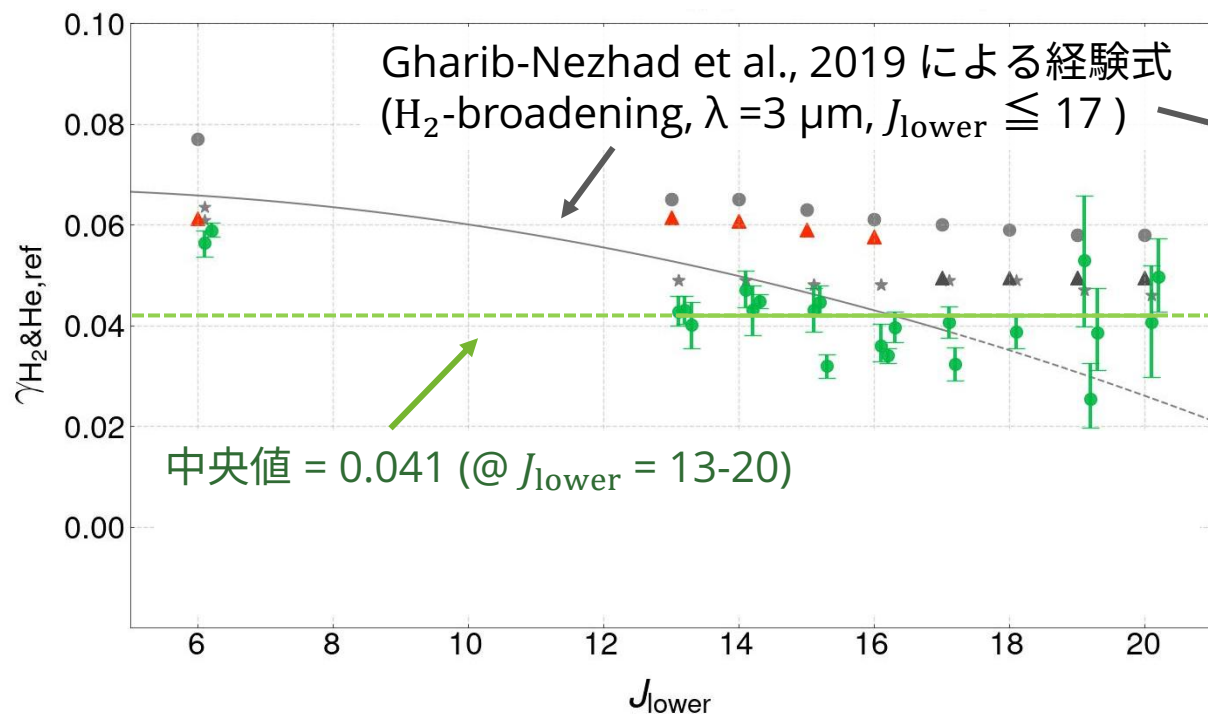
CH₄吸収線圧力幅の推定：推定結果 ($\gamma_{\text{H}_2\&\text{He,ref}}$, $n_{\text{H}_2\&\text{He}}$)

$\gamma_{\text{H}_2\&\text{He,ref}}$: 相関傾向は $\gamma_{\text{H}_2,\text{ref}}$ の経験式に回転量子数 $J_{\text{lower}} \sim 17$ までは一致。それ以降は相関が弱い

$n_{\text{H}_2\&\text{He}}$: n_{H_2} の経験式と傾向は一致せず、概ね無相関

→ $J_{\text{lower}} = 13 - 20$ に注目した場合、経験式としては $\gamma_{\text{H}_2\&\text{He,ref}}$, $n_{\text{H}_2\&\text{He}}$ とも一定値と考えられる

吸収線圧力幅 (半値半幅): $\gamma_{T,P} = \gamma_{\text{ref}} \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{-n} \left(\frac{P}{1\text{atm}} \right)$

