

令和元年6月7日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220704

研究課題名(和文) Imaging habitable zone planets with Subaru Telescope and TMT

研究課題名(英文) Imaging habitable zone planets with Subaru Telescope and TMT

研究代表者

Guyon Olivier (Guyon, Olivier)

国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員

研究者番号：90399288

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 119,200,000円

研究成果の概要(和文)：我々は本基盤研究で、太陽系外惑星や原始惑星系円盤を高分解能、高コントラストで中心星の極近傍まで観測を可能とする高感度光子計測カメラを開発し、すばる望遠鏡用極限補償光学システム「SCEXA0」に搭載した。このMKIDS惑星探査カメラ(MEC)はカリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB)のBen Mazin教授らのグループによって初めて開発された新技術検出器であり、色(波長による明るさ)の違いを、光子一つ一つで計測することが可能である。現在、MECは完全にリモート制御が可能で、UCSBチームの協力の下、既にSCEXA0と組み合わせた科学観測が実施できるようになっている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ですばる望遠鏡に搭載したSCEXA0で培った技術の応用により、将来30mクラスの大望遠鏡でハビタブルゾーンの太陽系外惑星を直接撮像することができるようになる。我々の太陽系の外にある生命の痕跡を探することも可能となり、宇宙における生命誕生といった大きな疑問に答えるような科学的な証拠を掴めるようになるだろう。我々は宇宙で孤独なのか？文明の発現は稀有なことなのか？他の環境での生物進化はどのようなものなのか？我々の立ち位置を知るとい意味で重要な研究意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：A high-sensitivity photon-counting camera was built, deployed, and integrated with Subaru Telescope's exoplanet imaging instrument SCEXA0, enabling observations of exoplanets and disks at deeper contrasts and smaller separation angles. The MKID Exoplanet Camera (MEC) uses a new detector technology called MKID pioneered by Professor Ben Mazin at the University of California Santa Barbara (UCSB). MKIDs are able to directly detect individual photons while measuring their color. MEC can be run completely remotely and is ready for science night observations with the support of the UCSB team.

研究分野：天文学

キーワード：太陽系外惑星 惑星 天文学 検出器 補償光学 コロナグラフ 画像解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

この10年以上の間に1000を超える太陽系外惑星が発見されてきた。しかし、直接画像として捉えた結果はまだ一握りしかない。現行の装置や、数年以内に可動予定の装置で撮像できるのは、形成段階の重力収縮による熱で自ら輝く巨大惑星のみである。(形成段階が比較的若く、赤外線でも光りながらゆっくりと冷えていくような木星サイズの天体)。そのため、現在探査可能な惑星は、地球から比較的近く、若い恒星を大きな軌道で回る質量の大きなものに限定されている。一方、恒星周囲を回る惑星からの「反射光」を直接観測するには、感度等の改善が必要であるが、科学的には以下のような多くの有益性がある。

- (1) 惑星からの反射光を見ることになるため、重力収縮で光っている若い惑星(温度の高い惑星)である必要がない。よって、近傍の恒星すべてを惑星探査の対象にできる。
- (2) 中心星に近くなるほど惑星からの反射光は明るくなるため、より内側の惑星を捉えるための技術開発が進む。
- (3) 惑星からの反射光は短い波長にいくにつれて暗くなるようなことはない。これは、より短い波長を用いた高空間分解能の撮像の実現に繋がる。
- (4) 質量と半径の依存性が小さいため、惑星の反射光の明るさは質量に対して急激に減少することはない。つまり、巨大惑星だけではなく、地球型の惑星も狙えるようになる。

もし中心星の極近傍を周回する淡い惑星からの反射光を捉えることができるほど SCEXAO の技術が進めば、直接撮像される惑星の数は飛躍的に増加することになるだろう。

系外惑星の直接撮像を狙う上で最もチャレンジングな点は、中心星とそれを回る惑星の距離がかなり近いことが挙げられる。中心星に比べ、100万~10億倍暗い惑星を見分けるには、高いコントラストと高分解能が必須となる。これを実現させるには、暗い惑星からの光を集め、高い分解能をもつ巨大望遠鏡。地球大気のゆらぎの影響を補正する補償光学。明るい中心星の影響を受けずに、高いコントラストで撮像できる光学系とカメラシステム。が必要となる。

