

# 系外惑星の大気を観測する

"Direct imaging and astrometric detection of a gas giant planet  
orbiting an accelerating star"

T. Currie et al., *Science*, **380**, 198-203 (2023)

"Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRSpec PRISM"

Z. Rustamkulov et al., *Nature*, **614**, 659-663 (2023)

今日紹介する論文の内容は，皆さんの多くにはあまりなじみのない分野かと思しますので（※しかも，研究自体は結構細かいところが多く，あまり詳しく話すのも……），論文そのものの内容よりも研究の背景等を詳しく説明しようかと思えます．

# 1. Introduction

# そもそも「系外惑星」(Exoplanet)とは？

- ・ 太陽系の外にある惑星.
  - ・ 基本的には、うちのところの太陽系と同様に、各恒星の周りで惑星が形成されていると思われる。
- ※ただし宇宙には、ブラックホールの降着円盤の周囲での惑星形成があるだとか、白色矮星の周囲を回る惑星、もともとの恒星系からはじき出され単独で銀河を彷徨う自由浮遊惑星などいろいろなものが存在する。

# 系外惑星はどのくらいあるのか？

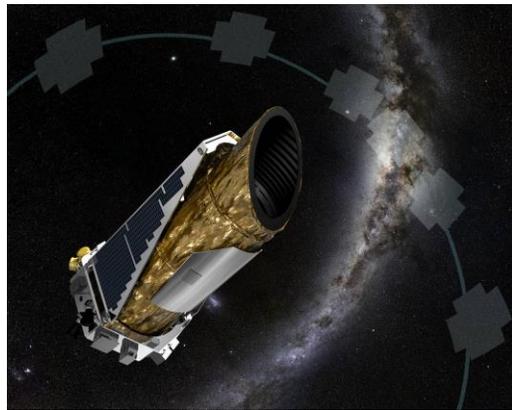
- 太陽系だけで、8個（以上？）もの惑星がある  
→ 銀河系内（恒星数約2000億以上）だけでも相当あるはず  
宇宙の観測可能領域は、およそ半径460億光年。  
この範囲内に銀河は数千億～数兆個はあると考えられており、惑星の数は無尽蔵といっても良い。
- しかし、惑星のすべてを観測できるわけではない。  
惑星は恒星と違い自ら光を発しないので、検出は難しく、  
距離の近い恒星系でしか惑星を見つけることはできない  
（現状最遠で、2万光年と少し先）。見つけやすい惑星も  
偏っている（重くて恒星に近いと見つけやすい）。

# 系外惑星はどのくらいあるのか？

- ・ただ、現時点で5000を超える系外惑星（や、その候補）が見つかっており、現在その数を急激に増やしている。  
※新型衛星の活用などで、発見数が急激に伸びている。



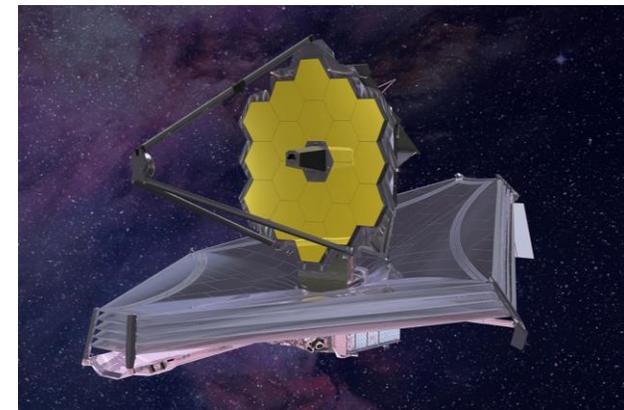
Hubble宇宙望遠鏡  
全長13 m  
1990～



Kepler宇宙望遠鏡  
全長4.7 m  
2009～2018  
狭く、深く



TESS  
全長1.5 m  
2018～  
広く、浅く



J. Webb宇宙望遠鏡  
主鏡口径6.5 m  
2022～  
超高分解能（赤外）

※画像はNASAの各探査機のページより

# 何のために調べるのか？

- 地球を含め、惑星（や星系）がどのように生まれ進化してきたのかは、古代からの興味の対象。  
しかし身近な惑星はごく少数で、身近な恒星系は一つしかない。この非常に少数のデータをもとに考察すると、実際のところとはズレた推測をしてしまうかもしれない。  
（我々の太陽系が、典型的な恒星系だという保証はない。  
もしかすると、我々が住んでいるのは「異常な」環境なのかもしれない）

→ より多くのデータを集め、宇宙に対する理解を深める  
(将来的には、他の星系での生物の証拠なども見つけたい)

