



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	TRAPPIST-1 系地球型惑星における水蒸気大気の流体力学的散逸とその観測可能性 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	渡辺, 健介
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第13132号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70001
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kensuke_Watanabe_review.pdf, 審査の要旨



学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士 (理 学) 氏 名 渡 辺 健 介

審査担当者	主査	教 授 倉 本 圭
	副査	教 授 高 橋 幸 弘
	副査	准教授 石 渡 正 樹
	副査	准教授 亀 田 真 吾 (立教大学理学部)

学 位 論 文 題 名

TRAPPIST-1 系地球型惑星における水蒸気大気の流体力学的散逸とその観測可能性

博士学位論文審査等の結果について (報告)

近年、赤色矮星を中心星とする TRAPPIST-1 系において、生命が居住可能とされる軌道範囲に地球と同程度の質量とサイズの惑星が複数存在することが確認された。この系は、太陽から 12pc と近距離に存在し、系外地球型惑星の大気構造のキャラクタリゼーション観測や太陽系外生命圏探査の対象として有望視されている。他方、軌道半径の小ささから、同系の惑星は、その誕生以来、主星からの強い極端紫外線(EUV)にさらされてきたと推測されている。EUV 照射は、 H_2O を分解し、また上層大気を加熱することによって、大気の流体力学的散逸を引き起こすと考えられる。TRAPPIST-1 系の惑星に、生命にとり必須の物質とされる水が現存するかどうか明らかにするには、惑星の歴史を通じた総散逸量を明らかにする必要がある。

著者は、本論文において、水蒸気の光解離から始まる一連の大気光化学過程と、光学活性気体種による放射冷却過程を組み込んだ多成分大気流出モデルを新たに構築した。これらの過程は、その定式化の複雑さから、従来の地球型惑星からの水蒸気大気散逸シミュレーションには全く組み込まれて来なかったものである。実際、TRAPPIST-1 系の惑星からの大気散逸モデルの先行研究は、あらかじめ H_2O 分子が原子に完全に光分解し、それ以上の化学反応は生じないとする仮定を置いた簡略なモデルが用いられている。しかし、分子による放射冷却や分子の光解離によるエネルギー損失が散逸を抑制する効果を持ち、また特定の大气成分による中心星放射の遮蔽が観測可能性の検討材料になることを鑑みれば、これらの効果を取り入れることは、極めて重要といえる。

著者は運動を記述する方式系に、化学反応、放射冷却を組み込んだモデルを丹念に組み上げ、TRAPPIST-1 系のハビタブルゾーン (地球類似惑星を想定した際に、地表に液体の水が安定に存在可能な軌道領域) のやや内側に位置する TRAPPIST-1d を主対象に、大気散逸の駆動源となる主星からの EUV 照射フラックスの関数として大気散逸率を明らかにした。TRAPPIST-1d は、ハビタブルゾーン内に位置する e、f、g よりも強い中心星放射を受けており、また、その推定質量も相対的に小さい。もしも TRAPPIST-1d に水が現存する可能性があるなら、より外側の惑星に水が現存することはより一層確からしいといえる。

TRAPPIST-1 のような M8 型の赤色矮星に対し、EUV 光度と年齢の関係は今のところ直接的な観測データが存在しない。そこで、著者は TRAPPIST-1 を含む同型の恒星の X 線光度と年齢の関係、そして、M 型星において知られている EUV 光度と X 線光度の関係をもとに、主星の EUV 光度進化曲線を推定し、惑星誕生から現在までの総水散逸量を推定した。

散逸シミュレーションの結果、EUV 照射エネルギーが流出する質量の内部エネルギーと位置エ

エネルギーに転換される効率は、水分子の光解離と水分子および水素原子による放射冷却によって、10%以下にとどまる。そして、年齢が約 70 億年と推定される TRAPPIST-1d からの水蒸気総散逸量は、EUV 進化曲線の推定幅を考慮の上、1~300 地球海洋質量相当と見積もられる。有力視される TRAPPIST-1 系の原始惑星系円盤からの形成論によれば、同系の各惑星は、 H_2O が氷として凝縮する領域の内縁付近で誕生し、徐々に内側の現在の軌道へ移動してきたとされ、初期に大量の H_2O を獲得していた可能性がある。推定された H_2O 散逸量は上限で TRAPPIST-1d の質量の約 15%であり、この結果は、同惑星に H_2O が現存する可能性があることを示す。これは、より外側を公転し、より質量の大きな e、f、g に水が現存している可能性が高いことを示す。

著者はまた、 H_2O の光解離によって生成し、上層に大きく広がった H、O 大気が、トランジット時における主星の Ly- α 線と OI 輝線の減光の過剰として観測的に捉えられる可能性があることを示した。現行ならびに次期宇宙望遠鏡の紫外観測の性能を踏まえ、TRAPPIST-1d だけでなくハビタブルゾーン内にある e、f、g について各波長帯に期待される減光量と、それを観測的に明らかにするための必要な観測時間を星間雲による吸収を考慮しつつ定量的に求めた。TRAPPIST-1 の現在の EUV 光度の推定幅の中で、もっとも強い値を与えた場合、TRAPPIST-1d におけるトランジット前後の Ly- α 線の減光は 30%、OI 輝線のそれは 20%と評価される。この場合、ハッブル宇宙望遠鏡と次期宇宙紫外望遠鏡 WSO-UV のどちらにおいても、最も質量が重い TRAPPIST-1c を除き、Ly- α 線の減光は数回のトランジット観測によって検出可能である。OI 輝線についてはトランジット時間や公転周期を考慮し、各宇宙望遠鏡の使用期間を約 1 年間程度とした場合、約 50 時間の露光時間で検出可能な惑星は、TRAPPIST-1d、e、f である。各惑星の流出水蒸気大気が存在が観測的に検知できる可能性があることを示したこの成果は、今後の国内外の系外惑星の観測研究に強い刺激を与えるものとなっている。

以上のように、著者は流体力学的散逸の精巧な数値モデリングから、TRAPPIST-1 系の地球型惑星における水蒸気大気ならびに水の現存可能性を示すとともに、将来観測による流出しつつある水蒸気大気の検出可能性を定量的に明らかにした。これらの成果は、周辺分野へ高い波及性を持つものである。以上のことから、著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があるものと認める。