さらに、TMT30m 望遠鏡で同様の技術が使えるようになると、近傍の M 型星を回る地球型惑星の撮像も可能になるかもしれない。もしこれが実現すれば、生命活動を伴う近傍惑星の解明に繋がる最初の成果となるだろう。そのため、現在すばる望遠鏡に搭載して行っている SCEXAO の技術開発と検証は、将来の TMT30m 望遠鏡で、地球型惑星の反射光を直接捉えるための準備としても重要である。

2. 研究の目的

本研究における目的は、系外惑星や原始惑星系円盤の直接撮像にむけて、現在すばる望遠鏡に搭載されている極限補償光学システム SCEXAO の性能を向上させることにある。将来の TMT 望遠鏡のような 30m クラスの巨大望遠鏡による超高コントラスト撮像を見据えた技術開発やアルゴリズム構築を進め、中心星の極近傍を回る惑星からの反射光検出を狙う。本研究で進めている技術の進展により、将来は TMT や他の巨大望遠鏡で近傍のハビタブルゾーンにある惑星を直接撮像できるようになるだろう。そして、ここでの直接撮像が太陽系外で生命の痕跡を捉えた最初の機会となり、近傍の M 型星周りにおいて、生命活動を伴う惑星大気の解明にも繋がることにもなっていく。

3. 研究の方法

上記に挙げた目標達成には、既存装置の性能向上が必要である。中でも、地上から系外惑星の反射光を直接観測するには大幅な技術革新が必須となる。特に、地球大気によるゆらぎを正確に測定し、補正する必要があるため、高速で動作する近赤外線カメラが欠かせない。我々は、すばる望遠鏡に搭載している SCEXAO システムに、大気ゆらぎをリアルタイムで正確に制御し、高速で動作するカメラを新たに加えることで、性能改善を進めている。このカメラは既に完成し、SCEXAO システムに搭載することに成功した。

我々はこの目的のために「MKIDS」と呼ばれる新技術カメラを選択した。このカメラは大気のゆらぎ成分よりも高速でノイズの低い画像を読み出すことが可能であり、リアルタイムで大気ゆらぎを補正することが可能である。MKIDS の搭載により、光子一つ一つを測定することができるようになり、より高度で繊細な画像処理も実現できる。そして、それは系外惑星や原始惑星系円盤の検出に大きく役立つ。

4. 研究成果

本研究で行った最も重要な成果は、最先端の MKIDS カメラをすばる望遠鏡用極限補償光学装置 SCEXAO に統合させたことである。現在、この統合により SCEXAO は世界で最も強力な系外惑星探査装置となっている。MKIDS 系外惑星探査カメラ(略称 MEC)により、波長ごとの光子それぞれを測定できるようになり、大気ゆらぎ成分を超高速度・高感度で測定・補正できるようになった。この大気ゆらぎ成分は系外惑星を撮像する上で最も制限を受けていた項目である。

(1) すばる望遠鏡での MEC の構築と開発

MKIDS カメラは、この4年以上にわたり、カリフォルニア大学サンタバーバラ校の Ben Mazin 教授が率いるグループと大学院生 Alex Walter の協力によって開発作業が進み、ハワイ島マウナケア山にあるすばる望遠鏡に搭載された(図1参照)。この開発には、光学系、機械系、電気系、温度制御、ソフトウェアの整備まで含んでいる。これまで我々は、ノイズ削減のため、特に MEC 装置内部のマイクロ波の配線まわりのアルミシールドの設置など、性能改善のため様々なハードウェアの調整を行ってきた。検出器周りの温度環境の改善、最適化のための電圧制御系の交換/整備などもその一環として行っている。また、毎夜の観測前に行う調整や準備にかかる時間の削減、エラーへの対処、ユーザーインターフェースの改善など、読み出しソフトウェアのアップグレードも随時行った。こういった全体の統合作業は、20 夜以上の試験観測を通じて同時に行ってきた。特に、1.35 μm で光を分けるフィルターの設置は、既存の AO システムや、SCEExAO 内部のカメラに影響を及ぼすことなく、MEC で Y-band($\sim 0.9\mu\text{m}$)の波長域を使った観測ができるようになった上で大きなアップグレードである。これにより MEC が、波面の測定だけでなく、連星系や伴星探査、原始惑星系円盤の観測に使うことも可能になった。

