

A giant comet-like cloud of hydrogen escaping the warm Neptune-mass exoplanet GJ 436b

David Ehrenreich¹, Vincent Bourrier¹, Peter J. Wheatley², Alain Lecavelier des Etangs^{3,4}, Guillaume Hébrard^{3,4,5}, Stéphane Udry¹, Xavier Bonfils^{6,7}, Xavier Delfosse^{6,7}, Jean-Michel Désert⁸, David K. Sing⁹ & Alfred Vidal-Madjar^{3,4}

- 海王星質量程度の系外惑星 GJ 436b のトランジット観測
- 先行研究の観測結果よりも、紫外線領域のトランジットによる減光の深さが、可視光領域のそれよりもはるかに大きいことが観測された
- GJ 436b は水素原子の厚い外気圏雲に覆われている可能性を示唆
- 質量損失率は $10^8 \sim 10^9$ g/s 程で、この惑星大気を中心星(M 型星)の寿命中に全て散逸させることは難しいが、惑星形成初期は現在よりもはるかに大きな惑星であった可能性を示唆

Exoplanets orbiting close to their parent stars may lose some fraction of their atmospheres because of the extreme irradiation^{1–6}. Atmospheric mass loss primarily affects low-mass exoplanets, leading to the suggestion that hot rocky planets^{7–9} might have begun as Neptune-like^{10–16}, but subsequently lost all of their atmospheres; however, no confident measurements have hitherto been available. The signature of this loss could be observed in the ultraviolet spectrum, when the planet and its escaping atmosphere transit the star, giving rise to deeper and longer transit signatures than in the optical spectrum¹⁷. Here we report that in the ultraviolet the Neptune-mass exoplanet GJ 436b (also known as Gliese 436b) has transit depths of $56.3 \pm 3.5\%$ (1σ), far beyond the 0.69% optical transit depth. The ultraviolet transits repeatedly start about two hours before, and end more than three hours after the approximately one hour optical transit, which is substantially different from one previous claim⁶ (based on an inaccurate ephemeris). We infer from this that the planet is surrounded and trailed by a large exospheric cloud composed mainly of hydrogen atoms. We estimate a mass-loss rate in the range of about 10^8 – 10^9 grams per second, which is far too small to deplete the atmosphere of a Neptune-like planet in the lifetime of the parent star, but would have been much greater in the past.

背景

- ・ 中心星の近傍を公転している系外惑星の多くは、強い放射により大気の一部が散逸している可能性がある
- ・ 大気散逸は低質量惑星に影響を及ぼしやすい
 - 熱い岩石惑星はもともと海王星に似た惑星であり、これまでに大気を全て失った可能性が考えられる (e.g., Lopez+2012)
- ・ 先行研究(e.g., Kulow+2014) で、GJ436b においてホットジュピターで起きているような水素散逸の特徴が観測されている
 - 水素散逸の証拠としては、観測が不十分
 - GJ436b 起源はどうなっているのか??

手法

- トランジット観測
 - HST 搭載の STIS (宇宙望遠鏡撮像分光器)
 - 観測日時
 - ◇ 2013/06/18 (visit2)
 - ◇ 2014/06/23 (visit3)
 - その他の使用した観測データ
 - ◇ 2010/01/06 [Ehrenreich+2011](visit0)
 - ◇ 2012/12/07 [Kulow+2014] (visit1)

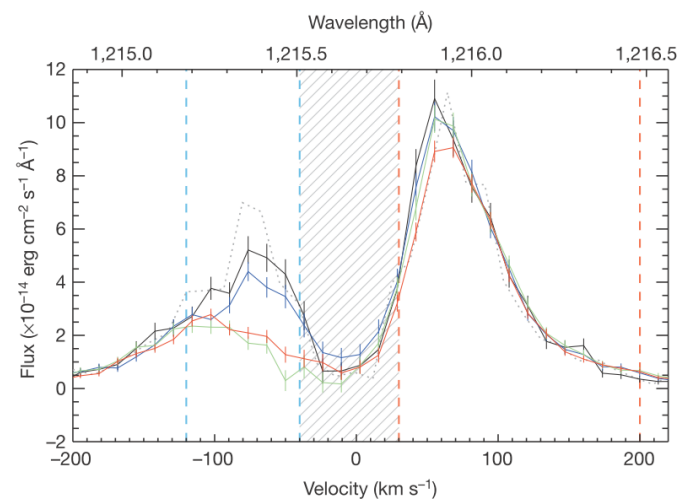


Figure 1 | Evolution of the hydrogen Lyman- α emission line of GJ 436.

Black-line: out-of-transit
Blue-line: pre-transit
Green-line: in-transit
Red-line: post-transit

Gray-dot line: GJ436 spectrum
(Ehrenreich+2011)

