

Transit Spectroscopy of Extra-Solar Planets HAT-P-16b and HAT-P-39b

矢口聖¹、伊藤洋一¹

1) 兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 天文科学センター

Hijiri YAGUCHI¹, Yoichi ITOH^{1*}

1) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan*

E-mail: yitoh@nhao.jp

(Received 2018 October 31; Accepted 2018 December 4)

概要

口径 2m の「なゆた望遠鏡」と狭帯域撮像分光装置 LISS を用いて、ホットジュピターである HAT-P-16b と HAT-P-39b のトランジット現象を可視光で分光観測した。HAT-P-16b のトランジット継続時間は 184 分で、トランジットを含む 299 分間で観測を実施した。HAT-P-39b のトランジット継続時間は 251 分で、トランジットを含む 390 分間で観測した。超低分散グリズムと 10'' 幅ロングスリットを使用し、得られたスペクトルの波長分解能は約 12 である。150 秒角または 196 秒角離れた天体を参照星として同時に分光した。その結果、620nm – 885nm において両惑星のトランジットを検出することができた。HAT-P-16b のトランジットの深さは 0.0120 ± 0.0006 、惑星と恒星の半径比は 0.1097 ± 0.0029 と求まった。HAT-P-39b のトランジットの深さは 0.0093 ± 0.0007 、惑星と恒星の半径比は $0.0966^{+0.0034}_{-0.0036}$ と求まった。どちらの惑星も 620nm – 885nm においてトランジットの深さが異なるという明確な証拠は得られなかった。

Abstract

Optical spectroscopic observations were carried out for transit events of hot-Jupiters HAT-P-16b and HAT-P-39b with 2m Nayuta Telescope and a narrow-band imager and spectrograph, LISS. We have observed HAT-P-16b for 229 minutes including 184 minutes of the transit event, and HAT-P-39b for 390 minutes including 251 minutes transit event. We used a very low resolution grism and a 10'' width slit, and obtained spectra with the spectral resolution of 12. Nearby stars were also observed simultaneously as a reference star. Transit events are detected for both objects in the wavelength between 620nm and 885nm. Transit depth is 0.0120 ± 0.0006 and the radius ratio of the planet to the star is 0.1097 ± 0.0029 for HAT-P-16b. Transit depth is 0.0093 ± 0.0007 and radius ratio of the planet to the star is $0.0966^{+0.0034}_{-0.0036}$ for HAT-P-39b. We do not find clear evidence for wavelength dependence of transit depths for both planets.

Key words: extra-solar planet

1. はじめに

現在までに 3000 個以上の太陽系外惑星が発見されている。我々が太陽系外惑星の公転面の延長上近くにいる場合には、惑星が恒星(中心星)の一部を隠すことがある。この時、恒星の明るさはわずかに暗くなる。この減光をトランジット現象といい、その割合は惑星の半径と恒星の半径の比の自乗となる。もし太陽系外惑星に大気がある場合、特定の原子や分子による吸収のために波長によって減光率が異なる。トランジットを分光観測すると波長ごとの減光率が分かり、その波長に吸収を持つ原子や分子の有無を調べることができる。現在までに約 20 天体に対してトランジット分光観測がなされ、大気組成が議論されてきた。

Lendl et al. (2017) は WASP-103b をトランジット分光観測し、系外惑星の大気組成を議論した。WASP-103b は公転周期が 0.9 日、軌道長半径が 0.02AU、質量が 1.49 木星質量のホットジュピターである。観測は口径 8.2m のジェミニニ望遠鏡と GMOS 分光器を用い、550nm – 980nm の波長範囲で波長分解能 ~ 400 のスペクトルを得た。解析の結果、約 590nm と約 760nm でトランジットによる減光が深いことが分かった。惑星大気に含まれるナトリウムとカリウムがこれらの波長域の光を吸収するため、トランジットが深く観測されると考えられる。

WASP-52b では惑星大気に雲があることがトランジット分光観測から分かった (Chen et al. 2017)。WASP-52b は公転周期が 1.7 日、軌道長半径が 0.03AU、質量が 0.46 木星質量のホットジュピターである。観測は口径 10.4m のカナリア大望遠鏡と OSIRIS 分光器を用い、522 nm – 903nm の範囲で、波長分解能 ~ 1000 のスペクトルを得た。解析の結果、ナトリウムの吸収によりトランジットが深くなっている波長があるが、他の波長ではトランジットの深さはほぼ一定だった。彼らは、1mbar の高度に雲がある 1 倍の太陽金属量の大気モデルだと、ナトリウムの吸収波長以外でトランジットの深さが波長によらないという特徴が説明できると結論した。

