

系外惑星大気の観測手法と 将来計画の展望

国立天文台 光赤外研究部
太陽系外惑星探査プロジェクト室
成田憲保

内容

◆ 系外惑星の発見方法と現状

- 発見方法と求まるパラメータ
- どんな惑星が見つかったか・見つかるか

◆ 系外惑星大気の観測手法

- 観測手法とそれぞれの特徴

◆ 今後の展望と期待

- 将来計画
- 観測側から期待される理論研究

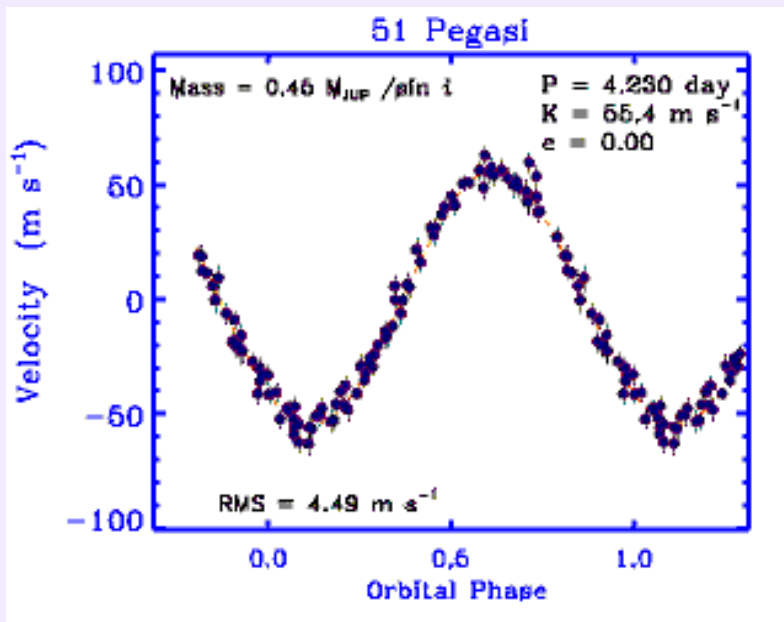
これまでの系外惑星の発見方法

- ◆ 視線速度法
- ◆ トランジット法
- ◆ 直接撮像法
- ◆ アstrometry法
- ◆ 重力レンズ法

視線速度法

主星のまわりを公転する惑星の存在により、
主星がその共通重心の周りをケプラー運動する。

そのため、**主星の視線速度に周期的なドップラーシフト**が現れる。



California & Carnegie Planet Search Team

直接観測量は視線速度の時間変化

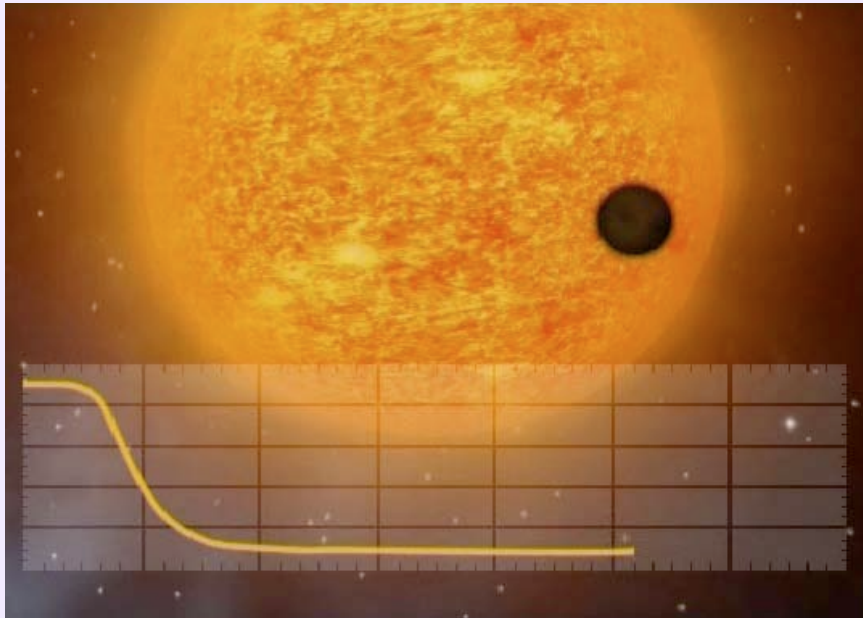


求まるパラメータ

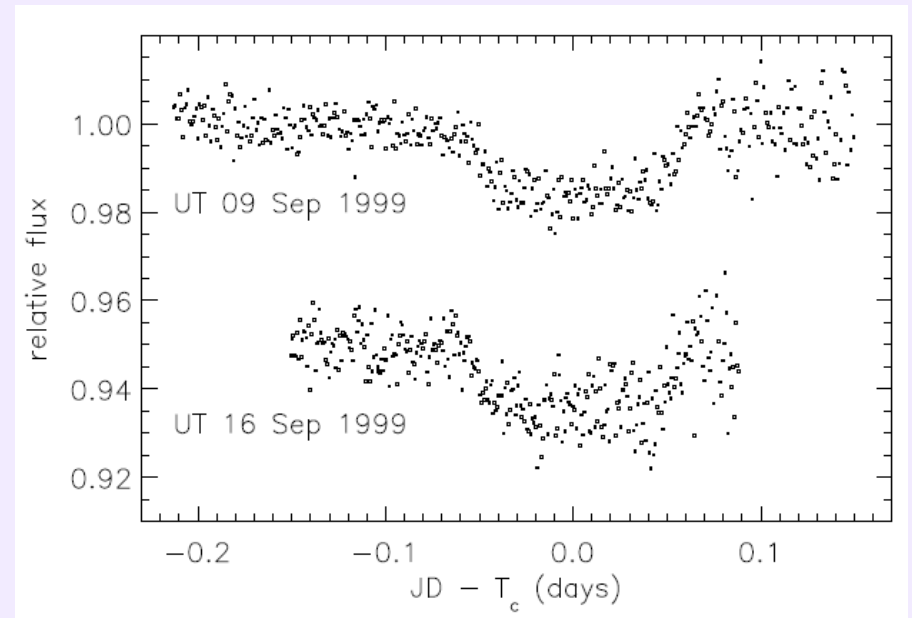
- 質量の下限値 $M_p \sin i$
- 離心率 e
- 公転周期 P
- 軌道長半径 a

トランジット法

系外惑星の軌道が太陽系から見てたまたま主星の前を通過する場合、
惑星の公転周期に同期した主星の減光が観測される。



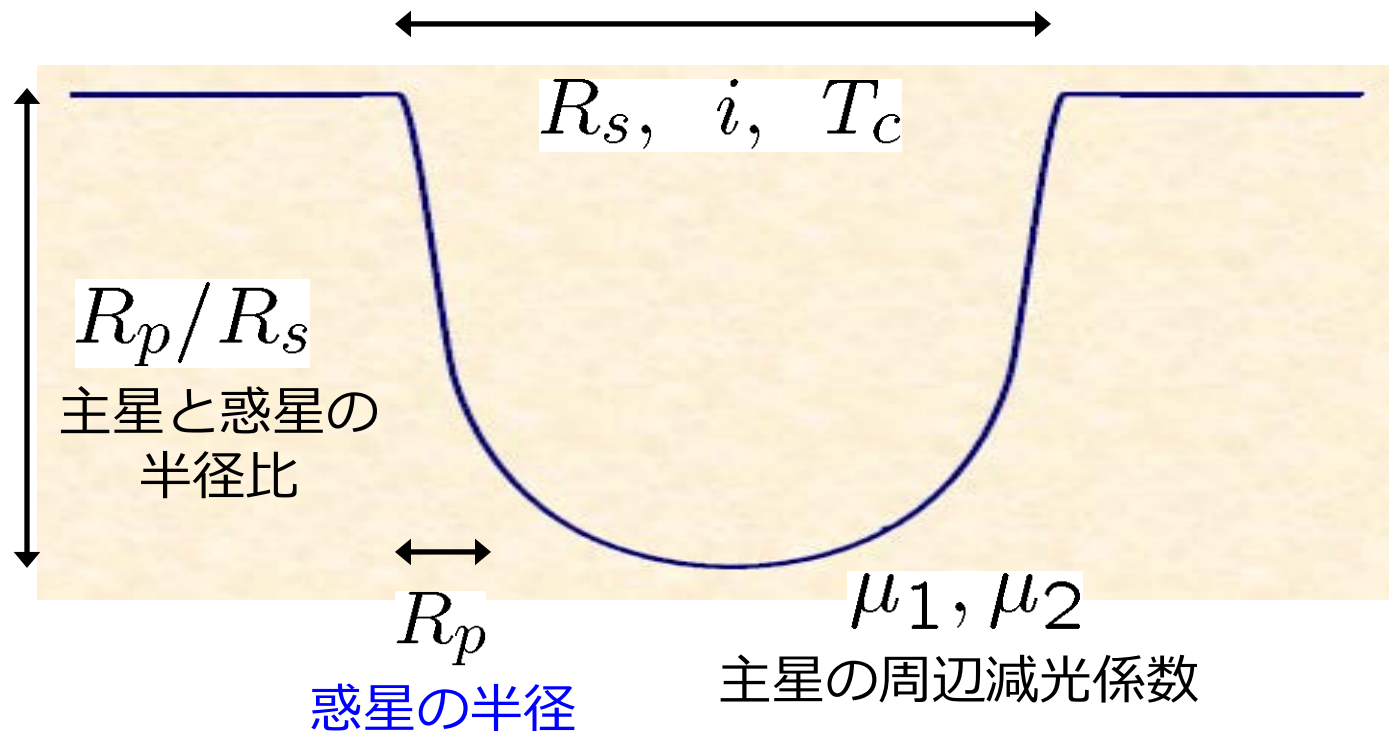
系外惑星による恒星の食
(空間的には分解できない)



Charbonneau et al. (2000)
HD209458bの発見

トランジットからわかること

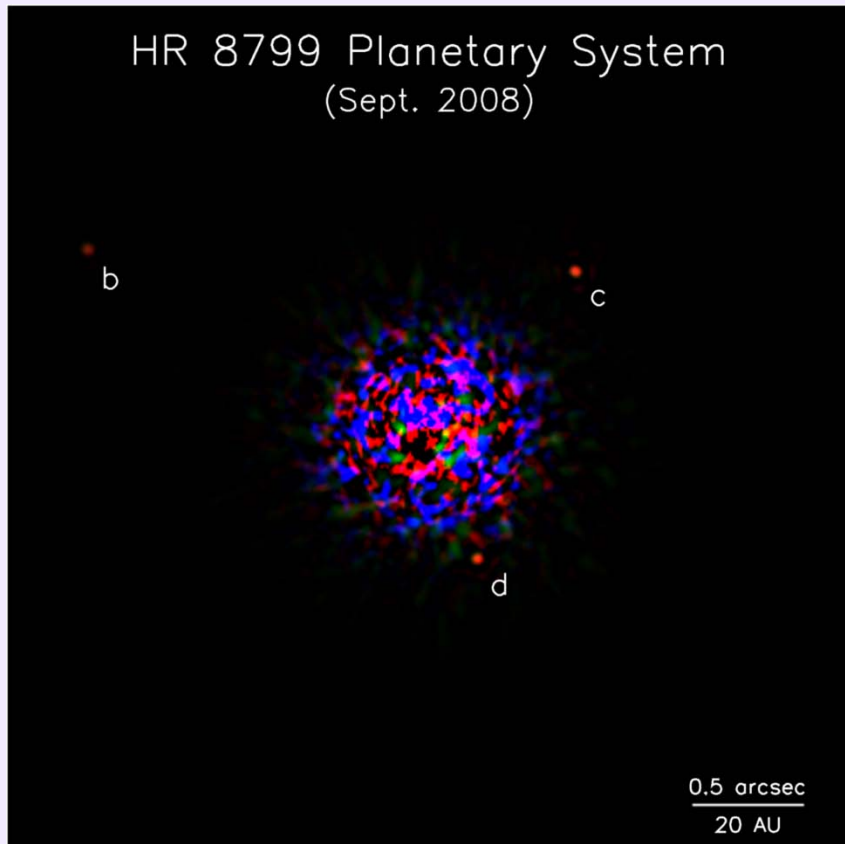
主星の半径, 軌道傾斜角, トランジット中心時刻



Mandel & Agol (2002), Gimenez (2006), Ohta et al. (2009)

