

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800106

研究課題名(和文) 太陽系外惑星探査のためのリモートセンシング法の構築

研究課題名(英文) Developing Remote Sensing Methods for Characterization of Exoplanets

研究代表者

河原 創 (Kawahara, Hajime)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：90649758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年、地球サイズの太陽系外惑星までもが発見されるようになった。しかし、直に空間分解して見ることのできない系外惑星において、今後、惑星本体の性質を調べたり、惑星の形成・進化を制限したり、惑星上の生命現象に迫ったりできるだろうか？本研究では、太陽系外惑星におけるリモートセンシング方法論の構築を行った。具体的には将来の直接撮像観測による光度変動データから軌道傾斜角の推定法を確立した。また、コロナグラフに高分散分光を用いるという新しい装置概念を提唱し開発をおこなった。これまでキャラクター化が難しいとされてきた長周期惑星のトランジットを検出する方法論を確立し、7個の長周期惑星を発見した。

研究成果の概要(英文)：Recently, many Earth-sized planets have been reported. However, how do we characterize these planets or constrain the planet formation theory or approach bio-phenomena at the planets? In this research, we developed the methodology for the remote-sensing of the exoplanets. We constructed the method to estimate the obliquity by the photometric variation of the directly imaged planets. We also propose a new concept of the instruments, which combine a coronagraph with a high dispersion spectrograph. So far, it has been considered that the long-period planets are difficult to be characterized. We developed a novel method to detect them and detected seven long period planets in Kepler data.

研究分野：太陽系外惑星

キーワード：太陽系外惑星 キャラクター化 直接撮像 トランジット惑星 長周期惑星

1. 研究開始当初の背景

太陽系外惑星研究は、海が存在可能な惑星や隣の恒星にまで惑星が見つかる段階となった。しかし、そのほとんどは惑星質量・半径が分かるのみで、惑星スピンや表層環境・組成といった「系外惑星科学」に必要な情報はほとんど得られていない。今後、いかに惑星を特徴づける方法論(キャラクタリゼーション)を構築できるかが、系外惑星科学の進展の鍵となる。キャラクタリゼーション可能な方法論は直接撮像とトランジット法の二つが主である。研究開始当初はこれらの方法について将来的にキャラクタリゼーションが可能な領域を広げたいという動機があった。具体的な課題となったのは、以下の3点である。

(1) 直接撮像光度変動の利用は、我々が開発してきたマッピング手法があるが、軌道傾斜角情報がどのように入っているのが不明確な部分があった。この理論的解明を目的とする。

(2) 惑星大気内の原子・分子の検出は現在のところトランジット惑星の透過分光・昼側分光に頼っているが、将来的には直接撮像惑星でもロバストな分子検出を行えるようにすべきである。

(3) 後者に関しては長周期惑星でトランジットしているものをそもそもどのように見つけるかという問題がある。

2. 研究の目的

上記背景を鑑みて、今後数年単位で実現可能なものから20年以上かかる生命探査までの次世代の系外惑星キャラクタリゼーション方法論の構築を行う。(1)、(2)に関しては現在装置がまだ存在しないので、方法論の開発が主となる。(3)に関しては、方法論だけでなく実際に解析を行い発見することが目的となるだろう。

3. 研究の方法

(1) はまず、反射光度曲線の数学的な理解を行い、数値的にどのように情報を抽出できるか考える。(2) は方法論の考案、装置シミュレーションや装置研究者との議論を行い、開発可能性について検討する。(3) はトランジット惑星にフォーカスしてケプラー衛星等のライトカーブ解析を行う。

4. 研究成果

(1) 直接撮像による系外惑星のマッピング手法(Spin Orbit Tomography; SOT)は我々が開発してきた独自の方法論である。しかし、軌道傾斜角の依存性があり、SOTではこれがどのように推定できるのか理論的に明らかでなかった。今回、周波数変調という新たな視点により、周波数領域での変動が軌道傾斜角により異なることを発見した。これにより直感的に軌道傾斜角がどのように決まるのかわかるようになり、さらにSOTの事前解析として有用であることがわかった(Kawahara 2016)。これらの解析に使用したコードは、最先端のプログラミング言語 Julia で書かれ、

github上で公開した。これにより誰もが使用できるようになる(Kawahara+2017)。

(2) 現在はトランジット系の観測によるキャラクタリゼーションが華々しいが、直接撮像は次世代のキャラクタリゼーションとして有望である。これまで低分散分光による分子検出が主に考えられてきた。我々は、高分散分光器をコロナグラフ後に設置することで、分子の確実な検出が可能であることを示した(Kawahara+2014)。特に近傍の warm Jupiter に対し、この分光コロナグラフを用いることで、主星光子の抑制効果が現れるため、惑星が分解できないような状況であっても有効であることを示した。さらにこのコンセプトを発展させ、すばる望遠鏡における極限補償光学と高分散分光器 IRD の接続部分 Post Coronagraphic Injection (PCI)の開発をおこなった(Jovanovic, Guyon, Kawahara, Kotani 2017)。