# 何のために調べるのか？

- ・ 実際，観測が進むにつれ，我々の太陽系でみられる惑星と大きく異なるような「奇妙な」惑星が数多く存在することが判明している。

恒星のごく近くを周回するガス巨星（ホットジュピター）

恒星の自転と惑星の公転が逆向きの逆行系

数時間で温度が700 °Cも上がり超音速の嵐が吹く惑星

表面温度が2000 °Cを超える灼熱の惑星

溶けたガラスの雨が降り注ぐ高温のガス巨星

恒星の強い輻射で4000 °Cを超え，輝きながら蒸発中の惑星

赤色矮星や白色矮星，パルサー等の周囲を公転する惑星

# どうやって系外惑星を見つけるのか？

- ・系外惑星観測の代表的な手段は、以下のようなものがある。

ドップラーシフト法（視線速度法）

恒星に近く，重い惑星ほど検出しやすい

トランジット法

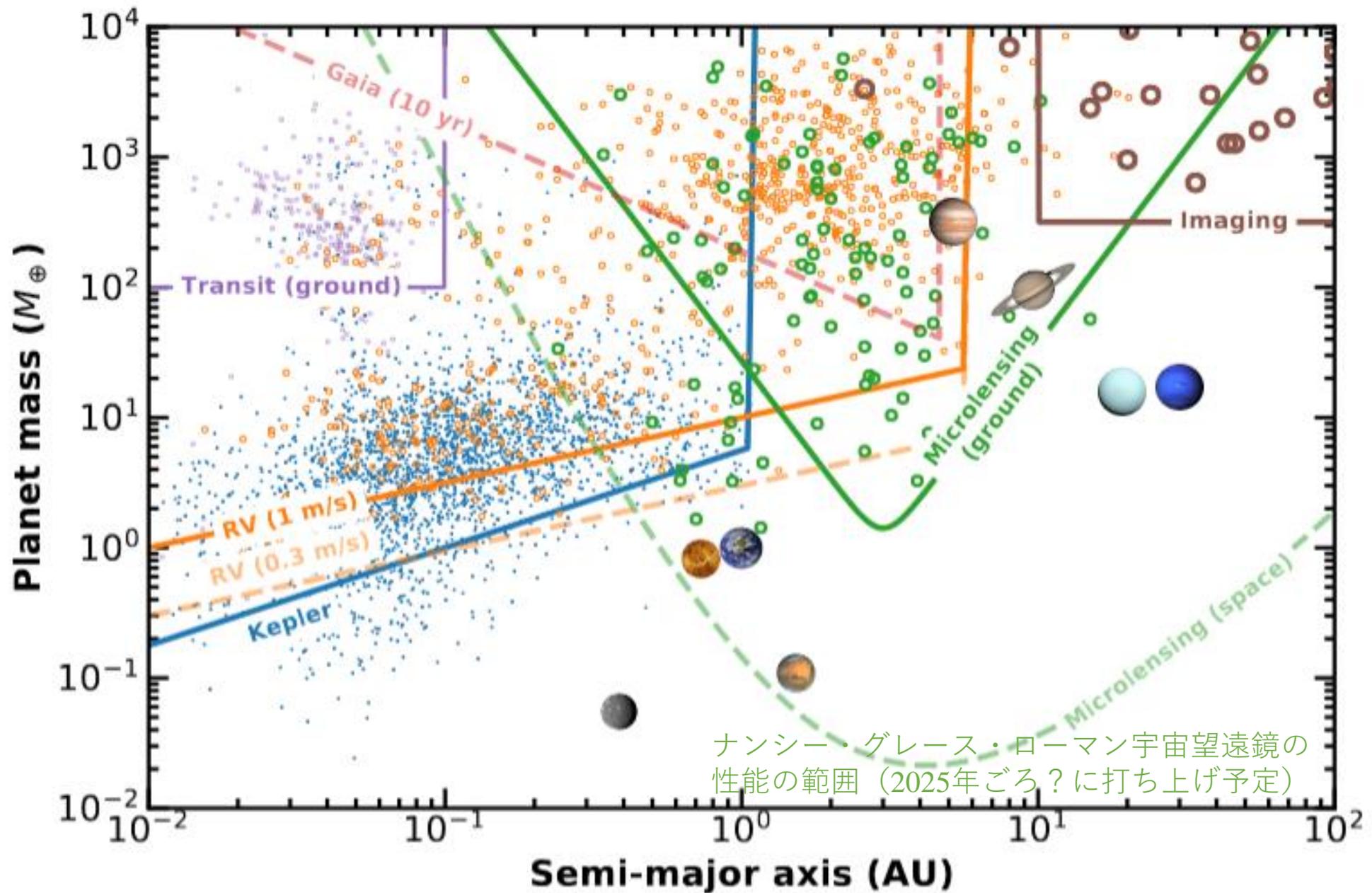
恒星に近く，半径が大きい惑星ほど検出しやすい

重力マイクロレンズ法

ほどほどの距離で，重い惑星ほど検出しやすい

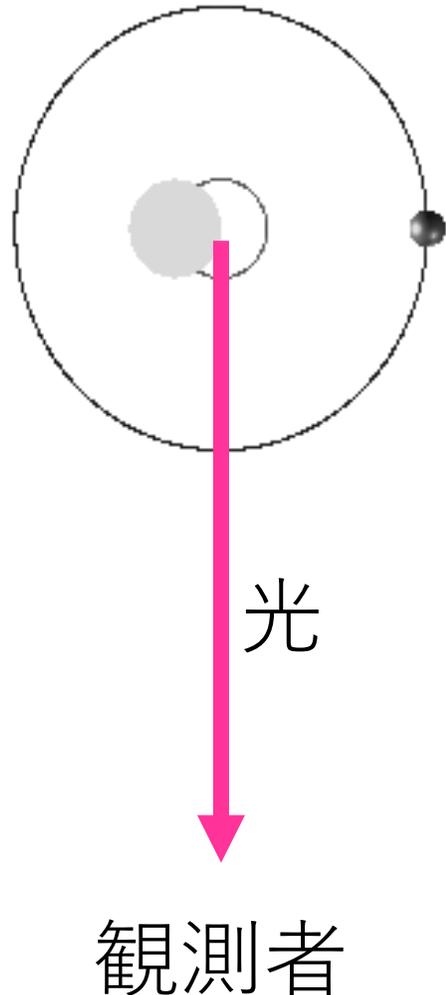
直接撮像

遠くて大きい（そして明るい）惑星ほど検出しやすい



- ドップラーシフト法（視線速度法）

2つのものが引っ張り合いながら周回している運動は、実際には2体の重心の周りを両者が回る運動となっている。

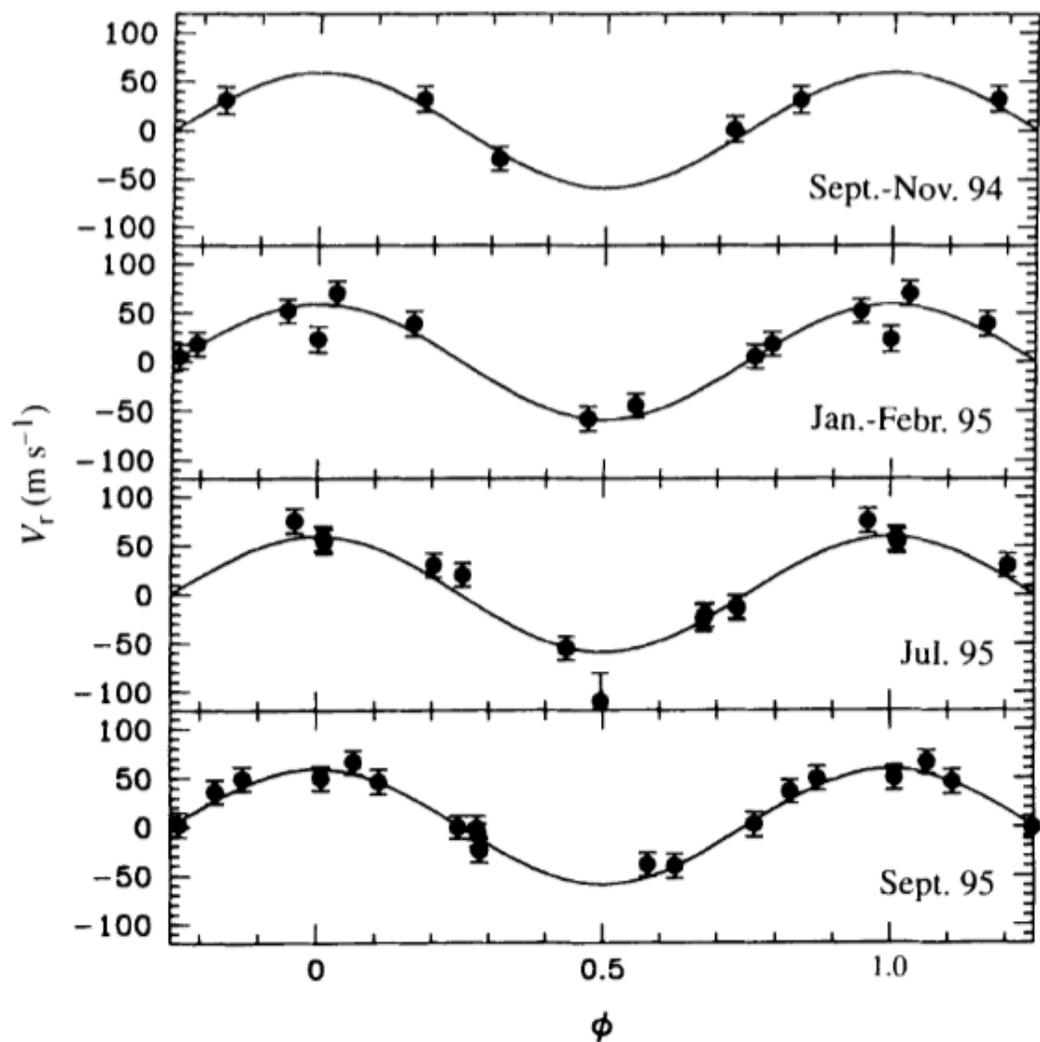


※誇張した図。実際には恒星のほうが圧倒的に重いので、重心位置は恒星内部ぐらいになる。

左図の位置関係だと、恒星が観測者に対して周期的に近づいたり遠ざかったりするため、ドップラー効果によって光の波長は周期的に短波長にズレたり長波長にズレたりする。この効果は、惑星が重い&恒星に近いほど強く効く。

# 主系列星\*で初の系外惑星の発見 (2019年ノーベル物理学賞)

\*ラフに言うと、いわゆる普通の恒星



51 Pegasi b (地球から約51光年)

恒星からの平均距離：0.053 au

公転周期：4.23日

惑星質量：地球の約150倍程度  
(木星の**0.47**倍)

