### ハビタブルゾーン 系外惑星の大気観測とHZ地球型惑星への展開 特に、中間赤外領域の可能性について

藤井友香@NAOJ

# CPS seminar / 2020年10月22日(木)





目次

# 系外惑星大気へのさまざまなアプローチ (ホットジュピターHD209458bを例に)



初めて見つかったトランジット・ホットジュピター

• 0.7 M」, 1.9 R」, 0.05 AU, Teff~ 1130 K (主星: GO型, 49 pc)

• 大気についてもっともよく調べられている系外惑星の一つ

Image Credit:NASA https://exoplanets.nasa.gov/resources/297/a-planets-transmission-spectrum/

### 系外惑星大気観測の幕開け



Charbonneau+ (2002) 惑星大気によるNaの吸収 & 雲?

Prediction by Seager & Sasselov (2000)

### 透過光分光



#### Vidal-Madjar+ (2003) HST/STIS, Lyman-α



### Na, H, CO, H<sub>2</sub>O, Fe, He...

Figure 14. Transmission spectrum of HD 209458b derived from HST spectroscopy. Our WFC3 results are the solid points. The open squares are our re-analysis of the STIS bands defined by Knutson et al. (2007b), and the diamond is the narrow sodium band absorption from Charbonneau et al. (2002). The red line is the transmittance spectrum from an isothermal Burrows model, having an extra opacity of gray character and magnitude  $0.012 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ . The red diamond integrates the red model over the sodium bandpass. The blue line is a Dobbs-Dixon model for HD 209458b, with no gray opacity, but with  $\lambda^{-4}$ (Rayleigh) opacity, normalized to magnitude 0.001 cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> at 0.8  $\mu$ m. Because the blue model has no gray opacity, we scale-down the modulation in this spectrum by a factor of three for this comparison (see text). (A color version of this figure is available in the online journal.)

### 透過光分光(1)



### 透過光分光(2):分子吸収線の高分散分光

#### Snellen+ (2010) VLT/CRIRES



Barycentric radial velocity + 14.8 (km s<sup>-1</sup>)





- 高分散分光による軌道速度決定
- 2 km/s のblueshift (~ 0.01–0.1 mbar) → 昼面から夜面への風?

#### Showman+ (2008) with Newtonian cooling $\sigma$



### 透過光分光(2):分子吸収線の高分散分光



- 高分散分光による軌道速度決定

- 2 km/s のblueshift (~ 0.01-0.1 mbar) → 昼面から夜面への風?

### cf) spatially-resolved transmission spectroscopy of HD 189733b



atomic/ion lines





~10<sup>-2</sup>–1 bar



Note: 見ている高度



### Transit, Phase Curves, Eclipse



# Thermal phase curves



#### Showman+ (2009)



→ super-rotationの予言と一致



主星と惑星の光を同時に観測し、 その中の惑星光由来の分光特性を 高分散分光で探す

### 高分散分光による惑星光の検出



→ 3Dモデルと合わせるとsignificance 向上 (e.g., Beltz+ 2020)

2.35



### ホットジュピター大気データの蓄積と 見え始めた統計的な性質 From individual characterization to statistical samples

# Clouds? (Phase curve@Keplerからの示唆)

Parmentier+ (2016)





### **Clouds**? 3000 Temperature (K) (Phase curve@Keplerからの示唆)

Parmentier+ (2016)









#### Keating+ (2019) but see also Beatty+ (2019)



 $\widehat{\boldsymbol{X}}$ 

 $\vdash$ 





### Clouds?(透過光スペクトルからの示唆)

Sing+ (2016)



Muted H<sub>2</sub>O absorption features in some transmission spectra

1.4 μm water band amplitude (H)01010000

Hydrocarbons?



Silicate clouds ?