(3) 4000個以上の惑星候補を発見したケプラー衛星は、系外惑星研究のブレイクスルーとなった。しかし、そのほとんどが周期100日以下の高温環境の惑星である。我々はこれまで、ケプラー観測期間中に1回から数回しか公転しないような長周期惑星・天体候補を探索してきた。一つは、ケプラーデータ中の単一トランジットを系統的に目視探査し、7個の周期2年以上の惑星候補を新たに発見した。発見された長周期惑星のアーキテクチャを図1に示した。コンパクト多重惑星系の実に20%以上が cool giant を持つという重要な結論を得た(Uehara et al. 2016)。これらの結果は、異なるグループからの惑星検出も追加され、現在では、数多くの長周期トランジット惑星候補がケプラーデータ中に発見されている。

また、惑星質量ではないが周期1200日の矮星をもつ三重連星系を、単一トランジット現象と光速有限性から生じる効果を用い、ライトカーブだけから質量を含む全ての軌道要素を決定する手法を開発した(Masuda et al. 2015)。

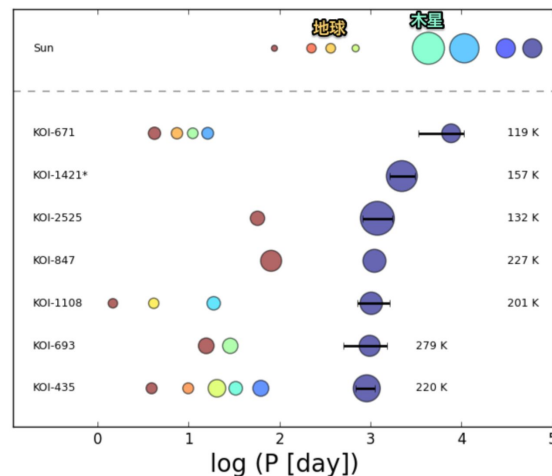


図1 単一トランジット探査で発見した長周期惑星(一番右)。7個中6個が新発見であり、4個がコンパクト複数惑星系に発見された。比較のため上部に太陽系の惑星を示す。Uehara, Kawahara, Masuda et al. (2016) ApJ in press より

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 13 件)

- 1 Masataka Aizawa, Sho Uehara, Kento Masuda, Hajime Kawahara, and Yasushi Suto, Towards detection of exoplanetary rings via transit photometry: methodology and a possible candidate, AJ 153,23, (2017) 査読有, DOI: 10.3847/1538-3881/aa6336
- 2 H. Akamatsu, M. Mizuno, N. Ota, Y.-Y. Zhang, R. J. van Weeren, H. Kawahara, Y. Fukazawa, J. S. Kaastra, M. Kawaharada, K. Nakazawa, T. Ohashi, H.J.A. Röttgering, M. Takizawa, J. Vink, F. Zandanel, Suzaku observations of the merging galaxy cluster Abell2255: The northeast radio relic, A&A 600 A100 (2017), 査読有, DOI:10.1051/0004-6361/201628400
- 3 Hajime Kawahara, Frequency Modulation of Directly Imaged Exoplanets: Geometric Effect as a Probe of Planetary Obliquity, ApJ 822, 112 (2016) 査読有, DOI:10.3847/0004-637X/822/2/112
- 4 Hajime Kawahara, Kento Masuda, Shin'ya Yamada, Masataka Aizawa, Transiting Planet Candidates Beyond the Snow Line Detected by Visual Inspection of 7557 Kepler Objects of Interest, Sho Uehara, ApJ, 822, 2 (2016) 査読有, DOI: 10.3847/0004-637X/822/1/2
- 5 M.Itahana, M. Takizawa, H. Akamatsu, T. Ohashi, Y. Ishisaki, H. Kawahara, R. J. Van Weeren, Suzaku Observations of the Galaxy Cluster 1RXS J0603.3+4214: Implications of Particle Acceleration Processes in Toothbrush Radio Relic, PASJ 67,113 (2015) 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psv084
- 6 H.Akamatsu, R. J. van Weeren, G. A. Ogrean,