結果と議論

- -120km/s - -40km/s における吸収が顕著 (図 1)
 - トランジット中の Ly α 線の吸収が $56.2 \pm 3.6\%$ (図 2)
 - 可視光線のトランジットの深さは 0.69%
 - 先行研究では $22.9 \pm 3.9\%$ [Kulow+2014]
 - ホットジュピターの Ly α 線の吸収よりも大きい [e.g., (~15%, Vidal-Madjar+2003)]
 - 紫外線で観測したトランジットが天体暦よりも~2.7h も早く起きた
 - トランジット後も大きな Ly α 線の吸収が存在
 - かなり膨張した大気が存在している可能性
-
- 三次元の散逸シミュレーション(Bourrier and Etangs 2013)
 - 目的: GJ 436b で観測される吸収特性を理解するため
 - 恒星との相互作用などを考慮し, 上層大気における水素原子の粒子計算を行った
 - 計算結果 (図 3, 4)
 - ◇ 観測値に fit するような吸収特性(緑線, 図2)
 - ◇ 散逸率: $10^8 - 10^9$ g/s エネルギー律速
 - 外気圏雲の膨張した水素の尾によって, 可視光線のトランジットが終了した後でも, 紫外線のトランジットが観測されていたと考えられる
 - 散逸率を 5×10^8 g/s と仮定し, 10 億年間の質量損失を見積もる
 - 現在の惑星質量の~0.1%/Gyr
 - ◇ 海王星同様に, 質量の約10%の大気を持つと仮定
 - ◇ この値は, 大気加熱効率が約~1%程度であることを示している
 - M型星は, 過去に行くほど活動が活発
 - 惑星形成初期の約10億年で現在の100倍以上のX線やEUVを受け取る (Ribas+2005)
 - ◇ 現在の惑星質量の10%程度の質量を惑星形成後の10億年で失う可能性がある
 - ◇ 近接した海王星に似た惑星は, 大気散逸によって劇的に進化してきたと考えられる

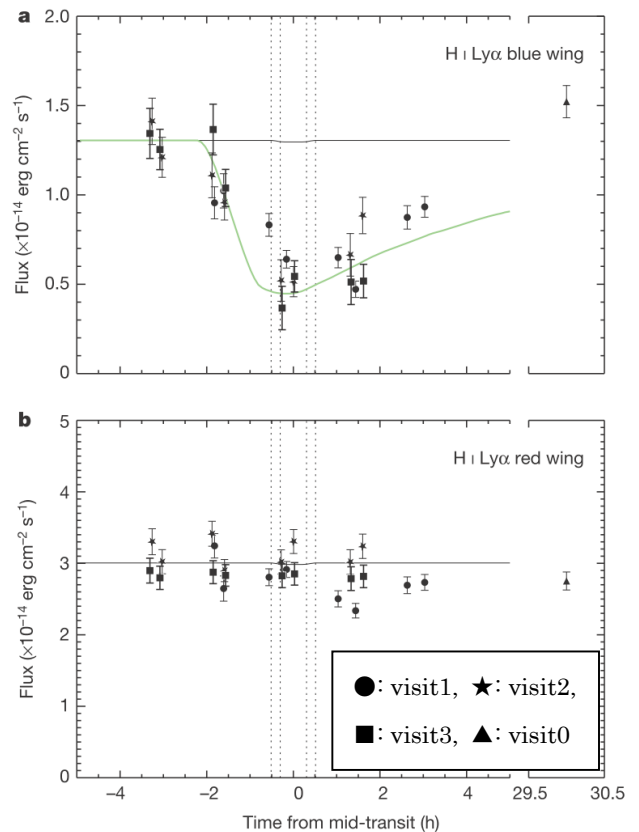


Figure 2 | Lyman- α transit light curves of GJ 436b. a, b, Data are from visit 1

天体暦: 恒星や惑星などの観測量をもとにその天体の位置や運動などの観測に必要な詳細な情報を記載した暦のこと

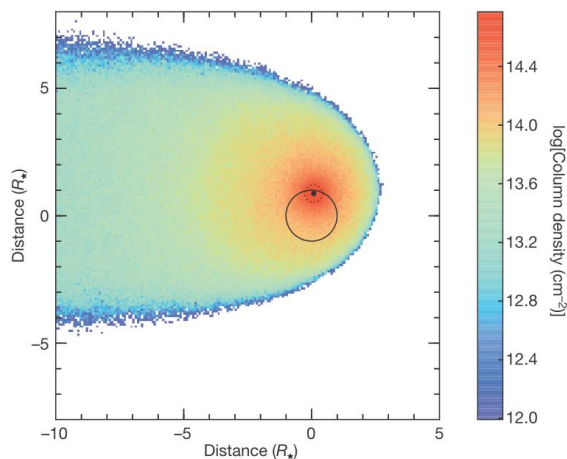


Figure 3 | Particle simulation showing the comet-like exospheric cloud transiting the star, as seen from Earth. GJ 436b is the small black dot

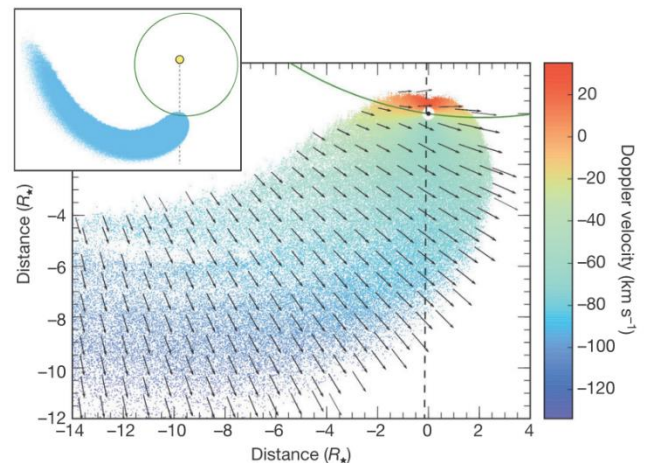


Figure 4 | Polar view of three-dimensional simulation representing a slice of the comet-like cloud coplanar with the line of sight. Hydrogen atom