# **星形成ゼミ2024/11/01** arxivへのリンク

片岡章雅

#### **Signature of Vertical Mixing in Hydrogen-dominated Exoplanet Atmospheres**

Vikas Soni<sup>1</sup> and Kinsuk Acharyya<sup>1</sup> <sup>1</sup>Planetary Sciences Division, Physical Research Laboratory, Ahmedabad, 380009, India

- - このとき、quenching modelを入れて、早く計算した。
- ・結果、vertical mixingの影響が強い、狭いパラメータ範囲を見つけた。
  - vertical mixingを調べるのに良い。

・惑星大気におけるvertical mixingを考慮して、観測スペクトルがどこまで影響され るか調べた。逆問題を解き、vertical mixingの効率を制限できる条件を調べた。

こういうパラメータ範囲は、transport strengthに強い制限がかけられるし、

・平衡温度1400K以上のとき、NH3のアバンダンスから内部温度がわかる

### P-T図の見方 天文月報川島さん記事



図1  $CH_4 > CO$  (黒色の破線),  $NH_3 > N_2$  (黒色の 点線)の存在量が等しくなる温度・圧力条件 [16, 17]. 青色の実線は[18]の温度構造モデル を用いて計算した、中心星近傍の木星サイズ の惑星HD 209458bと海王星サイズの惑星GJ 436bの温度構造である.また、参考として木 星の温度構造モデル[19]も示す.

- れる

- - から。

・可視光域や近赤外線域ではおおよそ圧力で 0.1-1 barが見

・大気透過スペクトルでは薄い上層の1mbarあたりが見える

・現在の観測の主流である高温な惑星大気では、熱化学反応 時間が短いので、特に下層はLTEでおよそ良い。

・炭素について考える。左図、CH4とCOの熱化学平衡での存 在量が同じ線を見ると、線の右上(高温/低圧)のパラメー タスペースではCはCOになりやすいとわかる

数密度が低くなると、それを打ち消すように反応が進む。

・同様に窒素について考えると、NH3/N2から、右上では窒 素はN2として存在しやすい

・もちろん、左下、冷たい惑星はCH4やNH3 が支配的になる

















## 大気循環による混合の考え方 天文月報川島さん記事



Fig 19(a) Kawashima and Ikoma 2018

- ・渦拡散は、混合率を圧力に対して一定に 保つように働くため、ある高度よりも上 層では、化学種の混合率が一定となる。こ のような過程はクエンチと呼ばれている。
- ・点線は熱化学平衡状態の存在量の分布、実 線は渦拡散による大気の混合等を考慮した 場合
- ・CH4に着目すると、大気下層では重なっ ている(密度が高いので熱化学平衡状 態)。10^-4から1barでは、渦拡散を考 慮したら圧力に対して一定値、つまり、 1barでクエンチしている、という

## おおもとの考え方 Guillot et al. 2010



**Fig. 1.** Planet receiving a flux  $\sigma T_{irr}^4$  from its parent star and emitting an intrinsic heat flux  $\sigma T_{int}^4$ . The labeled quantities correspond to radiative fluxes perpendicular to the atmospheric surface at the location considered.  $\theta_*$  correspond to the angle between the direction of incidence of the collimated irradiation flux and the local vertical, and  $\mu_* = \cos \theta_*$ . Fluxes that are mostly characterized by visible wavelengths are drawn in blue. Fluxes in the infrared are drawn in red.

・外側境界:主星からT\_{irr}を受ける。
・内側境界:intrinsic heat T\_{int}

紹介論文で主に扱うvertical mixing

•  $\tau_{mix} = L^2/K_{zz} = (\eta H)^2/K_{zz}$ 

# petitRADTRANS Molliere et al. 2019

- ・1Dの大気の輻射輸送を早く解いてスペクトルを出す コード
- line opacities (H2O, O3, OH, CO, CO2, CH4, C2H2, NH3, HCN, H2S, PH3, TiO, VO, SiO, FeH, H2, Na, K)
- For the low-resolution mode, the range of line opacity is  $0.3 - 28 \mu m$
- Rayleigh scattering (for H2, He, H2O, CO2, CO, O2, CH4, and N2)
- cloud opacity (for Al2O3, H2O, Fe, KCl, MgAI2O4, MgSiO3, Mg2SiO4, and Na2S clouds)



boxes are the steps that are done by petitRADTRANS, and the green boxes are the steps carried out by our disequilibrium model function.



