

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400224

研究課題名(和文)短周期スーパーアースの大気獲得過程の解明

研究課題名(英文)Understanding of accretion process of atmospheres of short-period super-Earths

研究代表者

生駒 大洋 (Ikoma, Masahiro)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：80397025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：太陽以外の恒星をまわる惑星(系外惑星という)が次々と発見されている。最近になって、地球の直径の倍程度の惑星(スーパーアースという)が最も多いことが明らかになった。観測された質量と直径の関係から、それが単に地球を大きくしたものではなく、分厚い大気を持つ可能性が高いことがわかる。そこで本研究課題では、惑星の母体である原始惑星系円盤から大気が形成される過程を理論的に調べた。結果として、分厚い大気を持つスーパーアースが形成される条件を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A growing number of planets have been detected around stars other than the Sun. Those are called exoplanets. It has been recently revealed that the biggest population of exoplanets is planets of about 1-2 times the Earth's diameter, which are called super-Earths. According to their measured masses and diameters, the super-Earths are not a big version of the Earth, because many of them are low-density ones, relative to the Earth. This indicates that the super-Earths likely have thick atmospheres. It was poorly known how super-Earths obtain such thick atmospheres. In this research project, I have investigated theoretically the accumulation process of the atmosphere on super-Earths embedded in protoplanetary disks where planet formation occurs. Then, I have quantified the conditions required for the formation of such thick atmospheres of super-Earths.

研究分野：惑星科学

キーワード：系外惑星

1. 研究開始当初の背景

(1) ケプラー望遠鏡など宇宙でのトランジット観測が成果を出しはじめ、地球半径の数倍以下という小さなサイズの系外惑星が中心星近くの領域では圧倒的多数を占めることが明らかになった。それらは、スーパーアースとよばれる。

(2) 質量と半径ともに測定されているスーパーアースの大半が、岩石惑星に比べて明らかにサイズが大きく、太陽系の地球型惑星と異なり、厚い大気を持つことが示唆されていた。

(3) スーパーアースの大気の獲得過程について十分な理論的研究はなされていなかった。先行研究として、太陽系の地球型惑星の大気起源論を拡張して、岩石からの揮発性成分の脱ガスによる大気形成については議論されていたが、そうした脱ガス大気では量が足りず、スーパーアースの大きなサイズを全く説明できていなかった。

2. 研究の目的

本申請研究課題では、惑星形成場である原始惑星系円盤のガス成分(以下、単に「円盤ガス」という)の獲得による大気形成の可能性を理論的に検討した。これは、巨大ガス惑星(木星型惑星)形成に関する研究代表者の理論研究に基づいているが、対象となるスーパーアースが存在する中心星に近い領域では、巨大ガス惑星形成領域での円盤ガス獲得過程では単純化のために無視してきた効果(固体部分の比熱や円盤ガスの散逸、円盤温度の影響)が重要であり、その影響を詳細に検討することが目的であった。

3. 研究の方法

(1) トランジットを起こすようなスーパーアースは中心星近くに存在し、原始惑星系円盤内の対応する場所でのガス温度も高かったと考えられる。また、円盤ガス散逸段階でのガス捕獲も経験する。そこで、円盤散逸時のガス圧力・温度の変化をモデル化し、それがスーパーアースの獲得する大気量に与える影響を評価した。

(2) 円盤ガス散逸後、惑星は中心星から大量に紫外線を受け、それによって大気は大規模散逸を経験しうる。その散逸量を定量化するため、収縮しつつある大気に中心星紫外線が照射された場合の大気質量の変化について調べた。

(3) 大気の強力な毛布効果により、固体部分は溶融し大規模なマグマオーシャンが形成される。マグマに含まれる酸化物と大気中の水素が反応して水が生成される。そこで、水の生成に伴う大気構造の変化を調べ、大気獲得過程に対する影響を評価した。