トランジットの分光観測で惑星大気の組成が確認され始めているが、そのような太陽系外惑星は全体の 1% 以下でしかない。太陽系外惑星の大気組成により減光率は波長によって変化する。惑星大気が晴れている場合、大気に含まれる原子や分子の吸収のために減光率は異なる。惑星大気に厚い雲がある場合、減光率は波長によらず一定である。分光観測で減光率の波長依存性を求めることで、惑星の大気組成や、厚い雲の有無を調べられる。今までの研究では大口径望遠鏡を用い、波長分解能数百程度のスペクトルを得てきた。しかし、太陽系外惑星の大気に強い吸収を持つ原子や分子がある場合や、雲がある場合には、低分散のスペクトルからでも系外惑星の大気を調べることができる。このような観測は分散が低い場合信号/ノイズ比が良くなり、小口径の望遠鏡でも惑星大気を推定できる。

本研究は、可視光域で分光観測されていない太陽系外惑星のトランジット超低分散分光観測を行い、減光率の波長依存性から惑星の大気組成や構造を推定することを目的とした。

2. 観測

観測には西はりま天文台にある口径 2m の「なゆた望遠鏡」と狭帯域撮像分光装置 LISS (Line Imager and Slit Spectrograph) を使用した。LISS は東京大学大学院天文学教育研究センターの土居、橋場等が開発した観測装置で (Hashiba et al. 2014)、広帯域フィルターや狭帯域フィルターを用いた撮像観測と低分散分光、超低分散分光観測ができる。本観測では超低分散グリズム (75 本/mm) とロングパスフィルター (波長約 600nm 以下の光をカット) を使用した。スリットは幅が $10''$ で長さが $240''$ の物を用いた。このスリットは両端と中央部に波長較正用の $1''$ 幅の部分がある。こうしたセッティングにより、600 nm – 900nm の波長範囲で波長分解能が ~ 12 ($\Delta\lambda \sim 53$ nm) のスペクトルを得た。観測ではスペクトル (一次光) の他に、0 次光の撮像画像も得られる (図 1)。

HAT-P-16bはHAT-Net(Hungarian Automated Telescope Network)により発見されたホットジュピターで(Buchhave et al. 2010)、主星のV等級は10.8等級である。Buchhave et al. (2010)、Pearson et al. (2014)、Turner et al. (2016)、Ciceri et al. (2013)、Sada et al. (2016)によって測光観測がされている。またTurner et al. (2016)では惑星の平衡温度1500Kで太陽と同じ組成を持つ大気モデルが作成された。

2016年11月16日にHAT-P-16bの観測を行った。トランジットの予報時刻は23:33 – 26:37(JST)で、高度はトランジットの開始時で61度、トランジットの終了時で31度だった。HAT-P-16から150.14"離れ、V等級が11.96等級のTYC 2792-1778-1を参照星として同時に撮影した。22:08から天体の導入を行い、22:14にグリズムを入れ、22:57からオートガイダーの動作を開始した。ローテータの回転角度は177度とした。観測時間は22:14 – 27:13で、露出時間が30s – 120sの画像を216フレーム取得した。0次光の半値幅は観測開始時の22:14で2.4"だった。また観測後の薄明の時間に超低分散分光モード、ロングパスフィルター、スリット無しで天頂を撮影し、フラットフレームとした。さらに、波長較正用のHg、Arランプを超低分散グリズム、10"幅のロングスリット、フィルターなしで観測終了後に0.5秒積分で撮影した。

