

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 14 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340051

研究課題名(和文)高コントラスト撮像装置による恒星極近傍の系外惑星の直接探査

研究課題名(英文)Direct imaging of exoplanets in the vicinity of the star with high contrast instruments

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) 12,400,000円、(間接経費) 3,720,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者はすばる望遠鏡用の高コントラストカメラ「SCEXAO(スケックスエーオー)」の開発をしている。本研究により、2つの新たな高感度波面センサー、"可視光を主に動作するピラミッド型波面センサー"と"近赤外線で動作する低次波面センサー"を開発に成功した。両センサーは、リアルタイムで、高感度かつ低ノイズでの測定を可能にし、大気の変乱を補正する可変形鏡と共に使用し、SCEXAOに載せて初めて立証できた新技術である。近傍の太陽系外惑星や原始惑星系円盤を直接撮像することを目的とし、SCEXAOシステムに搭載後、テスト観測での実証を得ており、2014年から科学運用が開始される予定となっている。

研究成果の概要(英文)：We have developed a high contrast imaging camera for the Subaru Telescope. The instrument, named Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics (SCEXAO) has been greatly improved during our effort. We have developed and installed two high sensitive wavefront sensors in the instrument. These sensors measure in real time, with high accuracy, the small residual aberrations in the beam, and then use a deformable mirror (DM) to correct the aberrations. The two sensors work in visible light (pyramid wavefront sensor) and infrared light (low order wavefront sensor). We have integrated them in the SCEXAO system, making it a high performance camera for imaging exoplanets and disks around nearby stars. The SCEXAO instrument has been tested on-sky and is now offered for scientific use starting in year 2014. Our team is now helping scientists, both in Japan and internationally, to use this powerful instrument to study exoplanets and disks around nearby stars.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：太陽系外惑星 補償光学 波面センシング 望遠鏡 カメラ 可変形鏡

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽系外惑星の研究は、惑星の検出例が増えるにつれ年々急速に発展してきており、検出技術はより多様化し、より高感度を求める方向に進んでいる。現在、千数百個の系外惑星が見つかっており、惑星の形成と進化を調べるに十分な数に達してきている。

(2) しかし、これらの発見のほとんどが視線速度法やトランジット法といった「間接法」で行われており、検出は極近傍(1AU 以内)の重たい惑星ばかりに偏っている。つまり、まだ惑星形成のメカニズムを探る点で限定的な情報しか得ていない。研究代表者の目指す「直接撮像法」はこれまで間接法で検出された惑星とは異なるタイプ(主に数 AU ~ 数十 AU 程度の領域にある惑星)に感度があり、惑星自体の直接的な測光や、位置測定、分光、偏光特性の観測などを可能にするという点で科学的に極めて重要である。また、直接撮像は惑星のみならず、惑星形成の母体となる「原始惑星系円盤」の研究に対しても威力を発揮するという上でも重要な観測手法である。

1AU=1天文単位(太陽と地球の距離を1とした単位。約1億5000万km)。

2. 研究の目的

(1) 研究代表者の目的は、すばる望遠鏡で系外惑星の直接撮像を可能にし、多数の惑星の特徴を調べることである。そして世界中の研究者に高性能の系外惑星撮像装置を提供し、それらを使えるようにすることを目標としている。

(2) 研究代表者は、リアルタイムで極わずかな大気揺らぎを計測できるような超高感度波面センサーを新たに開発することで、このチャレンジな命題に取り組んでいる。本技術は SCEXA0 のカギとなる部分であり、将来、30m クラスの大望遠鏡へ向けての技術立

証にも繋がる。

3. 研究の方法

(1) 高いコントラストで系外惑星を撮像すべく、高精度で波面コントロールが可能なように SCEXA0 システムを拡張させた。具体的には2つの高性能波面センサーの開発し、SCEXA0 に搭載することで、高いコントラスト撮像を可能にしている。

