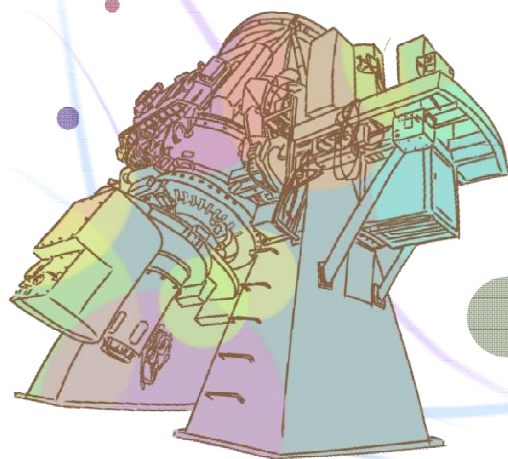


# 太陽系外惑星の 近赤外トランジット観測

平野佑弥、伊藤洋一（兵庫県立大学）



# 太陽系外惑星の発見

1995：初の太陽系外惑星51 Peg bを発見

1999：HD209458 bで惑星が主星の前を通過するトランジットを初めて観測

2001：太陽系外惑星で初めて大気が検出される

2009：太陽系外惑星探査機ケプラー運用開始

2018：トランジット系外惑星探査衛星TESS運用開始

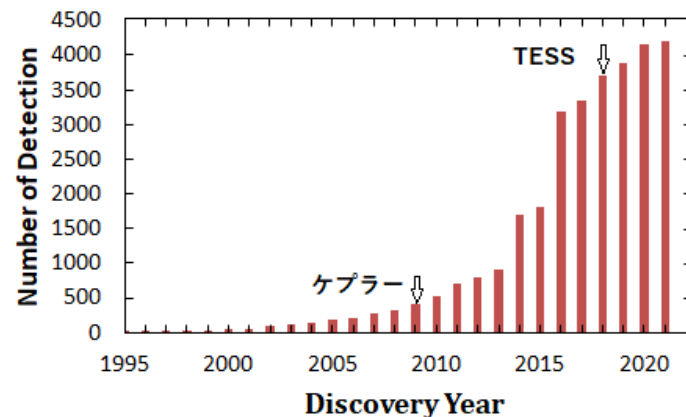


図1 太陽系外惑星の発見数

ケプラーやTESSなどにより4000個以上の太陽系外惑星が発見されたが、惑星一つ一つの特徴づけはほとんど終わっていない。

また現在行われている太陽系外惑星の観測は可視光のみで行われることが多く、近赤外領域での観測は発見数全体の数%しか行われていない。

本研究では近赤外領域でのトランジットに着目する。

# 近赤外トランジット観測

トランジット中、主星の光の一部は惑星大気を通過し原子・分子に吸収される。

惑星大気の吸収は波長依存性があるので、波長によってわずかにトランジットの深さが異なる(図2)。

特に近赤外領域では分子の吸収が多く見られるため、大気組成を調べることができる。

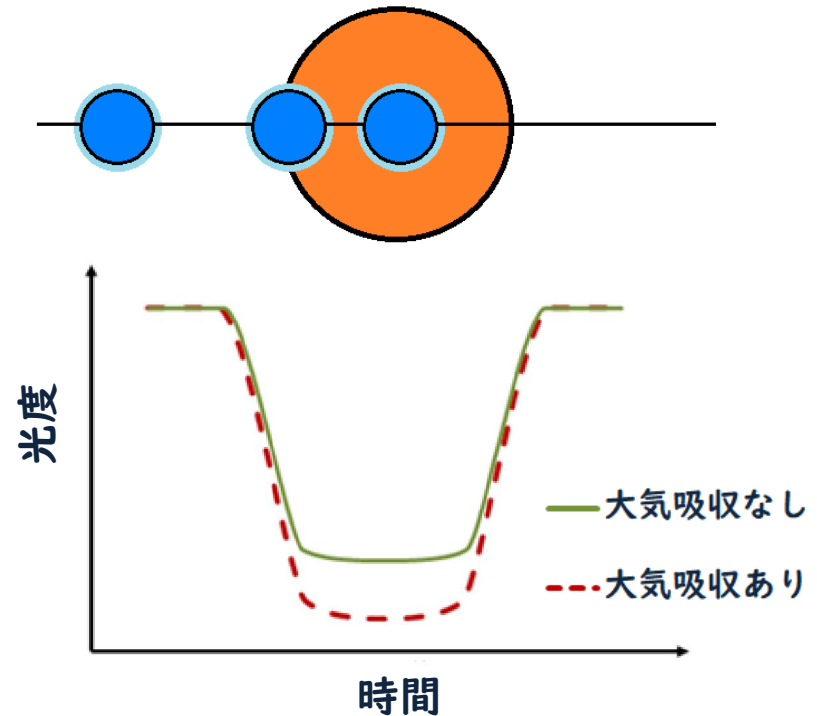


図2 大気吸収の有無による深さの違い

可視光領域で観測されている太陽系外惑星を近赤外 J, H, K<sub>s</sub>バンドで同時にトランジット観測を行い、半径の波長依存性を調べる。

# 惑星大気の推定

Tabata et al. (2020)は  
なゆた望遠鏡/NICを用い  
て、K型星HAT-P-54が持つ  
太陽系外惑星HAT-P-54 b  
のトランジット観測を  
行った。

また大気モデルと各波長  
域での半径比を比較する  
ことで、大気成分の推定  
を行い、HAT-P-54 bは $\text{H}_2\text{S}$   
の大気を持つと推定した  
(図3)。