直接撮像法

コロナグラフ等を用いて主星の光を低減し、
外側にある惑星からの光を検出する。

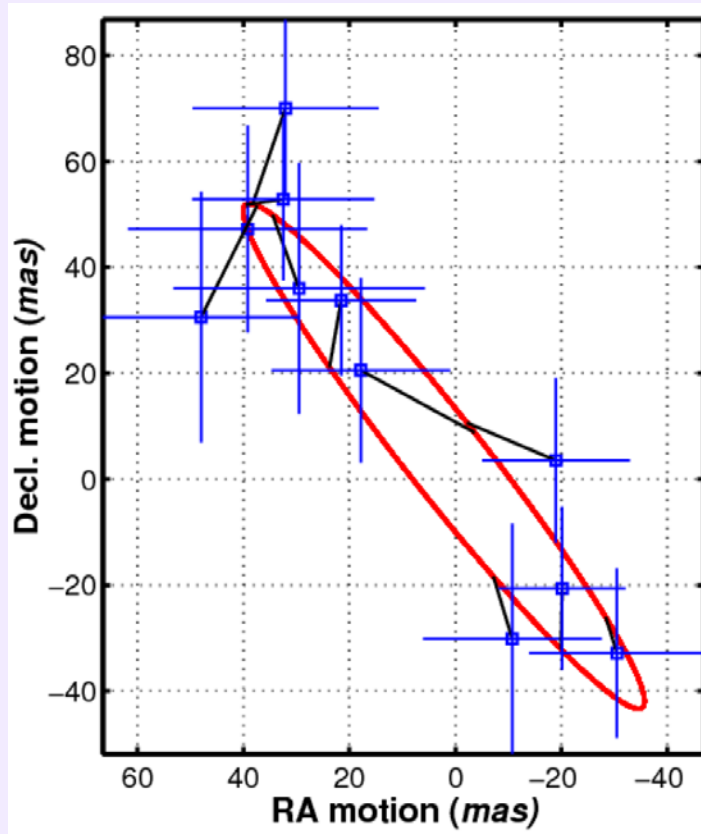


求まるパラメータ

- 中心星からの離角(奥行きはわからない)
- 惑星の明るさからモデルを介して質量が推定できる
- 観測波長ごとの測光観測でおおまかなスペクトルが推定できる

アストロメトリ法

高精度な恒星の位置決定を行うことで、
恒星の天球面上での動き(ケプラー運動)から惑星の存在を探す。

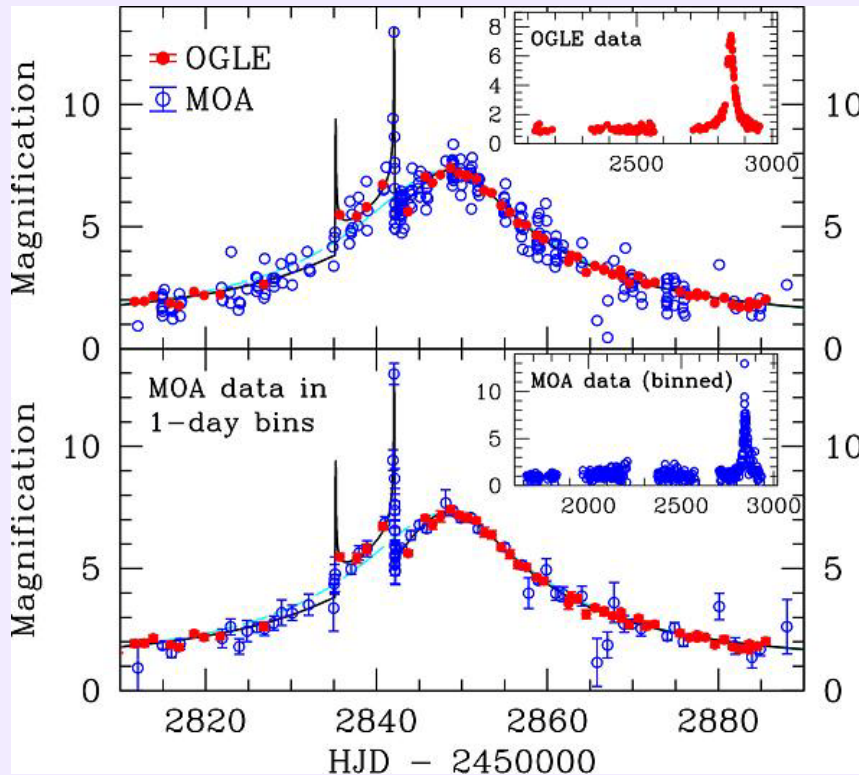


求まるパラメータ

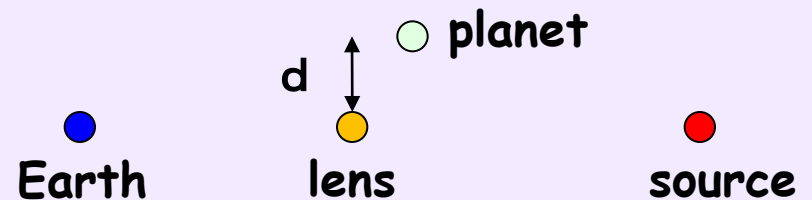
- 惑星質量の下限值(視線速度法と相補的)
- 天球面上での惑星の位置
- 地上からの観測では難しいものの、2015年以降にSIM Lite (宇宙干渉計による惑星探査) 計画が予定されている

重力レンズ法

一般相対論による重力レンズ効果を利用して、
重力レンズを引き起こした恒星に付随した惑星を探す。



重力レンズイベントの光度変化



求まるパラメータ

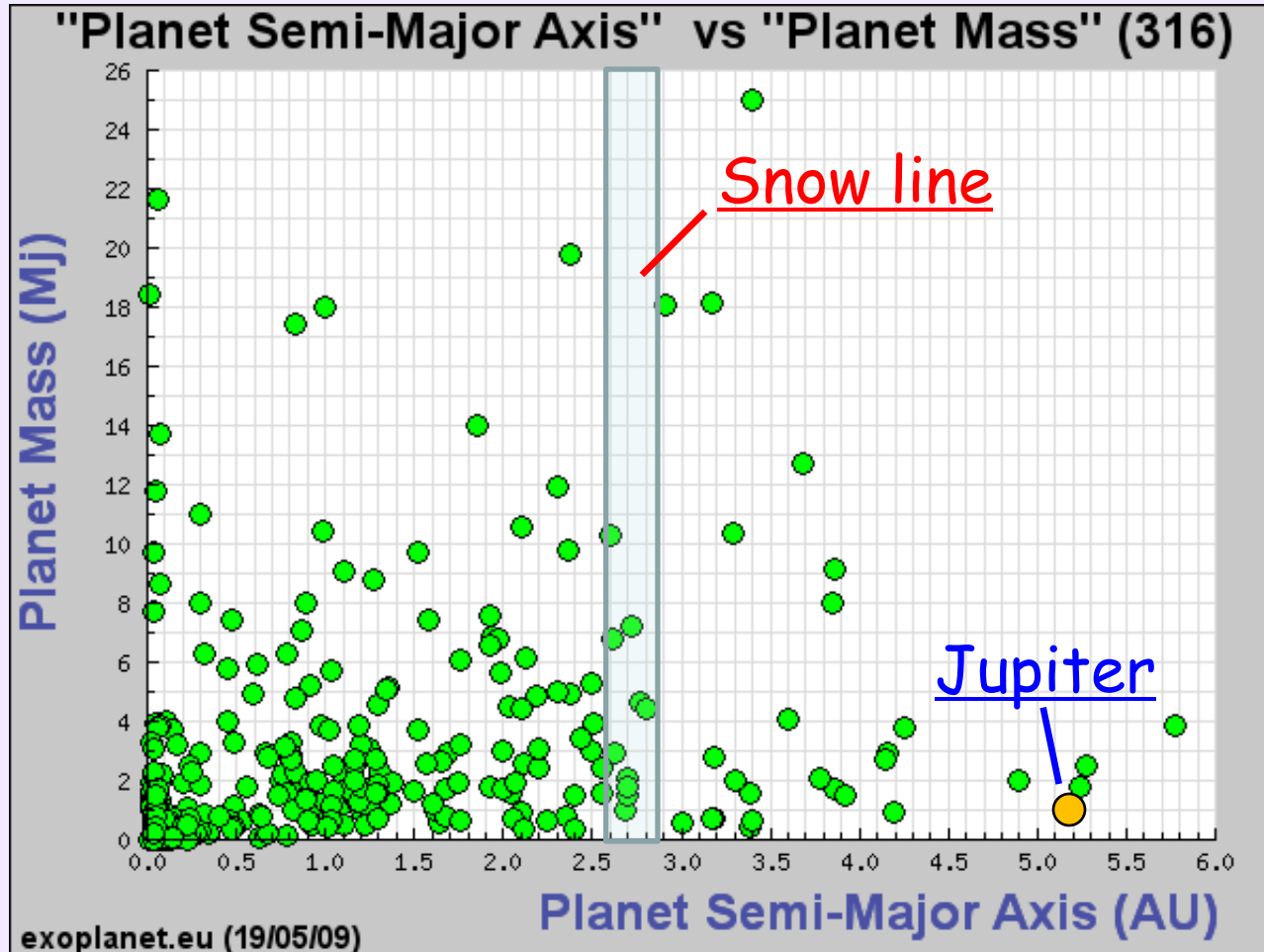
- 公転距離の射影成分 d
- 質量比 $M_{\text{planet}} / M_{\text{lens}}$
- 主星から離れた惑星に感度がある

系外惑星の 発見方法・数 とわかる情報	質量	大きさ・密度	スペクトル	ハビタブルな 地球型惑星 に対する感度
視線速度 300個以上	△ (下限値)	×	×	○ (数年)
トランジット + 視線速度 ~60個	○	○	○	○ (数年)
直接撮像 ~10個?	△ (モデル依存)	×	△ (バンドごと)	△? (相当先)
Astrometry 1個?	△ (下限値)	×	×	○ (>2015年)
重力レンズ ~10個	△ (モデル依存)	×	×	○