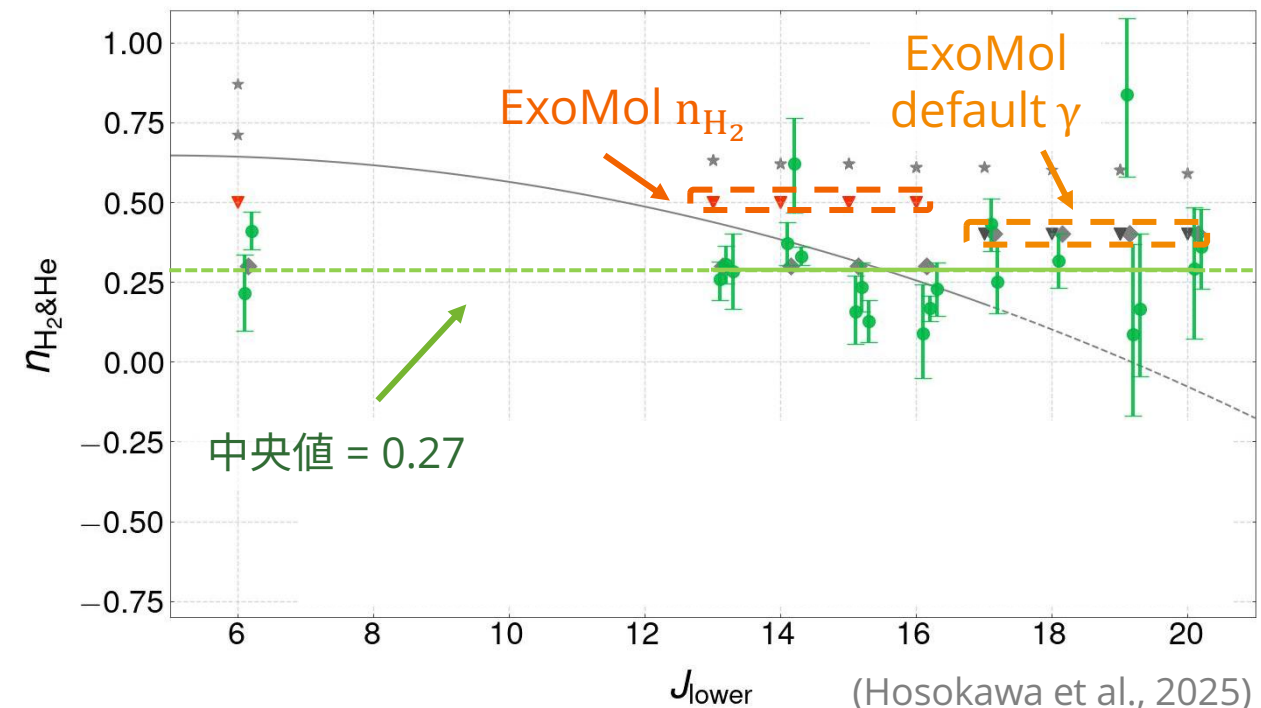
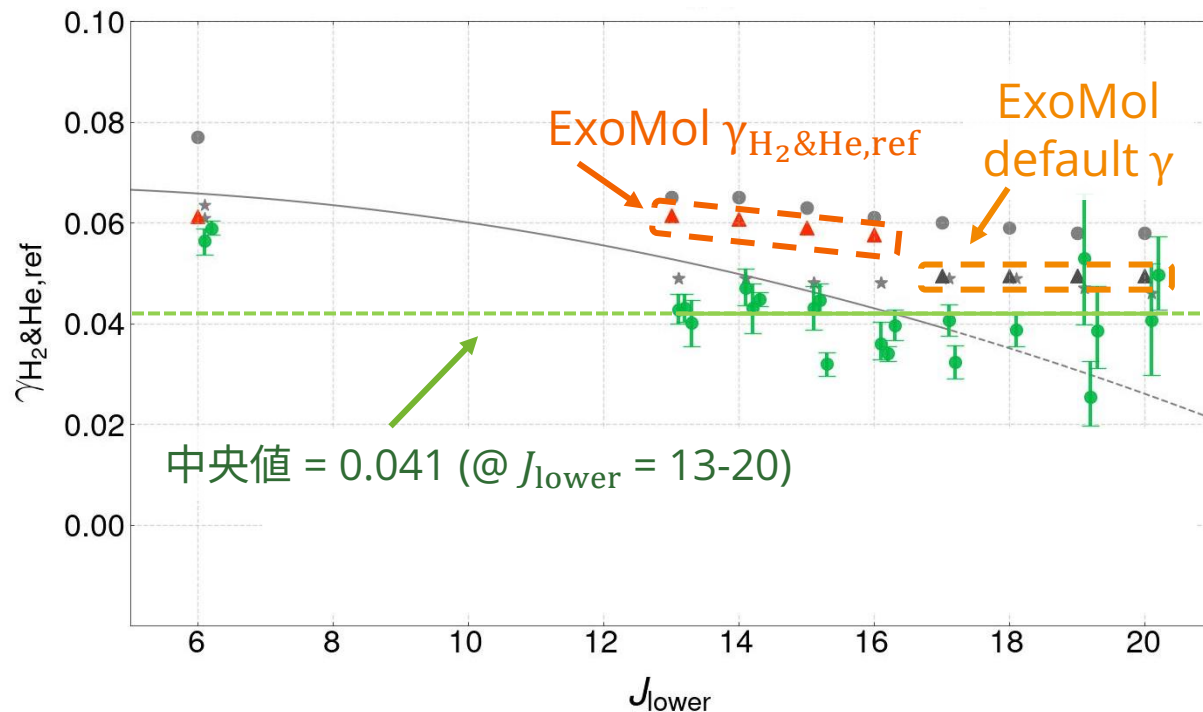