H. Kawahara, A. Stroe, D. Sobral, M. Hoefft, H. Röttgering, M. Brüggen, J. S. Kaastra, Suzaku X-ray study of the double radio relic galaxy cluster CIZA J2242.8+5301 A&A 582, A87 (2015) 査読有, DOI:10.1051/0004-6361/201425209

7 Kento Masuda, Sho Uehara, Hajime Kawahara, Absolute Dimensions of a Flat Hierarchical Triple System KIC 6543674 from the Kepler Photometry, ApJL, 806, L37 (2015) 査読有, DOI: 10.1088/2041-8205/806/2/L37

8 Keiko Hamano, Hajime Kawahara, Yutaka Abe, Masanori Onishi, George L. Hashimoto, Lifetime and Spectral Evolution of a Magma Ocean with a Steam Atmosphere: Its Detectability by Future direct Imaging, ApJ, 806, 216 (2015) 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/806/2/216

9 Yuichi Ito, Masahiro Ikoma, Hajime Kawahara, Hiroko Nagahara, Yui Kawashima, and Taishi Nakamoto, Theoretical Emission Spectra of Atmospheres of Hot Rocky Super-Earths, ApJ, 801, 144 (2014) 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/801/2/144

10 Hajime Kawahara, Naoshi Murakami, Taro Matsuo, Takayuki Kotani, Spectroscopic Coronagraphy for Planetary Radial Velocimetry of Exoplanets, ApJS, 212, 27 (2014) 査読有, DOI: 10.1088/0067-0049/212/2/27

11 Ikuyuki Mitsuishi, Hajime Kawahara, Norio Sekiya, Shin Sasaki, Thierry Soubie, Noriko Yamasaki, Exploring Hot Gas at Junctions of

Galaxy Filaments with Suzaku,
ApJ, 783, 137 (2014) 査読有, DOI:
10.1088/0004-637X/783/2/137

12 Hajime Kawahara, Teruyuki Hirano, Kenji Kurosaki, Yuichi Ito, Masahiro Ikoma, Starspots - Transit Depth Relation of the Evaporating Planet Candidate KIC 12557548b, ApJ Letters 776, L6 (2013) 査読有, DOI:
10.1088/2041-8205/776/1/L6

13 Mark Swain, Pieter Deroo, Giovanna Tinetti, Morgan Hollis, Marcell Tessenyi, Michael Line, Hajime Kawahara, Yuka Fujii, Adam Showman, Sergey Yurchenko, Probing the extreme planetary atmosphere of WASP-12b, Icarus 225,432-445 (2013), 査読有,DOI:
10.1016/j.icarus.2013.04.003

〔学会発表〕(8件)

1 河原創, Transiting planets near and beyond the snow line, JSPS Core-to-Core Program "Planet2" Symposium 2017, Nice (フランス) 2017年2月20日

2 河原創, 日本天文学会 秋期年会、FM Exoplanets: 反射光光度曲線の周期解析、首都大学東京(東京都南大沢市), 2016年3月14日

3 河原創, 地球型系外惑星の探査理論、第27回理論懇シンポジウム, 国立天文台(東京都三鷹市) 2014年12月25日

4 河原創, Characterization of Exoplanets with High-contrast&High-Dispersion Instruments on Extremely Large Telescopes, the 2014 German-Japanese Exoplanet Conference, Heiderberg (ドイツ), 2014年11月6日

5 河原創, 村上尚史, 松尾太郎, 小谷隆行, 系外惑星の分光直接検出のための Spectroscopic Coronagraph, 日本天文学会秋季年会, 山形大学(山形県山形市), 2014年9月12日

6 河原創 Characterization of Exoplanets with

High Contrast Instruments, Japan Geoscience Meeting 2014年4月28日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市),

7 河原創, Characterization of Exoplanets using Planetary Radial Velocimetry, Exoclimes III, Davos Congress Centre, Davos (スイス) 2014年2月10日

8 河原創, Starspots-Transit Depth Relation of KIC 12557548b, Kepler Conference II, NASA Ames Center, California(アメリカ) 2013年11月4日

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
河原 創 (KAWAHARA Hajime)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号: 90649758

(2) 研究分担者 ()

研究者番号:

(3) 連携研究者 ()

研究者番号:

(4) 研究協力者 ()