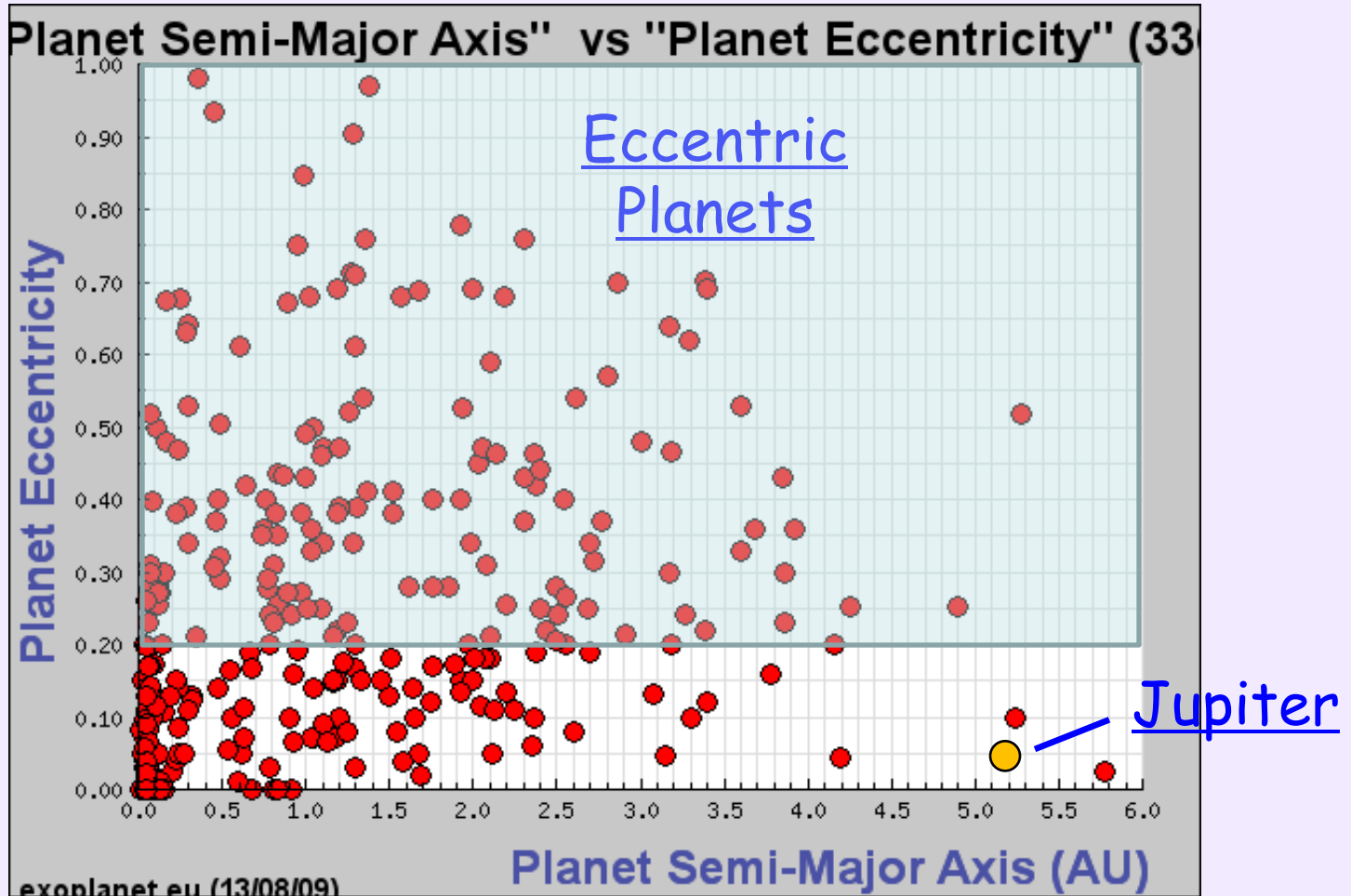
どんな惑星が見つかっているか

- ◆ これまでに見つかった惑星の軌道分布
- ◆ 最小質量、最小半径の惑星
- ◆ ハビタブルかもしれない惑星
- ◆ 現在進行中・近い未来のミッション

惑星の軌道長半径分布



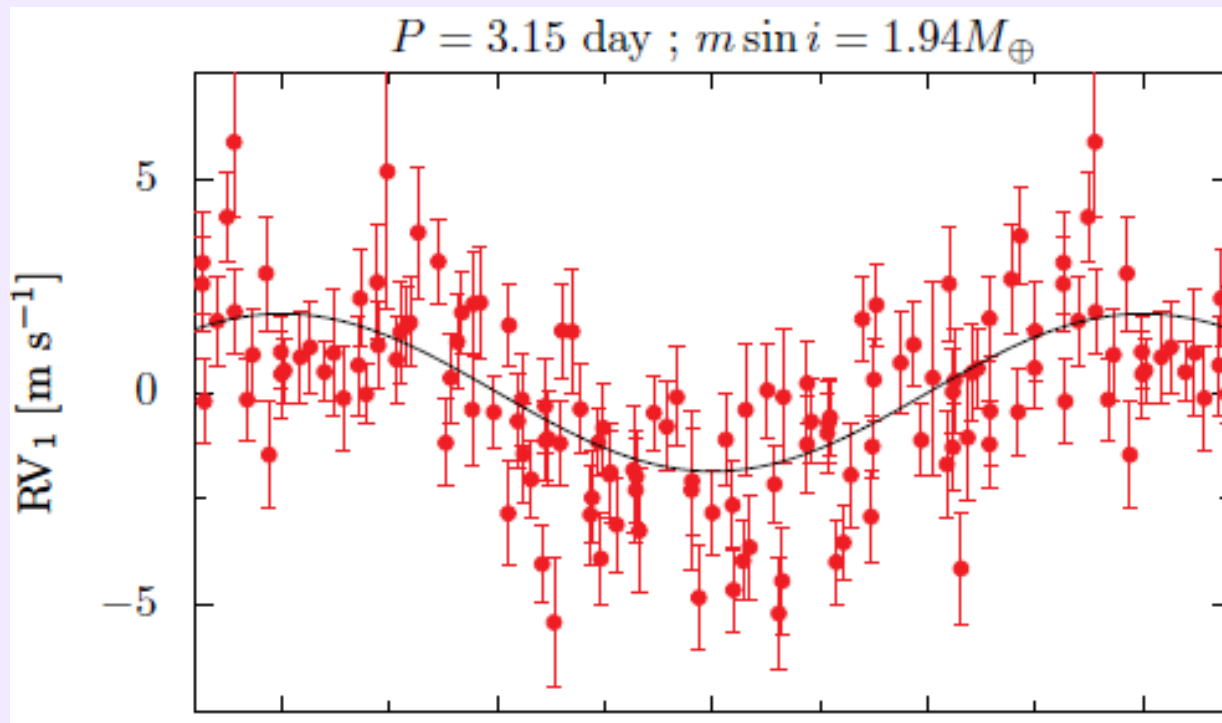
惑星の軌道離心率分布



我々の太陽系は「標準」とは言えない

これまでで最小質量の惑星

現在の視線速度の決定精度は
地球質量の惑星を検出できるレベルに達しつつある

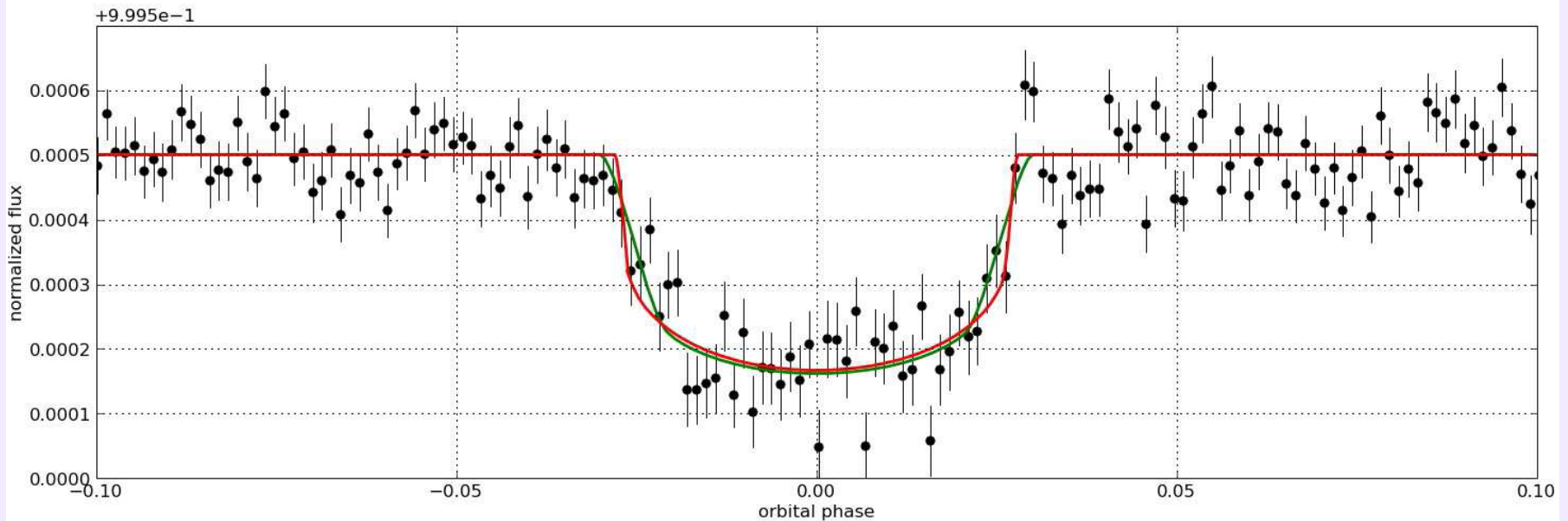


GJ581e: Mayor et al. (2009)

これまでで最小半径の惑星

現在の宇宙望遠鏡によるトランジット測光精度は
地球半径の惑星を検出できるレベルに達しつつある

Corot-7b best-fit transit model

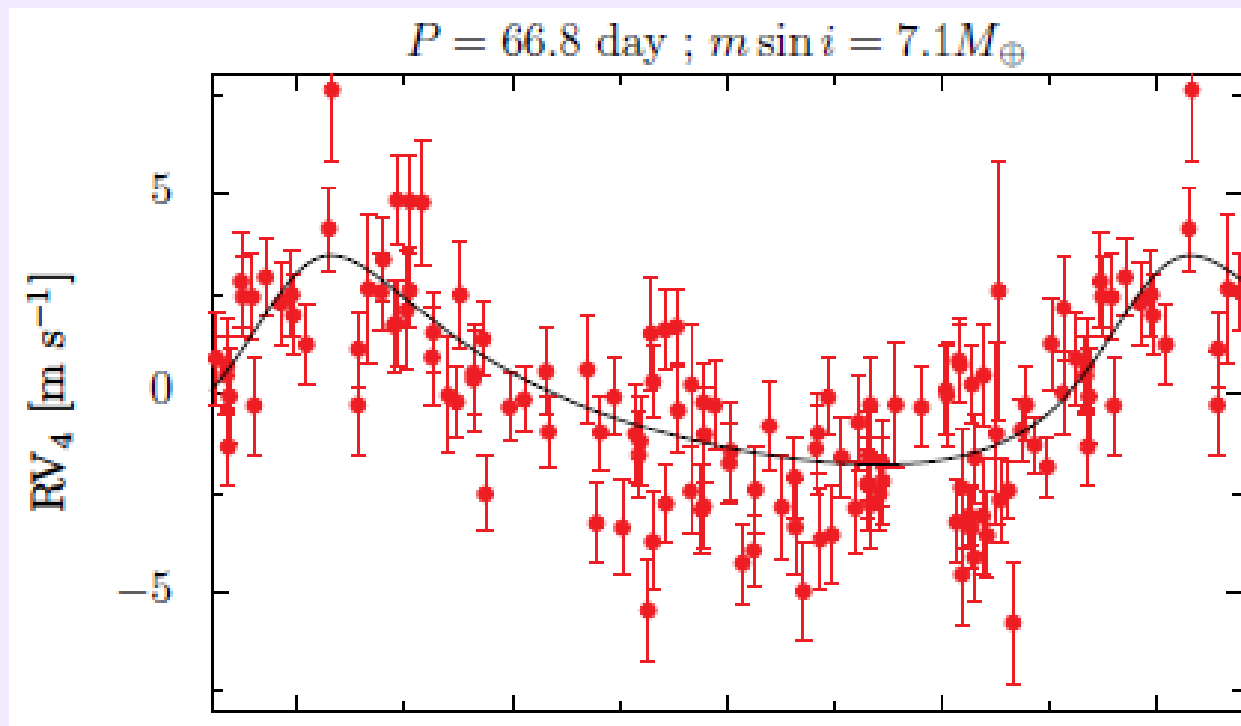


CoRoT-7b: $R_p = 1.68 R_{\text{Earth}}$

Leger et al. (2009)

ハビタブルと考えられる惑星

スーパーアースと呼ばれる地球より大きい地球型惑星では
ハビタブルと考えられる惑星が発見されている



GJ581d: Mayor et al. (2009)

スペーストランジットサーベイ計画

	COROT	Kepler	TESS
打ち上げ	2006年12月	2009年3月	2012年以降
観測視野 ターゲット	2.8 ² deg ² (銀河中心) 7 < m _V < 15 ~1.2 * 10 ⁵ 個	10 ² deg ² (オリオン腕) 9 < m _V < 15 ~1.3 * 10 ⁵ 個	3 * 10 ⁴ deg ² (全天) 7 < m _V < 12 ~ 10 ⁶ 個
検出目標	近傍の明るい星 super-Earths 数個	m _V ~ 12 の太陽型星 Earth-like planets ~50個	m _V ~10 の M型星 Earth-like planets 短周期のもの 数個
観測期間	2.5 年	4 年	2 年

これからは地球型、特にハビタブルな惑星が探される

視線速度フォローアップ計画

HARPS-NEF



William Herschel Telescope

- ✓ 2009年以降稼働
- ✓ スペイン・カナリア諸島
- ✓ 4.2m 望遠鏡
- ✓ ~ 数 cm/s の視線速度精度
- ✓ 欧米の共同研究
- ✓ Kepler, TESSで発見された惑星の質量を決定する装置

近い未来の展望まとめ

近傍のF型～M型の恒星のまわりで
地球サイズからスーパーアースサイズの
トランジットをするハビタブル惑星が
数個～数十個発見される見込みになっている

系外惑星大気の観測手法

どんな方法で？

- ◆ 分光
- ◆ 測光
- ◆ (偏光)

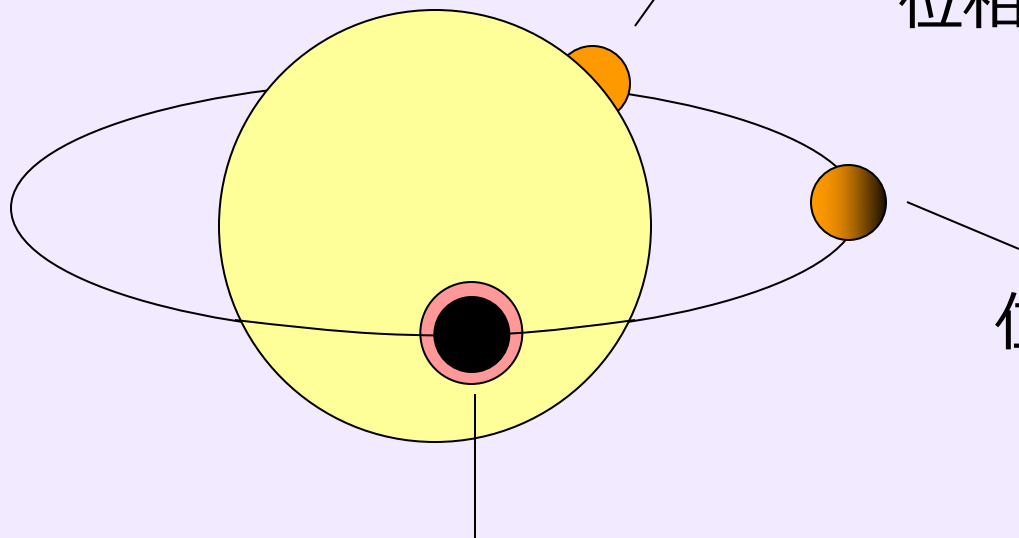
何を見る？

- ◆ 透過光 transmission spectroscopy
- ◆ 赤外放射光・可視反射光
 - 二次食 secondary eclipse
 - 位相変化 phase variation
 - (日周変化 diurnal variation)