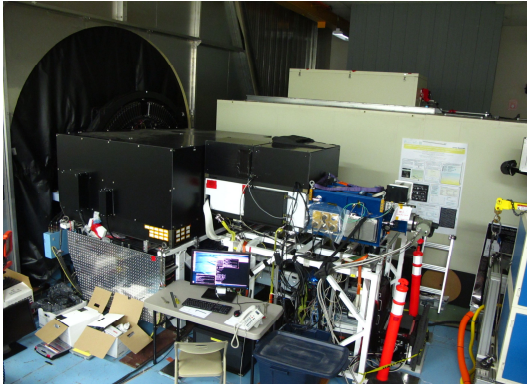
(2) まず一つ目は「低次波面センサー (LOWFS)」である。これはコロナグラフにより中心星の強い光を抑制し、高速で星の位置と焦点のズレを測定するものである。このセンサーで観測中に星の位置を安定させるような制御を行い、コロナグラフマスクの極近傍にある惑星の位置ズレの影響を無くした高感度撮像が可能となる。

(3) 2つ目のセンサーが「無変調型ピラミッド波面センサー (pyWFS)」である。これは可視光にて動作し、1秒間に2000回近くもの大気揺らぎが補正可能な高感度測定装置である。本装置は多数の惑星を高いコントラストで撮像するために欠かせない技術である。

4. 研究成果

(1) 研究代表者は、太陽系外惑星探査装置の分野を世界にリードしていくため、この SCEXA0 に改良を加えてきた。本装置はすばる望遠鏡を使う世界中の研究者が使用できる体制になっており、現在も系外惑星の直接撮像に使用されている。なお、SCEXA0 に関する詳細は以下の Web サイトをご覧ください。

<http://www.naoj.org/Projects/SCEXA0/index.html>

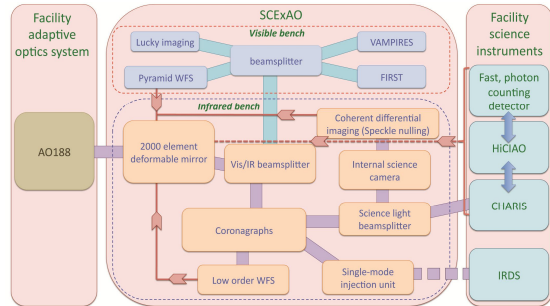


すばる望遠鏡に搭載した SCEXAO システムの外観。望遠鏡本体は左の壁の向こうにあり、そこから補償光学 AO188 を経て、中央の SCEXAO システムに光が入る構造である。青く小さなボックスは SCEXAO で使用する近赤外線カメラ HiCIAO である。

(2) 研究代表者は、観測中の低次な揺らぎ(位置や焦点の微細なズレ)を制御する低次波面センサー(LOWFS)を開発・制御できるようになった。この LOWFS は、実際の観測で 2 つの高性能コロナグラフの実証に成功した。2 つのコロナグラフはPIAA、Vortexと呼ばれ、光の位相を変えることで、中心星の光を抑制する新技術である。LOWFS により観測中、大気揺らぎによって生じる星の位置や焦点のズレを抑えることで、ミリ秒角レベルの高精度で星を安定させて撮像することが可能となった。研究代表者はこの LOWFS の成功により、観測中に 5 つ(位置ズレ、焦点のズレ、球面収差、非点収差、コマ収差)もの光学的揺らぎを同時に制御できることを示した。

(3) さらに、初めて高感度無変調型ピラミッド波面センサーの制御を実証した。惑星検出を睨む高い感度を保つには、このセンサーが生む高いコントラストが必要であり、これまでよりも低質量の惑星を直接撮像するにはかせない技術である。従来のセンサーでは大気揺らぎに制限されていたが、本センサーは望遠鏡の回折限界で感度が決まること有利点であり、これは星の明るさにして約 1000 倍もの高感度に等しい。

(4) 低次波面センサー(LOWFS)の技術は焦点面のスペックルコントロールと合わせて、実際の観測で実証した。



SCEXAO システムの構成。装置内での波面コントロールの部分は赤い矢印にて示してある。この技術は日本の科学研究費補助金のサポートによって開発され、太陽系外惑星の直接撮像にとって極めて重要な位置を占める。