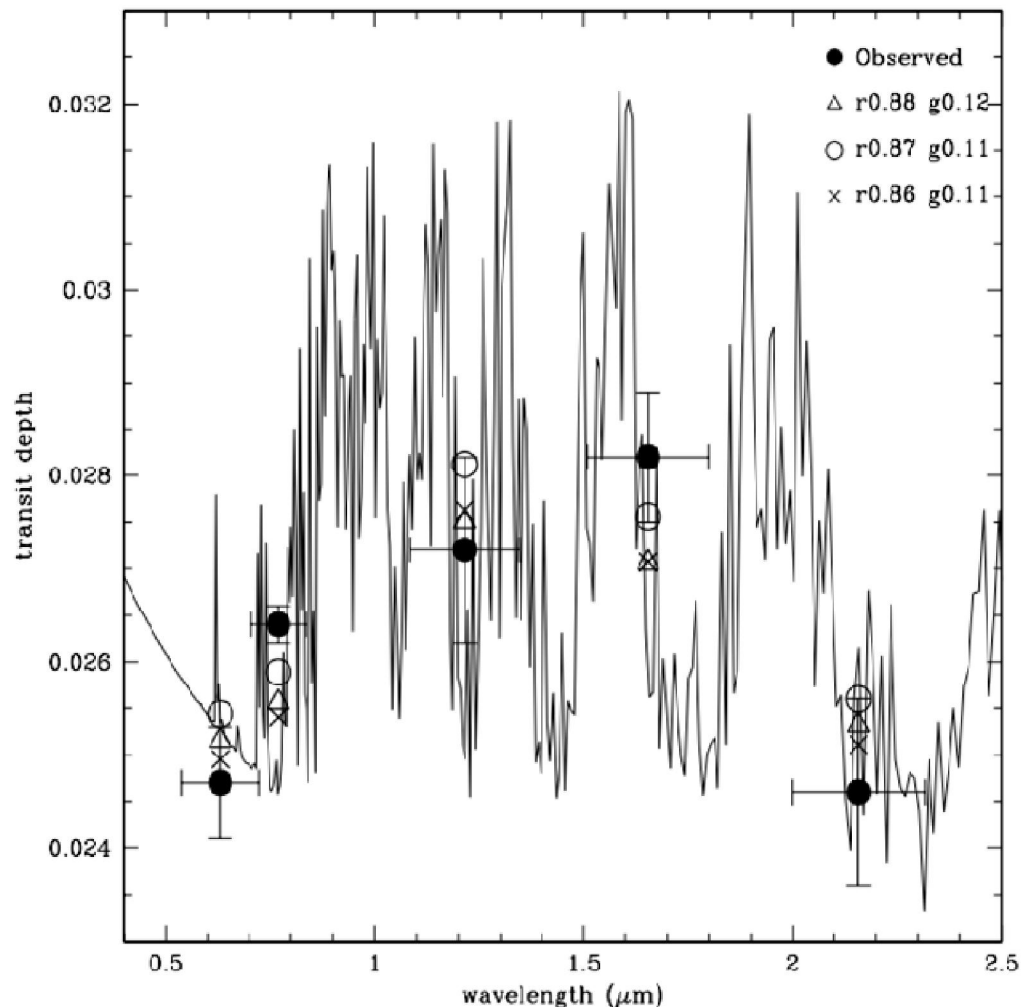


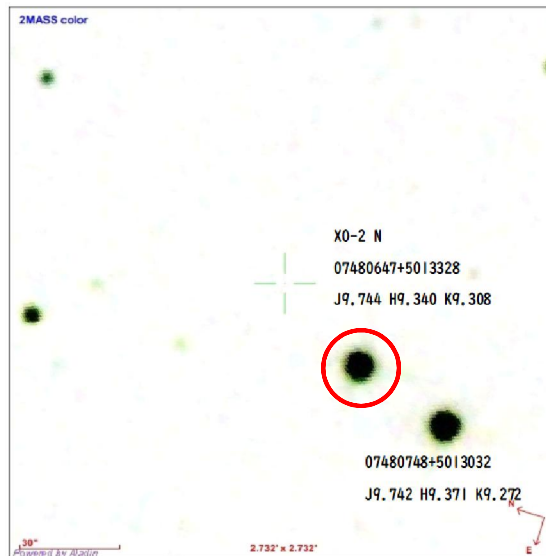
図3 r, i, J, H,  $K_s$ バンドで取得された主星と惑星の  
半径比と大気スペクトル(Tabata et al. 2020)

# 観測天体

トランジット観測では主星の半径が小さいほど、減光率は大きくなることが多い。

また公転周期が短ければ、より観測の機会が増える。

そのため、対象星には主星の半径が小さく、公転周期が短いXO-2N bとK2-45 bを選んだ。



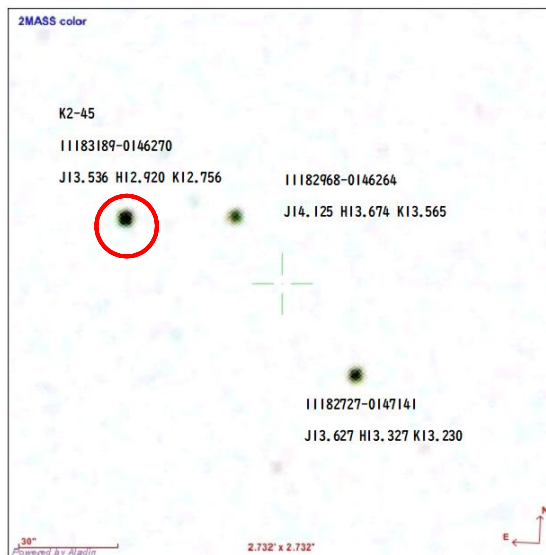
XO-2N

- K0V 有効温度 5340 K
- $0.971 R_{\odot}$   $0.974 M_{\odot}$

XO-2N b

- $0.983 R_J$   $0.566 M_J$
- 周期 2.6 day

図4 XO-2N星図



K2-45

- M0V 有効温度 4103 K
- $0.44 R_{\odot}$   $0.68 M_{\odot}$

K2-45 b

- $0.599 R_J$   $NR M_J$
- 周期 1.7 day

図5 K2-45星図

# 観測

観測対象：X0-2N b, K2-45 b

観測装置：西はりま天文台 なゆた望遠鏡  
近赤外撮像装置NIC(J, H, K<sub>s</sub>)

視野：2.73' × 2.73'

ディザリング：半径10" で10カ所

X0-2N b

観測日：2020年10月26日 25:11 - 29:46 (JST)

トランジット時刻：26:11 - 28:51 (JST)

露出時間：画像1枚につき30秒

画像枚数：J, H, K<sub>s</sub>バンドそれぞれ260枚

K2-45 b

観測日：2021年3月10日 21:18 - 25:14 (JST)

トランジット時刻：22:37 - 24:18 (JST)