# テスト計算で理解する

- A1はvertical mixingなし、A2はあり。
- Aは温度高め。CH4とNH3が影響受ける
- ・ Bは温度低め。多くの分子が影響受ける

. Parameters used to calculate the atmospheric composition of the test cases A and B
--

Parameter	A1	A2	B1	B2
Equilibrium temperature $T_{equi}$ (K)	1200	1200	1000	1000
Internal temperature $T_{\rm int}$ (K)	300	300	200	200
Surface gravity $g \ (\text{cm s}^{-2})$	$10^{3}$	$10^{3}$	$10^{3}$	$10^{3}$
Atmospheric metallicity [M/H]	1	1	0	0
Radius of the planet $(R_J)$	1	1	1	1
Reference pressure (bar)	0.1	0.1	0.1	0.1
Eddy diffusion coefficient $K_{zz}$ (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	0	$10^{9}$	0	$10^{9}$



Figure 8. Left column: The top panel shows the vertical volume mixing ratio (VMR) for A1 (thermochem ical equilibrium abundance) and A2 (disequilibrium abundance) in solid and dashed lines, respectively. Th bottom panel shows the transmission spectra for A1 and A2 in solid blue and red lines, respectively. Righ column: similar to the left column but for B1 and B2.

- ・ AはCH4とかNH3が10barでクエンチしている。よって 1mbarくらいではvertical mixingありなしでぜんぜん違う。 一方でCOとかCO2は変わらん(vertical mixingの影響を受け ない)。全領域でCOが支配的。
- ・ Bは、mixingないと(実線)、1barより下層ではCH4が支配的 だが、それより上層はCOが支配的になっている。mixingあ ると(破線)、CH4が支配的になる。









Table 3. Parameters used to generate the synthetic JWST observation.



Figure 9. The solid blue line shows the re-binned transit spectrum of A1 (top left panel), A2 (top right panel), B1 (bottom left panel) and B2 (bottom right panel). The solid red dots show the simulated JWST observed spectrum, and the black vertical lines are the associated errors. The three solid horizontal colored lines (yellow, brown, and green) show the wavelength coverage of the labeled JWST instrument.





**Figure 3.** Panels (i.c), (ii.c), and (iii.c) show the mixing ratio of CH<sub>4</sub>, CO, and NH<sub>3</sub>, respectively, at 1 mbar pressure level and solar metallicity, for a range of equilibrium temperatures. The dashed, dotted-dashed and dotted lines are the mixing ratio for  $\log_{10}(K_{zz}) = 8$ , 10, and 12, respectively for  $T_{int} = 150$  K (green colored lines) and  $T_{\rm int} = 450$  K (blue colored lines). The solid lines are the thermochemical equilibrium mixing ratio. In panel (i.a), the solid black lines are the thermal profile for a range of equilibrium temperatures and  $T_{\text{int}} = 150$  K, while the solid red lines are the contours of the thermochemical equilibrium abundance of CH<sub>4</sub>. The dashed, dotted-dashed and dotted lines are the quenched curves for  $\log_{10}(K_{zz}) = 8$ , 10, and 12, respectively (see Figure 9 of Soni & Acharyya 2023a for quenched curves). Panel (i.b): same as panel (i.a) but for  $T_{int} = 450$  K. Panels (ii.a) and (ii.b): same as panels (i.a) and (i.b), respectively, but for CO. Panels (iii.a) and (iii.b): same as panels (i.a) and (i.b), respectively, but for  $NH_3$ .