(5) 次世代の超巨大(~30m 級)望遠鏡にて、近傍 M 型星におけるハビタブルゾーン(生命居住可能領域)内の地球型惑星を撮像し、その特徴を判別できるような新技術を開発・制御することができた。つまり、研究代表者はこの SCEXAO を将来に先駆けた技術立証機として築きあげることに成功したことになる。これにより、ハビタブルゾーンにおける惑星を直接撮像するまでのタイムスケールを大幅に加速させることになるだろう。

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 9 件)
 "Central-Obscuration Removal Plates for Focal-Plane Phase-Mask Coronagraphs with a Centrally-Obscured Telescope"
 Oshiyama, Fumika; Murakami, Naoshi; Guyon, Olivier; Martinache, Frantz
 Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 126, issue 937, pp.270-279 (10pp.), DOI:10.1086/675807 (02/2014)
 "High Performance Lyot and PIAA

Coronagraphy for Arbitrarily shaped Telescope Apertures"

Olivier Guyon; Philip H. Hinz; Eric Cady; Ruslan Belikov; Frantz Martinache

The Astrophysical Journal, Volume 780, Issue 2, article id. 171, (18pp.), DOI:10.1088/0004-637X/780/2/171 (01/2014)

"Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around the Sun-like Star GJ 504"

M. Kuzuhara, M. Tamura, T. Kudo, M. Janson, R. Kandori, T. D. Brandt, O. Guyon.

The Astrophysical Journal, Volume 774, Issue 1, article id. 11, (18 pp.) DOI:10.1088/0004-637X/774/1/11 (09/2013)

"Simultaneous Exoplanet Characterization and Deep Wide Field Imaging with a diffractive pupil telescope"

Olivier Guyon, Josh A. Eisner, Roger Angel, Neville J. Woolf, Frantz Martinache

The Astrophysical Journal, Volume 767, Issue 1, pp.11-32 (22pp), DOI:10.1088/0004-637X/767/1/11 (04/2013)

"Direct Imaging Discovery of a "Super-Jupiter" around the Late B-type Star kappa And"

O. Guyon, J. Hashimoto, Y. Hayano, M. Hayashi, S. Hayashi, K. Hodapp, T. Kudo
The Astrophysical Journal Letters, Volume 763, Issue 2, article id. L32, pp.1-6,

DOI:10.1088/2041-8205/763/2/L32

(02/2013)

"Speckle Control with a Remapped-Pupil PIAA Coronagraph"

Martinache, Frantz; Guyon, Olivier; Clergeon, Christophe; Blain, Celia
Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 124, issue 922, pp.1288-1294 (12/2012)

"Can Ground-based Telescopes Detect the Oxygen 1.27 micron Absorption Feature as a Biomarker in Exoplanets?"

Kawahara, Hajime; Matsuo, Taro; Takami, Michihiro; Guyon, Olivier

The Astrophysical Journal, Volume 758, Issue 1, article id. 13, 11 pp., DOI:10.1088/0004-637X/758/1/13 (10/2012)

"A Highly Efficient Lucky Imaging Algorithm: Image Synthesis Based on Fourier Amplitude Selection"

Garrel, Vincent; Guyon, Olivier; Baudoz, Pierre

Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 124, issue 918, pp.861-867

DOI : 10.1086/667399 (08/2012)

"Coronagraphic Low-Order Wavefront Sensor: Postprocessing Sensitivity Enhancer for High-Performance Coronagraphs"

Vogt, Frederic P. A.; Martinache, Frantz; Guyon, Olivier; Yoshikawa, Takashi; Yokochi,

Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 123, issue 910, pp.1434-1441,

DOI: 10.1086/663723 (12/2011)

[学会発表](計 10件)

"Coronagraphy - From State of the Art to the Near Future", Search for Life

Beyond the Solar System; Guyon, Olivier, Hilton El Conquistador, Tucson, Arizona, USA, March 16-21 2014; Invited talk (3/20/2014)

"On-sky wavefront correction with a 2048 actuator MEMS", Guyon, Olivier, SPIE Photonics West; The Moscone Center, San Francisco, California, USA, Feb 7-12 2014; Invited talk (2/6/2014)

"High Contrast Imaging: New Techniques and Scientific Perspectives for ELTs", Guyon, Olivier, Adaptive Optics for ELTs 3; Florence Congress Center, Florence, Italy (5/28/2013)

