



太陽系外惑星の多波長トランジット測光観測

石岡 千寛, 大朝 由美子 (埼玉大学), 宝田 拓也 (ABC), 伊藤 洋一, 高橋 隼 (兵庫県立大学)

Introduction

太陽系外惑星

太陽以外の恒星を公転する惑星質量の天体。1995年に初発見されてから現在まで4000個程見つけられている。質量や半径・軌道長半径の特徴から**ホットジュピター**、**大軌道巨大惑星**、**スーパーアース**などに分類される。多くはトランジット・ドップラー法などの間接法で検出されている。

トランジット法

惑星が主星の前を横切る際に起こる減光を利用して惑星を検出。

- 惑星半径 (減光率 = $\frac{F_0 - F_t}{F_0} = \frac{R_p^2}{R_s^2}$)
(※Rp: 惑星半径 Rs: 主星半径)
- 軌道長半径 (ケプラーの第三法則 $a = (\frac{4\pi^2}{GM_s T^2})^{1/3}$)
(※a: 軌道長半径 T: 公転周期)
- 軌道傾斜角 (トランジット継続時間から)

太陽-木星のトランジットを観測した場合約1%の減光が起こる

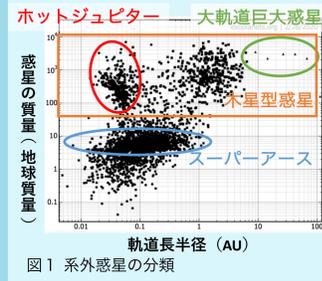
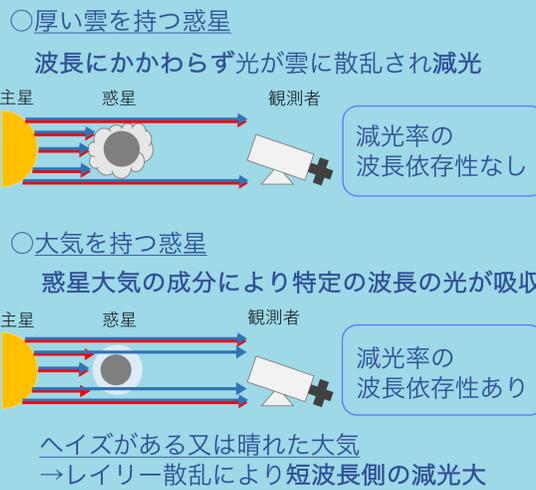


図1 系外惑星の分類

トランジット多波長測光

トランジット法は、惑星大気を通過した光を観測



惑星大気の理論モデルとの比較から系外惑星の大気組成の推定が可能

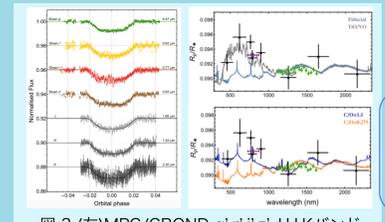


図3 (左)MPG/GROND g',r',i',z',J,H,Kバンドでの光度曲線 (右) 惑星大気モデルと半径比

WASP-74bはTiO/VOを含む大気を持つ可能性

Mantini et al. (2019)

複数の波長帯での減光率を求め、波長依存性を調べることで惑星大気を推定できる

本研究は、SaCRA/MuSaSHIを用いた多波長トランジット測光観測から

- ①系外惑星の半径や軌道長半径などを求め
- ②系外惑星の大気モデルと比較し
- ③恒星の有効温度や金属量などの物理量による大気の差異を探る

Observations

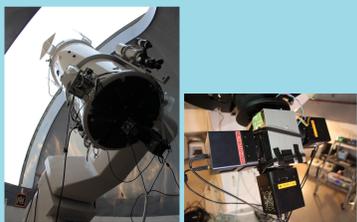


図4 55cm望遠鏡SaCRA, MuSaSHI

| 望遠鏡 | 55cm望遠鏡 SaCRA | 36cm望遠鏡 |
|------|--|--------------------------------|
| 観測装置 | 三波長同時撮像装置 (MuSaSHI) | SingleCCD (FLI/SBIG) |
| 観測視野 | 12'.8 × 12'.4 | 17'.4 × 17'.8 36'.4 × 24'.2 |
| 観測波長 | r(550-680nm), i(700-810nm) z(820-1000nm) | g'(410-550nm) |
| 観測天体 | HAT-P-3, HAT-P-20, HAT-P-24, HAT-P-36, WASP-1, WASP-12, WASP-36, WASP-52, WASP-65, WASP-84, WASP-114, WASP-143, TrES-3, TrES-4, Qatar-1, Qatar-3, Qatar-6, Qatar-9, XO-3, K2-30 (赤: 36cm望遠鏡と同時観測、青: 新たな望遠鏡と同時観測した天体) | |
| 露出時間 | 30~60秒 | 30~60秒 |



