

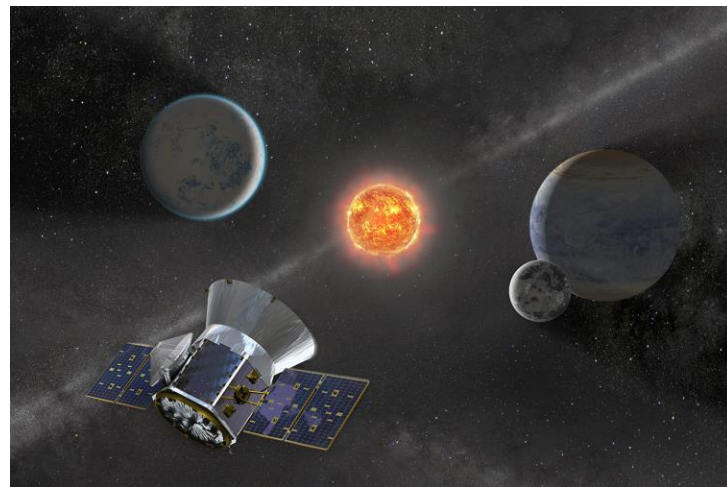
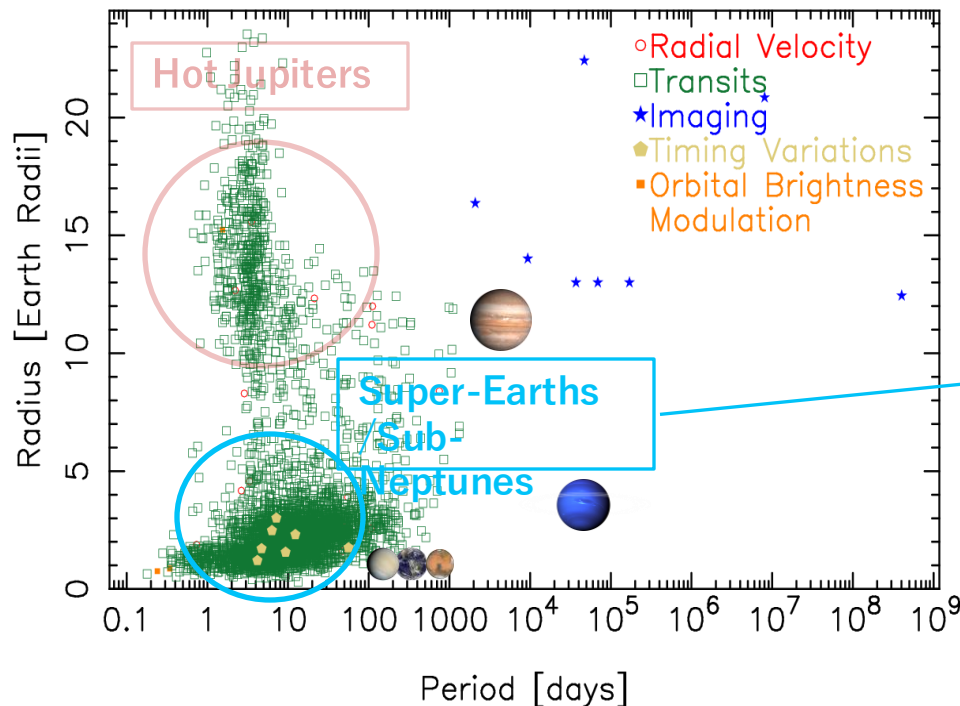
Helium Transmission Spectroscopy of a transiting planet on  
the boundary of super- Earths and sub-Neptunes  
スーパーアースとサブネプチューンの境界にあるトランジット  
惑星に対するヘリウム透過光分光観測