"How Extremely Large Telescopes (ELTs) will Acquire the First Spectra of Rocky Habitable Planets", Guyon, Olivier; Martinache, F., American Astronomical Society, AAS Meeting #221, #419.05 Long Beach, California, USA (01/23/2013)

"Optical Tricks to image Habitable Planets around nearby Stars", Guyon, Olivier, Frontiers in Optics 2012, Rochester, New York, USA; Invited talk, (10/18/2012)

"High Contrast Imaging with PIAA Coronagraphy" Guyon, Olivier, American Astronomical Society meeting, Austin, Texas, USA (01/2012)

"Direct imaging of habitable planets with ELTs?", Adaptive Optics for ELTs, Guyon, Olivier, Victoria, BC, Canada (9/27/2011)

"Wavefront control with the Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics (SCEXAO) system" SPIE optics and photonics, Guyon, Olivier, San Diego, California, USA (08/2011)

"Phase-induced amplitude apodization (PIAA) coronagraph: recent results and future prospects" SPIE optics and photonics, Guyon, Olivier, San Diego, California, USA (08/2011)

"Survey of Present and Future Ground-Based Imaging Systems", Exploring Strange New Worlds, Guyon, Olivier, Flagstaff, Arizona, USA (5/5/2011)

〔その他〕
ホームページ等

SCEXAO instrument website:
<http://www.naoj.org/Projects/SCEXAO/>

Outreach presentation, teaching lectures, and seminars:

"Directly imaging habitable exoplanets" Search for Life Beyond the Solar System Astrobiology school; Guyon, Olivier, Biosphere 2, Tucson Arizona, USA, March 14-16 2014; Invited lecture (3/16/2014)

"Adaptive Optics", Guyon, Olivier, Dunlap Institute astronomical instrumentation summer school; Toronto, Canada Aug 11-16 2014; Invited lecture (8/16/2013)

"Adaptive Optics systems for astronomy", Guyon, Olivier, Center for Adaptive Optics summer school; University of California, Santa Cruz, California, USA, Aug 4-9, 2014; Invited lecture (8/9/2013)

"Life in the universe", Guyon, Olivier, University of Hawaii at Hilo, Hilo, Hawaii, USA, Guest lecture (3/26/2013)

"Anybody out there? Optical tricks to look for life around nearby stars", Guyon, Olivier, Caltech, Hilo, Hawaii,

USA (2/25/2013)
"Adaptive Optics: Atmospheric
Turbulence & Techniques", Guyon,
Olivier, Dunlap Institute
Instrumentation Summer School,
Ontario, Canada (08/2012)
"Adaptive Optics systems for
astronomy", Guyon, Olivier, Center for
Adaptive Optics summer school lecture,
Aug 2012, University of California
Santa Cruz, California, USA (08/2012)
"Direct imaging of habitable planets
from ground and space", Guyon, Olivier,
Observatoire de Paris, Paris, France
(3/12/2012)
"Astronomical Adaptive Optics Systems
Design", Guyon, Olivier, CfAO summer
school lecture, University of
California, Santa Cruz, California,
USA (08/2011)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

国立天文台ハワイ観測所 RCUH 職員
ギュヨン オリビエ (GUYON, Olivier)
研究者番号 : 90399288

(2) 研究協力者

国立天文台ハワイ観測所 RCUH 職員
工藤 智幸 (KUDO Tomoyuki)
研究者番号 : 80591495

Observatoire de la code d'azur
SCEXAscientist
マティナシェ フランツ (MARTINACHE,
Frantz)
研究者番号 : 00534851

国立天文台ハワイ観測所 RCUH 職員
ヨハノビック ネマンジャ (JOVANOVIC
Nemanja)
研究者番号 : 50647633

国立天文台ハワイ観測所 RCUH 職員
サイ ガリマ (SINGH Garima)

国立天文台ハワイ観測所 RCUH 職員

クリストフェ クラ - ジオン
(CLERGEON Christophe)

北海道大学大学院工学研究院
応用物理学部門 助教
村上 尚史 (MURAKAMI Naoshi)
研究者番号 : 80450188