いつ観測するか

SE

惑星が主星の裏側に隠れる
位相を観測する

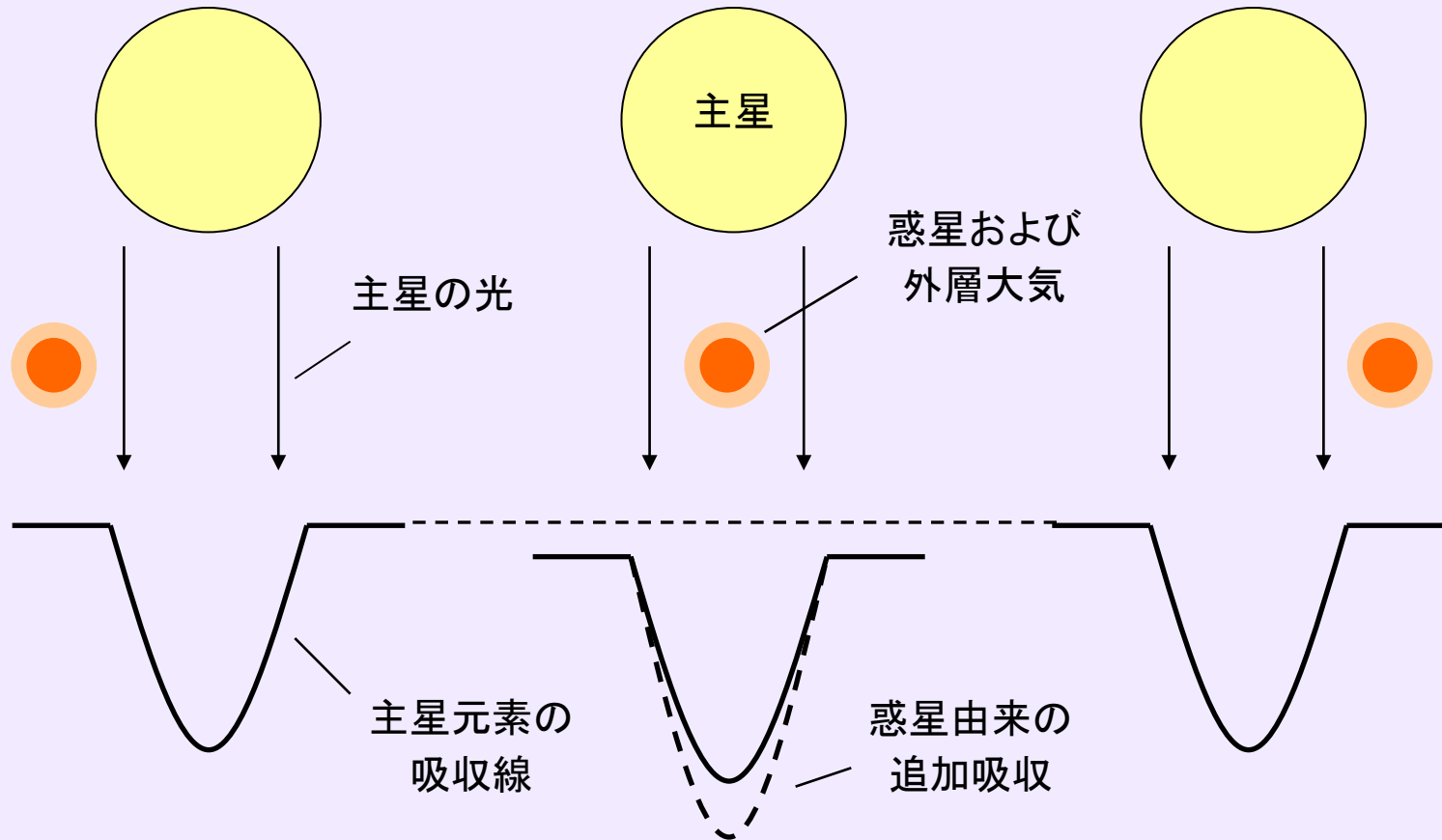


位相や時間と共に変動する
成分を観測する

TS

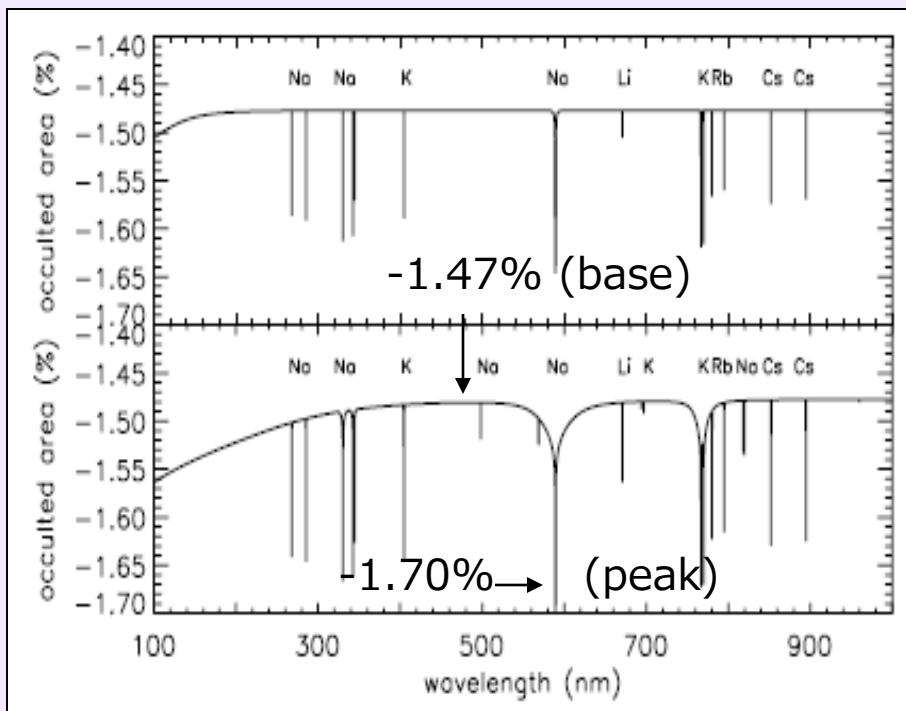
トランジット中の惑星大気を
透かして観測する

Transmission Spectroscopy

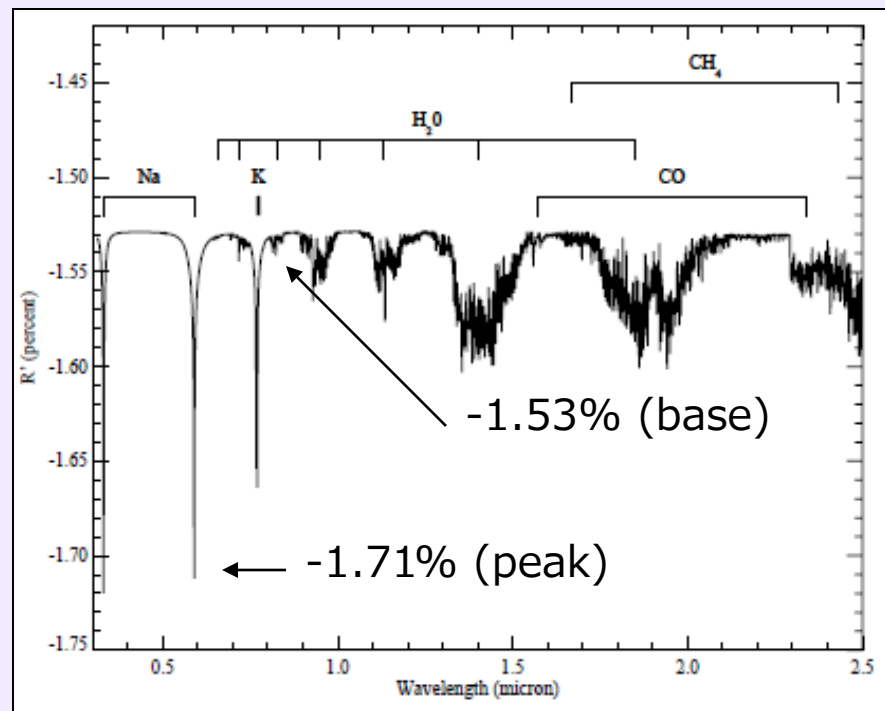


惑星の昼と夜の境目の部分を透過した光を分光し
大気による吸収を調べることができる

ホットジュピターに対する理論モデル



Seager & Sasselov (2000)



Brown (2001)

特に可視領域のナトリウム線や赤外の分子吸収バンドで
強い追加吸収が予想されていた

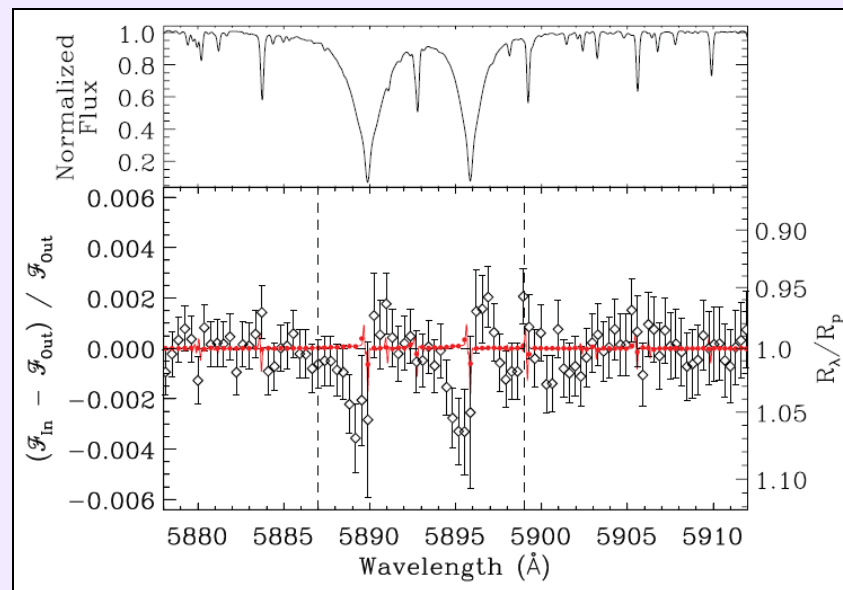
これまでに報告された大気成分

◆ 可視・ナトリウム原子

➤ HD209458b: Charbonneau et al. (2002)

Snellen et al. (2008)

➤ HD189733b: Redfield et al. (2008)

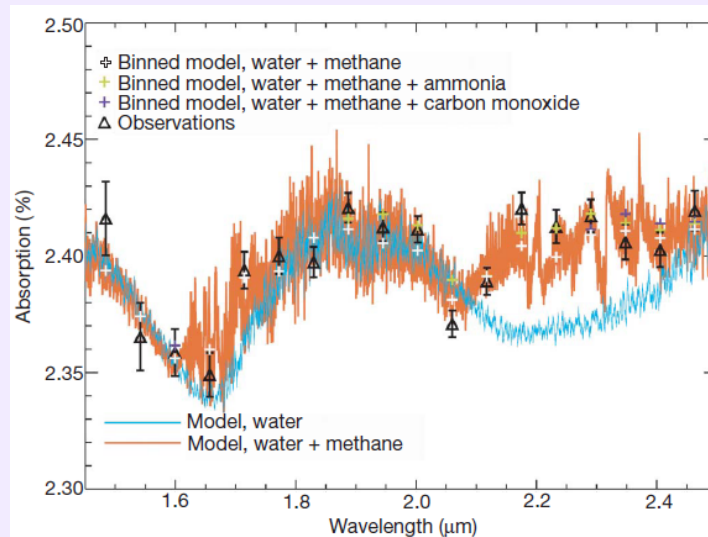


Redfield et al. (2008)

これまでに報告された大気成分

◆ 赤外・分子

- Vapor: Barman (2007), Tinetti+ (2007)
- CH_4 : Swain+ (2008)



▲ : 観測点(Hubble/NICMOS)

赤 : メタン+水蒸気

青 : 水蒸気のみ

Swain et al. (2008)