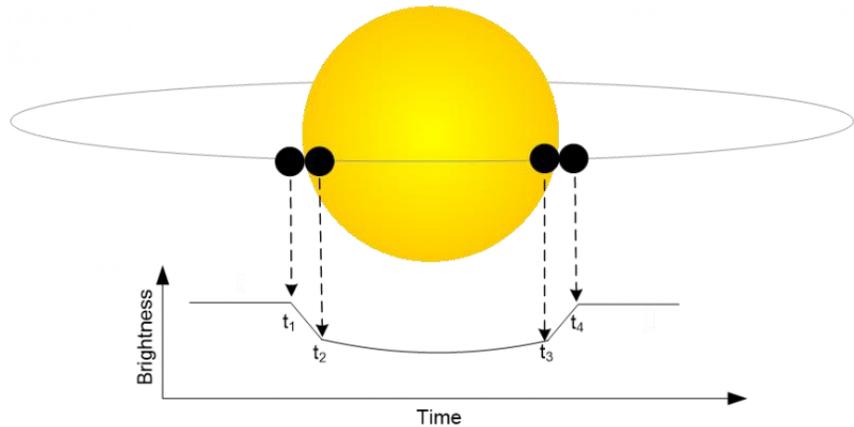
主星の質量：色と光度から決定

軌道半径：公転周期から決定

惑星の質量：主星の揺れ具合  
からある程度推測

- ・トランジット法

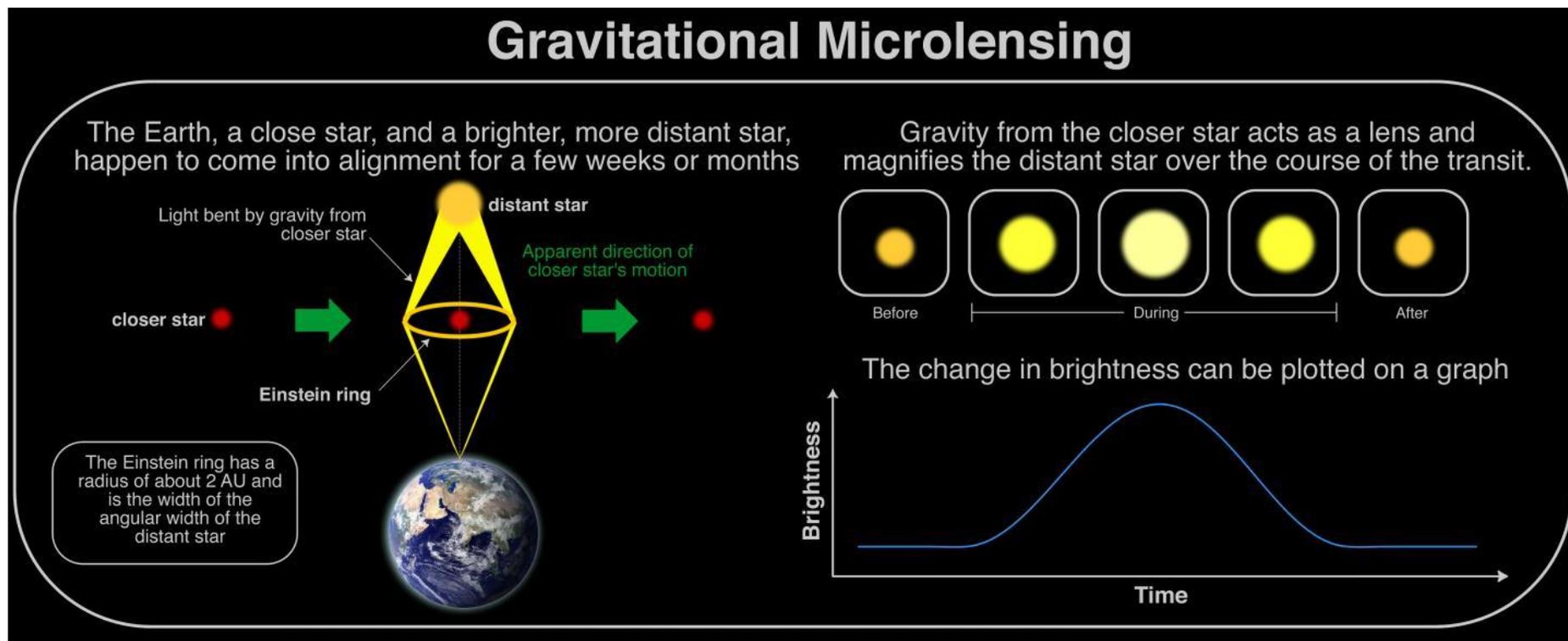
(我々から見て) 恒星の前を惑星が横切ると、恒星の光の一部が遮蔽されるため、星の明るさがわずかに暗くなる。これを利用して惑星を検出する。



小さい星は検出しにくい。  
大気分光ができることもある (後述)  
Kepler宇宙望遠鏡により、2600以上の系外惑星を確認。

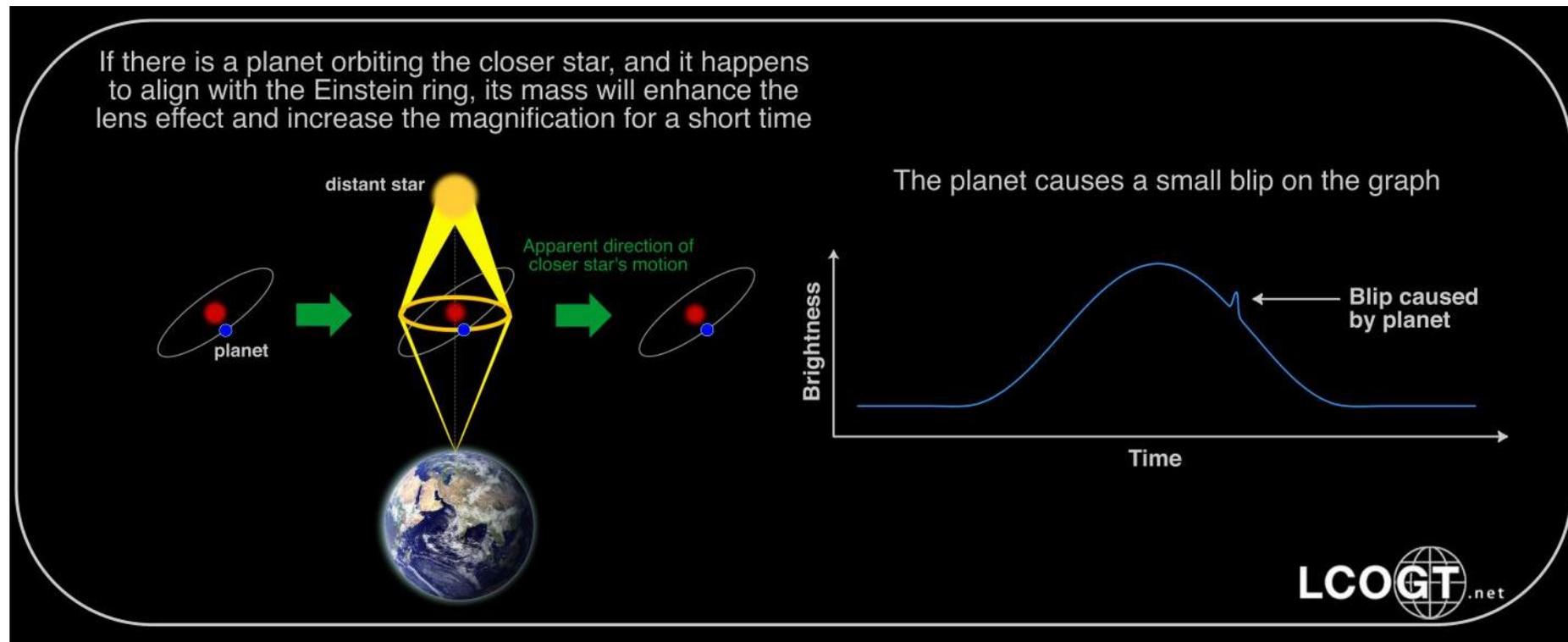
- 重カマイクロレンズ法

相対論によれば重力は空間を歪め、そこを通る光の進路が曲がる。このため、地球と光源との間を恒星などの質量の大きな物体が横切ると、レンズで集光されたように一時的に少し明るく観測される（重力レンズ）。



- 重力マイクロレンズ法

このとき、レンズの役割をしている恒星系に惑星があると、惑星の重力も（わずかではあるが）レンズの役割をはたし光を少し集光する。これを用いて惑星が検出できる。



- ・重力マイクロレンズ法

原理的に、特定の星を狙って観測することはできない。  
(光源の星と重力レンズを起こす星が偶然重なる位置関係の時にだけ測定できる)

広い範囲で観測し、重力レンズを起こしている対象を発見したらしばらく観測を続けると、まれに惑星が横切る、という感じであり、観測にはかなり運も絡む。  
(現時点で、数十個ぐらいを発見?)