また、同時並行で、校正済の画像を得られるよう、データ解析に使うパイプラインの開発も行っている。現在、様々な光学的影響を分離し、処理できるようなアルゴリズムの作成など、より洗練されたソフトウェアを開発中である。また、MEC カメラに入る光を制御するためのフィルターをリモートコントロールする機構など、観測を遂行する中でのコントロールソフトウェアの調整など重要な改善も行った。この改良の中には、MEC に光を取り入れる鏡の制御、望遠鏡と SCEExAO との同期など装置の状態を随時モニターする自動ログ機構の組み込みも含んでいる。カリフォルニア大学サンタバーバラ校と、国立天文台、そして他の共同研究者と連携し、観測手順や、解析方法の確立に取り組み、MEC の能力を最大限に引き出し、高い角分解能とコントラストで中心星の極近傍まで原始惑星系円盤と系外惑星の探査が可能となった。



図1: すばる望遠鏡ナミス焦点に設置されたMKIDS系外惑星探査カメラ「MEC」の画像。

左側に見える黒い大きな個体がSCEExAO光学系を格納している部分。右側に見える縦長で銀色の装置がMECである。一緒に写っているのは、カリフォルニア大学サンタバーバラ校の大学院生Alex Walter。

黒いSCEExAOのボックスには、光学系や光の波面をコントロールする機構が納められており、ここで大気ゆらぎを補正後、MECへ光が送られる。

MECの検出器は光子ひとつひとつの計測を行うため、真空かつ温度は0.1Kの極低温に保たれている。

(2) MEC と SCEExAO を組み合わせた試験観測

2018 年度に MEC をすばる望遠鏡に設置することに成功し、SCEExAO と組み合わせた試験観測を開始した(図2参照)。波長ごとの光を分けて直接 MEC に取り入れることを可能にするための SCEExAO 光学系のアップグレードを行った。0.9 μm ~1.35 μm の光を MEC に送り、それよりも長い波長の光を既存の面分光撮像装置 CHARIS に送るように改良することで、MEC と CHARIS の2つの装置で同時に異なる波長域を効率よく観測できるようアップグレードを行っている。これにより、MEC を用いた高速での大気ゆらぎの測定を行う一方で、CHARIS による系外惑星の分光撮像をも実現可能となった。

MEC の開発と並行して、我々は SCEExAO 本体に対する開発・改善も行ってきた。重要な進展のひとつは、直近の大気ゆらぎを予想し、前もって補正するコントロールする手法を開発した点である。これにより時々刻々と変化する大気ゆらぎに対し、これまでよりも迅速に対応できるようになった。この予測コントロールの手法は装置的な制御感度を2~5倍改善し、現在科学観測にも使用している。また、星から届く光の波面コントロールにおいても操作する側にとって、校正作業も含め、より使いやすいように改善されている。こういった一連の作業成果は、我々のチームが率先して開発している「cacao ソフトウェア」に基づいている。先進のコロナグラフ技術を使った新しい観測モードの構築も行っており、

以下の web サイトでその内容を確認することができる。

(<https://www.naoj.org/Projects/SCEXAO>)

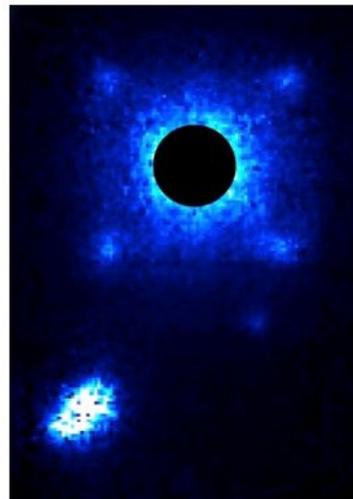


図2: すばる望遠鏡に搭載したMECとSCEExAOの組み合わせによる M42中心部トラベジウムの観測画像。明るい中心部はコロナグラフマスクによって隠されている。左下に明るい2つの星と、やや右上に淡い伴星が確認できる。マスクの4隅に見える点源は、コロナグラフマスクで隠された星の中心を厳密に決めるための位置校正に用いる参照点である。