HAT-P-39bはHAT-P-16bと同様にHAT-Netにより発見されたホットジュピターである(Hartman et al. 2012)。主星のV等級は12.422等級である。2017年1月31日にHAT-P-39bの観測を行った。トランジットの予報時刻は22:21 – 26:32(JST)、高度はトランジットの開始時に63度、トランジットの終了時に37度だった。HAT-P-39から96.39"離れた、V等級が10.07等級のTYC 1364-1960-1を参照星として同時に撮影した。21:45から天体の導入を行い、21:47にグリズムを入れ、21:55からオートガイダーの動作を開始した。ローテータの回転角度は43度だった。観測時間は21:49 – 28:19で、露出時間が55s – 100sの画像を228フレーム取得した。0次光の半値幅は観測開始時の21:49で2.4"だった。また観測後の薄明の時間に超低分散分光モード、ロングパスフィルター、スリット無しで天頂を撮影し、フラットフレームとした。コンパソフレームはHAT-P-39bの観測終了後に撮影した。

3. 解析

解析にはIRAFを用いた。まず、生データからオーバースキャンを引き、規格化したフラットフレームで画像を割った。次に、目標星と参照星の0次光の重心をdaofindタスクで測り、重心のx座標を1"スリットの中心のx座標と等しくなるように平行移動させる。これにより1次光のスペクトルも平行移動する。そして、10"幅のロングスリットに3箇所ある1"幅スリットで分光した波長較正ランプのスペクトルの10本の輝線を用いて、波長の較正を行った。さらに、10"幅のロングスリットがある領域で、かつ天体が写っていない領域を各フレームにおいてスカイ領域に指定し差し引いた。最後に、apallタスクを用いて空間方向に広がりのある天体のスペクトルを1次元化した。

上記の解析処理を行うと、目標星のスペクトルと参照星のスペクトルで地球大気吸収バンドにズレがあった。この原因は装置内の光学系によるゆがみや誤った波長較正によるものだと考えられるが正確には分からない。これを補正するため、地球大気酸素分子Aバンドなど4つの吸収バンドを用いて再度波長較正を行った。HAT-P-39bの観測では、21:55-24:55で目標星と参照星がスリットから外れていることが分かった。0次光の天体画像からスリットに入っている光量を見積もり、スペクトルの光量を補正した。解析が終了した目標星のスペクトルには地球大気時間変動の成分が含まれている。これは目標星のスペクトルを参照星のスペクトルで割ることで補正した。

次に、620nm-885nmの範囲で26.5nmずつずらして波長分解能の53nm幅でスペクトルを平均した。この波長帯毎の強度の平均を全てのフレームで求めた。そして、各波長帯の強度の平均値の $\pm 3\sigma$ から外れたものを除去した。さらに、HAT-P-16bの観測では各フレームの強度をトランジット前の10フレームとトランジット後の10フレームの強度の平均値で割った。HAT-P-39bの観測では各フレームの強度をトランジット後