(4) 大気の獲得過程は固体集積率に依存し、

反対に固体集積率は大気量に依存する。その関係を定量的に明らかにし、実際に系外に存在しうる惑星を予測し、将来観測に示唆を与えた。

4. 研究成果

(1) スーパーアースが獲得する大気量は、中心星近傍では温度変化に敏感であることがわかった。これは、巨大ガス惑星領域の振る舞いとは対照的である。また、高温環境下にある大気は、円盤ガスの圧力にも敏感であり、結果的に、散逸しつつある円盤ガスの中で、スーパーアースがその場で獲得できる大気量はそれほど多くなく、これまでに観測されているスーパーアースの多くとは矛盾しないものの、いくつかの惑星については理論予測値よりも大きく、整合的でないことがわかった。

(2) 大気獲得後から現在までの熱進化と質量散逸過程を検討した結果、中心星から受ける高エネルギー輻射によって大気の一部は光蒸発によって流出することが示された。そして、現在の大気量と形成期の獲得量の違いとその関係を明らかにした。

(3) 大気の構造と獲得量は、大気主成分である水素とヘリウム以外の重元素の存在に敏感で、特に大気上層での水蒸気の潜熱が決定的な影響を与えることを発見した。地表面では、マグマオーシャンと大気との反応により水蒸気が生成される。また、微惑星が大気中で蒸発することもありうる。したがって、大気量は従来考えられているより大幅に多くなり、これが上述の観測との非整合性を解消する要因となりうる。

(4) しかし一方、マグマオーシャンから酸化鉄などの物質を表面に効率良く運びには、マグマオーシャンの活発な対流が必要で、それは大気に熱を運ぶことに繋がり、結果的に大気量が大幅に減少しうることがわかった。したがって、マグマオーシャンと大気との反応による水蒸気生成が可能な条件は限定的であることがわかった。

(5) 水蒸気の混合を考慮した大気では、大気の密度は上空まで高く、水素・ヘリウム大気では素通りしていた微惑星も、そうした大気ではガス抵抗によって捕獲され、結果として、惑星成長率が大幅に高くなることがわかった。仮に微惑星のサイズが小さく、大気を効率良く汚せば、低密度スーパーアースの存在を説明できるかもしれない。今後の観測による検証が重要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)

Massol, H., Hamano, K., Tian, F.,

Ikoma, M. 他 12 名, Formation and Evolution of Proto-atmospheres, Space Science Reviews, 205, 153-211, 2016 (査読有), DOI: 10.1007/s11214-016-0280-1

Fukui, A., Narita, N., Kawashima, Y., Kusakabe, N., Onitsuka, M., Ryu, T., Ikoma, M., Yanagisawa, K., & Izumiura, H., Demonstrating High-precision, Multiband Transit Photometry with MuSCAT: A Case for HAT-P-14b. The Astrophysical Journal, 819, 27 (11pp.), 2016 (査読有), DOI: 10.3847/0004-637X/819/1/27

Venturini, J., Alibert, Y., Benz, W., and Ikoma, M., Critical Core Mass for Enriched Envelopes: The Role of H₂O Condensation. Astrophysics and Astronomy 576, A114. 2015 (査読有), DOI: 10.1051/0004-6361/201424008

Ito, Y., Ikoma, M., Kawahara, H., Nagahara, H., Kawashima, Y., & Nakamoto, T. Thermal Emission Spectra of Atmospheres of Hot Rocky Super-Earths. The Astrophysical Journal, 801, 144 (15pp.), 2015 (査読有), DOI: 10.1088/0004-637X/801/2/144

Fukui, A., Kawashima, Y., Ikoma, M., Narita, N. 他 21 名, Multi-band, Multi-epoch Observations of the Transiting Warm Jupiter WASP-80b. The Astrophysical Journal, 790, 108. 2014 (査読有), DOI: 10.1088/0004-637X/790/2/108

Kurosaki, K., Ikoma, M., & Hori, Y., Impact of Photo-Evaporative Mass Loss on Masses and Radii of Water-Rich Sub/Super-Earths. Astronomy & Astrophysics 562, A80 (14pp), 2014 (査読有), DOI: 10.1051/0004-6361/201322258

Kawahara, H., Hirano, T., Kurosaki, K., Ito, Y., & Ikoma, M., Starspots-Transit Depth Relation of the Evaporating Planet Candidate KIC 12557548b. The Astrophysical Journal 776, L6, 2013 (査読有), DOI: 10.1088/2041-8205/776/1/L6