ただ、恒星から中程度に離れた惑星での感度が高いため、他の観測手段と相補的にデータを集めることが可能。

近日打ち上げ(多分)の、ナンシー・グレース・ローマン宇宙望遠鏡で多数の発見につながると期待。

- 直接撮像

もっとも直接的な意味で惑星を「見る」方法。

ただし，無茶苦茶に明るい恒星のすぐ近くの惑星の微弱な光を撮像するため難易度は高い（惑星のほうが数桁暗い）。

いろいろな方法で困難を乗り越える。

- 天文台の大型反射鏡で光度を稼ぐ

- 補償光学により，大気の揺らぎの影響を除く

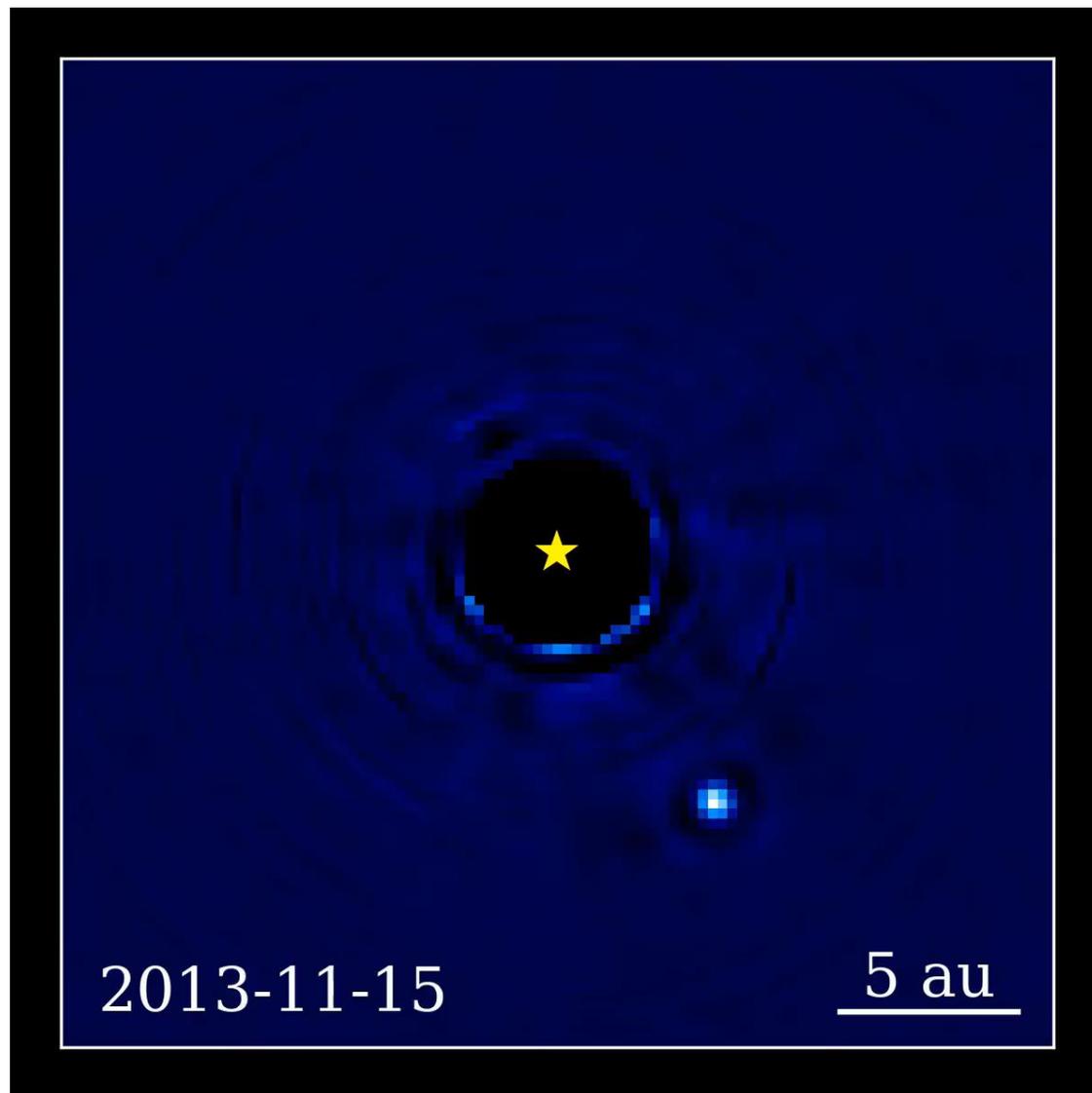
- コロナグラフなどにより主星の光を遮蔽

→ これらを組み合わせ，直接撮像が可能となる。

（ただし件数は少なく，現在までに30個前後ぐらい？）

恒星から遠い惑星ほど見やすい（暗すぎるとダメだが）。

がが座ベータ星b (約63光年先)



軌道半径：13.18 au  
(木星は5.2 au程度)  
サイズ：木星の1.7倍弱程度  
(質量は木星の7倍程度)

## 2. 直接撮像による惑星の発見と分析

"Direct imaging and astrometric detection of a gas giant planet orbiting an accelerating star"  
T. Currie et al., *Science*, **380**, 198-203 (2023)

直接撮像は、惑星自体を直接撮影・分析できるが、そもそも惑星を見つけ出すこと自体が難しい方法である。

（ものすごく明るい恒星のそばにあるかなり暗い光を見つけ出さないといけないため）

このため、「多分ここに惑星があるんだろうな」とわかっている対象でないと、見つけることは難しい。

今回、さまざまな工夫を盛り込むことにより直接撮像による系外惑星の発見・分析を行った、という研究が報告された。

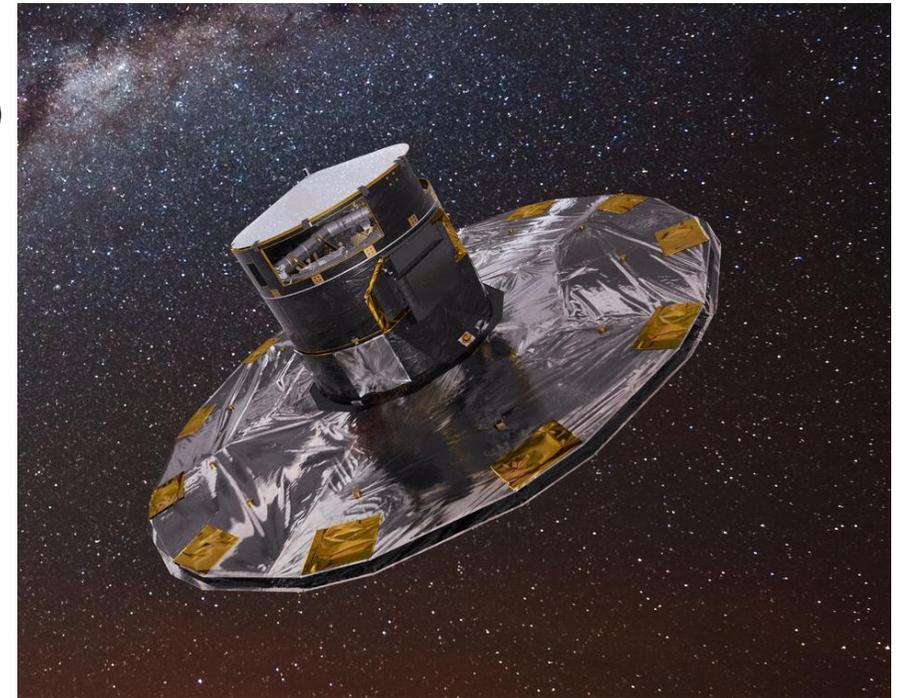
この研究では、高難易度の直接撮像での惑星発見を実現するために様々な工夫が盛り込まれている。特に重要なのは以下の2つである。

- ・ 観測に適した惑星のありそうな恒星系を事前に選別
- ・ すばる望遠鏡の極限補償光学（SCExAO）による高分解能

- ・ 観測に適した惑星のありそうな恒星系を事前に選別

これまでの直接撮像による系外惑星探査は、やみくもに多数のターゲットを撮影し、その時に惑星が写ることを期待する、というようなやり方であった。

状況が変わったのがESAのGAIA計画。  
この計画では、広い範囲の多数の恒星の運動をドップラー効果により測定し、データを公開。これをもとにすると、ある程度「どのぐらいの重さの惑星がどの程度の公転半径で存在するか」の予備データが得られる。

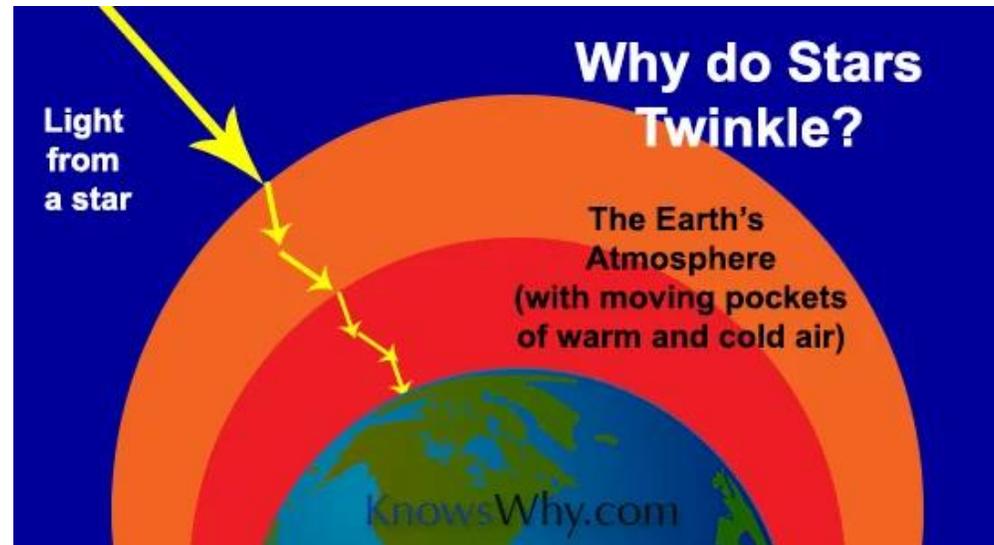


イラスト：欧州宇宙機関のwebページより

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Gaia/](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/)

- ・すばる望遠鏡の極限補償光学 (SCExAO)

地上の天文台は，衛星に比べて圧倒的に大きな主鏡をもち，高感度・高解像度の撮影が可能である．しかし大気の揺らぎ（風などによる上空の空気の動き）により光が揺れ動くため，その能力を十分に発揮できない．