図5 36cm望遠鏡

観測天体の選別

ETD*でトランジットが予報されているものの中から、Vバンドで13等より明るい天体を観測天体とした。

* ETD [http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php]

Analysis

- (1) IRAFを用いて一次処理 (ダーク引き、フラット補正)
 - (2) ターゲット星、参照星のアーチャー測光
 - (3) 参照星の変光確認
 - (4) ターゲット星の相対測光
- (3) EXOFAST*およびPytransitを用いて光度曲線を求める

* EXOFAST [https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html]

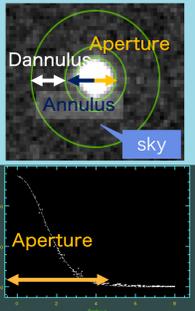


図6 アーチャー測光概念図

Results · Discussion

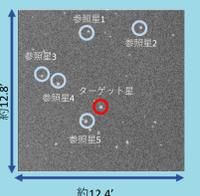


図7 WASP-143 (rバンド)

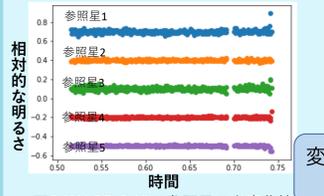


図8 WASP-143の参照星の光度曲線

光度曲線

変光していない5~13個の参照星を用いて相対測光を行い①-④の手順で光度曲線を作成した。

- ① EXOFASTなどで光度曲線を作成
- ② 1の曲線から3σ以上外れた値を除く
- ③ 2のデータについてEXOFASTで光度曲線を作成
- ④ 求めたデータについて②③を2σで繰り返す

変光していない星を参照星に決定

減光率の波長依存性

求めた減光率の波長依存性の有無を調査 (典型的な誤差-0.92%を1σとした)

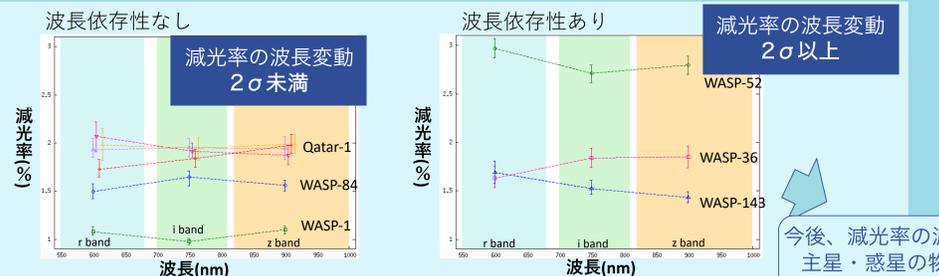


図10 減光率と波長の関係 (左) 波長依存性のない天体 (右) 波長依存性のある天体

惑星大気モデルとの比較

波長依存性があった天体についてPlanetary Spectrum Generator*を用いて惑星大気モデル(H₂, H₂O, CO, CO₂, CH₄, K, Na, TiO, VO, 雲)を作成し、惑星と主星の半径比を比較

*PSG [https://psg.gsfc.nasa.gov/index.php]

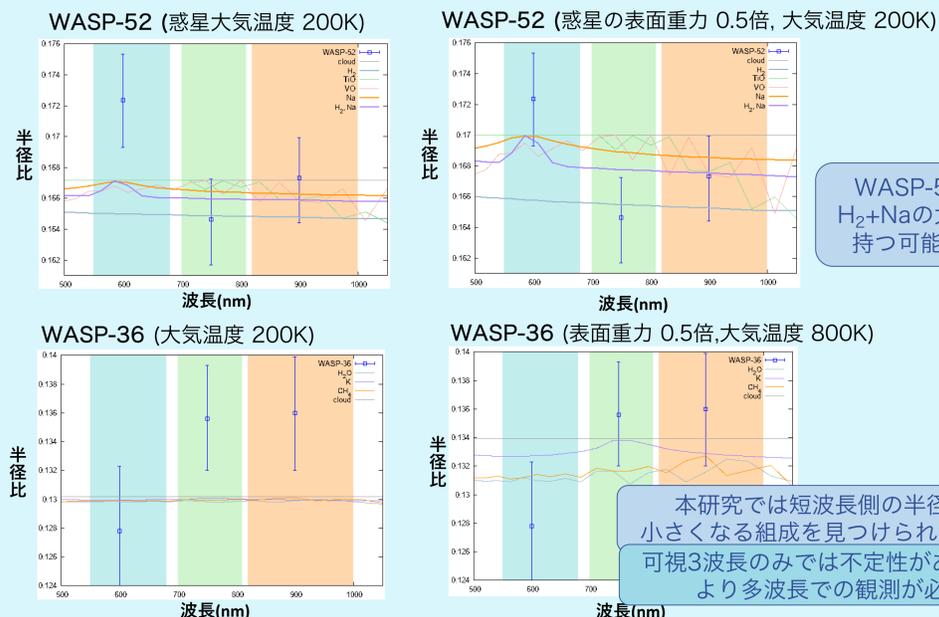


図11 (上段) WASP-52の波長ごとの半径比と大気モデル。左はHebrard et al.(2012)の惑星表面重力を仮定。右は表面重力0.5倍で求めたモデル (下段) WASP-36の波長ごとの半径比と大気モデル。左はSmith et al.(2012)惑星表面重力を仮定。右は表面重力を0.5倍、惑星大気温度を800Kにして求めたモデル