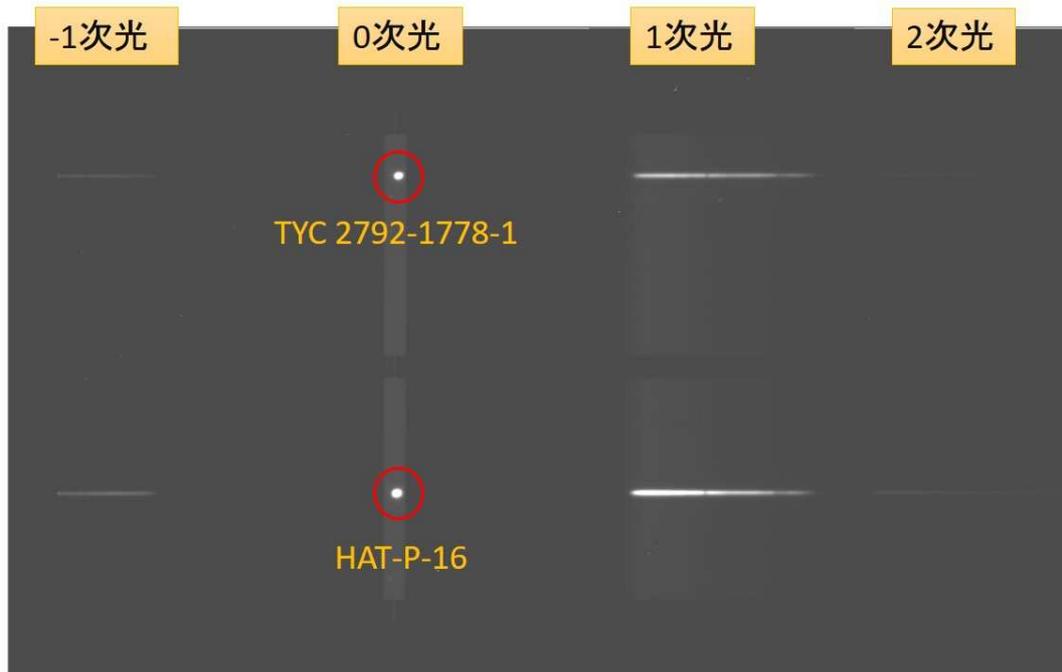


Fig. 1. An obtained image of HAT-P-16b after subtraction of the counts in the overscan region. Zeroth order images and 1st order spectra are clearly shown. The lower images are those of HAT-P-16b and the upper images are of the reference star.

の 20 フレームの平均値で割った。これによりトランジット外の強度が 1 に規格化された。

強度のエラーを求めるため、全てのスペクトルの平均をとった (テンプレート スペクトルと呼ぶ)。各フレームをテンプレート スペクトルで割ることでエラーを求めた。得たスペクトルの各波長帯の 1σ を強度のエラーとした。

4. 結果

規格化した強度からトランジットカーブを求めるため、WEB サイトの EXOFAST を使った (<http://astrutils.astronomy.ohio-state.edu/exofast/exofast.shtml>)。観測フィルターは入力した波長帯に近いフィルターを選んだ。620nm - 673nm、646.5nm - 699.5nm、673nm - 726nm、699.5nm - 752.5nm、726nm - 779nm は Johnson-R、752.5nm - 805.5nm、779nm - 832nm、805.5nm - 858.5nm、832nm - 885nm は Johnson-I である。

HAT-P-16b の観測では 620nm - 885nm においてトランジットを検出することができた (図 2)。トランジットの深さの平均は 0.0120 ± 0.0006 、主星と惑星の半径比の平均は 0.1097 ± 0.0029 と求まった。本研究で求めた半径比を表 1 にまとめた。

HAT-P-39b の観測では 620nm - 885nm においてトランジットを検出することができた (図 3)。トランジットの深さの平均は 0.0093 ± 0.0007 、主星と惑星の半径比の平均は $0.0966^{+0.0034}_{-0.0036}$ と求まった。本研究で求めた半径比を表 2 にまとめた。

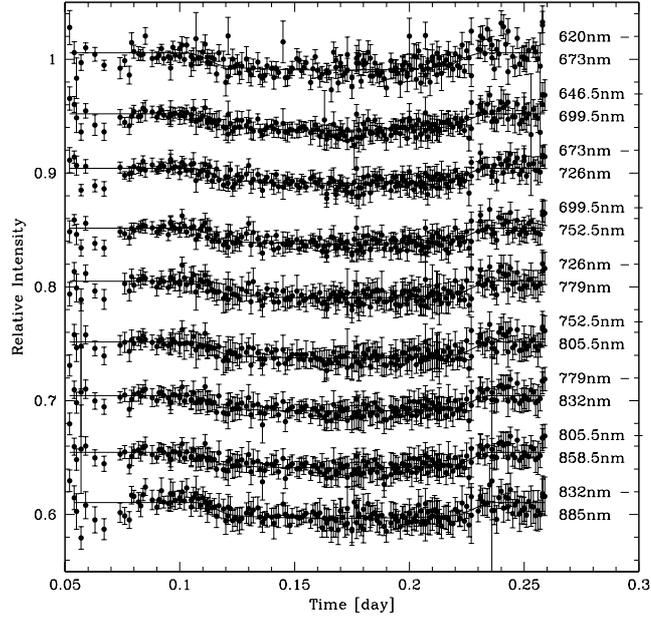


Fig. 2. Light curves of HAT-P-16b. The horizontal axis shows Julian date - 2457709. The vertical axis represents the normalized flux shifted by 0.05. The solid lines are the fitting light curves obtained at the EXOFAST web site.