### より小さな惑星、よりcoolな惑星への展開



### 主星光と惑星光のコントラスト





### HZ惑星 (mini-Neptune? super-Earth?) の透過光スペクトル



# **TRAPPIST-1 planets**の透過光観測



雲のないH<sub>2</sub>-richな大気は 棄却

理論的にも、H<sub>2</sub>を保持し ていないだろうと言われ ている。2次大気は保持で きるかも。

(Stökl+ 2015, Unterborn+ 2018, Hori & Ogihara 2019, Dorn+ 2018, Airapetian+ 2017)







# James Webb Space Telescope への期待



- 大気組成の検出
- ▶ 期待2:中間赤外線領域で、HZ惑星の熱輻射検出? (次スライド)

▶ 期待1: TRAPPIST-1惑星や同等のトランジットHZ惑星の透過光分光による



主星光と惑星光のコントラスト

中間赤外線では、ハビタブル惑星の熱輻射を 恒星光を打ち消すことなく検出できる可能性がある





### Proxima Cen b: フェーズカーブによる大気特徴付け?

Modeled thermal phase curves of Proxima Cen b assuming habitable condition

### 10µm brightness temperature (~thermal emission)



#### Robinson (2011)



Kreidberg, Leob (2016)

bare rock (no heat re-distribution)

atmosphere



inclinationとの縮退

- JWSTのMIRにおける noise floor: 30-50 ppm?

- さらに長期の観測だとトレンドが載る(基準なしで補正難しい)



# Proxima Cen b: 中分散分光を用いた吸収線検出?



### 中間赤外線領域の晩期型星のスペクトル



YF & Matsuo under review

晩期型星の中間赤外線領域のスペクトルにはさまざま な吸収線が入り、(非トランジット系では)それらを 100 ppm以下の精度で決めるのは難しい

(私たちはいつも惑星と主星を合わせたスペクトルを 観測する)

主星-惑星をスペクトル上で分離するには、 公転速度によるドップラーシフトが十分分解できる R >~ 10000 でないと厳しい



# Ref) 恒星スペクトルモデル の不定性

TRAPPIST-1の近赤外スペクトルを いくつかの温度の理論スペクトルで説明 (黒点/白斑を考慮) => poor fit

Zhang+2018, Wakeford+ 2019



- ▶ JWSTでは、TRAPPIST-1のような、太陽 ル惑星の透過光分光観測が期待される。
  - そのようなターゲットは今のところ1つ(今後も探査は続く e.g., exo-Jasmine)
- ▶ 他の可能性:TMTなどの地上大型望遠鏡による高コントラスト+高分散観測
  - Proxima Cen bが良いターゲット。それ以上はInner working angle次第。反射光を見る。
- ▶ それぞれに challenging。
- もう少し先へ向けてハビタブル惑星の観測をキーサイエンスとしたミッションが検討中
   幅広くいろいろな観測の可能性を考えておく(装置の設計にも理論モデルにも影響)

### ▶ JWSTでは、TRAPPIST-1のような、太陽近傍の<u>超晩期型星周り</u>の<u>トランジット</u>ハビタブ

# 中間赤外線高分散分光を用いた HZ地球型惑星大気観測の検討

### <u>考えられるメリット</u>

- (中間赤外)大気分子の吸収が強い
- (中間赤外)温度・半径の情報
- (高分散)吸収バンドがオーバーラップした分子でもロバストに検出できる
- 可能性がある





▶ (高分散) たくさんのシャープな線によって、装置の系統誤差が大きくても検出できる

大気モデルと高分散スペクトル

- ▶ 地球の混合率を仮定
- ▶<br />
  温度構造は右図のように単純化

▶ 雲なし

- ▶ 水平方向の依存性は考慮せず
- ▶ ライン: HITRAN2016
- ▶ 散乱無し
- ▶ 計算にはGoogle colabのGPUを使用





YF & Matsuo, under review

### **Examples of high-resolution planetary spectra in MIR**



YF & Matsuo, under review

36





観測者









### 観測シミュレーションの設定

- ・ 恒星スペクトル: BT-Settl (Allard+2012)
- ▶ ノイズ:恒星光ノイズ、Bose factor, 黄道光 ノイズ, readout noise, dark current

- ▶ 波長分解能R=30,000
- ▶ 口径 6.5 meter (スケーリング可能)
- ▶ end-to-endの透過率: 0.2
- ▶ 系統誤差なし(あとで議論)