これまでに報告された大気構造

◆ cloud

➤ HD209458, HD189733

- ・ ナトリウムの吸収量が雲がない理論モデルに比べて約1桁小さい

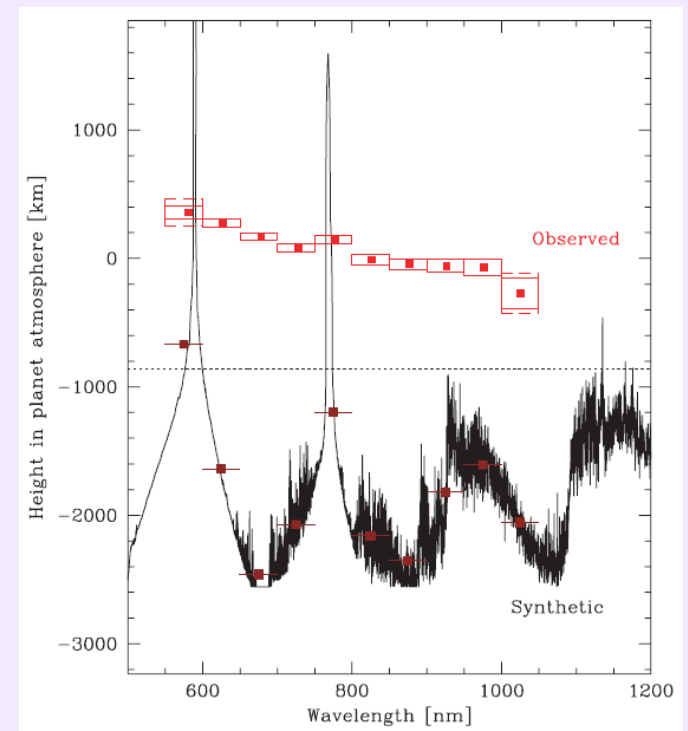
◆ haze

➤ HD189733

- ・ HSTの観測で 500-1000nm にのっぺりした吸収
- ・ 大気上層にsubmicronの粒子？

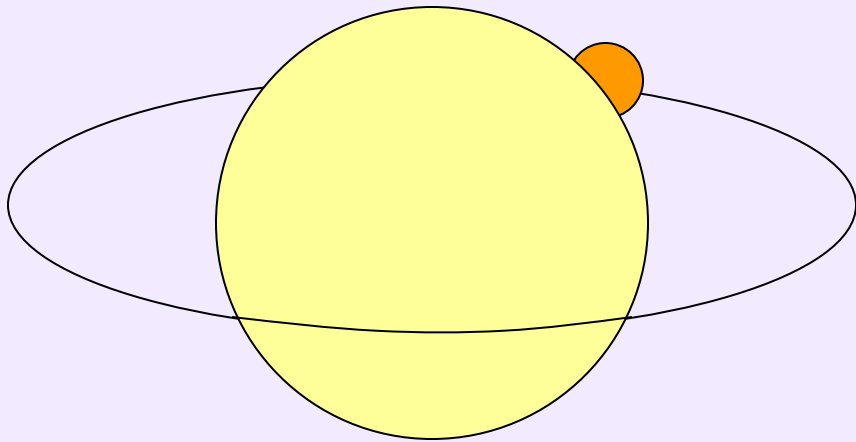
実線：理論モデルとbinningした点

■：観測点



Pont et al. (2008)

Secondary Eclipseの観測



◆ 惑星の昼側の放射光/反射光を測定できる

- TSと同様に分光することで、昼側の大気成分を探せる
- 惑星の昼側の温度の手がかり
- thermal inversionの発見
- 惑星の熱輸送効率・アルベド

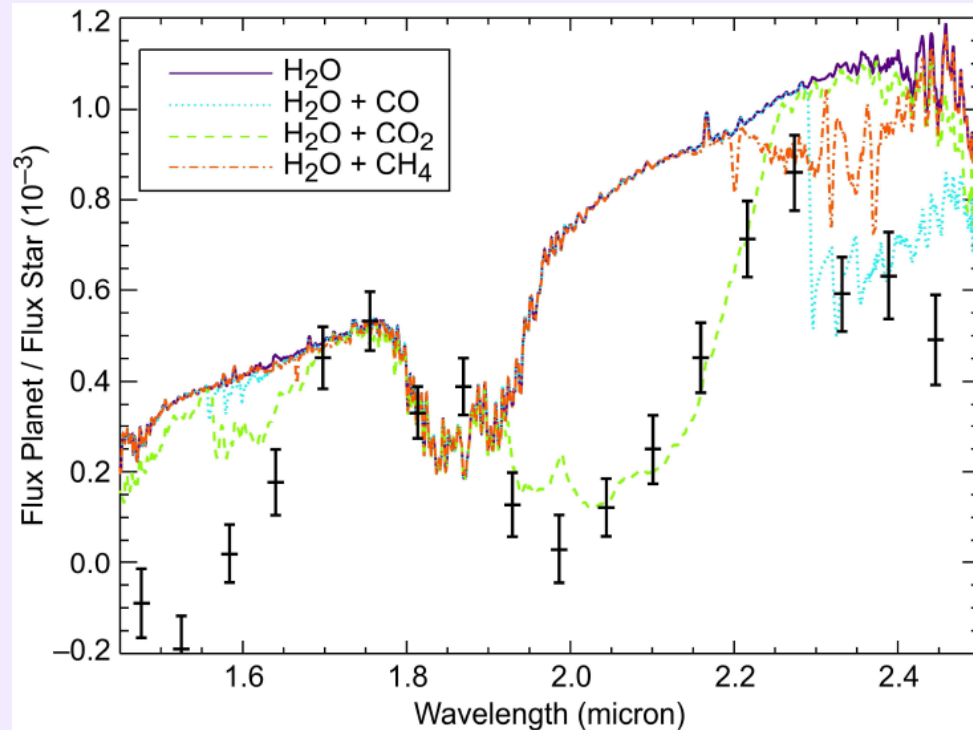
◆ 惑星が裏側に来る時刻から軌道離心率を制限できる

- 離心率の最も強い制限

これまでに報告された大気成分

◆ 赤外・分子

➤ H_2O , CO , CO_2 : Swain+ (2009)



— : 観測点(Hubble/NICMOS)

紫 : 水蒸気のみ

青 : 一酸化炭素 + 水蒸気

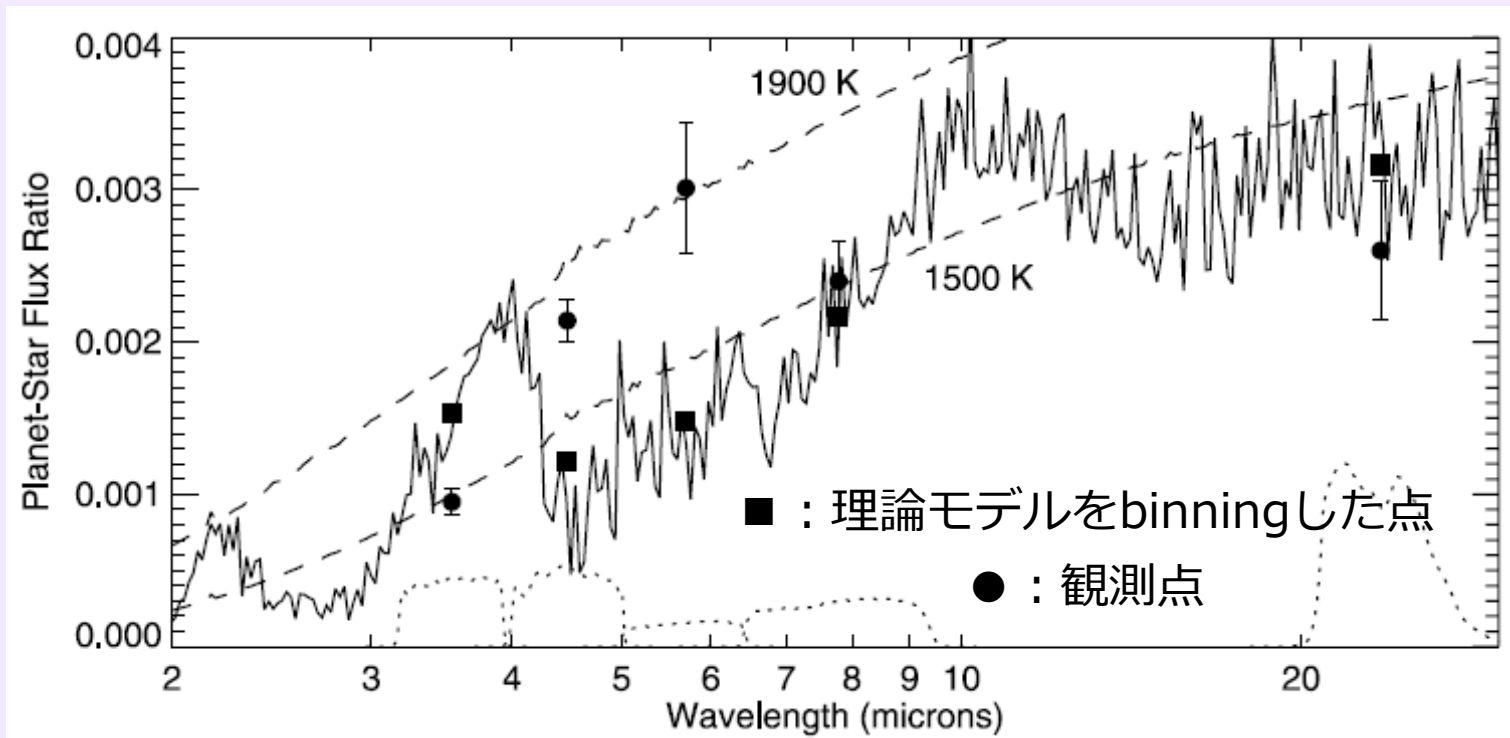
緑 : 二酸化炭素 + 水蒸気

赤 : メタン + 水蒸気

Swain et al. (2009)

thermal inversion in HD209458b

3.6, 8.0, 24 μm の観測点から予想される温度の理論モデルより
4.5, 5.8 μm の観測点のフラックスが有意に大きい

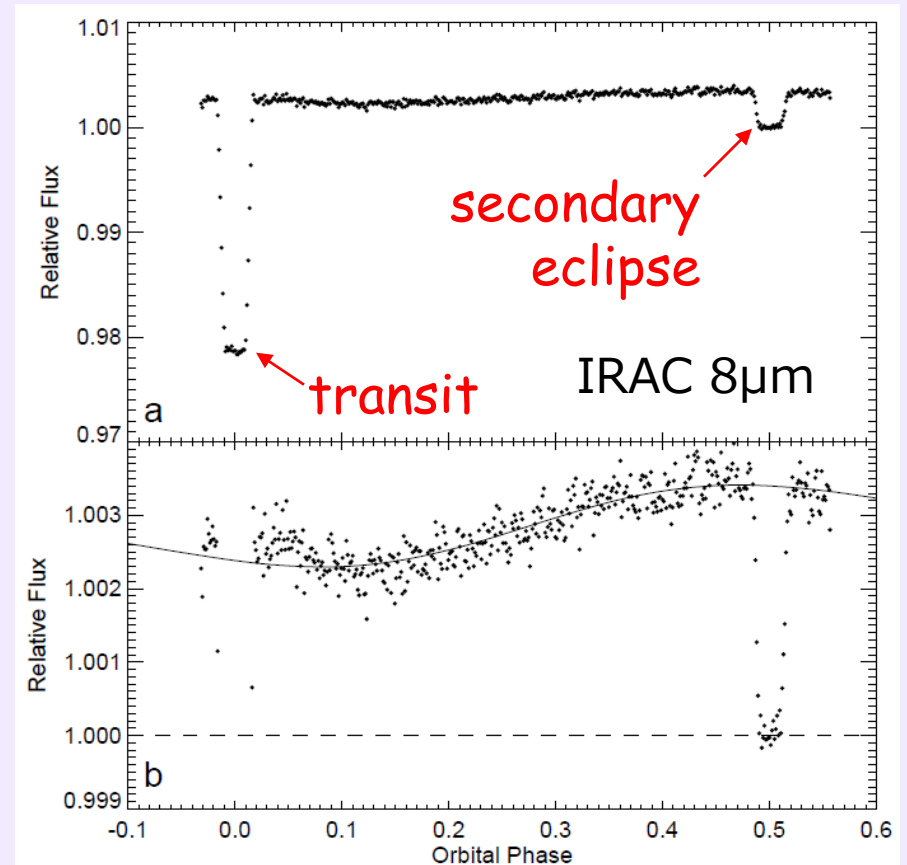
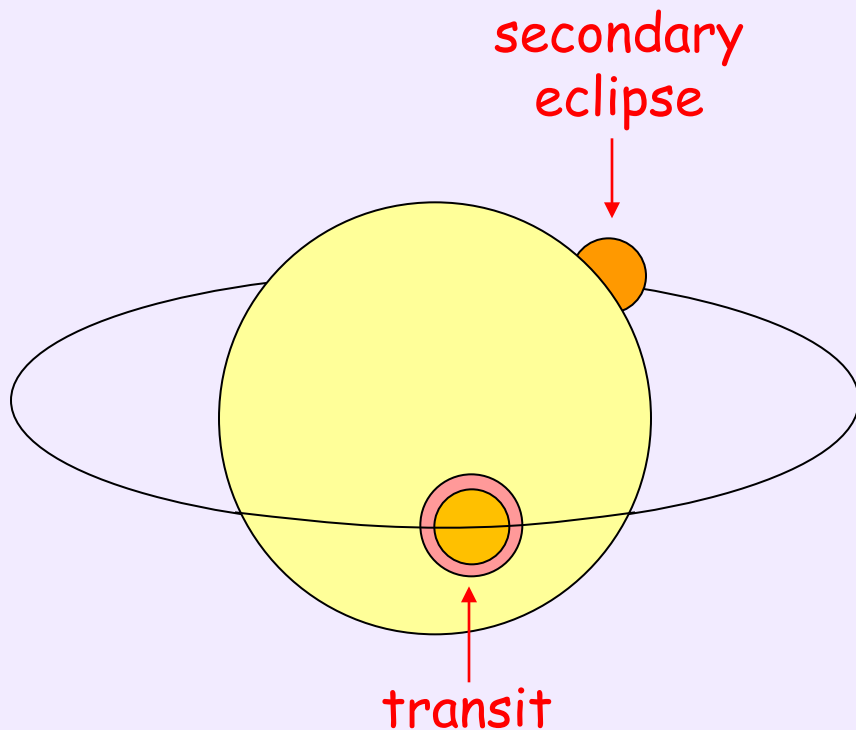