エラーが比較的大きい+可視域のみのデータであるため大気組成に不定性がある

⇒ 可視・近赤外同時観測での観測+測光精度の向上

可視・近赤外同時測光観測

2020年5月に3天体について、兵庫県立大学西はりま天文台なゆた望遠鏡/NICとSaCRA/MuSaSHIを用いた可視・近赤外同時トランジット測光観測を行った。

| 観測装置 | 近赤外撮像装置 (NIC) |
|------|--|
| 観測視野 | 2'.7 × 2'.7 |
| 観測波長 | J (1.18-1.33μm), H (1.48-1.78μm) Ks (1.99-2.30μm) |
| 観測日 | 2020/05/27 - 05/29 |
| 観測天体 | Qatar-6, Qatar-9, TrES-3 |
| 露出時間 | 30~60秒 |

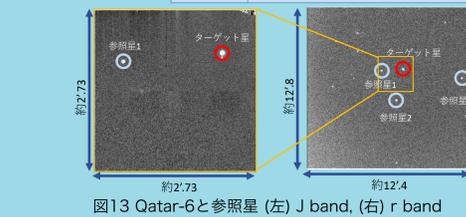


図12 なゆた望遠鏡

観測

- ・オンフォーカス
- ・視野内での天体の位置を固定
- ・スカイ画像の取得のため、1時間に1回程度ディザリングモードで観測

解析

- (1) ダーク引き
- (2) フラット補正
- (3) bad pix補正、hot/dark pix除去
- (4) スカイ画像作成・スカイ差し引き
- (5) 縦パターンの除去

スカイが不安定で(4)が課題

スカイ差し引き後に

- ①天体が見えなくなる
- ②縞模様が残る 課題がある

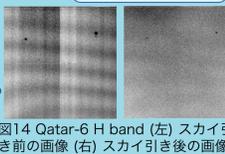


図14 Qatar-6 H band (左) スカイ引き前の画像 (右) スカイ引き後の画像

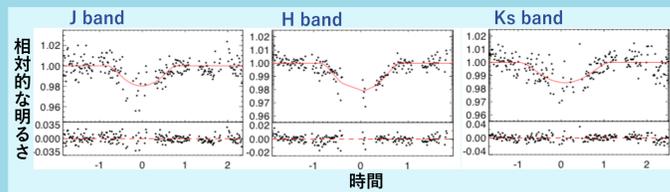


図15 (上) 左からJ, H, KsバンドのQatar-6の光度曲線。黒い点が観測値、赤い線が求めた光度曲線。(下) 光度曲線と観測値の残差

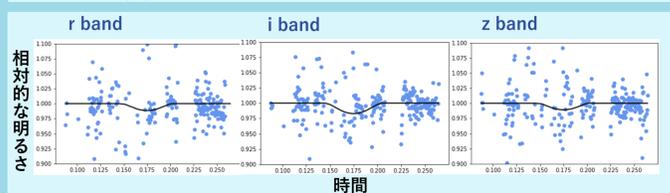


図16 左からr, i, zバンドのQatar-6の光度曲線。青い点が観測値、黒い線がPytransitを用いて求めた光度曲線。

J, H, Ksバンド共に比較的散らばりが大きい

一次処理の見直しやトレンド除去等を行い光度曲線を再作成

可視データは悪天候のため減光がほとんど見られない

今後、SaCRAで追観測を行い近赤外データと合わせて大気の推定を行う

Summary & Future Works

SaCRA/MuSaSHIを用いて2018~2020年に行なった多波長トランジット測光観測により求められた減光率から、

- (1) 短波長側で減光率が小さい天体が1天体、短波長側で減光率が大きい天体が2天体、波長依存性のない天体が3天体見られた。
 - (2) WASP-52の大気中にH₂とNaが含まれる可能性が示唆された。
- また、SaCRA・なゆた望遠鏡を用いて3天体の可視近赤外同時トランジット観測行なった。→1天体の解析を行ったが、現状では悪天候のため可視・近赤外での議論は困難である。

- 近赤外観測データについて一次処理の見直し・トレンド除去を行う。
- 可視・近赤外同時トランジット観測結果から、詳細に大気組成の調査を行う。
- フィッティングツールと大気モデルについて比較・検討を行う。