露出時間：120秒

画像枚数：90枚

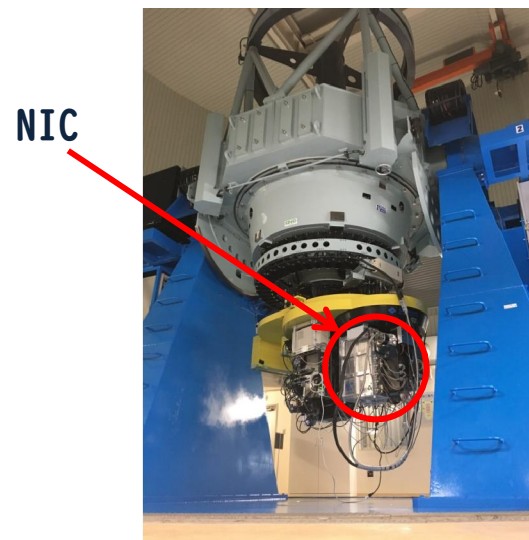


図6 なゆた望遠鏡

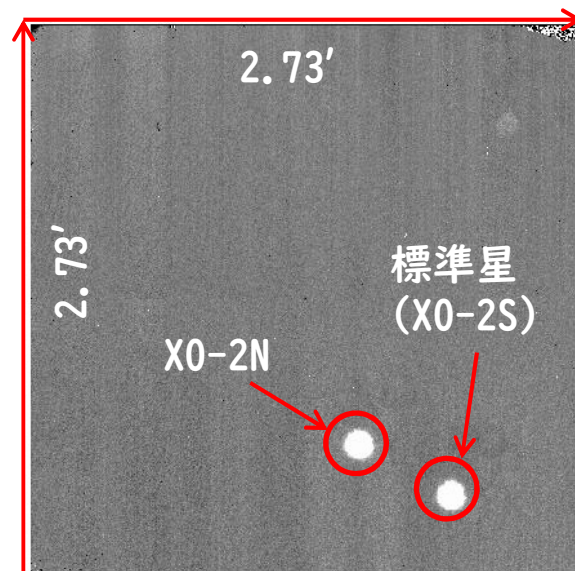


図7 対象星と標準星(Hバンド)



