

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：62616

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23103002

研究課題名（和文）ガス惑星の直接撮像・分光と地球型惑星の検出

研究課題名（英文）Direct imaging and spectroscopy of gas giants and detection of terrestrial planets

研究代表者

林 正彦（HAYASHI, Masahiko）

国立天文台・大学共同利用機関等の部局等・台長

研究者番号：10183914

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 437,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本課題においては、主として以下の2件の研究テーマを実施した。

(1) すばる望遠鏡によるガス惑星の直接撮像観測：2個の恒星周囲にそれぞれ1個、合計で2個のガス惑星を直接検出した。そのひとつ、GJ504星に付随する惑星は質量が木星の4倍と、これまで撮像された惑星のなかでは最も低質量であり、「第二の木星」と呼ぶにふさわしい。

(2) ガス惑星の直接分光観測を目的とした装置群の開発：すばる望遠鏡に搭載してガス惑星の分光を行うための装置として、高コントラスト赤外線面分光器（CHARIS）と超高次波面補償光学装置（SCEXAO）の開発・製作を行い、試験観測にて系外惑星のスペクトルの取得に成功した。

研究成果の概要（英文）：As part of the Grant-in-Aid program “Extrasolar Planets” for Scientific Research on Innovative Areas, we mainly pursued the following two subjects:

(1) Direct Imaging of Gas Giants with Subaru Telescope. We successfully imaged two new gas giants. The one around GJ504 has a mass of 4 MJupiter and could be called as “Second Jupiter.”

(2) Development of Instruments for Direct Spectroscopy of Exoplanets. We developed CHARIS, an integral field spectrograph, and SCEXAO, an extreme adaptive optics system, for Subaru Telescope in order to carry out direct spectroscopy of exoplanets and successfully obtained spectra from exoplanets by combining these new instruments.

研究分野：天文学

キーワード：系外惑星 惑星大気 原始惑星系円盤 惑星系形成

1. 研究開始当初の背景

1995年に太陽以外の恒星を周回する惑星(系外惑星)が発見されて以来、系外惑星の研究は観測的宇宙論と並んで天文学における最重要課題となった。日本でも近年その研究は大きく進展し、特にすばる望遠鏡を用いた太陽型恒星周囲の巨大惑星の直接検出、原始惑星系円盤の多様性の発見、ドップラー法による巨大コアをもつ惑星の発見等は世界的に大きな注目を集めた。また、中小望遠鏡により巨星の周りの惑星(つまり中小質量星周囲の惑星)の研究においても、日本のオリジナリティは高い。これらの成果と動向を受け、系外惑星・円盤研究の最も重要な次のマイルストーンは太陽系惑星と同程度の軌道にある系外惑星の直接撮像・分光と地球型惑星の間接検出である。

2. 研究の目的

本計画研究は観測と開発の双方を強力に推進することにより、直接撮像・分光により木星型系外惑星の特徴づけを行うと同時に、地球型惑星の間接検出を進めることを目的としている。

これまでに発見された系外惑星のうち、大部分はドップラー法やトランジット法(惑星の主星面通過)で検出されており、ごく限られた範囲だが惑星大気の情報も得られるようになった。これらの手法では、主星近傍の系外惑星に検出バイアスがかかり(6 AUまで調べるには約15年かかる; 1 AUは地球-太陽間の距離)、また太陽型ではあるが若いために活動性が高い恒星(Tタウリ型星)には適用できない。一方、直接観測では、そのような若い恒星を周回する若い惑星を検出し、分光することが可能となる。惑星系の内側の多様性が明らかになった現在、スノーラインを超えた外側領域(> 4 AU)の多様性や、円盤から形成されたばかりの初期状態としての若い惑星に迫るには、直接観測が不可欠である。さらに、直接分光まで行えば、ドップラー法やトランジット法では得られない惑星の色、光度、スペクトル、従って、温度や大気組成の情報まで手に入れることができ、単なる検出を超えた惑星系の特徴づけ(キャラクタリゼーション)が可能となる。

3. 研究の方法

すばる望遠鏡に搭載されているコロナグラフ撮像装置 HiCIAO を使用した戦略的観測プロジェクト SEEDS を実施。系外惑星や原始惑星系円盤の直接撮像観測を推進した。惑星や円盤の探査に加えて、惑星であることを確認するための追観測やスペクトル観測、円盤の多波長観測等のフォローアップ観測を実施。また、ニュージーランドにある 1.8 m 望遠鏡を使用して、重力マイクロレンズ効果