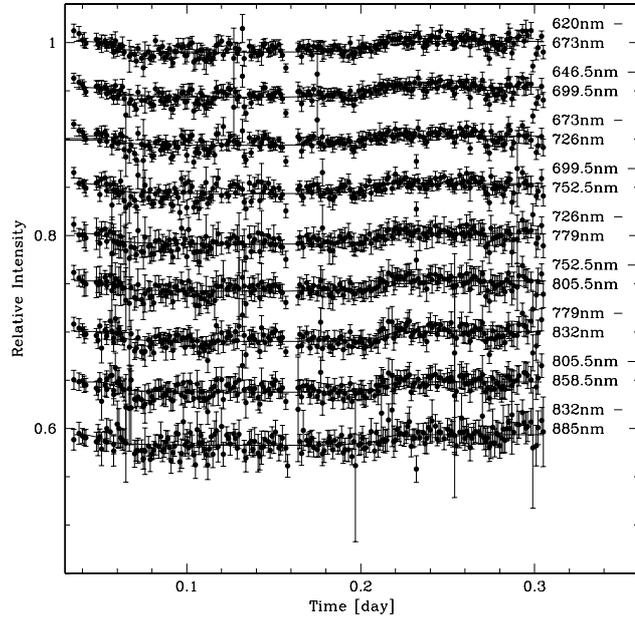


Fig. 3. Light curves of HAT-P-39b. The horizontal axis shows Julian date - 2457785. The vertical axis represents the normalized flux shifted by 0.05. The solid lines are the fitting light curves obtained at the EXOFAST web site.

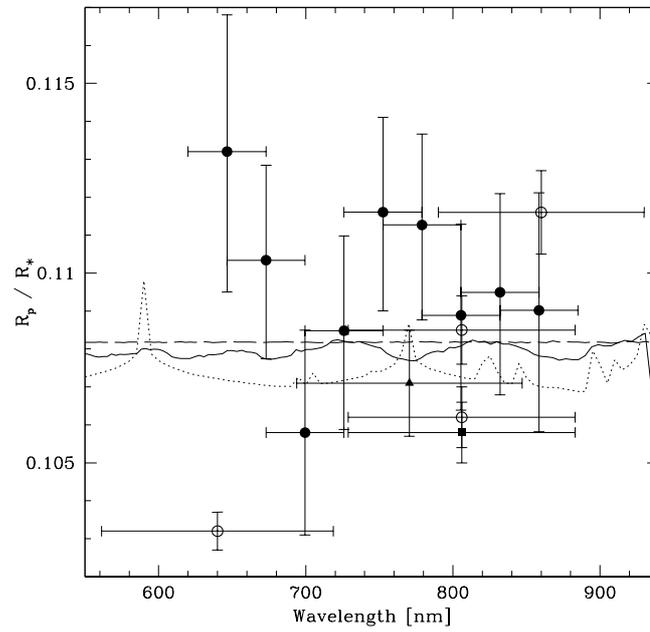


Fig. 4. Radius ratios of the planet to the central star for HAT-P-16b. Filled circles show the ratio in this work and the other symbols show the ratio obtained in the previous studies. The solid line represents the model spectrum of 100 % water vapor atmosphere. The dotted line shows the model spectrum of Turner et al. (2016) and the dashed line shows the model spectrum of thick cloud atmosphere.

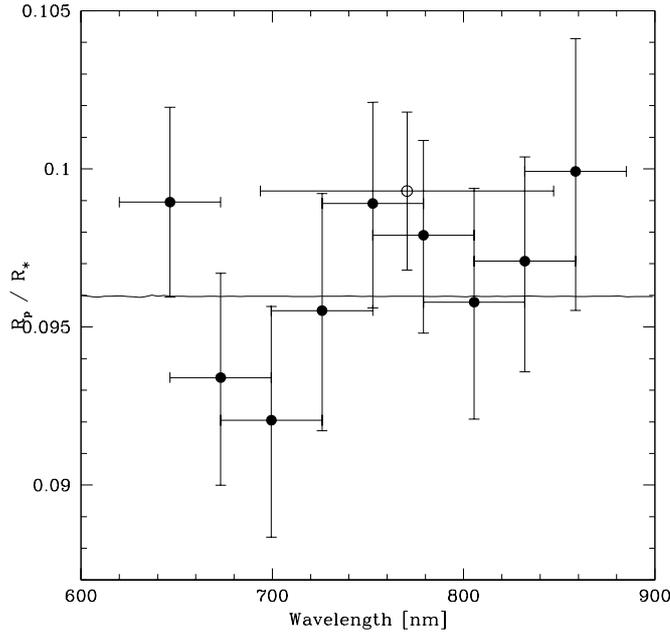


Fig. 5. Radius ratios of the planet to the central star for HAT-P-39b. Filled circles show the ratio in this work and the open circles show the ratio obtained in Hartmann et al. (2012). The solid line represents the model spectrum of thick cloud atmosphere.