# 解析方法（画像処理）

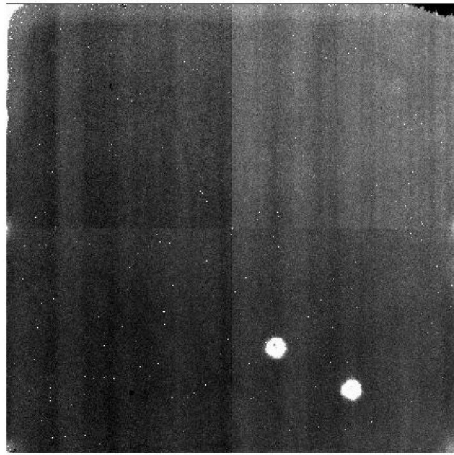


図8 X0-2N生画像

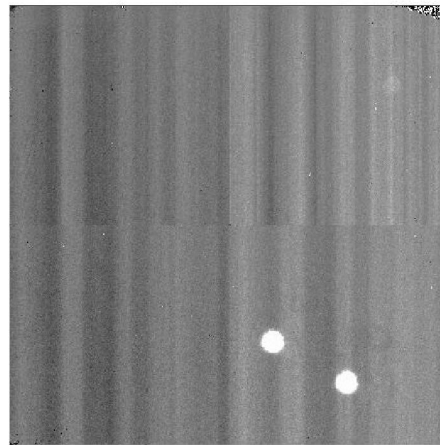


図9 スカイ引き後

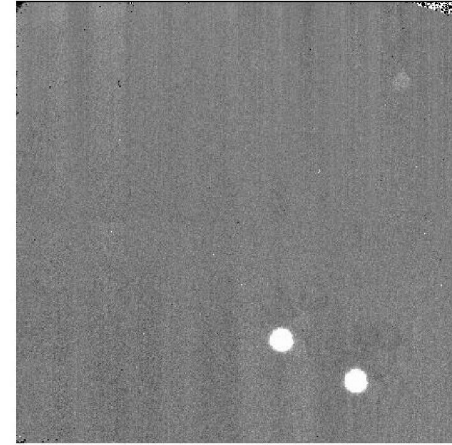


図10 縦縞パターン除去

- ①生画像のダーク引き、フラット補正を行った。（トワイライトフラットを使用）
- ②検出器由来のバッドピクセル、熱によるホットピクセル、宇宙線をそれぞれ補正。
- ③ディザリングした10枚の画像を中央値をとって重ね合わせ星を消し、スカイパターンを取得してスカイの補正を行った。
- ④検出器の読み出し列を切り替える際に電圧が変動し縦縞が目立つ。画像ごとに縦縞パターンは異なるので、画像の上半分と下半分のそれぞれ星のない領域から縦縞パターンを作成し縦縞を除去した。

# 解析方法 (測光)

測光は開口測光を用いた。

対象星のフラックスを標準星のフラックスで割ったものを相対フラックスとした。

アパーチャー半径をFWHMの0.125倍~2.5倍に設定して相対フラックスの標準偏差を求めた。0.5倍の時標準偏差が最小になったが、フラックスは1.0倍の時の50%しかないためアパーチャー半径を1.0倍に設定した。