Knutson et al. (2008)

HD209458bは大気上層に温度の逆転層がある

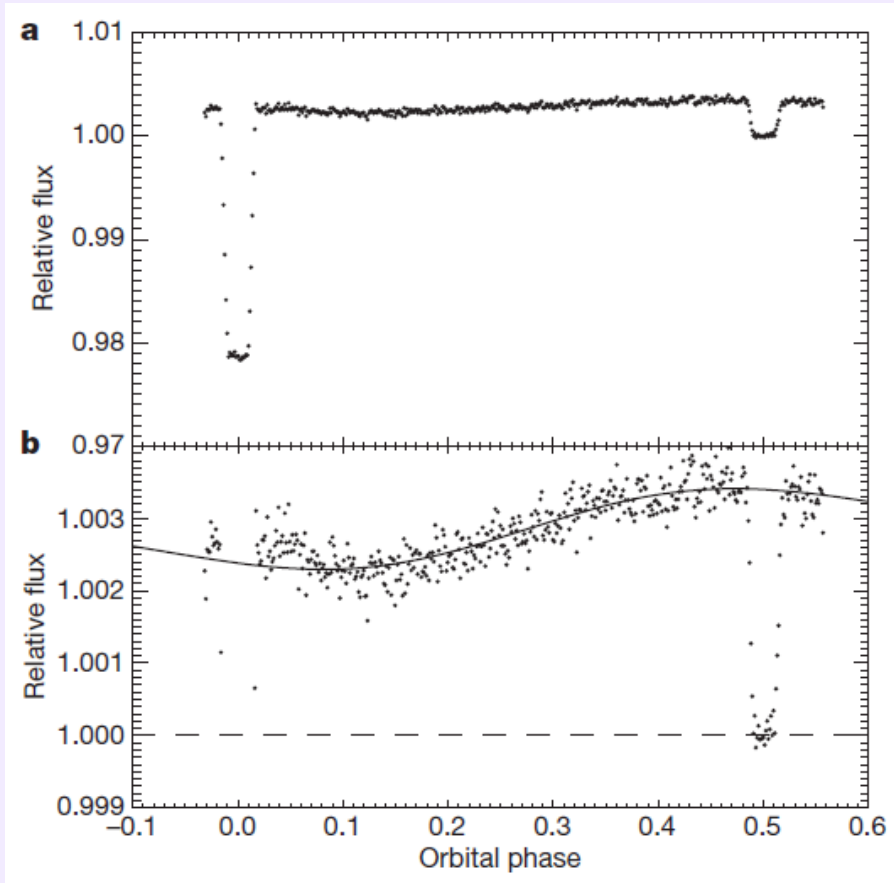
赤外での位相変化の観測例

HD189733bのトランジット前からSE後までを連続測光観測した結果

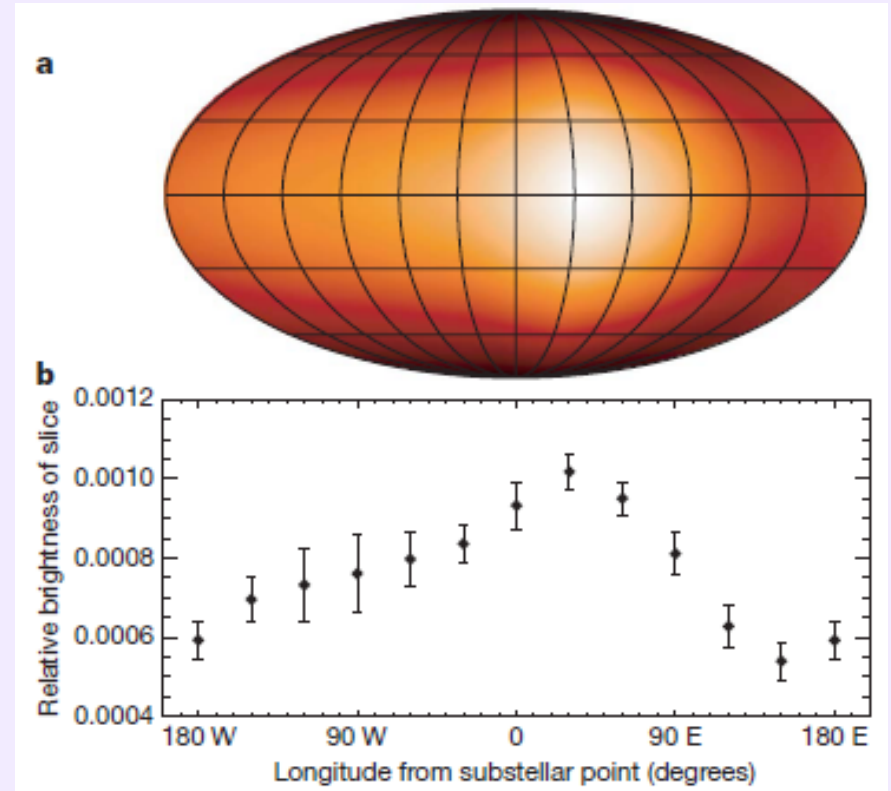


Knutson et al. (2007)

位相変化観測からわかること

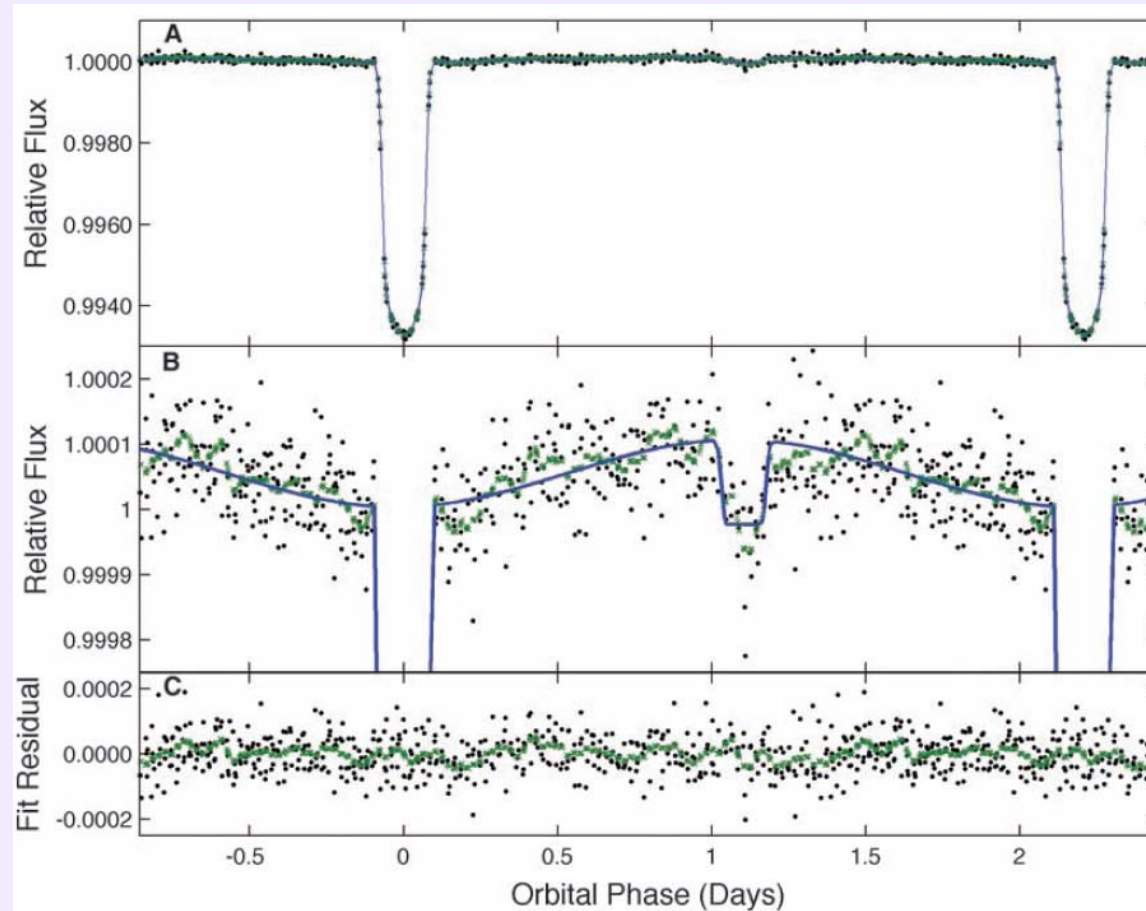


惑星の大気循環
(熱輸送の効率)



惑星の温度分布

可視でのSEと反射光の検出

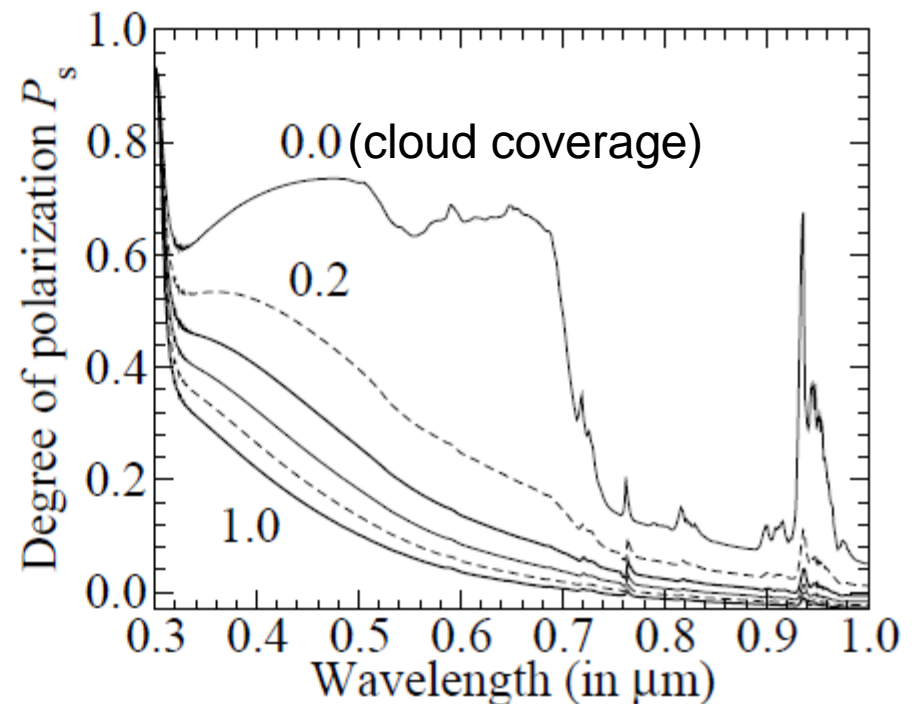
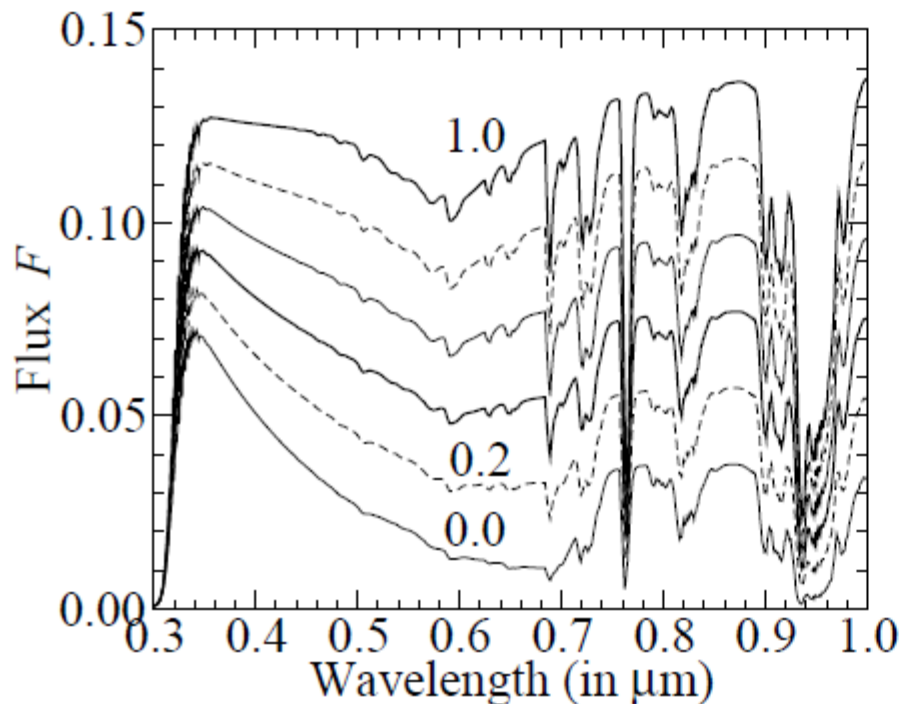