広域科学専攻・広域システム科学系  
鄒宇傑

# Intro:惑星全体分布

## 半径一周期分布

22 Dec 2022  
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

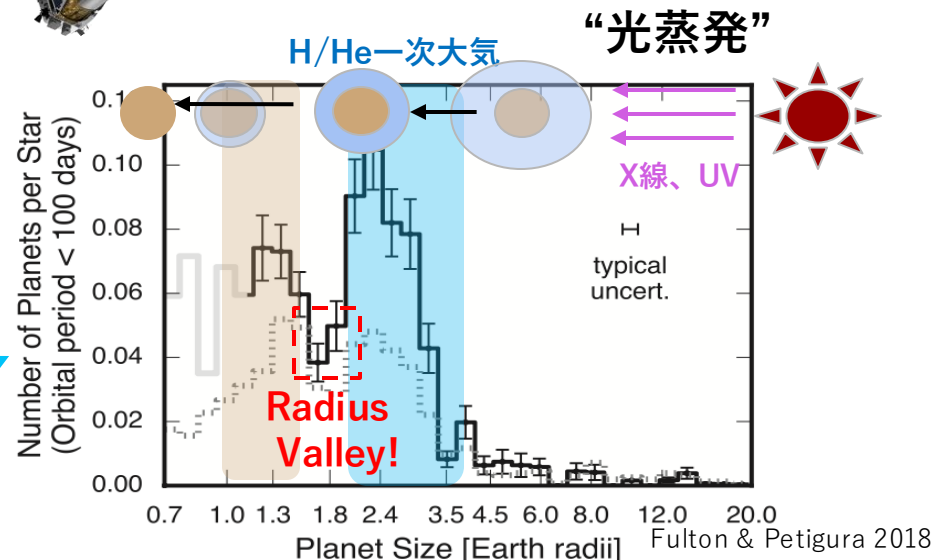
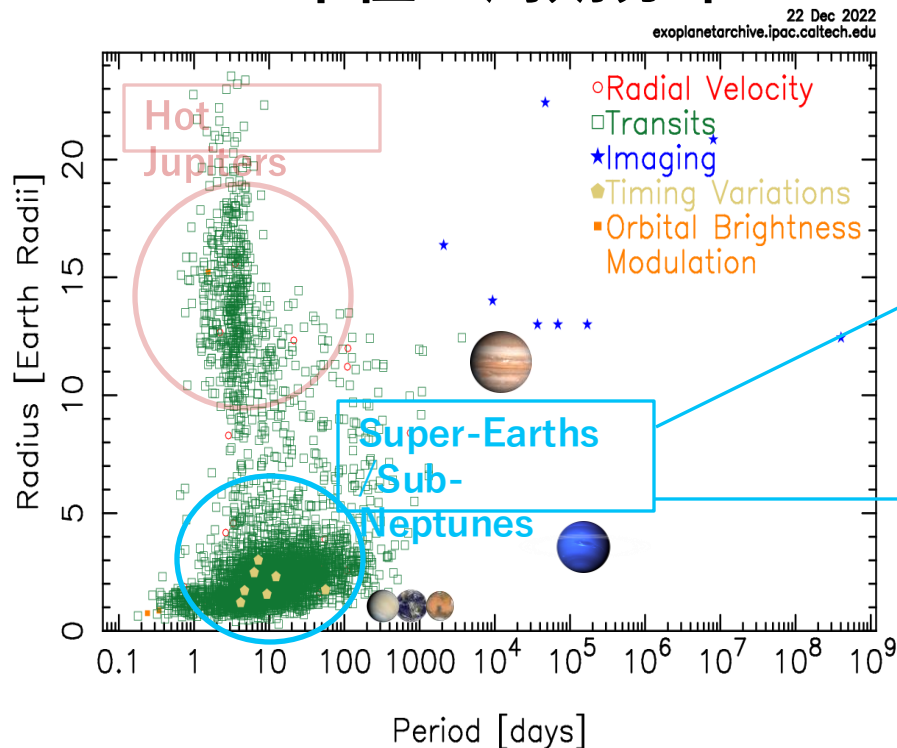


@NASA/TESS

□ Kepler(2009年~)やTESS(2018年~)により見つかった4倍地球半径( $R_{\oplus}$ )以下の惑星が圧倒的に増えた

# Intro:惑星全体分布

## 半径一周期分布

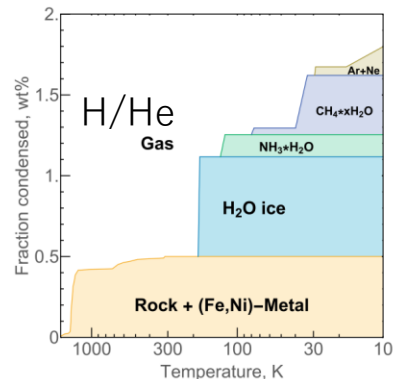


疑問1: 大気の有無の具体的な境目はどこか?  
疑問2: 大気の進化により今後は変わる(ノ余命)のか?