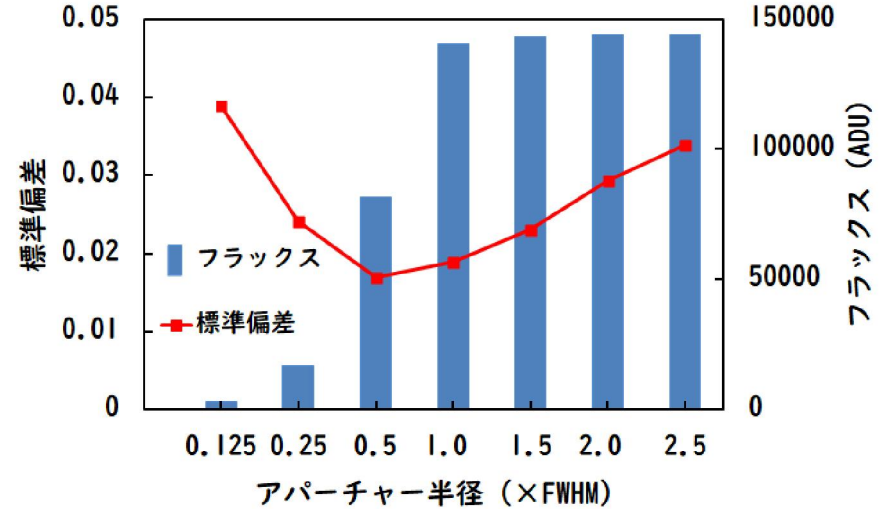


図11 アパーチャー半径の決定

トランジット外の相対フラックスを用いて回帰直線を求めた。

回帰直線の値を1として規格化を行った。

ディザリング観測による位置の依存性を除去した。

トランジット外の相対フラックスをディザリング位置ごとに平均値を求め、対応する同じ位置の画像の相対フラックスを平均値で割った。

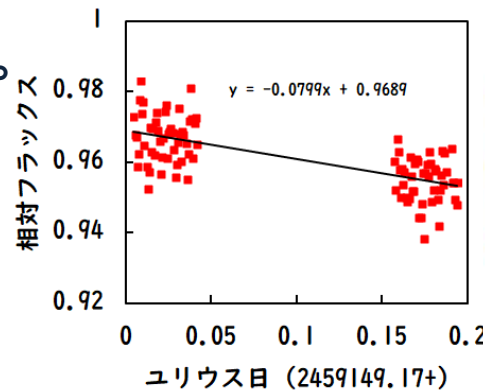


図12 回帰直線

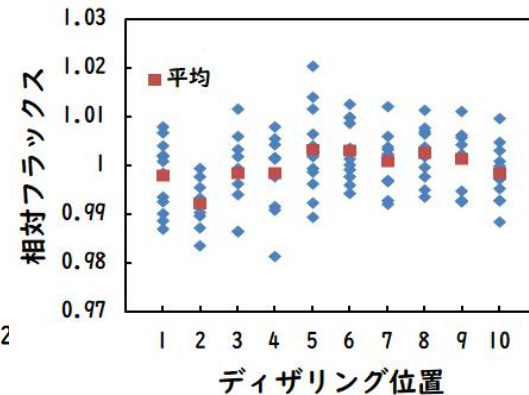


図13 ディザリング位置ごとの相対フラックス



# XO-2N bとK2-45 bの観測結果

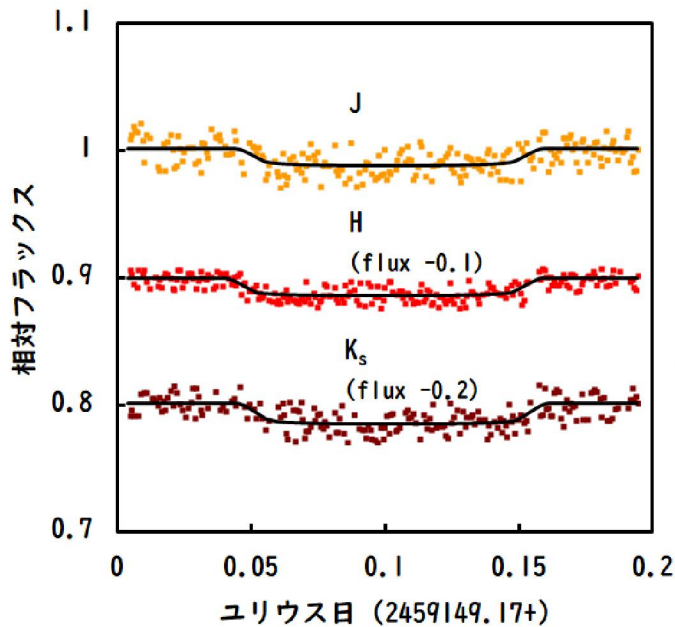


図14 XO-2N光度曲線

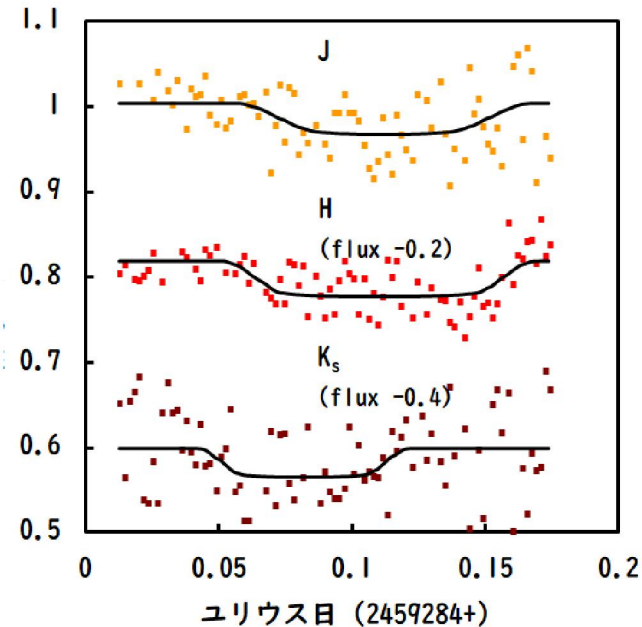


図15 K2-45光度曲線

表1 主星と惑星の半径比

バンド	XO-2N b	K2-45 b
J	$0.1101 \pm 0.0040$	$0.1683 \pm 0.0191$
H	$0.1101 \pm 0.0022$	$0.1813 \pm 0.0137$
K <sub>s</sub>	$0.1200 \pm 0.0033$	$0.1790 \pm 0.0245$
V	$0.1040 \pm 0.0009$ (Torres et al. 2008)	$0.1376 \pm 0.0019$ (Crossfield et al. 2016)