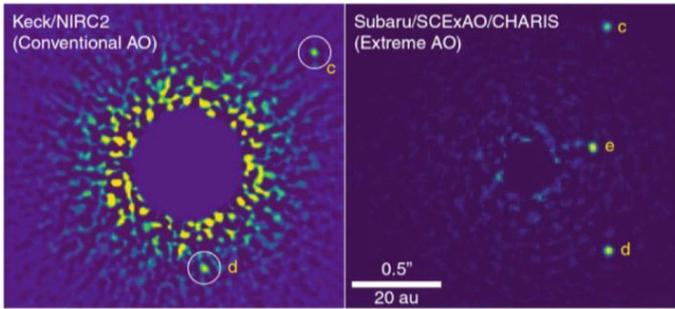


図3: HR8799と呼ばれる太陽系外惑星系の2つの近赤外線画像。
左図は、ケック望遠鏡の近赤外線カメラ(NIRC2)を使い、汎用の補償光学装置を使った画像。
右図は本研究で開発中の補償光学系SCEXAO/CHARISを使い同じ天体を写した画像である。

これらの開発により、我々のチーム以外にも国内外の天文学者が、これまで以上の性能で太陽系外惑星や原始惑星系円盤を探索できるようになり、成果はいくつもの査読論文にて出版されている。例えば、図3(右)はSCEXAOとそれに取り付けられた近赤外線カメラ CHARIS で取得した HR8799 と呼ばれる太陽系外惑星系の H-band(波長 1.6 μ m) の画像である。この波長帯において、これまでで最も高い感度で取得できた画像である。

(3) TMT30m 巨大望遠鏡へ向けた計画

本研究により、すばる望遠鏡と組み合わせることで進めてきた技術開発と実証は、将来 30m クラスの超巨大望遠鏡によるハビタブルゾーンの系外惑星の探索に向けたカギとなるだろう。近傍のハビタブルゾーンに存在する惑星の表層や大気の特徴を掴むことで、生命活動の指標を探る初めての試みになる。こういった観測は、現状では直接は不可能だが、我々がすばる望遠鏡と組み合わせることで実証している技術を応用し、超高感度・高コントラストを実現することができれば、TMT30m 望遠鏡に適用することで実現可能になるだろう。現在、米国の研究者と近密に連携を取りながら、TMT の装置計画(TMT 惑星探査装置: TMT-PSI)を踏まえた技術開発を行っている。我々の研究グループでは、ハビタブルゾーンにある惑星を直接撮像するといった重要な科学的目標を達成すべく、装置的に「実証済」で「安全(実現可能)」な技術の積み重ねを念頭においている。現在、こうした成果は論文としてまとめられており、TMT-PSI 装置の概念設計をリードしている。今後 2 年以上の期間を経て、実現に向けた詳細な基礎研究がまとめられる予定である。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 18 件)

Lozi, J., Jovanovic, N., Guyon, O., Chun, M., Jacobson, S., Goebel, S., Martinache, F., Visible and Near Infrared Laboratory Demonstration of a Simplified Pyramid Wavefront Sensor, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 査読有, Vol. 131, 44503, 2019, DOI:10.1088/1538-3873/ab046a

Goebel, S., Currie, T., Guyon, O., Brandt, T. D., Groff, T. D., Jovanovic, N., Kasdin, N. J., Lozi, J., Hodapp, K., Martinache, F., Grady, C., Hayashi, M., Kwon, J., McElwain, M. W., Yang, Y., Tamura, M., SCEXAO/CHARIS Near-IR High-contrast Imaging and Integral Field Spectroscopy of the HIP 79977 Debris Disk, The Astronomical Journal, 査読有, Vol.156, 2018, 279, DOI:10.3847/1538-3881/aaeb24
Goebel, S. B., Guyon, O., Hall, D. N. B., Jovanovic, N., Lozi, J., Martinache, F., Measurements of Speckle Lifetimes in Near-infrared Extreme Adaptive Optics Images for Optimizing Focal Plane Wavefront Control, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 査読有, Vol.130, 2018, 104502,
<https://doi.org/10.1088/1538-3873/aad8ed>

Guyon, O., Extreme Adaptive Optics, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 査読有, Vol.56, 2018, 315-355,
<https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-052000>