Borucki et al. (2009)

位相変化の形から惑星のphase function、振幅からアルベドなど

偏光 + 分光観測

恒星の光と惑星の放射光は無偏光なので、
偏光を測定すると惑星の反射光を選択的に調べられる

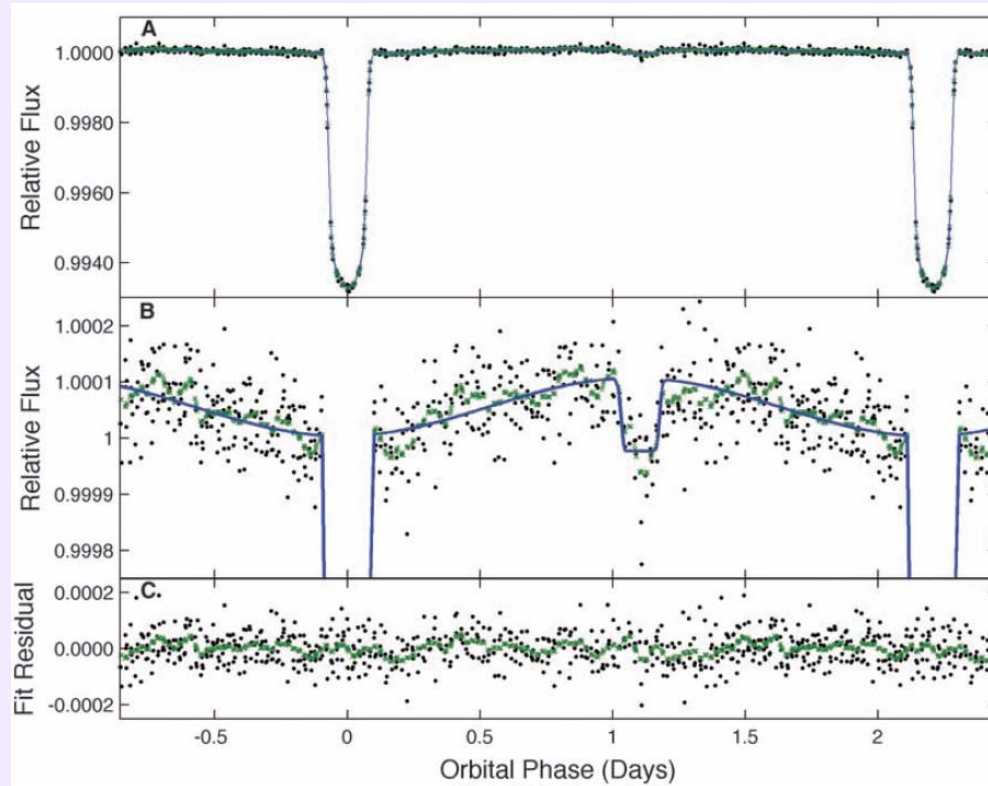


Stam (2008)

波長ごとのフラックスと偏光度から
惑星の表層のモデル(アルベド + 雲、海、植物の割合)がフィットできる

日周変化

位相変化からの残差の中で
惑星の自転周期に同期して周期的に起こる変動成分



Borucki et al. (2009)

もし検出できれば惑星の自転速度や表層の分布などがわかるかもしれない

透過光	トランジット・分光	惑星の大気成分(昼夜の境目の部分) 雲の有無、hazeの存在
放射光	二次食・分光	惑星の大気成分(昼側) 惑星の昼側の有効温度 鉛直方向の温度プロファイル
放射光	位相変化・測光	惑星の熱輸送効率・温度分布
反射光	位相変化・測光	惑星のphase function・アルベド
放射光	日周変化・測光	惑星の自転速度(★)
反射光	位相変化・分光+偏光	惑星の雲の割合+表層の情報(★)
反射光	日周変化・分光+偏光	惑星の表層の分布(★)

★：現在の技術で未達成のサイエンス

今後の展望

- ◆ どんなハビタブル惑星が見つかるか？
- ◆ 10年以内に予定されている観測計画
- ◆ 観測者の立場から

どんなハビタブル惑星が見つかるか？

◆ 主星について

- 近傍にある明るいF~M型の恒星
- ✓ 特にM型が注目されている

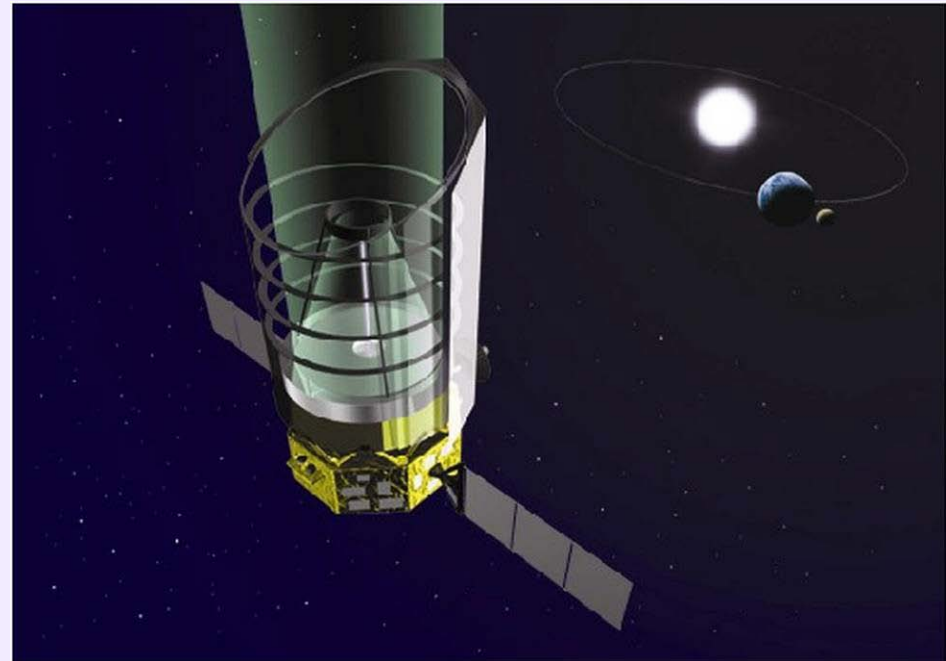
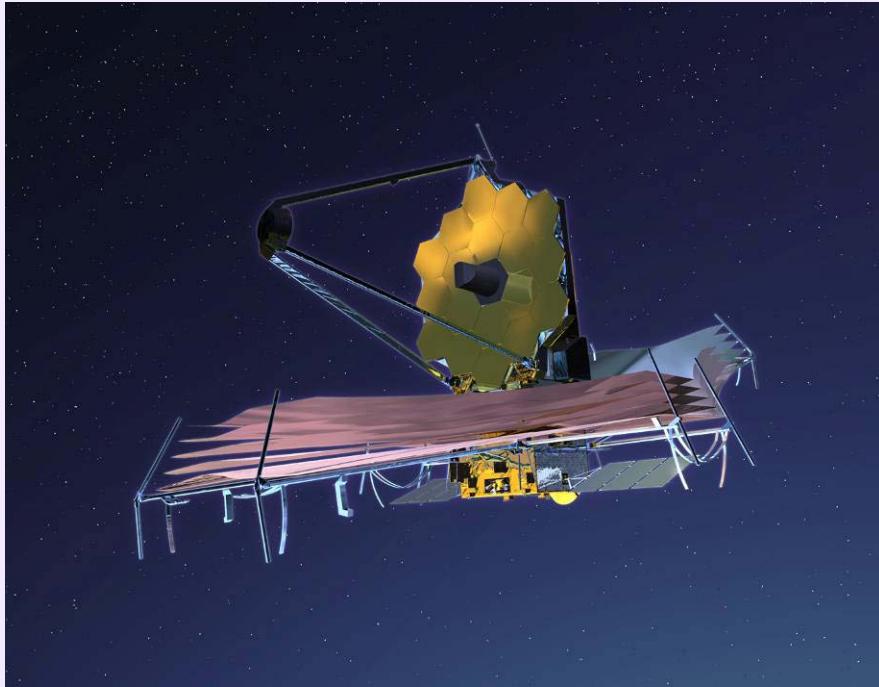
◆ 惑星について

- 大きさ：水星サイズ～地球の数倍のサイズまで
- 質量：地球質量程度～地球質量の10倍程度まで
- ✓ スーパーアースの方が検出されやすい
- ✓ 離心率を持つ可能性がある
- ✓ ハビタブルゾーンにある木星型惑星の衛星も測光観測で発見される可能性がある

宇宙赤外望遠鏡による観測計画

James Webb Space Telescope

SPICA



2014年6月以降

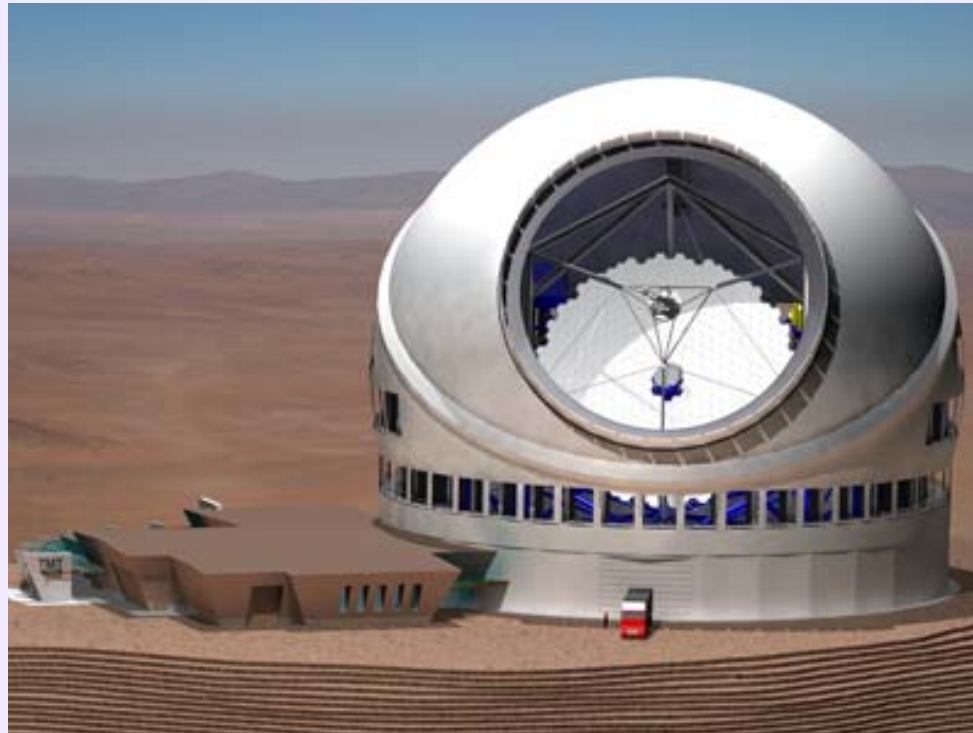
2017年以降

主に中間赤外を中心に透過光・放射光の観測が行われる

見積りでは近傍のM型星のハビタブル惑星の大気がぎりぎり検出できるかどうか

地上超大型望遠鏡による可視観測

Thirty Meter Telescope



2018年以降

可視領域の透過光分光をすることができる

ナトリウムや酸素の吸収がどの程度あるのかの理論モデルが必要

最後に観測者の立場から

◆ハビタブル惑星は一体どう見えるのか？

➤ 透過光

- ✓ まずは地球の透過光の精密な理論モデル
- ✓ (このモデルは月食の分光観測で検証可能)
- ✓ ナトリウムや酸素など可視領域の分光特性(TMT)
- ✓ 近赤外～遠赤外での分光特性(JWST/SPICA)

➤ 放射光

- ✓ thermal inversionを含めたSEモデル(JWST/SPICA)
- ✓ 近赤外～遠赤外での分光特性(JWST/SPICA)