CH₄吸収線圧力幅の推定：推定結果 ($\gamma_{\text{H}_2\&\text{He,ref}}$, $n_{\text{H}_2\&\text{He}}$)

$\gamma_{\text{H}_2\&\text{He,ref}}$: ExoMol $\gamma_{\text{H}_2\&\text{He,ref}}$ より ~20-30 %, HITEMP $\gamma_{\text{air,ref}}$ より ~10 %小さい

$n_{\text{H}_2\&\text{He}}$: ExoMol n_{H_2} , HITEMP n_{air} より 0.2 ~ 0.3 ほど温度依存性が小さい

→ 高温下(T = 1000 K) でも、既存の分子データベースの値から ~ 30 % 異なる



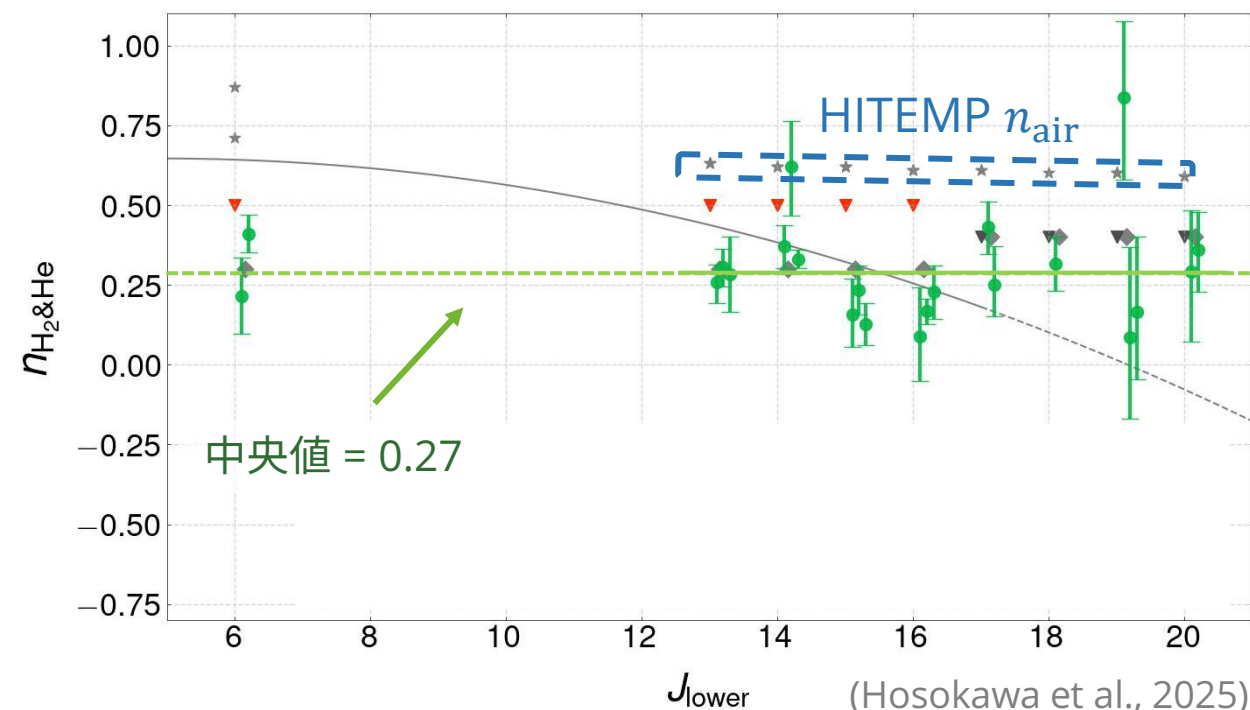
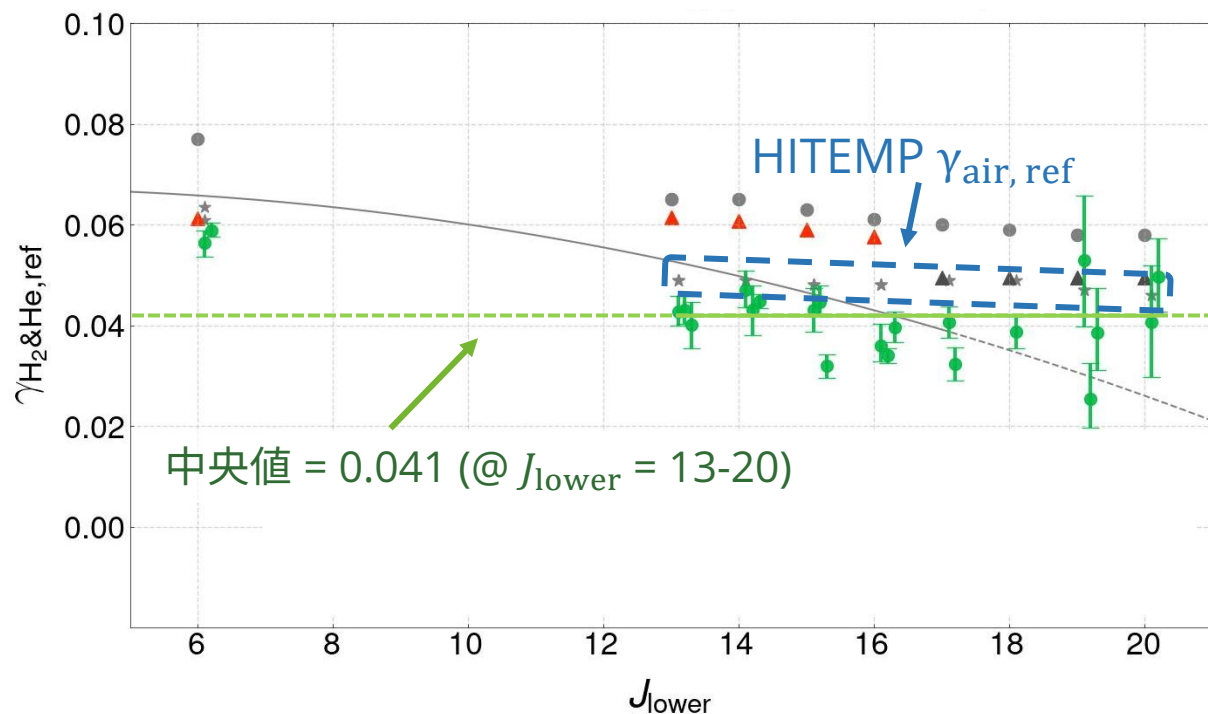
(Hosokawa et al., 2025)