Snik, F., Absil, O., Baudoz, P., Beaulieu, M., Bendek, E., Cady, E., Carlomagno, B., Carlotti, A., Cvetojevic, N., Doelman, D., Fogarty, K., Galicher, R., Guyon, O., Haffert, S., Huby, E., Jewell, J., Jovanovic, N., Keller, C., Kenworthy, M. A., Knight, J., Kuhn, J., Mazoyer, J., Miller, K., N'Diaye, M., Norris, B., Review of high-contrast imaging systems for current and future ground-based and space-based telescopes III: technology opportunities and pathways, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III, 査読無, Vol.10706, 2018, 107062L, <https://arxiv.org/abs/1807.07100>

Dirnberger, M., Rigaut, F., Minowa, Y., Conan, R., Guyon, O., Gratadour, D., Korkiakoski, V., Rolling shutter detector data flow strategies to push the limits of AO performance, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 査読無, Vol.10703, 2018, 1070340,
<https://doi.org/10.1117/12.2311901>

Miller, K., Males, J. R., Guyon, O., Close, L. M., Doelman, D., Snik, F., Por, E., Wilby, M. J., Bohlman, C., Lumbres, J., Van Gorkom, K., Kautz, M., Rodack,

A., Knight, J., Jovanovic, N., Morzinski, K., Schatz, L., Focal plane wavefront sensing and control strategies for high-contrast imaging on the MagAO-X instrument, *Adaptive Optics Systems VI*, 査読無、Vol.10703、2018、107031T、<https://arxiv.org/abs/1807.04381v1>

Guyon, O., Mazin, B., Fitzgerald, M., Mawet, D., Marois, C., Skemer, A., Lozi, J., Males, J., Wavefront control architecture and expected performance for the TMT Planetary Systems Imager, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 査読無、Vol.10703、2018、107030Z、<https://doi.org/10.1117/12.2314331>

Beaulieu, M., Martinez, P., Abe, L., Guyon, O., Gouvret, C., Dejonghe, J., Preis, O., An end-to-end Fresnel propagation model for SPEED: PIAACMC implementation and performance, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 査読無、Vol.10700、2018、1070030、DOI:10.1117/12.2311668

Kuhn, J., Serabyn, E., Lozi, J., Jovanovic, N., Currie, T., Guyon, O., Kudo, T., Martinache, F., Liewer, K., Singh, G., Tamura, M., Mawet, D., Hagelberg, J., Defrere, D., An H-band Vector Vortex Coronagraph for the Subaru Coronagraphic Extreme-adaptive Optics System, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 査読有、Vol.130、2018、35001、<https://doi.org/10.1088/1538-3873/aa9fe5>

Pathak, P., Guyon, O., Jovanovic, N., Lozi, J., Martinache, F., Minowa, Y., Kudo, T., Kotani, T., Takami, H., On-sky Closed-loop Correction of Atmospheric Dispersion for High-contrast Coronagraphy and Astrometry, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 査読有、Vol.130、2018、25004、<https://arxiv.org/abs/1710.11197>

Jovanovic, N., Guyon, O., Kotani, T., Kawahara, H., Hosokawa, K., Lozi, J., Males, J., Ireland, M., Tamura, M., Mawet, D., Schwab, C., Norris, B., Leon-Saval, S., Betters, C., Tuthill, P., Developing post-coronagraphic, high-resolution spectroscopy for terrestrial planet characterization on ELTs, *arXiv e-prints*, 査読無、Vol., 2017、<https://arxiv.org/abs/1712.07762>

Miller, K., Guyon, O., Males, J., Spatial linear dark field control: stabilizing deep contrast for exoplanet imaging using bright speckles, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 査読有、Vol.3、2017、49002、<https://doi.org/10.1117/1.JATIS.3.4.049002>

Singh, G., Lozi, J., Jovanovic, N., Guyon, O., Baudoz, P., Martinache, F., Kudo, T., A Demonstration of a Versatile Low-order Wavefront Sensor Tested on Multiple Coronagraphs, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 査読有、Vol.129、2017、95002、DOI:10.1088/1538-3873/aa76c1

Jovanovic, N., Guyon, O., Kawahara, H., Kotani, T., Application of Multicore Optical Fibers in Astronomy, *arXiv e-prints*, 査読無、Vol., 2017、<https://doi.org/10.1364/OFC.2017.W3H.3>

Pathak, P., Guyon, O., Jovanovic, N., Lozi, J., Martinache, F., Minowa, Y., Kudo, T., Takami, H., Hayano, Y., Narita, N., A High-precision Technique to Correct for Residual Atmospheric Dispersion in High-contrast Imaging Systems, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 査読有、Vol.128、2016、124404、DOI:10.1088/1538-3873/128/970/124404