光度曲線の作成にはEXOFASTを用いた。

XO-2N bのJ, Hバンドの半径比は一致し、K<sub>s</sub>バンドのみ大きい半径比を示した。すべてのバンドでVバンドより大きい。

K2-45 bは各バンドでのばらつきが大きく、観測誤差もXO-2N bの4~8倍大きいため、大気の推定はできなかった。

# 大気組成の推定方法

XO-2N bの惑星大気モデルを約200パターン作成した。惑星の大気モデルの作成にはPlanetary Spectrum Generator を用いた。

主星と惑星のパラメータは先行研究で求められたものを初期値として使用した。

また本研究では温度構造と圧力構造は考慮していない。

先行研究で求められた惑星の直径と表面重力を用いて、30種類の分子を100%含む大気モデルをそれぞれ作成した。JバンドとHバンドで同程度、Ksバンドのみ大きな半径比を示した分子は $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ の7種類であった。

観測結果に合うように惑星の直径を0.8~1.2倍、表面重力の値を0.2~1.0倍にして大気モデルを作成した。

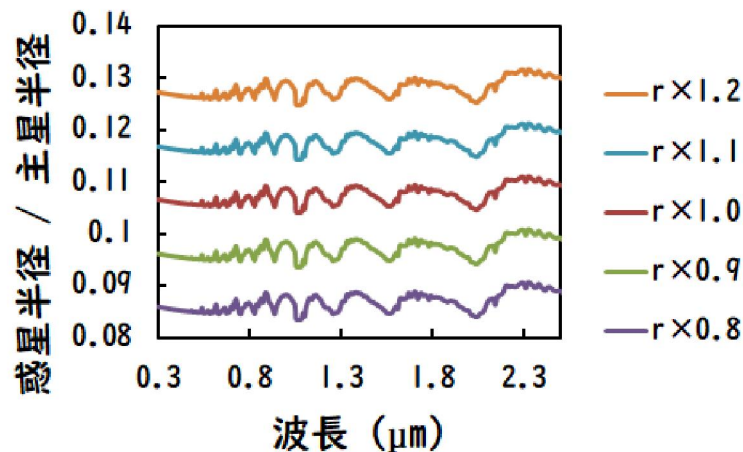


図16 直径の値を変えた時のスペクトルの変化

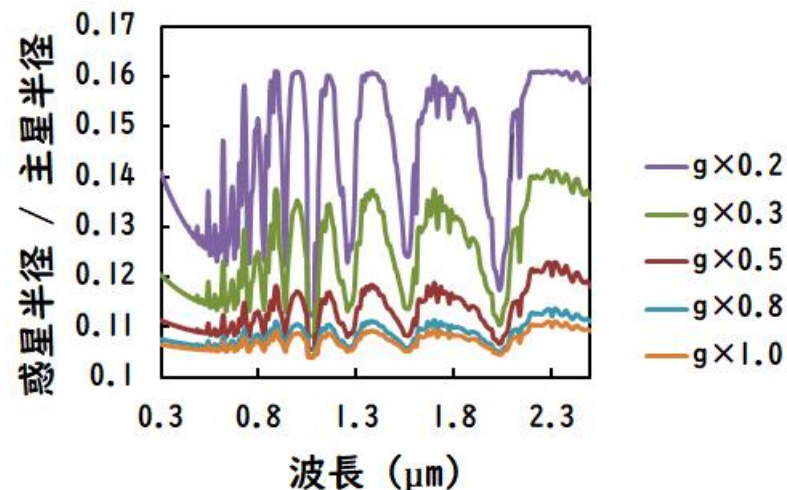


図17 表面重力の値を変えた時のスペクトルの変化

# XO-2N bの大気組成

大気モデルの半径比を各バンドのバンド幅と透過率で補正したものをモデル半径比とし、観測値との比較を行った。

CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>のうち、最も観測値に近い分子はCH<sub>4</sub>であった。