CH₄ 吸収線圧力幅の推定：推定結果 ($\gamma_{\text{H}_2\&\text{He,ref}}$, $n_{\text{H}_2\&\text{He}}$)

$\gamma_{\text{H}_2\&\text{He,ref}}$: ExoMol $\gamma_{\text{H}_2\&\text{He,ref}}$ より ~20-30 %, HITEMP $\gamma_{\text{air,ref}}$ より ~10 % 小さい

$n_{\text{H}_2\&\text{He}}$: ExoMol n_{H_2} , HITEMP n_{air} より 0.2 ~ 0.3 ほど温度依存性が小さい

→ 高温下(T = 1000 K) でも、既存の分子データベースの値から ~ 30 % 異なる



まとめ

目的

- ガス惑星・褐色矮星の大気解析でバイアス源となる $\text{H}_2\&\text{He}$ 中の吸収線圧力幅パラメーター (γ_{ref}, n) を正確にする

成果

- 褐色矮星・惑星大気環境を模擬し、高温・高分解能で透過スペクトルを取得できる実験系を開発
- 複数の温度・圧力下でのスペクトルからベイズ解析により γ_{ref} & n を推定するプロセスを構築
- $\lambda = 1613 - 1628 \text{ nm}$ の22本の吸収線について、初めて $\text{H}_2\&\text{He}$ 大気中における CH_4 の $\gamma_{\text{H}_2\&\text{He}, \text{ref}}, n_{\text{H}_2\&\text{He}}$ を推定

$\text{H}_2\&\text{He}$ 大気 圧力幅の 傾向

- $\gamma_{\text{H}_2\&\text{He}, \text{ref}}, n_{\text{H}_2\&\text{He}}$ は測定した線 ($J_{\text{lower}} = 13-20$) において概ね一定値 ($\gamma_{\text{H}_2\&\text{He}, \text{ref}} = 0.041, n_{\text{H}_2\&\text{He}} = 0.27$)
- ExoMol, HITEMPなどの分子データベースの値に比べ、**~30%の違いがあった**
- 本実験データの適用で CH_4 存在量・C/Oの推定バイアスを低減し、より正確な形成過程などの議論を可能に

スペクトル 解析への 影響

- $R = 70000$ の褐色矮星スペクトルの解析ではFluxで最大5%の違いが生じる
→ 30m級の望遠鏡による**高S/N (>100)** 観測スペクトル解析では
無視できないレベルのバイアス源となる