### ターゲット星のプロパティ

description	mid-M	late-M
star radius $(R_{\star})$	$0.14~R_{\odot}$	$0.10R_{\odot}$
star temperature $(T_{\star})$	$3000 \mathrm{K}$	$2500 \mathrm{K}$
planet/star flux ratio <sup>a</sup>	$\sim 70~{ m ppm}$	$\sim 200 \text{ ppm}$
planet orbital radius	$0.0485  \mathrm{au}$	0.0146 au
planet orbital period	11.26  days	$2.27 \mathrm{~days}$
planet orbital velocity	$46.83 \mathrm{~km/s}$	$69.70 \mathrm{~km/s}$

### 観測条件

description	symbol	value
spectral resolution	${\cal R}$	30,000
telescope diameter	D	$6.5 \mathrm{m}$
total throughput	ξ	0.2
distance to target	d	$5~{ m pc}$
planetary radius	$R_{ m p}$	$R_{\oplus}(=6.371 \times 10^6 \text{ m})$
exposure time	$ au_{ m exp}$	$1800  \sec$



正解

より現実的な場合(右)では 3倍程度時間がかかる

## Thermal inversion

さまざまな分子種



Thermal inversion入りモデル



### 68.3% 95.5%



CO<sub>2</sub>のみ考慮, 主星が5pcのlate-Mの場合



- 成層圏温度が高くなるとfeatureの深さは減少。
- ただし、Thermal inversionはシャープな輝線を形成するため、検出に有利に はたらく。軌道傾斜角も決まりやすい。



Ref) 恒星スペクトルのvariability



K2 (0.43-0.89µm) と Spitzer (4.5µm) によるTRAPPIST-1の時間変動のデータ

Morris+ (2018)



### HZの付近に地球サイズ惑星の存在が検出されている恒星

※恒星パラメータはGaidos+2014に基づく

	距離	Sp	恒星 有効温度	惑星	惑星質量 [M <sub>e</sub> ]
Proxima Cen	1.3 pc	M7	2883 K	b	>1.17
<b>Ross 128</b>	3.4 pc	M5	3145 K	b	>1.35
Gliese 1061	3.7 pc	M6	3000 K	d	>1.7
Lyten's star	3.8 pc	M4	3317 K	b	>2.89
Teegarden's star	3.9 pc	M7	2700 K	b	>1.05
				С	>1.11
GJ 682 b	5.1 pc	M5	3190 K	С	>4.4

### 太陽近傍の低質量星

その他のものも含めると、 5 pc以内に late-M (M6 or later) 7個 mid-M (M3-M5) 10個 (Gaidos+ 2014)

ターゲットごとの見積もり

▶ ざっくりしたスケーリング

惑星半径 積分時間 距離

Proxima Cen b (1.3 pc, 主星M5, 1.1R<sub>e</sub>) の場合 6.5m望遠鏡では、<1 days 2.5m望遠鏡で透過率0.1では、~10 days

望遠鏡の系統誤差を<100ppmに抑えることができれば、 6.5 m望遠鏡では5pc以内程度の天体の中間赤外における最も強いラインの検出可能性あり。 (2.5 m望遠鏡では少し厳しい。がんばってProxima Cen bのみ。)



Teegarden b (3.86 pc, 主星M7, 1R<sub>e</sub>) の場合 6.5m望遠鏡では、~3 days 2.5m望遠鏡透過率0.1では、~45 days

#### 0.1 µm

#### 1.0 µm

#### 高層大気 分子の吸収

#### 反射スペクトル



TMT 近傍のM型星周りの ハビタブル惑星



#### 10 µm

#### 分子の吸収

# <image>

#### 熱輻射 (温度構造)

JWST 透過光分光 惑星食分光

太陽型星周りの ハビタブル惑星



OST 透過光分光 惑星食分光 近傍のM型星周りの ハビタブル惑星

波長

### まとめ

▶ 恒星と惑星を同時に観測した中から惑星光を取り出すさまざまな手法や多波長観測を用 いて、系外惑星大気の多角的な特徴付けが進行中

- トランジットや食の利用、フェーズカーブ、高分散分光
- 可視vs中間赤外
- ▶ 木星型惑星の大気については、サンプルが蓄積し、一部で統計的な議論が可能に
  - 雲についての示唆など
- ▶ HZの地球型惑星大気までもう一声
- 星の光を打ち消す装置なく検出できる可能性がある

▶ 中間赤外線を利用したHZ惑星の熱輻射とその中の分子の検出は、晩期型星の周りでは主