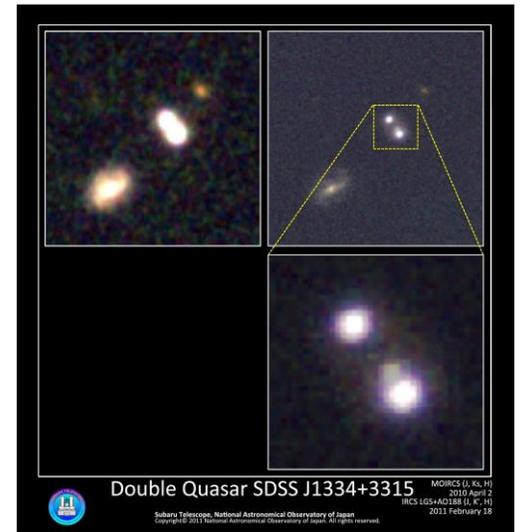
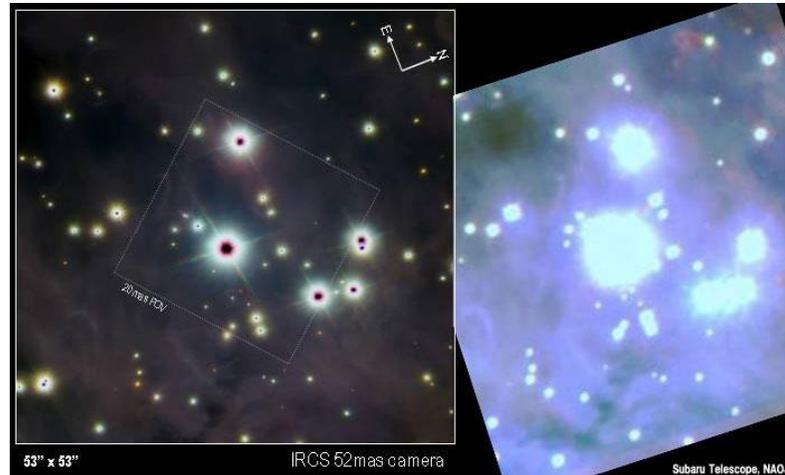
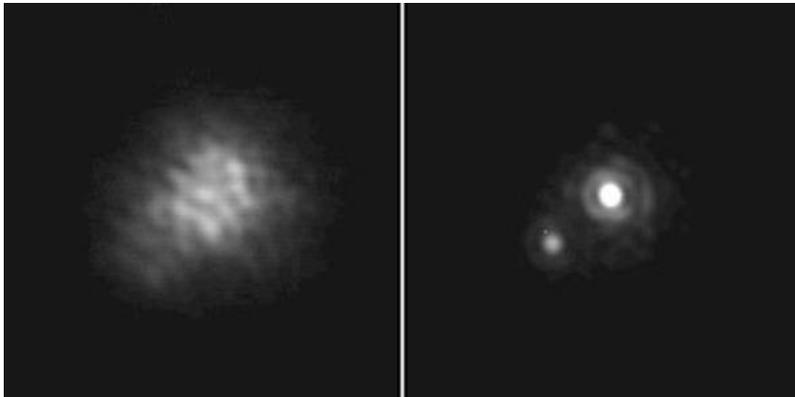


# ・すばる望遠鏡の極限補償光学（SCExAO）

そこで最近の天文台では、「補償光学」という手法が使われている。これは、ガイド星（観測対象付近の明るい星、またはレーザーで大気高層に一時的に作った発光源）を観測した際の歪みが消えるように鏡面を僅かに（ナノメートル単位で）変形させ、それにより大気による影響を減少させるものである。

[https://subarutelescope.org/old/Pressrelease/2006/11/20/j\\_index.html](https://subarutelescope.org/old/Pressrelease/2006/11/20/j_index.html)

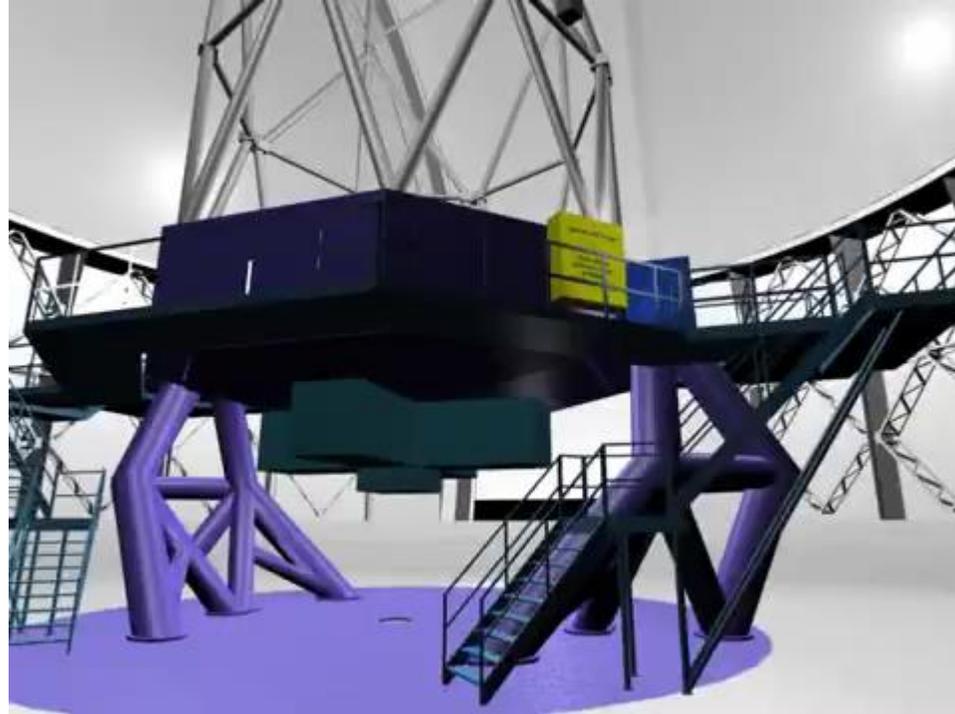
補償光学の効果の例



<https://subarutelescope.org/jp/gallery/pressrelease/2011/07/06/195.html>

[https://subarutelescope.org/old/Pressrelease/2002/01/16/j\\_index.html](https://subarutelescope.org/old/Pressrelease/2002/01/16/j_index.html)

# ジェミニ二天文台の補償光学装置の説明動画



[https://www.youtube.com/watch?v=3BpT\\_tXYy\\_I](https://www.youtube.com/watch?v=3BpT_tXYy_I)

- ・すばる望遠鏡の極限補償光学 (SCExAO)

実際には、単に鏡を変形させる、というだけではなく、

- ・観測された像の歪みから、鏡をどう変形させるかを瞬時に計算するプログラム
- ・観測値から近い将来の大気の変化を予測するプログラム
- ・それらを高速に実行するための演算システム
- ・高解像度になった光を素早く分光できる検出器

などさまざまな技術を組み合わせたシステムとなっている。

## ・すばる望遠鏡によるHIP 99770b(\*)の観測

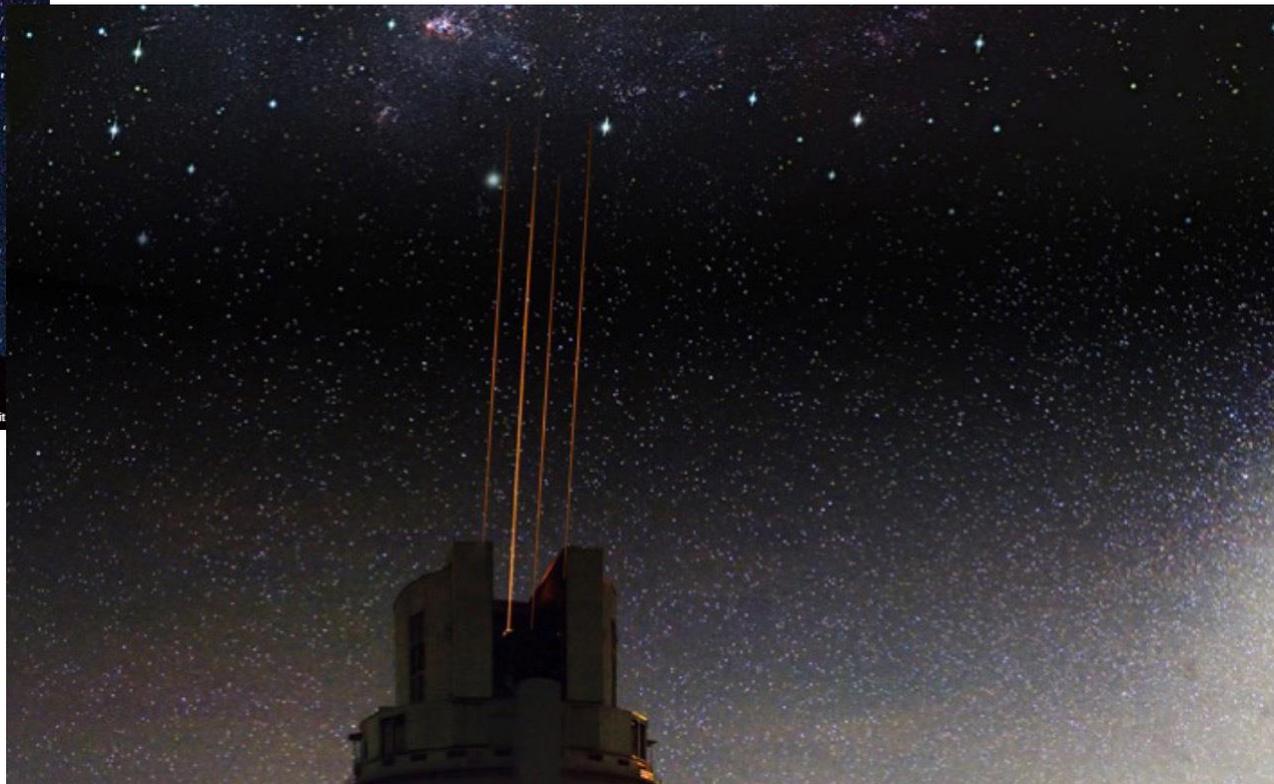
\* 各種の計画・衛星等によって発見・位置を特定された恒星は、星表としてまとめられる。HIP 99770というのは、ESAのヒッパルコス衛星のデータから作られた星表（HIP）のNo. 99770の恒星という意味で、そのあとに続く「b」はHIP99770の星系で最初に見つかった惑星、という意味である（「A」が主星を指し、b以降が惑星）。