によって地球型系外惑星を検出する MOA プロジェクトを継続、地球質量惑星を発見した。

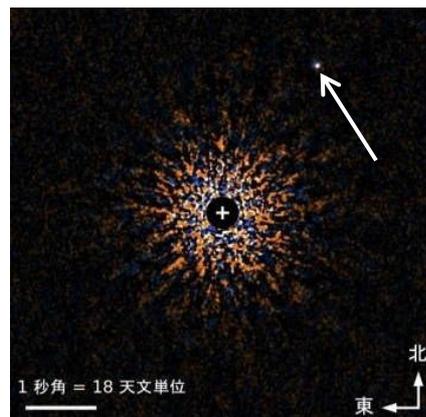
プリンストン大学と共同で、高コントラスト面分光器 CHARIS (Coronagraphic High Angular Resolution Imaging Spectrograph)を開発し、これを完成させて木星型系外惑星のスペクトルを得た。また、その前置光学系となる超高次波面補償光学装置 (SCEXAO) の開発を国立天文台ハワイ観測所にて実施、完成させた。

4. 研究成果

(1) ガス惑星の直接撮像

ガス惑星の直接検出に関しては、この5年間にすばる望遠鏡を用いた戦略的観測プロジェクト SEEDS が順調に進み、新たに2個の恒星周囲にそれぞれ1個(合計2個)の惑星を直接撮影することに成功した(これを含めて、これまでに直接撮影された惑星は、6個の恒星周囲に9個しかない)。このうち GJ504b は、主星から約30天文単位の距離にあり、質量が木星の約4倍、表面温度が510K、年齢が1.6億歳のガス惑星であり、まさに「第二の木星」と呼ぶにふさわしい。またこれらの直接検出は、研究項目 B02 の理論研究に重要な観測情報を提供した。

図1: 直接撮像した惑星 GJ504b (矢印)



(2) 地球型惑星の間接検出

間接的手法による検出では、重力マイクロレンズ効果を用いた観測によって、研究期間中に合計36個の系外惑星を検出した。その内訳は、木星型惑星が25個、海王星型惑星が10個、地球型惑星が1個だった。これらはすべて、スノーラインの外側に位置する冷たい惑星である。

(3) 高コントラスト装置の開発

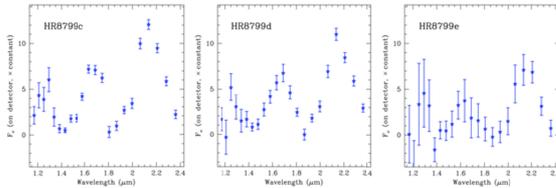
高コントラスト装置のうち、前置光学系として用いる超高次波面補償装置 SCEXAO を完成させ、既存の赤外線撮像装置と組合せて観測を行って性能を確認した。SCEXAO を使用すると、主星周囲のノイズ(波面補償され

ない高次誤差によって生じるスペックル)が約 10 分の 1 に低減される。

高コントラスト赤外線分光器 CHARIS については、製作途中で分光素子をより高性能のものに交換する必要が生じたこと等の理由により工程に遅れが生じたが、平成 27 年度内に製作を終了し、平成 28 年にはすばる望遠鏡に搭載して観測を行い、木星型系外惑星からのスペクトルを得ることに成功した。

図 2: CHARIS と SCEXAO を組み合わせた試験観測で得られた系外惑星のスペクトル

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](以下の抜粋 10 件含む査読論文計 57 件)

Honda, M., ... Sakon, I., ..., 2015, High-resolution 25 M Imaging of the Disks around Herbig Ae/Be Stars: A Link between the Progenitor and the Mass Loss, *Astrophys. J.*, 804, 143, doi: 10.1088/0004-637X/804/2/143

Brandt, T., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2014, A Statistical Analysis of SEEDS and Other High-contrast Exoplanet Surveys: Massive Planets or Low-mass Brown Dwarfs?, *Astrophys. J.*, 794, 159, doi: 10.1088/0004-637X/794/2/159

Brandt, T., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2014, The Moving Group Targets of the SEEDS High-contrast Imaging Survey of Exoplanets and Disks: Results and Observations from the First Three Years, *Astrophys. J.*, 786, 1, doi: 10.1088/0004-637X/786/1/1

Kuzuhara, M., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2013, Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around the Sun-like Star GJ 504, *Astrophys. J.*, 774, 1, doi:10.1088/0004-637X/774/1/11

Guyon, O., ... (全 15 名), 2013, Simultaneous Exoplanet Characterization and Deep Wide-field Imaging with a Diffractive Pupil

Telescope, *Astrophys. J.*, *ApJ*, 767, 11, doi: 10.1088/0004-637X/767/1/11

Carson, J., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2013, Direct Imaging Discovery of a "Super-Jupiter" around the Late B-type Star κ And, *Astrophys. J.*, Letter, 763, L32, doi: 10.1088/2041-8205/763/2/L32