#### ・メインの結果

上からCH4, CO, NH3

・一番左のパネルが、中心温度T\_{intが150Kのとき。真 ん中がT {int}=450K。

・左のパネル、黒実線が、外側境界温度T\_{equi}をパラ メータとして振ったときの温度。

・緑と青がクエンチレベル。

赤線が分子種の熱化学平衡のアバンダンス。

・見方

・あるパネルで、適当に温度T\_{equi}を決めて、黒い 実線を辿っていく。緑や青の線とぶつかったら、そ こから上層はクエンチしていて、その分子種は vertical mixingによりその上で分子量が一定とな る。









- 率。

- vertical mixing は効かない

 右のパネルだけ別物なので抜き出す。上からCH4, CO, NH3の定 常状態で1 mbar(の高さ、つまりちょっと上層における)混合

 ・緑がT\_int=150K, 青が450K。実線は熱化学平衡状態。

・ 横軸はT\_equiで、パラメータ。(たぶん外側のT {irr}のこと)

・線種はK {zz}を変えた。この値が大きいとたくさん拡散する。

・例えば、CH4は、K\_{zz}が大きいと、下の方から上に拡散され て、上空1mbarにおける混合率(アバンダンス)が大きくなる。

・例えばCOの場合はT\_intの違いが顕著に見える。T\_{equi} >1000Kなら基本的には熱化学平衡状態だと思って良い。



- COにだけ着目してみる。左は内側境界がT\_int=150K,外側境界がT\_{equi}=
   600,800,…1800Kでの結果。赤い線を見ると温度が高いと全然コントアがない=温度が高いときはCOが支配的。
- ・このまま(a)の緑の線がそれぞれ quenchする場所。

- ・つまり、高温ではquenchする場所は CO支配領域に入っている。
- ・1000K以下だと、ちょっとCH4支配の 領域が出てくる(CH4の図を見ないと わからない)



**Figure 4.** The transit depth excess due to vertical mixing in the exoplanet atmosphere from our 1D chemical kinetics model run ( $T_{equi} = 500 - 2000$  K;  $T_{int} = 150, 250, 350, 450$  and 550 K;  $\log_{10}(K_{zz}) = 9$ ; surface gravity = 1000 cm s<sup>-2</sup>). The color contours from blue to red in panels (a) - (e) represent the transit depth excess due to CH<sub>4</sub> and panels (f) - (j) due to NH<sub>3</sub>. The white to black colormesh plot in all the panels represent the total transit depth excess.

- ・vertical mixingを入れたこと によるtransitのexcessの図。
- ・T\_equiが低すぎても高すぎて も兆候が見えないことが確認 できる。
- ・CH4よりNH3のほうがよく兆 候が確認できる



**Figure 5.** The retrieved values of [M/H],  $K_{zz}$  and  $T_{int}$  for different values of metallicity and equilibrium temperature with  $\log_{10}(K_{zz}) = 9$ ,  $T_{int} = 200$  K and g = 1000 cm s<sup>-2</sup>. The rows from top to bottom correspond to metallicity values of -1, -0.4, 0.2, 0.8, and 2. The blue horizontal lines show the true values of the parameters.

- ・疑似観測から金属量、 K\_{zz}、T\_intを retrieveした結果。
- ・K\_{zz}は温度が1100K くらいでのみよく決ま っていることがわかる
- ・T\_intはNH3アバンダン スできまっている

# 結果のまとめ

- は結果のスペクトルにあまり影響しない)
- るとわかった
- にあまり依らないので、K {zz}は制限できない。
  - 決まる

・平衡温度が<900Kだと、K\_{zz}を変えても結果は変わらない。(vertical mixing)

・900K < T\_{equi} < 1400K だと、K\_{zz}をNH3とCH4の観測から結構制限でき

・T\_{equi}>1400Kだと、NH3とCH4が観測できなくなり、COはvertical mixing

・基本的には、mixingが化学反応起こるちょうどいい温度で激しいかどうかで

#### **ALMA Observations of Proper Motions of the Dust Clumps in the Protoplanetary Disk MWC 758** Kuo, I-Hsuan Genevieve,<sup>1</sup>,<sup>2</sup> Yen, Hsi-Wei,<sup>1</sup> and Gu, Pin-Gao<sup>1</sup>



Figure 1. ALMA 1.3 mm continuum maps of the MWC 758 disk from the 2017 (left) and (right) 2021 data. The two maps have the same beam size of 0.071, shown as white ellipses at the bottom left corners, and are generated with similar uv coverages. The contour levels are  $5\sigma$ ,  $20\sigma$ ,  $30\sigma$ ,  $50\sigma$ , and  $100\sigma$ .