5. 考察

先行研究で求められた HAT-P-16b 及び HAT-P-39b の半径比を表 1,2 にまとめた。その結果、先行研究と一致する波長帯と一致しない波長帯があった。

次に、WEB サイトの Planetary Spectrum Generator(以後 PSG)を用いて (<https://psg.gsfc.nasa.gov/index.php>)、水蒸気が 100% のモデルと厚い雲のモデルを作成した。HAT-P-16b の場合、水蒸気が 100% のモデルを作成するために入力したパラメータは、惑星の直径=185500[km]、主星のスペクトル型=G 型、惑星大気を組成する分子=H₂O、分子の存在量=100%とした。厚い雲のモデルを作成するために入力したパラメータは、惑星の直径=184306[km]、主星のスペクトル型=G 型、惑星大気の組成=雲、組成の存在量=100%とした。また Turner et al. (2016) で作成された惑星大気モデルも同様に半径比の比較をした。これは太陽と同じ金属量を持つ晴れた大気モデルを表す。本研究の観測結果は誤差が大きいため、これらのモデルに制限を加えることは難しい。

HAT-P-39b に対しても PSG で厚い雲のモデルを作成した。厚い雲のあるモデルを作成するために入力したパラメータは、惑星の直径=195426[km]、惑星大気の組成=雲、組成の存在量=100%とした。厚い雲のモデルは観測結果のエラーの範囲内である。一方で、750nm や 860nm では惑星の半径が大きい可能性もある。HAT-P-39b の平衡温度は Hartman et al. (2012) で 1752K と求められている。これは褐色矮星の有効温度に相当する。褐色矮星の可視光スペクトルには約 750nm に酸化バナジウム、カリウム、酸化チタンの吸収、約 860nm に酸化チタンの吸収バンドがある。これらの分子が惑星大気に存在する可能性もある。より短い波長帯を観測し、半径比が本研究より大きい場合、レイリー散乱による短波長帯の半径比の増大だと予想できるため、惑星大気が厚い雲に覆われていない可能性が高いことを示すことができる。

本研究の観測結果は半径比のエラーが大きかった。半径比のエラーを小さくするためには、より明るい目

Table 1. Transit depths and the radius ratios of the planet to the star for HAT-P-16b

| wavelength | transit depth | radius ratio | reference |
|---------------|---------------------|------------------------------|------------------------|
| 620-673nm | 0.0128 ± 0.0008 | $0.1132^{+0.0036}_{-0.0037}$ | |
| 646.5-699.5nm | 0.0122 ± 0.0006 | $0.1103^{+0.0025}_{-0.0026}$ | |
| 673-726nm | 0.0110 ± 0.0006 | $0.1058^{+0.0027}_{-0.0027}$ | |
| 699.5-752.5nm | 0.0118 ± 0.0005 | $0.1085^{+0.0025}_{-0.0026}$ | |
| 726-779nm | 0.0125 ± 0.0006 | $0.1116^{+0.0025}_{-0.0026}$ | |
| 752.5-805.5nm | 0.0124 ± 0.0005 | $0.1113^{+0.0024}_{-0.0025}$ | |
| 779-832nm | 0.0119 ± 0.0005 | $0.1089^{+0.0024}_{-0.0025}$ | |
| 805.5-858.5nm | 0.0120 ± 0.0006 | $0.1095^{+0.0026}_{-0.0027}$ | |
| 832-885nm | 0.0119 ± 0.0007 | $0.1090^{+0.0031}_{-0.0032}$ | |
| U | | 0.10586 ± 0.00088 | Pearson et al. (2014) |
| U | | 0.10645 ± 0.00067 | Turner et al. (2016) |
| R | | 0.1032 ± 0.0005 | Ciceri et al. (2013) |
| i | | 0.1071 ± 0.0014 | Buchhave et al. (2010) |
| I | | 0.1062 ± 0.0008 | Ciceri et al. (2013) |
| I | | 0.1085 ± 0.0009 | Ciceri et al. (2013) |
| I | | 0.1058 ± 0.0008 | Sada et al. (2016) |
| I | | 0.1116 ± 0.0011 | Ciceri et al. (2016) |

