



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 渡辺 健介

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

近年、太陽から 12 pc の比較的近傍に位置する赤色矮星 TRAPPIST-1 に 7 つの系外惑星が発見され、もっとも外側の軌道を持つものを除く 6 つの惑星は地球程度の質量と半径を持つと推定されている。この中で 3 つの惑星は、惑星表層で液体の水が安定に存在することを許す中心星放射条件を満たしており、近い将来の新型宇宙望遠鏡による観測で液体の水や生命の有無について、手掛かりが得られるものと期待される。

理論的に、これらの惑星はスノーライン付近で形成され、内側に移動してきたことが示唆されており、少なくとも形成時点においては水を豊富に「保持」していた可能性がある。その一方、赤色矮星は、形成後数億年間継続する前主系列段階において、高い光度を維持するため、それに伴い現在は穏やかな中心星放射を受けている惑星も、過去に暴走温室状態にあり、中心星の EUV 放射によって水蒸気大気の流体力学的散逸を起こしていた可能性がある。

これまで TRAPPIST-1 系については、水蒸気が大気下層で水素原子と酸素原子に全て解離した系を想定した半解析的な大気散逸モデリング(Bolmont et al., 2017) しか行われおらず、水蒸気による放射冷却効果や水蒸気の光解離により生じる多数の大気成分による相互作用を取り入れ、水素や酸素の散逸量と大気構造の関係については明らかになっていない。

そこで本研究では、多成分大気の一次元流体力学的散逸モデルを構築し、水蒸気による冷却効果や分子種間の化学反応過程を取り入れ、水蒸気大気からの大気散逸率を推定し、TRAPPIST-1 惑星系から現在までにどの程度水が失われたのか、また現在も流体力学的散逸が起きていた場合に、散逸大気の観測可能性について明らかにすることを試みる。水蒸気主成分大気において、流体力学的散逸の物理過程や、散逸量、現在の大気構造の観測可能性などを明らかにするのは本研究が初めてである。

TRAPPIST-1 系のシミュレーションに進む前に、本モデルを流体力学的散逸現象が確認されているホットジュピター HD 209458b の H_2 -He 大気に適用し、モデルの有用性を確認した。水素散逸流の流量、水素ガスおよび重元素の持ち上げに関する観測的制約を満たす結果が得られ、本数値モデルは HD 209458b における流体力学的散逸を再現可能である。

次に、本モデルを惑星表面に液体の水の存在が許容される軌道半径からわずかに内側に外れている TRAPPIST-1d に適用し、EUV 光度の進化を考慮した水蒸気大気の散逸率を推定した。この惑星に着目したのは、もし表層に水が現存すれば、より外側の惑星にも水が残っている可能性が考えられるからである。流体力学的散逸の駆動源となる EUV 放射強度は TRAPPIST-1 のような M8 型の低質量恒星に対しては観測されていないため、X 線強度の不確定も考慮し、強弱二通りの X 線強度進化曲線を与えて、EUV 放射を推定した。

数値計算の結果、主に EUV 吸収を起こす高度領域において水蒸気による放射冷却が効き、散逸率が抑えられるとともに、水蒸気は計算領域下層で光解離し、上層では分子量の小さい大気成分が主要となることが示された。また EUV 放射強度が地球軌道上の平均値の 25 倍以上の場合は、散逸する水素原子と酸素原子の間に顕著な質量分別は生じなかった。

TRAPPIST-1d の形成から現在(約 70 億年)までの水素原子や酸素原子の総散逸量は強い EUV 光度進化モデルに沿う場合、水素は 316 地球海洋質量相当の水素原子質量、酸素は 268 地球海洋質量相当の酸素原子質量となり、弱い EUV 光度進化モデルに沿う場合は、総散逸量は著しく小さくなり、両元素合わせて約 1 海洋質量相当となった。前者の場合の総散逸量は、惑星質量の約 15 % に相当する。ただしこの場合であっても、この惑星がスノーライン付近で形成され、初期に水を豊富に獲得した場合には、現在でも水を保有している可能性がある。

強い EUV 光度進化モデルに沿う場合、TRAPPIST-1 系の惑星では、今も流体力学的散逸が起きている可能性があり、高高度まで水素原子や酸素原子が持ち上げられる。そこで強い EUV 光度進化モデルにおける現在の年齢の EUV 放射を与えた場合の組成分布を用いて、トランジット最中央点における恒星光の減効率を推定した。TRAPPIST-1d では、Ly- α 線の減光率が約 30 %、OI 輝線で約 7.4 % となり惑星の中心星に対する面積比に比べて大きな減光率を示す。また、TRAPPIST-1 d,e,f,g にも同様に当てはめたところ、Ly- α 線は 40 % 以上の減光率、OI 輝線は約 10 % 程度の減光率を得た。これらは現行あるいは次世代の宇宙望遠鏡で十分観測可能な大きさと言える。TRAPPIST-1c は惑星の重力による束縛が強く、大気上層の密度が希薄になるため、減光率はいずれの輝線も 10 % 未満となるが、重力の束縛効果で TRAPPIST-1 系他惑星に比べて散逸率が抑制されるため、現在でも惑星表層に多くの水が存在している可能性がある。