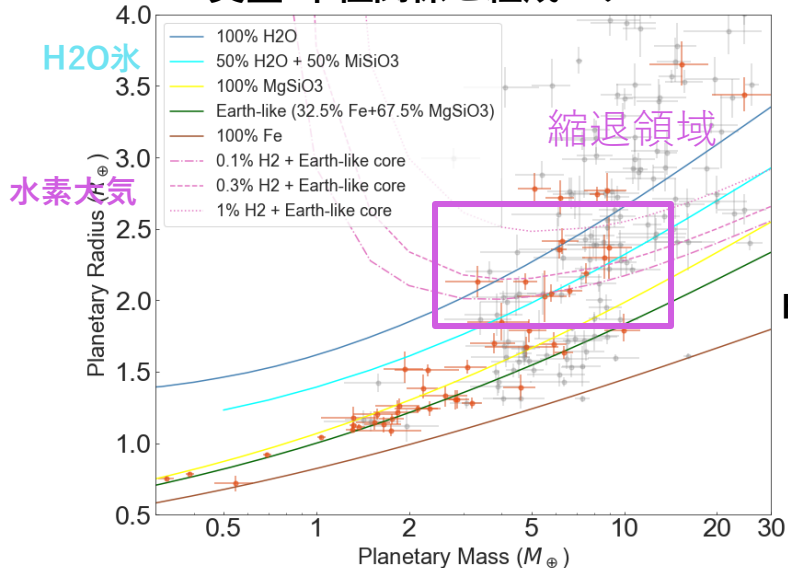
→future

# Intro: 大気組成の縮退

原始惑星円盤中の材料  
(太陽like) Zeng+2019



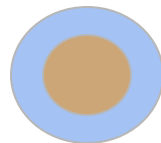
## 質量-半径関係と組成モデル



H<sub>2</sub>O氷

水素大気

縮退領域



H/He一次大気+岩石コア(主流)

→ H/He大気の光蒸発



50%, 100% H<sub>2</sub>O氷

→ 氷/超臨界H<sub>2</sub>Oの光分離 → 散逸  
Mousis+2020

□ H/He大気の有無はM-R関係から一意に決まらない

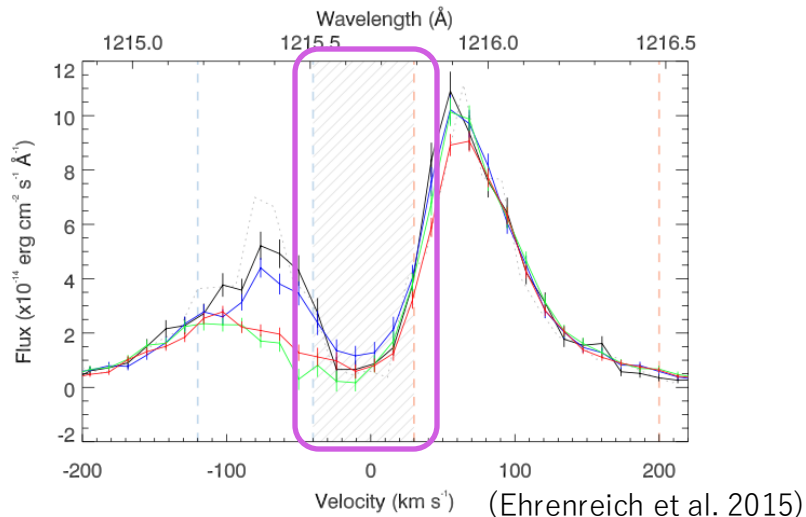
疑問3: sub-Neptunesの組成の多様性の原因は何か?

→ 直接He大気の観測を!

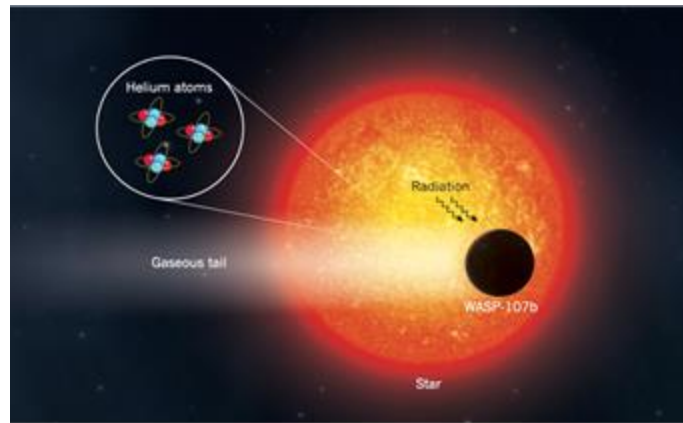
Models from Zeng+2019

# Intro – ヘリウム triplet 吸収線

Ly  $\alpha$  吸収線 (紫外域)



He triplet 10830Å 吸収線 (近赤外域)