こうしたモデルがあればぜひお知らせください

まとめ

◆ 系外惑星の発見方法

- トランジット+視線速度で惑星の多くの情報が得られる

◆ 系外惑星大気の観測手法

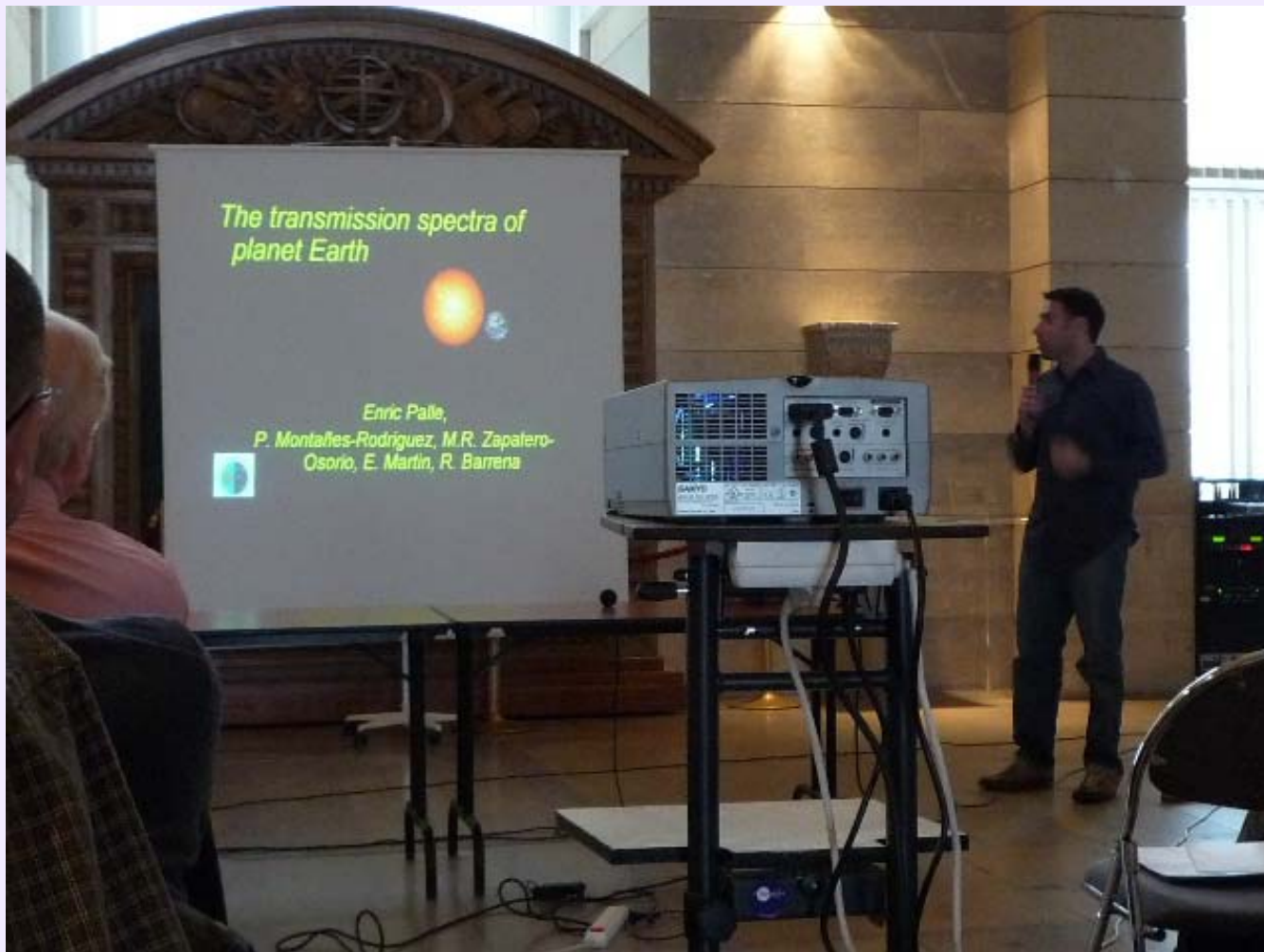
- 透過光、放射光、反射光など
 - ✓ 惑星大気の組成、昼の温度、熱輸送効率などがわかる

◆ 今後の展望

- ハビタブル惑星の発見は近付いている
 - ✓ 観測結果を予言・解釈する理論が必要
 - ✓ 理論が予言しなかった観測結果が出る可能性もある
- 観測と理論が結びつくことでハビタブル惑星の理解が進む

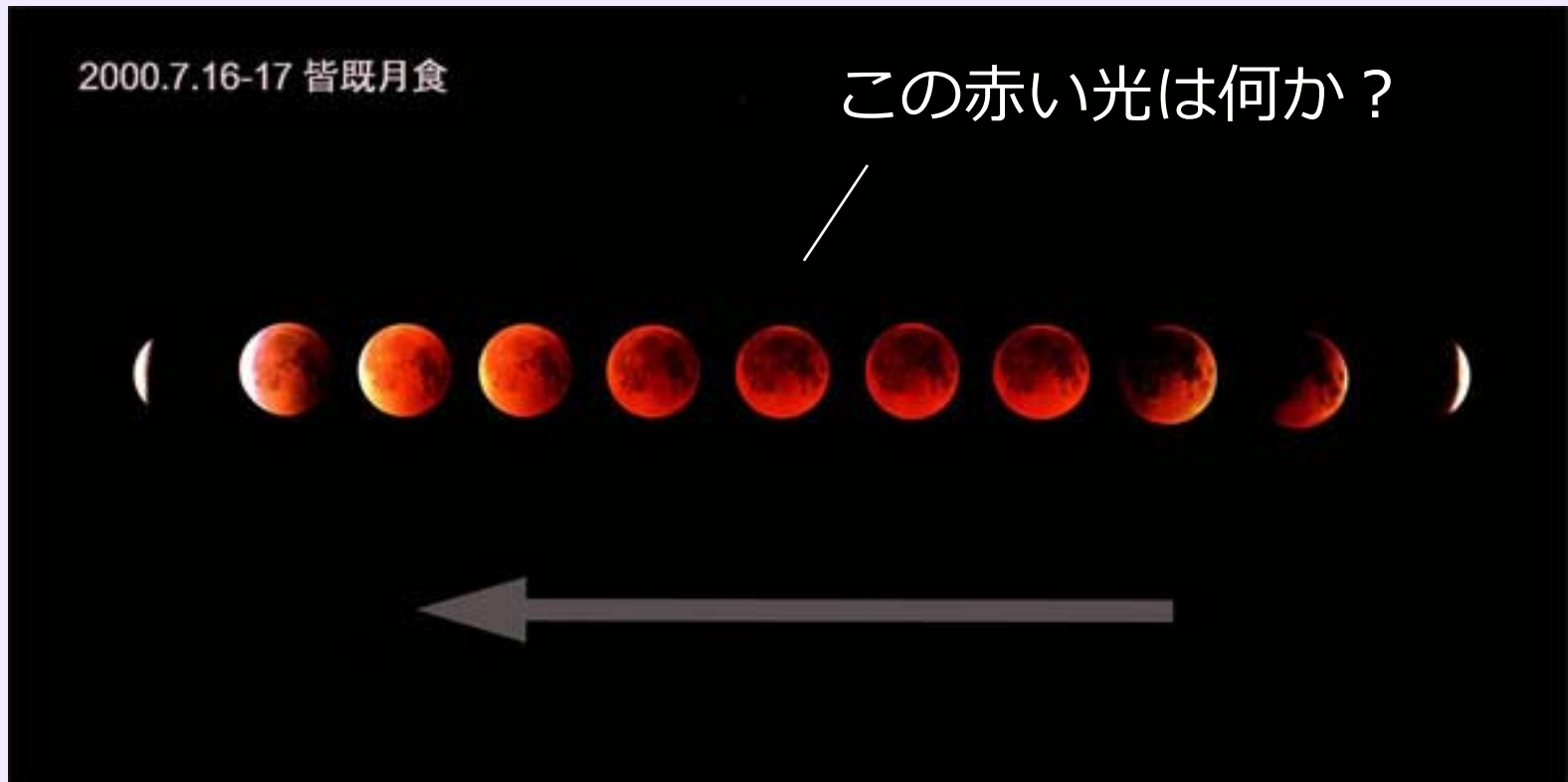
補足

月食を用いた地球のTS



Pallé et al. (2009)

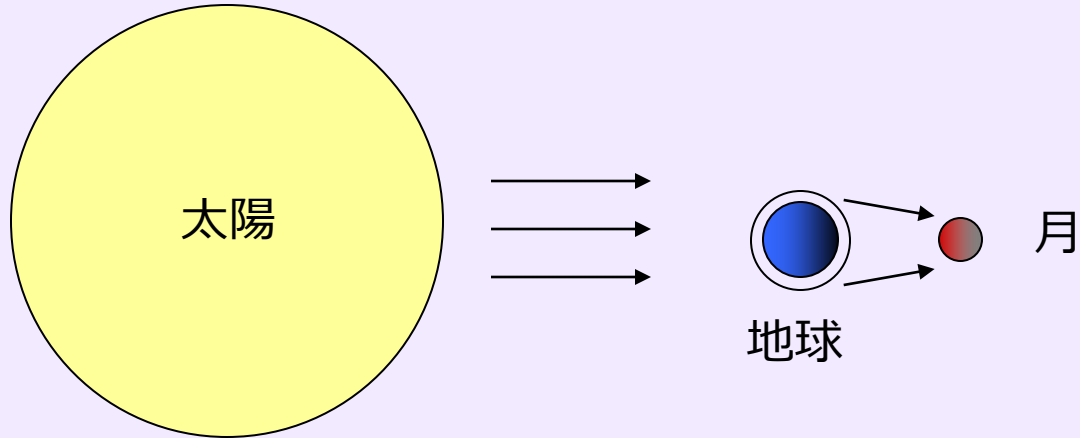
月食中の月に映るもの



(2000年7月 ぐんま天文台)

赤い光 = 地球の透過光

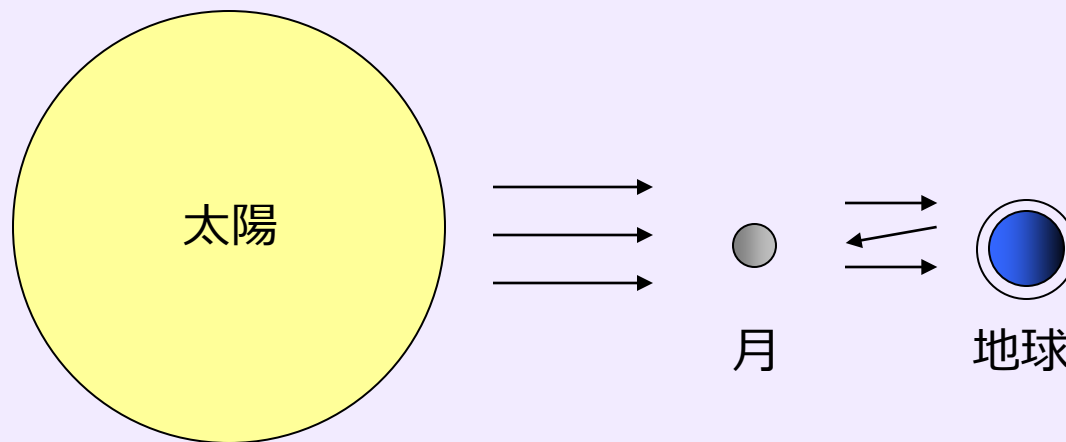
地球大気を透過してきた光が月に映ることで赤く見える



月食中の赤い光を分光することで地球の模擬TSが可能！

cf. 地球照 (Earthshine)

地球に反射した光が新月に映った光



地球照を分光することで地球の反射光の観測が可能

光・赤外同時分光観測

Palle et al. (2009)

- ◆ 2008年8月16日 部分月食
- ◆ カナリア諸島 La Palma Observatory
 - 2.5m Nordic Optical Telescope (optical)
 - 4.2m William Herschel Telescope (IR/ZJ, HK band)
 - 合わせて0.3 - 2.5 μm
 - 同じセットアップで地球照をreferenceとして観測
- ◆ HITRAN などのline-listで分子線の同定

検出された分子

◆ Vis:

- Ca II, O₃, O₂, H₂O, O₄, + NO₂(未同定)
- Ca II は電離圏のイオン?

◆ IR:

- O₂, H₂O, CO₂, O₂-O₂, O₂-N₂, (ZJ band)
- H₂O, CO₂, CH₄ (HK band)

◆ 地球照との比較

- 地球照でもほぼ同じ分子を検出できた
- Ca II, O₂-O₂, O₂-N₂などは月食でのみ顕著な吸収
 - ・ どのくらいの高度の吸収を見ているのかによる
 - ・ 解釈するための精密なモデルが必要