Street, R. A., ..., Sumi, T., ..., 2013, MOA-2010-BLG-073L: An M-dwarf with a Substellar Companion at the Planet/Brown Dwarf Boundary, *Astrophys. J.*, 763, 67, doi: 10.1088/0004-637X/763/1/67

Mayama, S., ..., Hayashi, M., ..., 2012, Subaru Imaging of Asymmetric Features in a Transitional Disk in Upper Scorpius, *Astrophys. J.*, Letters, 760, L26, doi: 10.1088/2041-8205/760/2/L26

Muto, T., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2012, Discovery of Small-scale Spiral Structures in the Disk of SAO 206462 (HD 135344B): Implications for the Physical State of the Disk from Spiral Density Wave Theory, *Astrophys. J.*, Letters, 748, L22, doi: 10.1088/2041-8205/748/2/L22

Kubas, D., ..., Sumi, T., ..., 2012, A frozen super-Earth orbiting a star at the bottom of the main sequence, *Astron & Astrophys.*, 540, A78, doi: 10.1051/0004-6361/201015832

[学会発表](以下の 10 件含む計 53 件)

高遠 徳尚、他
小天体の含水鉱物探査にむけた MIMIZUKU 近赤外線分光機能の検討、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 9 日、甲南大学(兵庫県神戸市)

高遠 徳尚、小谷隆行、他
地球型惑星検出のためのすばる赤外線ドップラー分光 IRD の開発:日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 17 日、首都大学東京、(東京都八王子市)

住 貴宏、他
MOA-2013-BLG-605Lb: The Neptune analog, IAU XXIX General Assembly, 2015/8/3, Honolulu (USA)

住 貴宏
Exoplanet Microlensing Context, IAU XXIX General Assembly, WFIRST Splinter Session, 2015/8/9, Honolulu (USA)

左近 樹

Exposure experiment of carbonaceous solids using JEM/ExHAM on the International space station International Conference on Interstellar Dust, Molecules and Chemistry 2014/12/15, Assam (India)

Guyon Olivier

Searching for Habitable Worlds and Life in the Universe with Optics 50 yr anniversary of the college of optical sciences special lecture, 2014/10/23, Tucson (USA)

住 貴宏

MOA-II による系外惑星探査、名古屋大学南半球宇宙観測研究センター研究会、2014年10月03日、名古屋大学(愛知県名古屋市)

Guyon Olivier

Optical Tricks to find and study Exoplanets, Optical Society of America Student Leadership Chapter, 2014/9/19, Tucson (USA)

藤原 英明

Warm Debris Disks, JCMT Science Workshop 2014/9/1, National Astronomical Observatory of Japan, Tokyo (Japan)

Guyon, Olivier

Optical Tricks to image Habitable Planets around nearby Stars, Frontiers in Optics, 2012/10/18/, Rochester (USA)

〔図書〕(計 3 件)

阿部 豊、文藝春秋、「生命の星の条件を探る」2015、238 ページ

左近 樹 (分担執筆)、朝倉書店、地球と宇宙の化学事典、2012、472 ページ

高遠 徳尚、丸善出版 (国立天文台編)、平成 24 年理科年表 (「南極からの天文学」) 2012 年 pp174-176

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/index.php>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者: 林 正彦 (HAYASHI,

Masahiko)

(自然科学研究機構・国立天文台台長)

研究者番号: 10183914

(2) 研究分担者: 住 貴宏 (SUMI, Takahiro)

(大阪大学・理学研究科・准教授)

研究者番号: 30432214

研究分担者: 高遠 徳尚 (TAKATO, Naruhisa)

(国立天文台・ハワイ観測所・准教授)

研究者番号: 50261152

研究分担者: 左近 樹 (SAKON, Itsuki)

(東京大学・大学院理学系研究科・助教)

研究者番号: 70451820

研究分担者: 藤原 英明 (FUJIWARA Hideaki)

(国立天文台・ハワイ観測所・RCUH 職員)

研究者番号: 70451820

研究分担者: Guyon Olivier

(国立天文台・ハワイ観測所・RCUH 職員)

研究者番号: 90399288

(3) 連携研究者: 須藤 靖 (SUTO, Yasushi)

(東京大学・理学系研究科・教授)

研究者番号: 90183053

連携研究者: 佐藤 文衛 (SATO, Bun'ei)

(東京工業大学・グローバルエッジ研究院・准教授)

研究者番号: 40397823

連携研究者: 伊藤 洋一 (ITO, Yoichi)

(兵庫県立大学・自然・環境科学研究所・教授)

研究者番号: 70332757

連携研究者: 本田 充彦 (HONDA, Mitsuhiko)

(久留米大学・医学部・助教)

研究者番号: 40449369

連携研究者: 森野 潤一 (MORINO, Junichi)

(国立天文台・光赤外研究部・助教)

研究者番号: 10370107