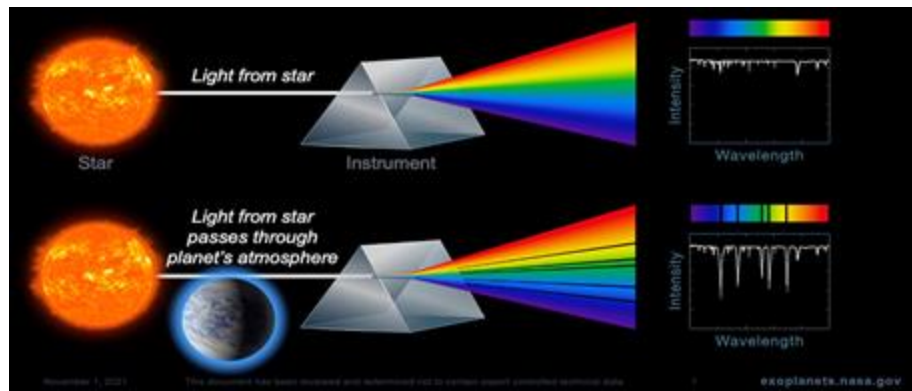


<https://www.nature.com/articles/d41586-018-04969-6>

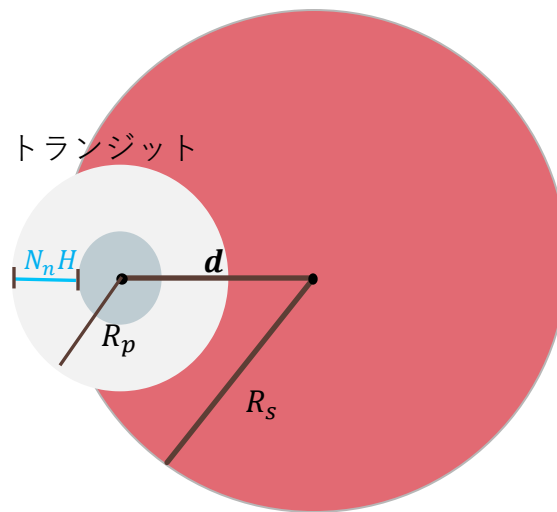
メリット & 観測できること

- ❑ 特に高層大気 of 散逸の検出に有力、宇宙観測がメイン
- ❑ 星間物質吸収によって Ly  $\alpha$  吸収線の特徴が妨害される
- ❑ 星間物質吸収されない、地上(高分散)観測できる
- ❑ 原始惑星円盤(He一次大気)と二次大気を区別できる

# Intro: 透過光分光



@NASA/JPL-Caltech

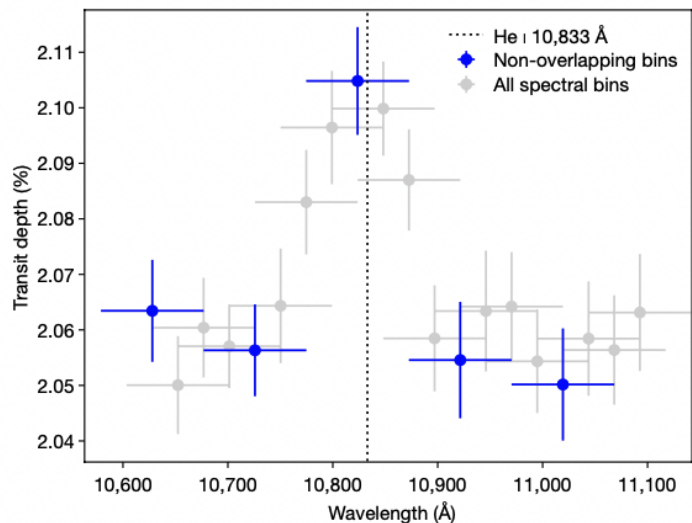


□ 恒星をトランジットする際、恒星の光が惑星大気を貫く際による、追加吸収

□ 恒星の射影面積中、惑星大気(円環)に隠された分から、特徴的追加吸収深さを求められる

# Intro: He triplet先行研究

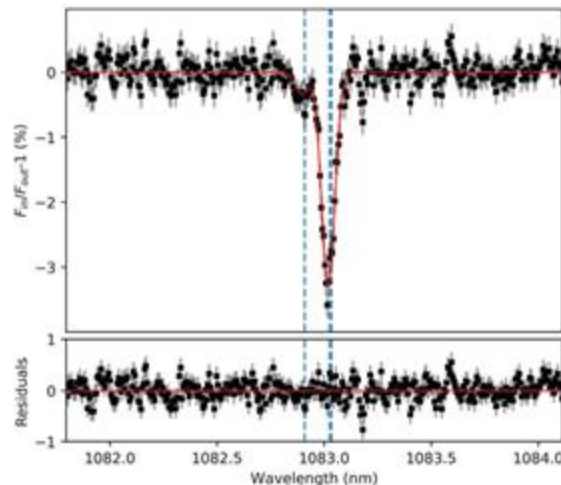
- 最初のHe検出は巨大惑星WASP-107bで  
宇宙望遠鏡(低分散)による (Spake et al. 2018)