Oh, D., Hashimoto, J., Carson, J. C., Janson, M., Kwon, J., Nakagawa, T., Mayama, S., Uyama, T., Yang, Y., Kudo, T., Kusakabe, N., Abe, L., Akiyama, E., Brandner, W., Brandt, T. D., Currie, T., Feldt, M., Goto, M., Grady, C. A., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S. S., Henning, T., Hodapp, K. W., Ishii, M., Resolved Near-infrared Image of the Inner Cavity in the GM Aur Transitional Disk, *The Astrophysical Journal*, 査読有、Vol.831、2016、L7、DOI:10.3847/2041-8205/831/1/L7

Martinache, F., Jovanovic, N., Guyon, O., Closed-loop focal plane wavefront control with the SCExAO instrument, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有、Vol.593、2016、A33、DOI:10.1051/0004-6361/201628496

[学会発表](計 16 件)

Guyon, O., Imaging Exoplanets with Extreme AO, *Astrobiology Center Symposium, Earth-Life Science Institute, Tokyo, Japan, Jan 31, 2019*

Gerard, B., Observing Two-Component Debris Disks with SCExAO+CHARIS, *American Astronomical Society Meeting #233, 2019*

Currie, T., Direct Imaging and Spectral Characterization of Extrasolar Planets with the SCExAO/CHARIS, *American Astronomical Society Meeting #233, 2019*

Guyon, O., The SCExAO High Contrast Imaging Platform: Current and Upcoming

Capabilities、American Astronomical Society Meeting #233、2019
Lozi, J.、SCEXAO, an instrument with a dual purpose: perform cutting-edge science and develop new technologies、SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Austin, June 2018、2018
Jovanovic, N.、Review of high-contrast imaging systems for current and future ground-based and space-based telescopes: Part II. Common path wavefront sensing/control and coherent differential imaging、SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Austin, June 2018、2018
Ono, Y.、On-going and future AO activities on Subaru Telescope、SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Austin, June 2018、2018
Currie, T.、Early Direct Imaging and Spectral Characterization of Extrasolar Planets with the SCEXAO/CHARIS、American Astronomical Society Meeting #231、2018
Guyon, O.、Subaru Coronagraphic Extreme AO (SCEXAO): Wavefront Control Optimized for High Contrast Imaging、SPIE optics and photonics, San Diego, Aug 2017、2017
Groff, T.、Wavefront control methods for high-contrast integral field spectroscopy、SPIE optics and photonics, San Diego, Aug 2017、2017
Guyon, O.、SCEXAO as a prototype platform available to the GSMT extreme-AO community、Adaptive Optics for ELTs 5. Tenerife, June 27, 2017、2017
Guyon, O.、Planet Searching from Ground and Space、Japanese Society for the Promotion of Science (JSPS) Washington workshop, June 06, 2017、2017
Guyon, O.、Can TMT Image Habitable Planets?、Thirty Meter Telescope, Pasadena, May 12, 2017、2017
Currie, T.、Directly Imaging Planets with SCEXAO: First Results、American Astronomical Society Meeting #229、2017
Guyon, O.、Direct imaging and spectroscopic characterization of habitable planets with ELTs、American Astronomical Society Meeting #227、2017
Guyon, O.、Imaging and Characterization of Rocky Planets in the Habitable Zones of Nearby Stars with ELTs、Fourth Annual GMT Community Science Meeting, September 26 - 28, 2016, Asilomar Conference Grounds in Pacific Grove, CA、2016

〔図書〕(計1件)

Hans J. Deeg & Juan Antonio Belmonte、Sromger、Handbook of Exoplanets、2018、3490

〔その他〕

ホームページ等

SCEXAO website:

<https://www.naoj.org/Projects/SCEXAO>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：村上 尚史

ローマ字氏名：Murakami, Naoshi

所属研究機関名：北海道大学

部局名：工学研究院・応用物理学部門

職名：教授

研究者番号(8桁)：80450188

(2)研究協力者

研究協力者氏名：ヨハノビック ネマンジャ

ローマ字氏名：Jovanovic, Nemanja

研究協力者氏名：工藤 智幸

ローマ字氏名：Kudo, Tomoyuki