2023年4月3日 CPSセミナー

膨張惑星大気のDSMCシミュレーション

寺田直樹¹、寺田香織¹、吉田辰哉¹、 藤原均²、生駒大洋³ 東北大学、2. 成蹊大学、3. 国立天文台

Introduction: 惑星大気の流出と進化



熱的流出(速度分布がボルツマン分布に従う成分の流出)



非熱的流出(速度分布がボルツマン分布に従わない成分の流出)





②の理論近似は比較的理解が進んでいる(と思われていた)。
 生命誕生期における①'と③が特に不明。
 (1)と③が本研究のターゲット。

2

高XUV放射下における熱的流出の抑制

- ・近年の理論研究は熱的流出の抑制を予測
 - Yoshida et al. (2022)
 - M型星周りのH₂-H₂O惑星大気
 - 赤外活性分子の放射冷却による流体力学的流出の抑制
 - 前主系列期間 (~1 Gyr) を経てもH₂とH₂Oが残留しうる
 - Nakayama et al. (2022)
 - 高XUV放射下でのN₂-O₂惑星大気
 - 高温(>3000 K)で電子遷移反応に伴う原子放射冷却が卓越
 - 1気圧大気の流出時間 @60 XUV は先行研究 (Johnston+2019) の1万倍に



⁽Nakayama et al., 2022)



3

非熱的流出の影響の先行研究



- 非熱的流出の影響
 - Tian (2013) は流体モデルを用いて、非熱的流出による膨張大気の収縮を示唆。
 - 外圏底における大気の流出速度 (effusion velocity) を変化させて計算。外圏底より上の物理は不明。
 - 断熱膨張による冷却が、大気の収縮を引き起こす。

本研究の目的

- •本研究の目的
 - ・惑星大気の非熱的流出^{*}が熱的流出や大気構造に及ぼす影響を、
 DSMC (Direct simulation Monte Carlo) モデルで評価する。
 - 得られた大気構造から、系内・系外の惑星大気観測への示唆を 議論する。

* 非熱的流出過程として、本研究ではイオンピックアップを想定

DSMCモデル

Upper thermosphere–exosphere particle model using the direct simulation Monte Carlo (DSMC) method (K. Terada et al., 2016)

The strategy of the model is to track the trajectory and status of the simulated particles, and then the physical quantities are obtained through statistical averaging.



DSMCモデル

Photochemical reactions





Thermosphere model for energetics and compositions (Fujiwara, 1996)

energy conservation equation

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = g \frac{\partial}{\partial p} \left[(K_m + K_t) \frac{P}{H} \frac{\partial T}{\partial p} \right] - g \frac{\partial}{\partial p} \frac{K_t g}{C_p} + \left(\frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}}{\rho} \right) + Q_s + Q_R + Q_P$$

continuity equation of mass mixing ratio (O, O_2, N_2)

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} = \frac{1}{\rho} m_i (P_i - n_i L_i) - \frac{1}{\rho} \frac{P}{H} \frac{\partial}{\partial p} \cdot (n_i m_i C_i) + \frac{1}{\rho} \frac{P}{H} \frac{\partial}{\partial p} \cdot \left(D_t n \frac{P}{H} \frac{\partial}{\partial p} m \psi_i \right)$$

where *T* is the temperature, *t* is time, g is gravity, C_p is the specific heat at a constant pressure, *H* is the scale height, ρ is density, K_m is the coefficient of the molecular heat condition, K_t is the coefficient of turbulent heat conduction, *J* is the electric current, *E* is the electric field, Q_s is the solar heating, Q_R is the radiative cooling, Q_P is the particle heating, ψ_i is the mass mixing ratio of i-th species, m_i is the molecular mass of i-th species, C_i is the diffusion velocity of i-th species, *n* is the total number density, *m* is mean molecular mass, and D_t is the eddy diffusion coefficient.

Case O(初期状態 - 地球10 EUVケース)



計算条件

- Case I
 - 非熱的流出を外圏底近傍で与え、その強さを変化させた場合
- Case II
 - 非熱的流出を外圏底近傍で与え、その位置を変化させた場合
- Case III
 - ・非熱的流出をある高度(磁気圏界面を想定)より上側全域で与え、

 その強さを変化させた場合

Case I (非熱的流出の強度依存性)

- ・高度範囲 $r = [r_e 0.5H_{si}, r_e]$ に非熱的流出を付加。
 - ここで、 r_e は外圏底高度、 H_{si} は初期スケールハイト(2700 km)。
 - ・非熱的流出率は、熱的流出率の1,3,9倍を与えた。
- 非熱的流出の付加により、上層大気全域で温度低下。



Casel(非熱的流出の強度依存性)

- エネルギーの式(定常): $\frac{d}{dr} \left[\Phi\left(\frac{mu^2}{2} + C_p kT \frac{GMm}{r}\right) 4\pi r^2 \kappa \frac{dT}{dr} \right] = 4\pi r^2 n q_a(r)$
- $\Phi = 4\pi r^2 nu = const.$
- ・非熱的流出により上向き速度が増加、断熱膨張による冷却(Tian (2013)と整合的)
- •「非熱的流出率<熱的流出率」のとき、トータルの流出率は最大23%増加(ほぼ一定)



Case II(非熱的流出の位置依存性)

- $r = [r_e 0.5H_{si}, r_e]$ (exobase), $r = [r_e + 0.5H_{si}, r_e + H_{si}]$ (above),
 - $r = [r_e 1.5H_{si}, r_e H_{si}]$ (below) の3通りの高度範囲に非熱的流出を付加。
- 「above」が最も大きく温度低下。高高度では高い位置エネルギー(重力ポテンシャル)をもつ分子が取り除かれるので、エネルギー損失に大きく寄与。



Case III (固定高度より上側での非熱的流出)

- ・固定高度(4000 km)より上側で非熱的流出を付加。
 - ・非熱的流出率は、熱的流出率の1,3,9倍を与えた。
- •「非熱的流出率>熱的流出率」のとき、イオンピックアップが生じる下限高度

(~磁気圏界面)で大気密度が急減。



観測への示唆: 膨張惑星大気の上端



- ・膨張惑星大気の上端は何で決まるのか?
 ・輻射圧?電離?
- 「非熱的流出率>熱的流出率」となる天体では、惑星磁気圏サイズで外圏底の位置が決まりうる。
 - ・膨張大気の観測により、惑星磁場強度を制約 しうる可能性。





- ・ 非熱的流出の影響
 - 非熱的流出(イオンピックアップ)により、膨張惑星大気が冷却されて収縮し、熱的流出率 が減少することをDSMCモデルを用いて示した。
 - •「非熱的流出率<熱的流出率」のとき、トータルの流出率は最大23%増加(ほぼ一定)。
 - 外圏底より高高度における流出も大気の冷却に大きく寄与。
 - 「非熱的流出率>熱的流出率」のとき、イオンピックアップが生じる下限高度(~磁気圏界 面)で大気密度が急減。
- 観測への示唆
 - 「非熱的流出率>熱的流出率」となる天体では、惑星磁気圏サイズで外圏底の位置が決まりうる。膨張大気の観測により、惑星磁場強度を制約しうる可能性。
 - 高EUV放射下の系外惑星、タイタン、冥王星などで非熱的流出の影響の検証が必要。