DSMC Simulation of Slow Hydrodynamic Escape From Terrestrial Planets

寺田香織¹, 寺田直樹¹, 藤原均², 生駒大洋³

1 東北大学大学院理学研究科

2 成蹊大学理工学部

3 東京大学大学院理学系研究科

我々は、DSMC 法を用いた粒子シミュレーションによって、地球類似惑星の遅進流体 力学的散逸(slow hydrodynamic escape)を調べた。

遅進流体力学的散逸は、中心星からの強い EUV に照射されて膨張した惑星大気で起 こる熱的散逸の一種である。熱的散逸は、大きく分けて遅進流体力学的散逸、ジーンズ 散逸、流体力学的散逸の3つに分類される。大気の熱エネルギーが惑星の重力エネルギ ーよりも十分に小さい惑星で起こるのがジーンズ散逸である。一方、大気の熱エネルギ ーが惑星の重力エネルギーに匹敵するほど大きい惑星で起こるのが流体力学的散逸で ある。遅進流体力学的散逸は、この両者の間に位置する惑星で起こっている。

大気の膨張は、系外惑星の観測の重要な条件である。系外惑星の観測法の1つである トランジット観測は、惑星が主星の前を通過する際の、惑星大気による主星の光の吸収 を観測するため、観測可能な多くの惑星大気は遅進流体力学的散逸状態もしくは流体力 学的散逸状態にあると考えられる。この両散逸機構による大気の散逸量は大きく、惑星 の大気の保有量や組成を一変し、大気進化の方向性を決める一因となる可能性があるこ とからも、この両散逸の大気の状態と散逸量を理解することは重要であり、今回我々は 遅進流体力学的散逸についてシミュレーションを行った。

遅進流体力学的散逸状態の大気の先行研究は流体モデルで行われているが、本研究で は、分子間衝突が支配的な領域から自由分子流へと遷移する領域を粒子モデルを用いて 解き、運動論効果を含めて遅進流体力学的散逸を調べた。

その結果は、現在の地球より 10 倍以上大きい EUV 放射に晒された地球類似惑星で 遅進流体力学的散逸が起こり、10 億年以内に 1 地球海洋質量もの大気を失うほどの大 規模な大気散逸が起こることを示している。流体モデルの結果との比較では、外圏底近 傍において、分子間衝突が少ないために断熱冷却効果が弱められることが示唆された。こ のことから、実際の外圏底温度は流体モデルで予測されるよりも高く、散逸率は大きいと考 えられる。通常の DSMC モデルと、分子間衝突回数を増やした流体的な DSMC モデルを 用いて行ったテストシミュレーションでは、通常の DSMC モデルで計算した外圏底の密度 は、より流体的な DSMC モデルで計算した値の約2倍、散逸率は約5倍となった。 2020/02/18

DSMC SIMULATION OF SLOW HYDRODYNAMIC ESCAPE FROM TERRESTRIAL PLANETS

Kaori Terada¹, Naoki Terada¹, Hitoshi Fujiwara², Masahiro Ikoma³ ¹Graduate School of Science, Tohoku University, ²Faculty of Science and Technology, Seikei University ³Graduate School of Science, The University of Tokyo





However, fluid model has a serious problem in the upper boundary condition. Transition from collisional to collisionless atmospheres is difficult to solve with a fluid model.



In this study, we investigate the slow hydrodynamic escape using a DSMC model (full particle model) [K. Terada et al., 2016].

Model Description Upper thermosphere - exosphere particle model using the direct simulation Monte Carlo (DSMC) method [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. Solar heating and IR cooling • velocity update photochemical reactions • add and loss move • position and velocity update • velocity update







Why adiabatic cooling works less efficiently ?

Why adiabatic cooling works less efficiently?



Verification of adiabatic cooling around the exobase

Does the adiabatic cooling work less efficiently in the upper thermosphere?

Test simulation conditions:

- 3 types of DSMC simulations of oxygen atmosphere without EUV heating
- Normal DSMC simulation
 10 times the intermolecular collision frequency (More fluid-like behavior) ③ 0.1 times the intermolecular collision frequency (More particle-like behavior)
- At ground, number density = 6.5×10^{14} [m⁻³], temperature = 20000 K
- $\left(\frac{\text{mean free path}}{\text{scale height}} = 0.01, \text{ escape parameter} = 6.0\right)$



Conclusions

When the Earth-like atmosphere is exposed to more than 10 times stronger EUV radiation than the present-day Earth, the atmosphere is in a slow hydrodynamic escape regime and 1 terrestrial ocean is lost within 1 Gyr.

The exobase temperature is underestimated by a fluid model in a slow hydrodynamic escape regime, because the adiabatic cooling works inefficiently around the exobase.

The exobase density and the escape rate calculated by the normal DSMC model are about 2 and 5 times larger than those calculated by the fluid-like DSMC model, respectively.