主星：HIP 99770 ※白鳥座29番星（29 Cygni）

- ・地球からおよそ133光年（約 $1.26 \times 10^{15}$  km）先の恒星
- ・太陽の2倍弱の重さの恒星。太陽よりやや熱く（約8000 K）、14倍ほど明るい。
- ・GAIA衛星での観測から、そこそこの距離に大きめの惑星が存在することが推定されている。

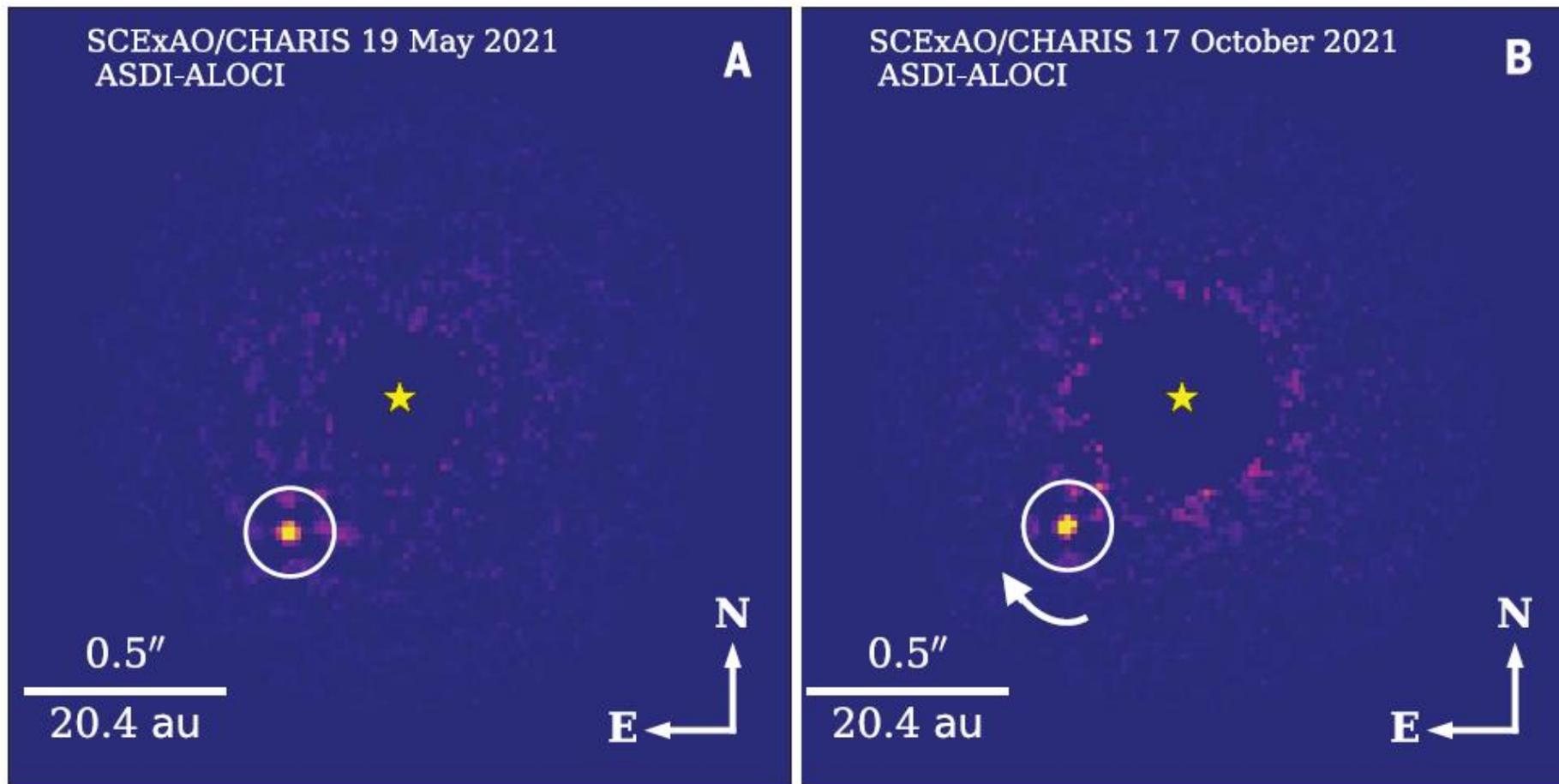


<https://www.nao.ac.jp/research/telescope/subaru.html>

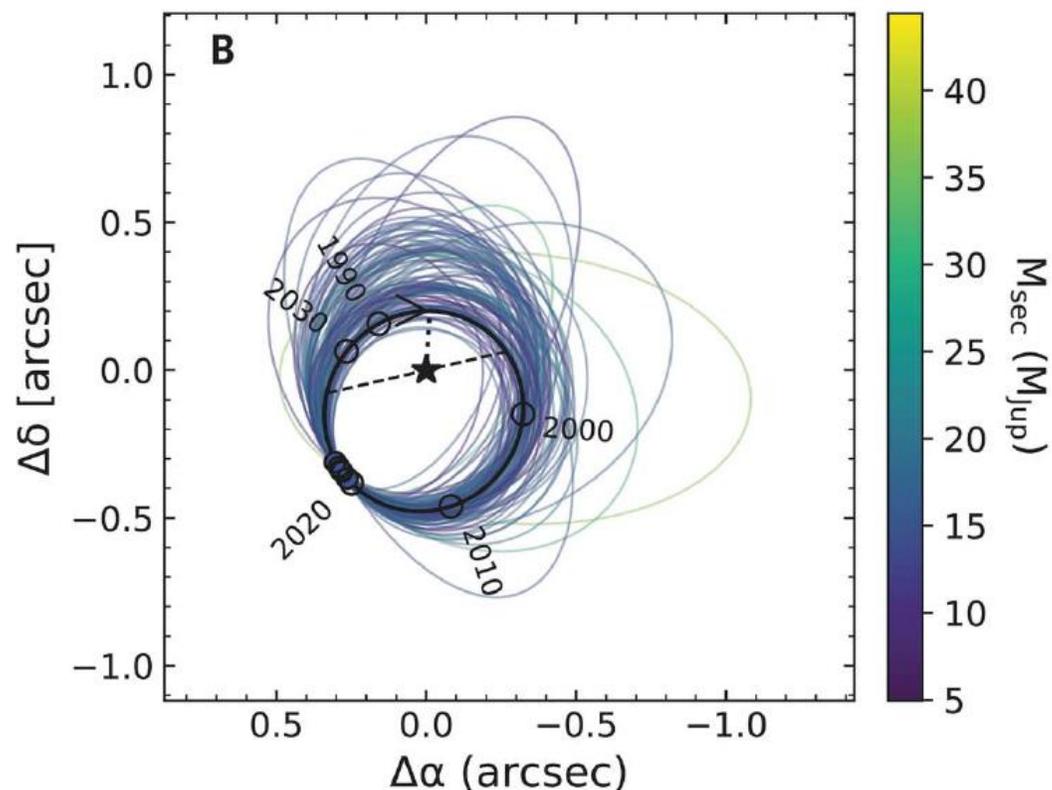


<https://www.nao.ac.jp/research/project/glao.html>

- すばる望遠鏡によるHIP 99770bの観測



- すばる望遠鏡によるHIP 99770bの観測

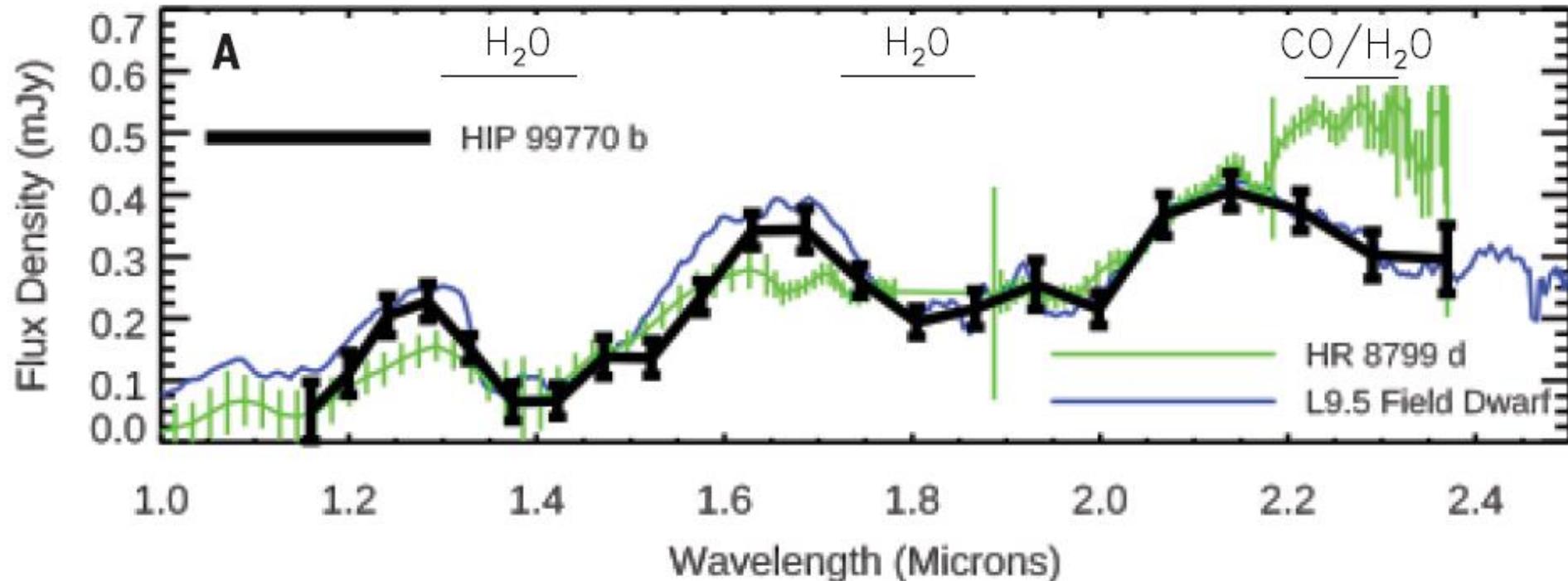