最後にH<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の混合大気モデルを考えた。

H<sub>2</sub>が90%、CH<sub>4</sub>が10%、先行研究に対して直径が0.925倍、表面重力が0.21倍の大気モデルが最もよく合った。

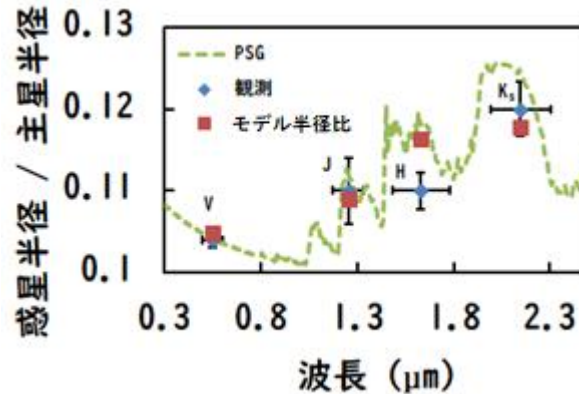


図18 CO<sub>2</sub>の大気スペクトル

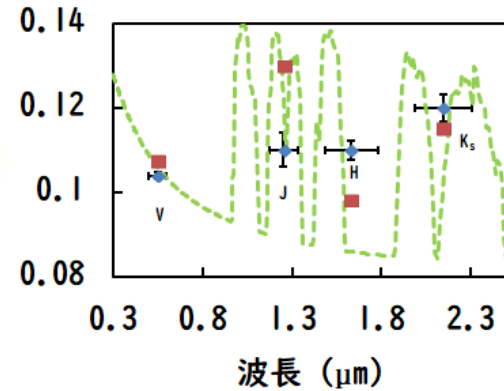


図19 NH<sub>3</sub>の大気スペクトル

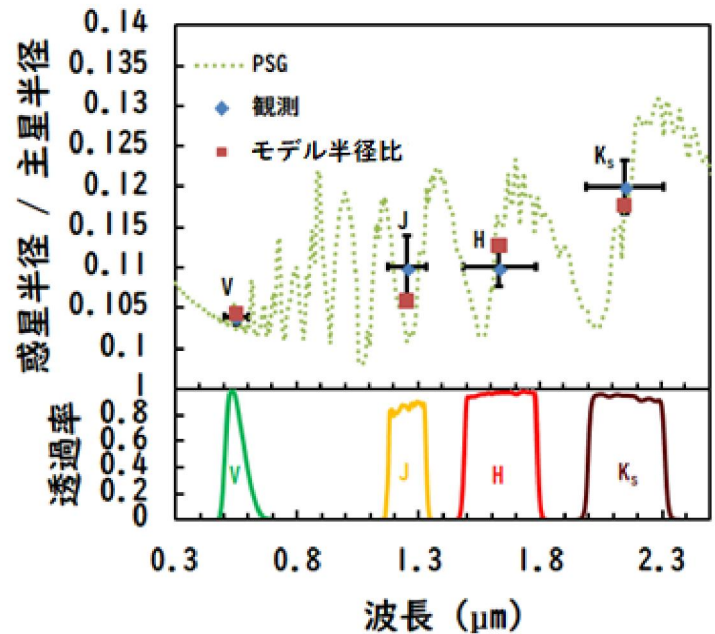


図20 H<sub>2</sub>(90%)とCH<sub>4</sub>(10%)の混合大気モデル

# 今後の観測

---

X0-2N bの大気を推定することができたが、K2-45 bは大気の推定に必要な測光精度を得ることができなかった。これはX0-2Nに比べてK2-45は4等級ほど暗いことが大きな原因である。

本研究は地球サイズの惑星の特徴づけを目標にしているが、なゆた望遠鏡でK2-45のような暗い天体のトランジットを観測するのは難しい。

またこれまで紹介したトランジット測光観測では観測領域の数しか大気組成の推定に必要な惑星半径を得ることはできない。大気組成に強い制限を与えるためには分光観測を行い、複数の波長域で惑星半径を得る必要がある。

現在はK0V, K5V, M0Vと少しずつ小さな恒星の観測を行っているが、今後はJバンドで10等より明るい恒星のトランジット観測をメインに行う必要がある。

# まとめ

---

- 太陽系外惑星の近赤外トランジット観測を行った。
- XO-2N bの半径比はJバンド 0.1101, Hバンド 0.1101, K<sub>s</sub>バンド 0.1200と求めることができた。
- K2-45 bは十分な測光精度を得ることはできなかった。
- 大気モデルと観測値を比較することで、XO-2N bはCH<sub>4</sub>の大気を持つ可能性があることが分かった。H<sub>2</sub>が90%、CH<sub>4</sub>が10%、直径が0.925倍、表面重力が0.21倍の混合大気モデルが最もよく合った。
- 今後の観測はJバンドで10等より明るい恒星のトランジット観測を行う必要がある。