Spake et al., 2018

- 地上観測で高分散分光でより細かく、巨大惑星 WASP-69bのヘリウム検出が行われた (Nortman et al., 2018)

WASP-69b He I 吸収線



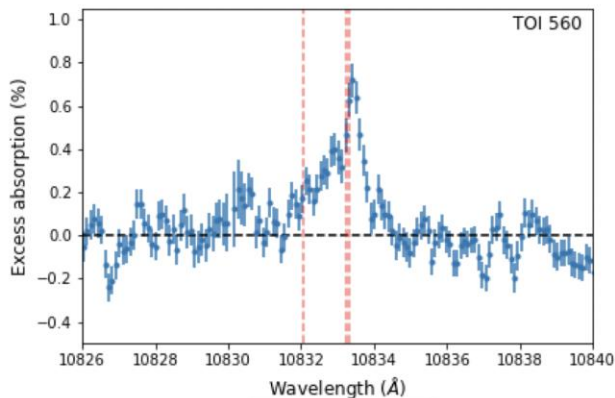
Nortman et al., 2018

- Heの検出は19例(暫定含み) Dos Santos (2022)、2021年までsub-Neptunesを狙った (Kasper et al., 2020, NIERSPEC分光器)検出はなかった。

# Intro: He triplet 先行研究-sub-Neptunes

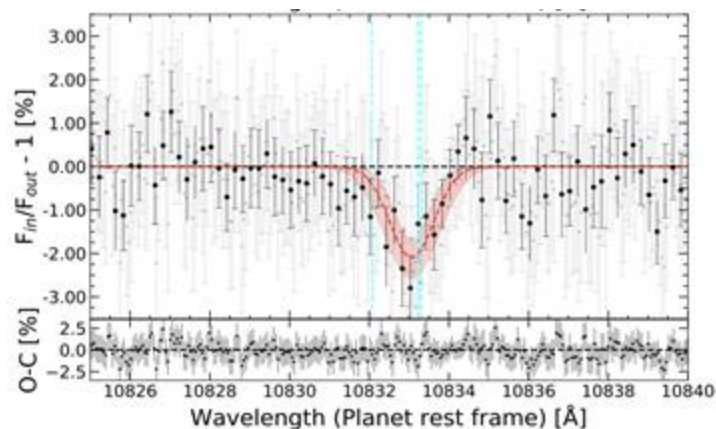
- ❑ 去年: 4つのK 型星周りの sub-Neptunes TOI 560b、TOI1430.01、TOI 2076b, TOI 1683.01 で検出 (Zhang+2022)
- ❑ M型星周りでは一つだけ(暫定な検出?) (Orell-Miquel et al. (2022))
- ❑ 理論: He tripletの生成は、K型星周りの惑星が一番理想、M型星周りは2番目で、triplet生成は短周期惑星が理想 (Oklopčić 2019)