Narita, N., Fukui, A., Ikoma, M., 他 19 名, Multi-color Transit Photometry of GJ 1214b through BJHKs Bands and a Long-term Monitoring of the Stellar Variability of GJ 1214. The Astrophysical Journal 773, 144, 2013 (査読有), DOI: 10.1088/0004-637X/773/2/144

Fukui, A., Narita, N., Kurosaki, K., Ikoma, M. 他 14 名, Optical-to-near-infrared

Simultaneous Observations for the Hot Uranus GJ3470b: A Hint of a Cloud-free Atmosphere. The Astrophysical Journal 770, 95, 2013 (査読有), DOI: 10.1088/0004-637X/770/2/95

Narita, N., Nagayama, T., Suenaga, T., Fukui, A., Ikoma, M., Nakajima, Y., Nishiyama, S., & Tamura, M., IRSF SIRIUS JHKs Simultaneous Transit Photometry of GJ 1214b. Publications of the Astronomical Society of Japan 65, 27, 2013 (査読有), DOI: 10.1093/pasj/65.2.27

生駒大洋, 系外惑星研究の新たな展開: スーパーアース, パリティ 28, pp.55-56, 2013 (査読無)
http://pub.maruzen.co.jp/book_magazine/magazine/parity-back/parity2013/2013_01/1301_tokusyu.html

[学会発表] (計 11 件)

Ikoma, M., Formation and Evolution of Giant Planets with Snowy Envelopes. Planet2 Symposium 2017: Origin and diversity of planetary systems from the microscope to the telescope, Villefranche-sur-Mer (France), February 21, 2017.

Ikoma, M., Theoretical Transmission Spectra of Warm Super-Earths with Hazy Atmospheres. Japan-Germany Planet & Disk Workshop, Ishigaki (Japan), September 29, 2016.

生駒大洋, 惑星系の多様性と起源の解明に向けた系外惑星トランジット観測の重要性, 日本天文学会 2016 春季年会, 首都大学東京 (東京都八王子市), 2016 年 3 月 16 日

Ikoma, M. Effects of snow on giant planet formation. International Workshop on "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III", Ishigaki (Japan), 22 Feb., 2016.

Ikoma, M. Role of magma ocean and primitive atmospheres for the hydration of planetary embryos. ISSI Workshop on The Delivery of Water to Protoplanets, Planets, and Satellites. Bern (Switzerland), 13 Jan, 2016.

生駒大洋, 見えはじめた系外惑星の大気, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 秋季講演会, 東京大学 (東京都文京区), 2015 年 11 月 2 日

Ikoma, M. What can we learn from atmospheres of transiting low-mass exoplanets as a stepping stone towards habitable planets? Pathways 2015: Pathways towards habitable planets. Bern (Switzerland), 15 July,

2015.

Ikoma, M. Theoretical Perspective on Super-Earths and Mini-Neptunes with a Focus on the Origins and Compositions of Short-period Exoplanets. 31st int'l colloquium of the Institut D'Astrophysique de Paris, From super-Earths to brown dwarfs: who's who? Paris (France), 30 June, 2015.

Ikoma, M. Bulk and Atmospheric Composition of Transiting Low-Mass Exoplanets and Their Origins. The 2014 German-Japanese meeting on Exoplanets and Their Formation. Haus der Astronomie, MPI-Astronomy Campus (Germany) 6th Nov. 2014.

Ikoma, M. Formation of the Nebular-Captured Protoatmosphere. Workshop on the Disk in Relation to the Formation of Planets and Their Protoatmospheres. ISSI-Beijing, Beijing (China), 27th August, 2014.

Ikoma, M. Accumulation and Loss of Hydrogen-Rich Atmospheres of Exo-Earths. Origins 2014 (2nd ISSOL - The international Astrobiology Society and Bioastronomy (IAU C51) Joint International Conference. Nara (Japan), 7 July, 2014.

〔図書〕(計2件)

井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 朝倉書店, 系外惑星の事典, 365ページ, 2016年

阿部豊・生駒大洋・他21名, 東京大学出版, 宇宙生命論(海部宣男・星元紀・丸山茂徳編), pp.92-96, 2015年

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

生駒 大洋 (IKOMA, Masahiro)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号: 80397025