標星と参照星を観測することが考えられる。西はりま天文台から観測できる、太陽系外惑星の存在が既知で、 $200''$ 以内にV等級が11等級より明るい参照星があることを条件とすると、V等級が10等級より明るい観測対象は3天体ある。

6. まとめ

西はりま天文台の2mなゆた望遠鏡と狭帯域撮像分光装置LISSを使用して、太陽系外惑星HAT-P-16bとHAT-P-39bの可視光超低分散分光観測を行った。超低分散グリズムモード、 $10''$ 幅ロングスリット、ロングパスフィルターを使用し、目標天体から200秒角以内にある参照星を同時に分光した。その結果、600nm–900nmの波長範囲で波長分解能12のスペクトルを得た。620nm–885nmの範囲において両惑星のトランジットを検出した。HAT-P-16bのトランジットの深さは平均で 0.0120 ± 0.0006 、半径比は平均で 0.1097 ± 0.0029 と求まった。先行研究(Buchhave et al. 2010, Sada et al. 2016, Ciceri et al. 2013)の可視測光観測から得られた半径比よりも大きい値のものが多かった。HAT-P-39bのトランジットの深さは 0.0093 ± 0.0007 、半径比の平均は $0.0966^{+0.0034}_{-0.0036}$ と求まった。先行研究(Hartman et al. 2012)で求められた半径比と似た値だった。水蒸気100%の大気モデルや厚い雲の大気モデルを作成したが、HAT-P-16bの観測結果はモデルに制限をつけるほどの精度は持っていなかった。HAT-P-39bの観測結果は酸化バナジウム、酸化チタン、カリウムが惑星大気に含まれると観測結果を説明できる可能性もあるが、半径比のエラーを考えると雲のあるモデルも否定できない。より短い波長帯を観測し、半径比が本研究より大きい場合、レイリー散乱による短波長帯の半径比の増大だと予想できるため、惑星大気が厚い雲に覆われていない可能性が高いことを示すことができる。

Table 2. Transit depths and the radius ratios of the planet to the star for HAT-P-39b

| wavelength | transit depth | radius ratio | reference |
|---------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|
| 620-673nm | 0.00979 ± 0.0006 | 0.0989 ± 0.0030 | |
| 646.5-699.5nm | 0.00872 ± 0.0006 | $0.0934^{+0.0033}_{-0.0034}$ | |
| 673-726nm | 0.00847 ± 0.0007 | $0.0921^{+0.0036}_{-0.0037}$ | |
| 699.5-752.5nm | 0.00912 ± 0.0007 | $0.0955^{+0.0037}_{-0.0038}$ | |
| 726-779nm | 0.00978 ± 0.0006 | $0.0989^{+0.0032}_{-0.0033}$ | |
| 752.5-805.5nm | 0.00959 ± 0.0006 | $0.0979^{+0.0030}_{-0.0031}$ | |
| 779-832nm | 0.00918 ± 0.0007 | $0.0958^{+0.0036}_{-0.0037}$ | |
| 805.5-858.5nm | 0.00943 ± 0.0007 | $0.0971^{+0.0033}_{-0.0035}$ | |
| 832-885nm | 0.01000 ± 0.0009 | $0.0999^{+0.0042}_{-0.0044}$ | |
| i | | 0.0993 ± 0.0025 | Hartman et al. (2012) |

LISS 開発グループである東京大学の土居教授、小久保氏、満田氏、一木氏、大橋氏に感謝します。

<< 参考文献 >>

- Buchhave, L. A. et al., 2010, ApJ, 720, 2
 Chen, G. et al., 2017, A & A, 600, 11
 Ciceri, S. et al., 2013, A & A, 557, 30
 Hartman, J. D. et al., 2012, ApJ, 144, 5
 Hashiba, Y. et al., 2014, proc SPIE, 9147, 2
 Lendl, M. et al., 2017, A & A, 606, 18
 Pearson, K. A. et al., 2013, New Astronomy, 27, 102
 Turner, J. D. et al., 2016, MNRAS, 459, 789
 Sada, P. V., Ramón-Fox, F. G., 2016, PASP, 128, 960