・MWC758の原始惑星系円盤の2017 年のALMA観測データと2021年の データを比較した。

- ・2つのダストクランプがそれぞれ22 mas, 24 mas動いていることを確認 した。
- それぞれの実速度は内側クランプは サブケプラー、外側クランプはスー パーケプラーだった。これは、RWI の渦の予測とは異なる。
- もしかしたら、スパイラルとの相互 作用で密度分布が変わったのを見た のかもしれない。





ne contour levels are  $5\sigma$ ,  $20\sigma$ ,  $30\sigma$ ,  $50\sigma$ , and  $100\sigma$ .

Figure 2. Azimuthal Intensity Distribution and Displacement. (*upper panel*) ALMA 1.3 mm continuum maps deprojected in the polar coordinates. The azimuthal angle is defined counter-clockwise from the minor axis of the disk. The color scale and contours present the 2021 and 2017 data, respectively. The contour levels are  $5\sigma$ ,  $20\sigma$ ,  $30\sigma$ ,  $50\sigma$ , and  $100\sigma$ . (middle panel) Intensity residuals (color) after subtracting the 2021 from 2017 maps presented in the upper panel. The contours present the 2021 continuum map with the contour levels the same as those in the upper panel. (lower panel) Azimuthal intensity profiles of the inner and outer clumps passing through the continuum peaks of the clumps extracted from the 2017 (blue) and 2021 (red) continuum maps. The inner clump is centered around  $322^{\circ}$ , and the outer clump at  $95^{\circ}$ .





Figure 3. Measured azimuthal velocity of the proper motions of the inner and outer clumps (green and blue data points, respectively,) in comparison with the Keplerian rotational profile of MWC 758, a 2  $M_{\odot}$  star (cyan dots) with uncertainty of  $\pm 0.5 M_{\odot}$  (shading). The error bars show the 1 $\sigma$  uncertainties of the measured azimuthal velocities. The inner clump peaks at a radius of 0.132 and azimuthal angle of 320°, while the outer clump peaks at a radius of 0.153 and azimuthal angle of 90°.

#### SCExAO/CHARIS Near-Infrared Scattered-Light Imaging and Integral Field Spectropolarimetry of the AB Aurigae Protoplanetary System

ERICA DYKES,<sup>1</sup> THAYNE CURRIE,<sup>1,2</sup> KELLEN LAWSON,<sup>3</sup> MILES LUCAS,<sup>4</sup> TOMOYUKI KUDO,<sup>2</sup> MINGHAN CHEN,<sup>5</sup> OLIVIER GUYON,<sup>2,6,7,8</sup> TYLER D. GROFF,<sup>3</sup> JULIEN LOZI,<sup>2</sup> JEFFREY CHILCOTE,<sup>9</sup> TIMOTHY D. BRANDT,<sup>5</sup> SEBASTIEN VIEVARD,<sup>2</sup> NOUR SKAF,<sup>10</sup> VINCENT DEO,<sup>2</sup> MONA EL MORSY,<sup>1</sup> DANIELLE BOVIE,<sup>1</sup> TAICHI UYAMA,<sup>11</sup> CAROL GRADY,<sup>12</sup> MICHAEL SITKO,<sup>13</sup> JUN HASHIMOTO,<sup>8, 14, 15</sup> FRANTZ MARTINACHE,<sup>16</sup> NEMANJA JOVANOVIC,<sup>17</sup> MOTOHIDE TAMURA,<sup>8, 14, 15</sup> AND N. JEREMY KASDIN<sup>18</sup>



Figure 1. SCExAO/CHARIS AB Aur broadband  $Q_{\phi}$  images (wavelength-collapsed) from 04 October 2020 obtained from PDI processing. The reduction described in Methods was used for both the linearly-scaled (left) and radius-squaredscaled(right) images shown. The image color map intensity scaling goes from the 10th to 99.7th percentile of count values (i.e. np.nanpercentile(image, (10, 99.7)) in the Python NumPy package).