観測より，推定軌道半径は約17 au  
(木星の3.2倍強)，観測から推定  
された軌道と，GAIAで測定された  
ドップラーシフト，そして主星の  
推定質量等を使うことで，惑星の  
質量は木星の16倍程度とわかる。  
(褐色矮星にやや近い木星型)

- ・すばる望遠鏡によるHIP 99770bの観測

惑星の光（恒星の光を反射したものの）を観測できるので、分光が可能である。

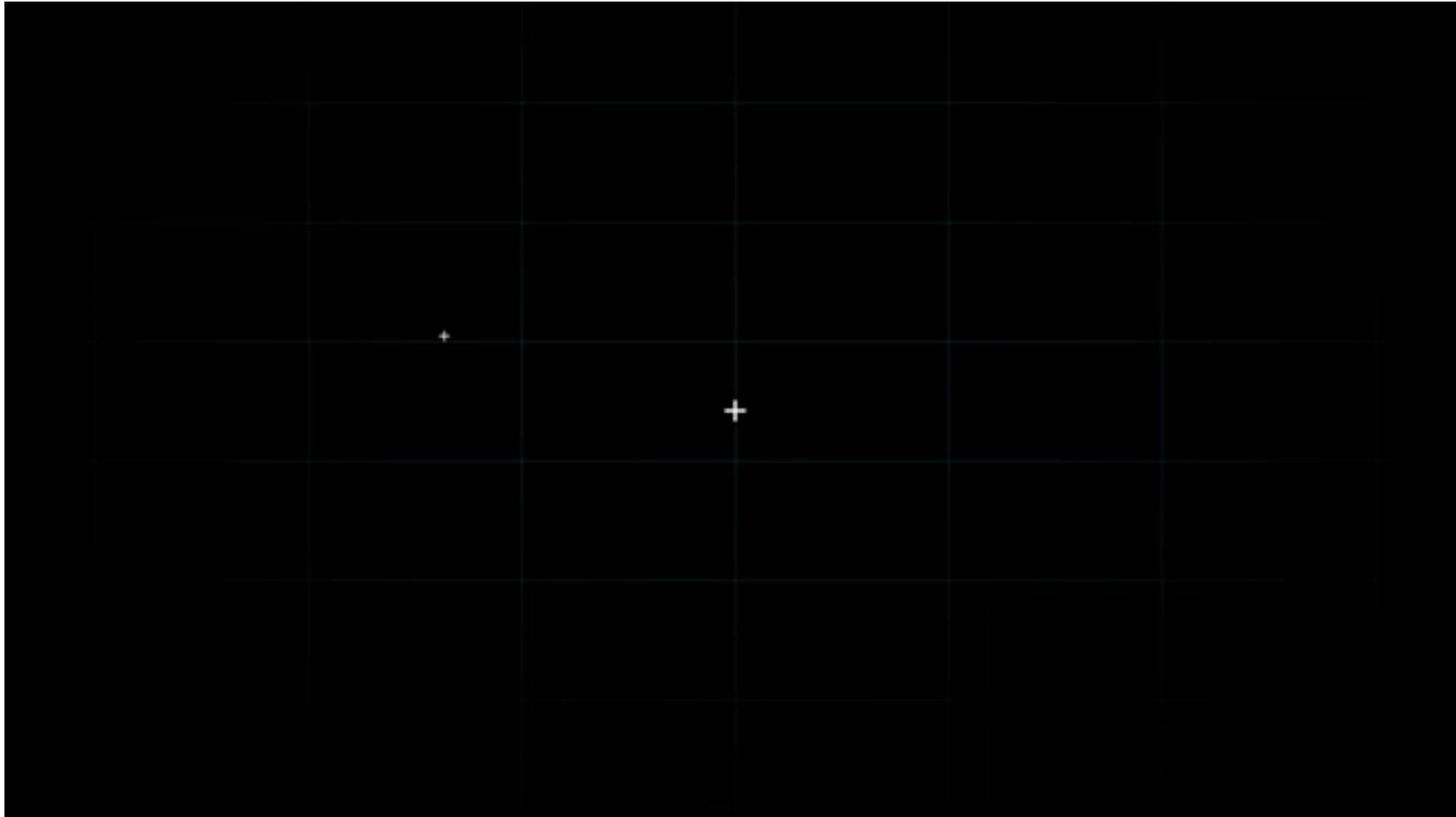
惑星からの光を波長分解し、その強度を分析。



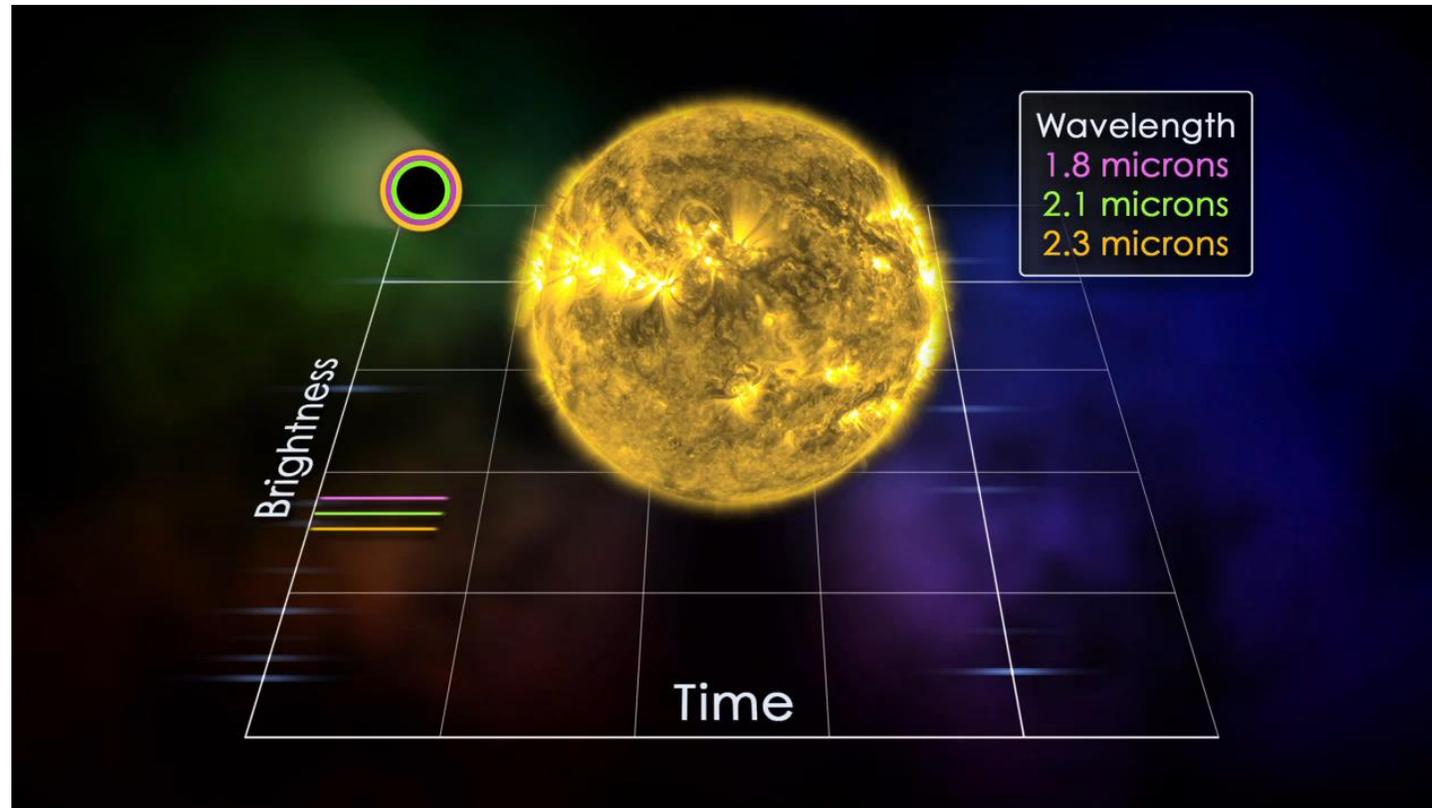
### 3. トランジット法による系外惑星大気分光

"Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRSpec PRISM"  
Z. Rustamkulov et al., *Nature*, **614**, 659-663 (2023)