TOI 560b He triplet 吸収線



Zhang+2022 a, b

GJ1214b He triplet 吸収線



Orell-Miquel et al., 2022



# Intro-研究の目的

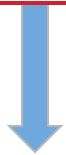
疑問1: 岩石のみと大気持ちの惑星を分ける具体的な境界はどこか？

疑問2: 大気の進化により今後は変わるのか、大気余命はどれくらいか？→future

疑問3: sub-Neptunesの組成の多様性のメカニズムは？

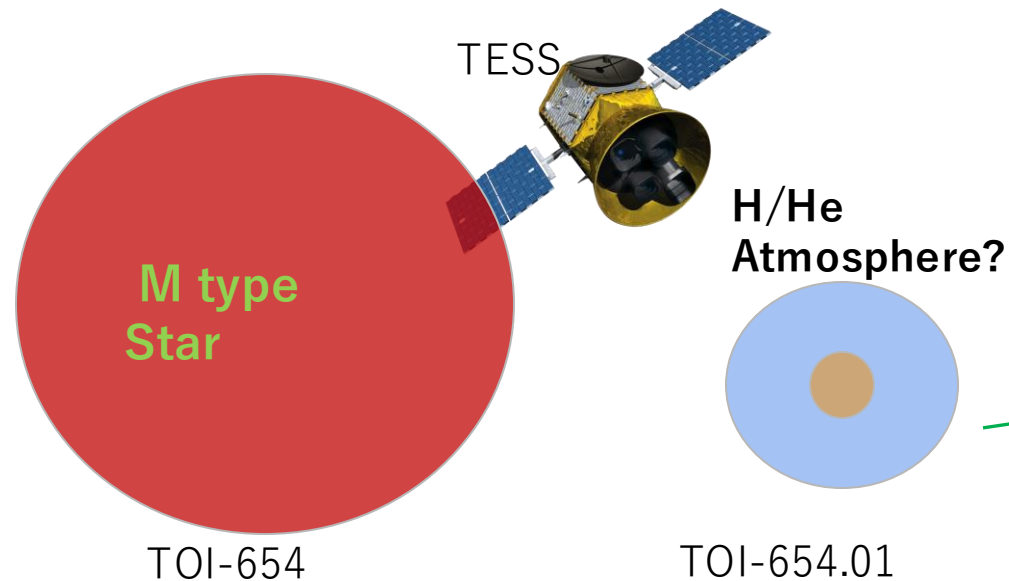
## 今回の研究の焦点

Radius Valleyの少し上端にあるsub-NeptuneがHe一次大気を持つか(1)?  
組成由来のメカニズムはどちらか(3)?  
を高分散分光で詳しく調べたい



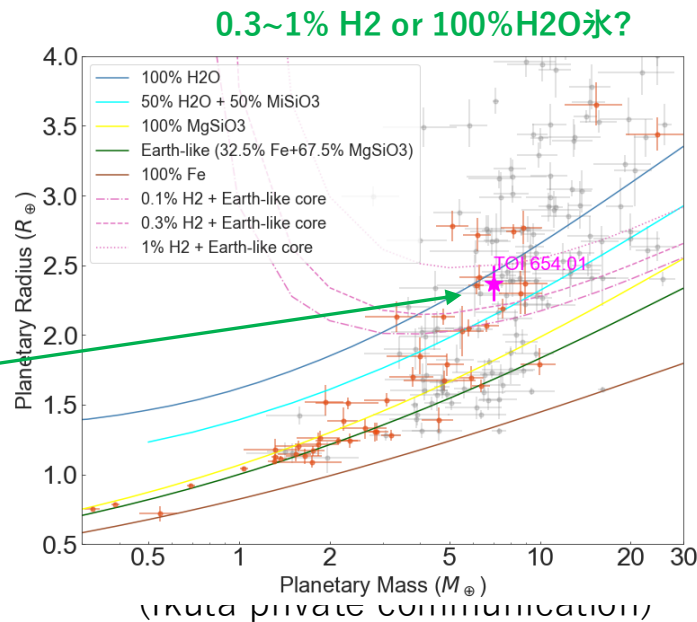
TOI654.01をSubaru/IRDで観測!

# Intro-Target: TOI-654 planetary system



$T \sim 3424\text{K}$   
 $R \sim 0.43 R_{\text{sun}}$   
 $M \sim 0.42 M_{\text{sun}}$

$P \sim 1.53 \text{ days}$   
 $R \sim 2.37 \pm 0.13 R_{\text{earth}}$   
 (Valley上端)  
 $M \sim 7 M_{\text{earth}}$



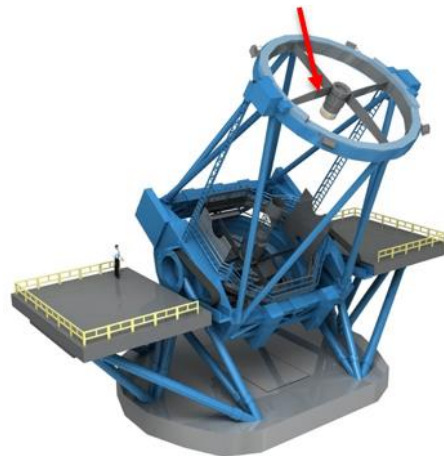
$P \sim 95 \text{ days}$   
 $M_{\text{ini}} \sim 0.15 M_{\text{Jupiter}}$

# 観測: Subaru/IRD Intensive

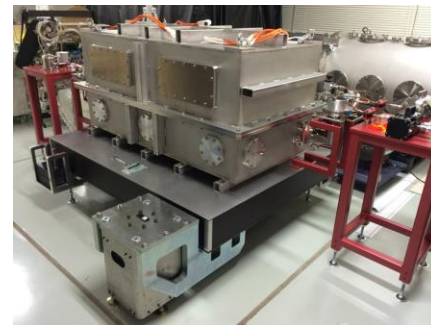


- ◆ 口径8.2m 望遠鏡

すばる 望遠鏡



IRD(赤外線ドップラー装置)



@NAOJ

- ◆ IRD: Resolution  $R \sim 70,000$   
(He回りの分解速度  $\Delta v \sim 4.27 \text{ km/s}$ )
- ◆ YJバンド(1000nm付近)使用