- AB Aurをすばる SCExAO/CHARISで観 測。
- ・波長J,H,K
- ・AB Aur bは1.3mmより 長波長では偏光では受か らない
- ・ ダストは小さいほうがよ く合う









Fig. 1 | Detection of a clump-like protoplanet, AB Aur b, around AB Aur at wide separation (~93 au). Left: SCExAO/CHARIS image from 6 January 2018 combined with ALMA submillimetre imaging<sup>13</sup> taken in 2014 at 900  $\mu$ m showing a ring of pebble-sized dust. AB Aur b lies interior to the dust ring at a location predicted from analysing spiral structure seen on smaller separations. The CHARIS component uses ADI/ALOCI for PSF subtraction. The green arrow points to the location of AB Aur b and the yellow star indicates the position of the star, AB Aur. Right: radius-scaled (that is, multiplied by r, the separation from the star in pixel units) CHARIS image of AB Aur from 2 October 2020 shown to highlight much fainter spiral structure in the disk. The green circle identifies AB Aur b. The CHARIS image uses polarimetry-constrained reference star subtraction to remove the stellar PSF. The colour stretch is linear in this figure and in all other figures. The x and y axes are in units of arcseconds east (along the x axis) and north (along the y axis). The white circle is the region masked by the coronagraph.

### Currie et al. 2020





Fig. 4 | SCExAO/CHARIS images of AB Aur at different wavelengths and observing modes. Left: CHARIS total intensity wavelength-collapsed image from October 2020 (same reduction as shown in Fig. 1, right), showing a clear detection of AB Aur b. Middle: polarized intensity wavelength-collapsed image obtained one day later. A pure scattered-light disk feature would have been detected at the position of AB Aur b (green circle). Instead this region shows no concentrated emission, indicating that AB Aur b is not detected. Right: emission at the approximate position of AB Aur b from VAMPIRES H $\alpha$ data using RDI/KLIP for PSF subtraction. From left to right, the intensity scaling is [0, 0.0925] mJy, [0, 0.055] mJy and [-0.007, 0.007] mJy, normalized to the source's apparent FWHM. The x and y axes are in units of arcseconds east (along the x axis) and north (along the y axis).

### Currie et al. 2020





Figure 9. Mean polarization fraction vs. angle from the disk minor axis for CHARIS broadband, J, H, and K. The error bars correspond to the standard deviation of the polarization at each angle. Measurements missing from the right-hand panel (near 90 and 270 degrees) correspond to regions with limited field of view on the CHARIS detector.



Figure 10. Model azimuthal dependent values for total intensity, polarized intensity, and polarization fraction compared to measured values at 0.25-0.5 and 0.5-0.75 for a model of high porosity (p=0.7) and low porosity (p=0.3). All other parameters for these models are the same (see main text).

### J,H,Kの偏光度の確度依存性から 空隙率を制限。 porosity=[0.3,0.5,0.6,0.7,0.8]で ふると、0.6がいいとのこと。



### Metal pollution in Sun-like stars from destruction of ultra-short-period planets Christopher E. O'Connor1, 2 and Dong Lai2, 3

- よる観測への影響を調べた。
- ・惑星飲み込みがあったと思われる主系列星をうまく説明できた。
- らいでの飲み込みを示唆している。

・超短周期惑星(USP)が潮汐進化や潮汐破壊によって中心星に食べられることに

・USPはmany Gyrくらいでゆっくりmigrationし、惑星の形成から0.1-1Gyrく