

系外地球型惑星における炭素循環の制約に向けた高層大気モデリン

グ

Upper atmosphere modeling for constraining carbon cycle on Earth-like exoplanets

中山陽史

立教大学理学研究科物理学専攻

1. 研究目的

現在、多くの系外惑星が見つまっている。その中で、地球のような温暖な環境を有するような惑星は存在するのかという問いは普遍的な問いである。地球における温暖環境は地質学的なタイムスケールで行われる炭素循環によって大気 CO₂ 量が調節され、気候が安定化されていると考えられている。これは CO₂ が温室効果気体であることと地球のような惑星における大気中からの CO₂ 除去率が表面温度に依存することに起因する。しかしながら、地球型惑星における炭素循環の役割は海洋水量などの惑星固有のパラメータに依存し、大気 CO₂ 量は大きく変わりうると示唆されている[e.g., Nakayama et al., 2019]。一方で、CO₂ は大気上層を冷却させる役割を持ち、その存在度によって熱圏の温度、そして膨らみは大きく変わりうる[Kulikov et al., 2007]。それを踏まえ、Tavlov et al., (2018)では金星と地球のように大気中 CO₂ 存在度が大きく異なる惑星では熱圏の広がり大きな違いが生じ、O 輝線を用いて熱圏の広がりを観測可能であると提案した。そこで本研究では、系外地球型惑星における炭素循環の制約に向けた熱圏大気シミュレーションを用いて、大気 CO₂ 存在度と熱圏の広がりについて検討を行った。

2. 研究成果の内容

様々な大気組成、そして高層大気のエネギー源である恒星から UV 放射に対して適用可能な高層大気モデルの構築を行い、熱圏構造の検討を行った。当初の研究目的とは異なるが、多くの系外地球型惑星において重要となる強 UV 環境において、原子とイオンの輝線放射冷却が熱圏構造に大きく影響を与えることを発見し、その影響を検討することに尽力した。そのため、輝線放射冷却を詳細に取り扱えるように電子遷移を含む化学モデルをさらに構築し、熱圏構造の検討を行った。特に、地球大気組成を対象として、輝線放射冷却の熱圏構造に対する影響について検討した。その結果、比較的弱い UV 環境である現在地球の 5 倍程度の UV 強度から輝線放射冷却が有効に働き、大気の膨らみと大気の散逸率を強く抑えることが分かった。これは当初の目的である大気の膨らみだけでなく、惑星が温暖環境を維持する上で重要となる大気の安定

性に対しても重要な意味を持つ。初期地球や系外地球型惑星で想定されるさらに強い UV 環境に対して検討を行った結果、大気散逸率が先行研究に比べて 1/1000 からさらに小さな程度まで抑えられることが分かった。先行研究で見積もられた強 UV 環境における地球大気の散逸タイムスケールは 0.1Myr 以下であったが、本研究で新たに得られた知見によって散逸タイムスケールが Gyr スケールという地質学的なタイムスケールまで伸びることが分かった。そのため、初期地球や系外惑星を想定した場合でも、大気は比較的安定であることが示唆される。これらの結果は初期地球や系外地球型惑星のハビタビリティを考える上で重要な示唆を与える。また、以上の結果は既に投稿論文にまとめており、学術雑誌に投稿を済ませている。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本学際共同利用によって、高精度かつ多くの化学反応を含む高層大気シミュレーションが可能になった。特に強 UV 環境では高層大気が大きく膨らむため、大気構造を解像するのに多くのシミュレーショングリッドに対して化学反応を考慮する必要となる。そのため、スーパーコンピュータなどの高性能の計算機がなければ、パラメータスタディを行い、物理的な性質を理解することが困難となる。この学際共同利用などのように比較的小規模かつ様々な分野のプロジェクトがスーパーコンピュータを利用可能な申請は貴重である。そして、多くの研究費を持たない若手研究者に関してはスーパーコンピュータを利用できるまたとない機会となる。そのため、この学際共同利用は多くの科学分野の発展に貢献していると考えている。

4. 今後の展望

本研究で得られた地球型惑星の高層大気における輝線放射冷却の知見は様々な応用が効くと考えている。まず、当初の目的であった CO₂ を多く含む大気などにおいても輝線放射冷却は有用である。そのため、今後は様々な大気組成や惑星質量の惑星における大気散逸の役割を再検討し、大気散逸が大気進化に与える役割を検討する必要がある。同時に、本研究目的で挙げた熱圏広がり観測を用いて理論の検証と地球型惑星表層環境の観測的制約を行い、地球型惑星の大気進化についての理解を目指す。

5. 成果発表

- (1) 学術論文
- (2) 学会発表 国内学会(筆頭著者 3 回、共著者 2 回)
- (3) その他

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus			
Oakforest-PACS	○	40,500	
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			