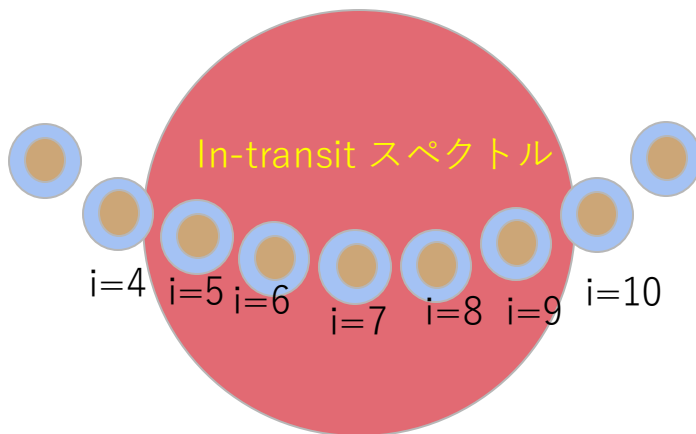
Kotani et al., 2018

# 観測: Subaru/IRD Intensive

## 観測データ

合計16枚、振り分け番号  $i=0,1,2,\dots,15$

観測日時: 2021-01-28 01:59 ~ 04:57 HST 露光時間 : 600 s	
In-transit スペクトル	out-of-transit スペクトル
02:50 ~ 03:44 5枚 ( $i=5 \sim 9$ )	01:59 ~ 02:40 4枚 ( $i=0 \sim 3$ ) 03:55 ~ 04:57 5枚 ( $i=11 \sim 15$ )



その中で一部掠っているだけのもの( $i=4,10$ )  
はin/out-of-transitスペクトルに数えない

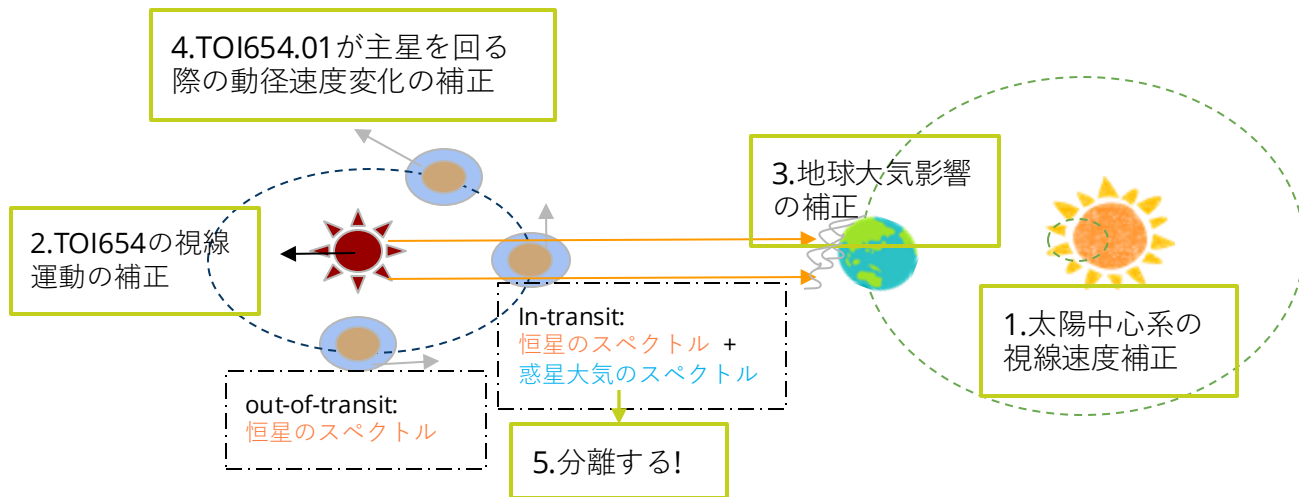
# 解析の概観

## TOI654.01の惑星大気の情報を知りたい!

しかし... 観測したスペクトルに、  
天体の運動による視線速度変化 + 地球大気変動の情報 + 恒星の吸収 が入っている

順番的に:

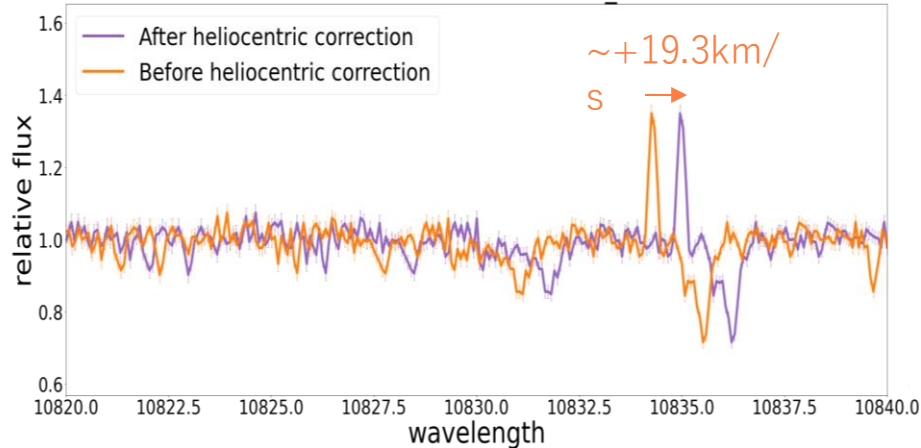
1. 太陽中心系の視線速度補正
2. TOI654の奥行き視線運動の補正
3. 地球大気影響の補正
4. TOI654.01の動径速度変化の補正
5. 惑星大気スペクトルを分離する



# 解析1と2: 太陽中心系、恒星系視線速度補正

太陽中心系補正結果 一例

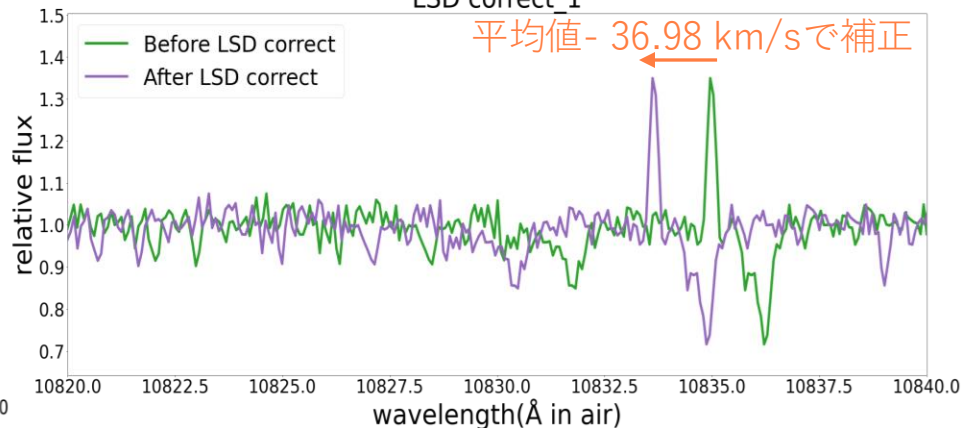
Heliocentric Correction\_1



- ☐ TOI654.01のHeliocentric correction velocity:  
e.g. +19.3km/sを使って赤方偏移で補正

恒星自身の視線方向運動の補正結果 一例

LSD correct\_1



- ☐ Least Square Deconvolution(LSD)法を使用した  
(e.g. Kochukhov+2010)

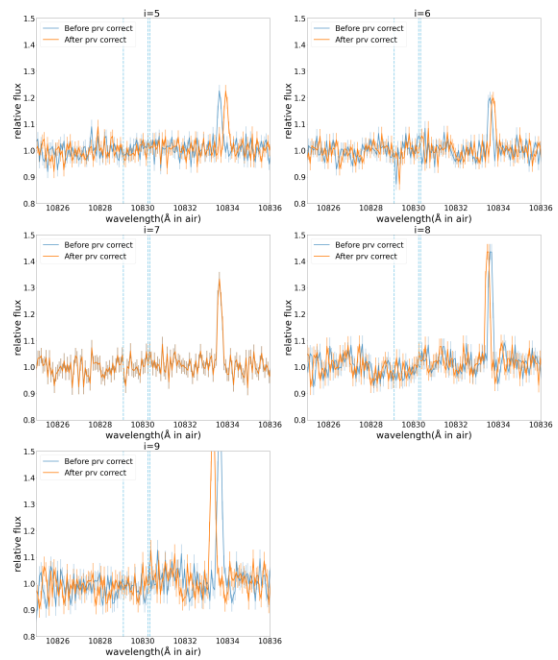
# 解析4と5:分離する/透過光スペクトルの作成

$$\mathfrak{R}'(\lambda) = \mathfrak{R}(\lambda) - 1 = \frac{\mathcal{F}_{in}}{\mathcal{F}_{out}} - 1 = \sum_{in} \frac{F_{in}(\lambda)}{\sum_{out} F_{out}(\lambda)} \Bigg|_{\text{Planet RV shift}} - 1. \quad (3.5)$$

## 4.惑星動径速度変化を補正

in-transitスペクトル  $F_{in}(\lambda)$ 使用

-8.29km/s ~ 8.79km/s で補正



## 5.恒星スペクトルを取り除く

恒星スペクトル  $\sum_{out} F_{out}(\lambda)$   
(out-of-transitスペクトルで作成)