系外惑星がその主星の前を横切ると，恒星の光が遮られるためわずかに光が弱くなる．これにより系外惑星を検出するのが，トランジット法と呼ばれる手法である．



トランジット法では，惑星大気分光を行うことができる．  
惑星の大気がある波長の光を強く吸収する場合，トランジット法では惑星が大きく見える（大気も光を遮断するので，大気のサイズも含めた大きさのものが恒星の光を遮る）．



このため、

「ある波長で測ると惑星が大きく見える」

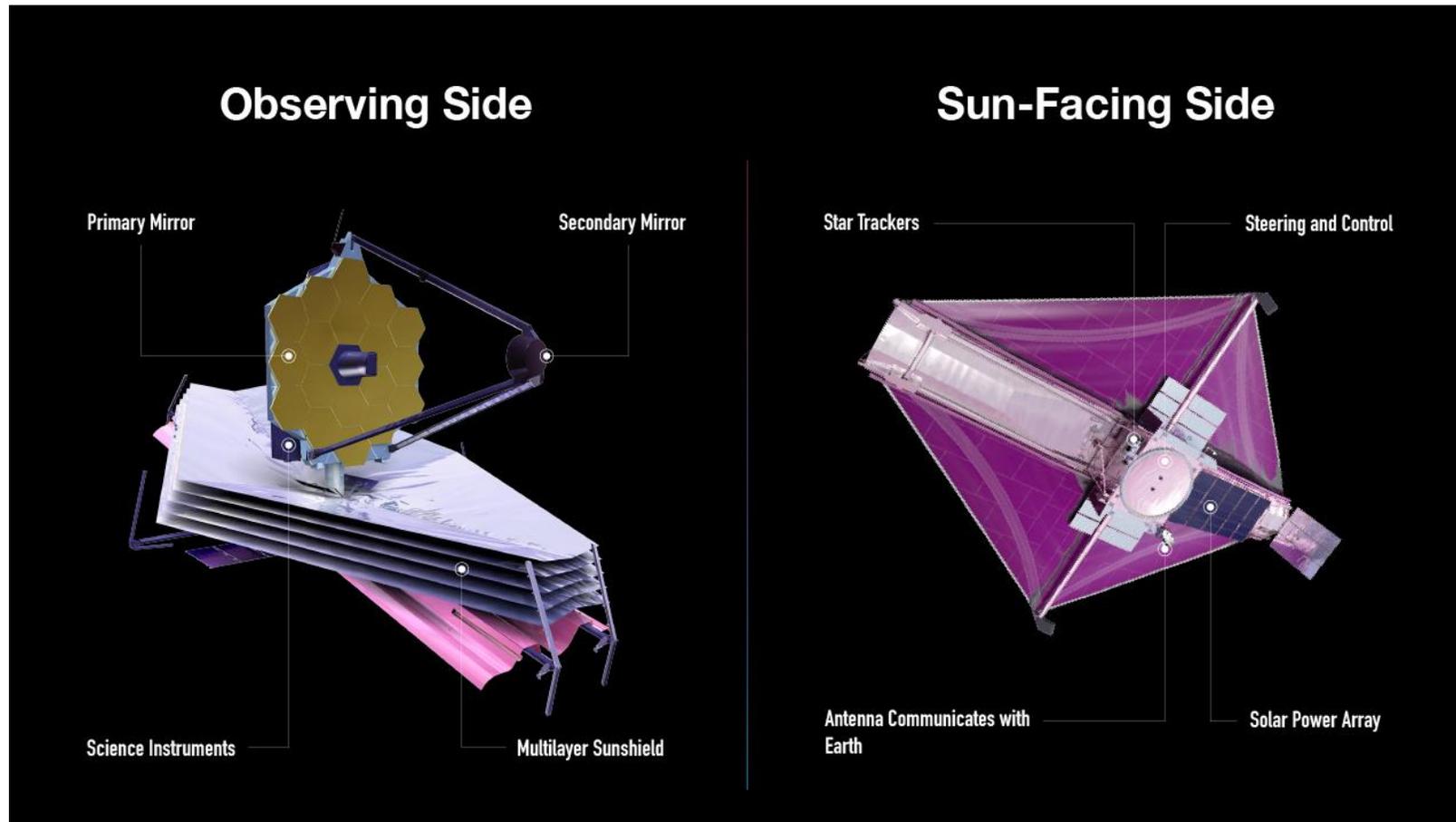
≡ その波長をよく吸う成分が大気に存在する

ということがわかる。

(さらに細かく分析&計算と組み合わせ、大気の高さ方向での成分の分布なども議論できる)

特に、 $1.8\ \mu\text{m}$ 付近には $\text{H}_2\text{O}$ の強い吸収、 $2.1\ \mu\text{m}$ 付近には $\text{CO}_2$ の強い吸収、 $2.3\ \mu\text{m}$ 付近には $\text{CH}_4$ の強い吸収があるため、これらの波長域での惑星の見た目の大きさから、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ の有無・量についての情報を得やすい。

この観測を精度よく行える新型の宇宙望遠鏡が、2021年末に打ち上げられたジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡である。



<https://webbtelescope.org/contents/media/images/01FJHPKRKJMSMM47QA3XKPJJ77>

この論文は、このJWSTによるデータをもとにした研究となる。

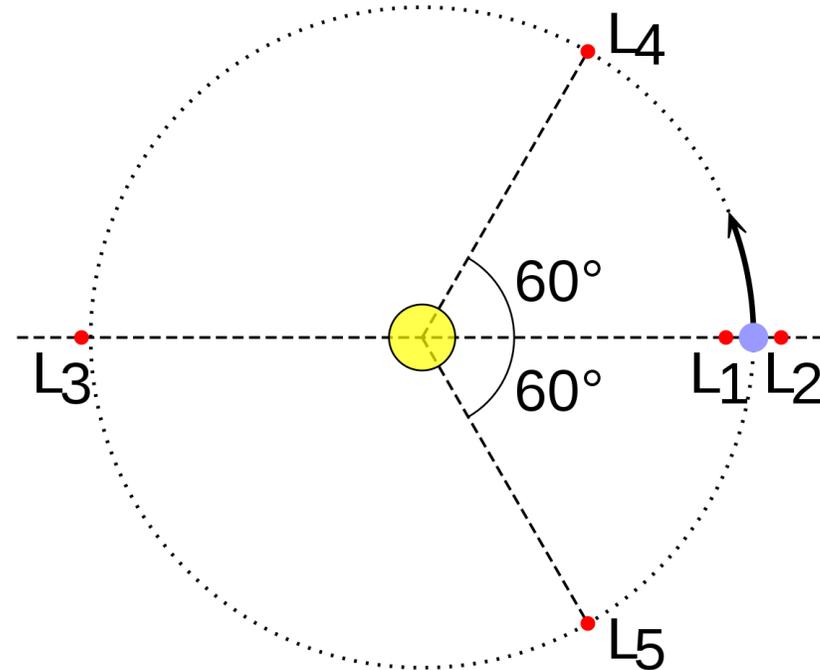
JWST：赤外観測用宇宙望遠鏡（可視光は見えない）

主目的：宇宙最初期の恒星の発見

位置：太陽-地球系のラグランジュ点（ $L_2$ ）に配置

※地球から約150万 kmと遠いので，何かあってもハッブルのように修理に行くことはできない

主鏡：直径約6.5 m



太陽・地球の赤外線をシールドで遮り，高精度な観測を実現



[https://www.youtube.com/watch?v=RzGLKQ7\\_KZQ](https://www.youtube.com/watch?v=RzGLKQ7_KZQ)

赤外線に限るが、ハッブルよりも圧倒的に高解像度 & 高感度の撮影が可能。

「創造の柱」 (わし星雲内の星が生まれている場所) での比較



JWSTで今回観測されたのは、WASP-39bという惑星である。この惑星は、ほぼ太陽と同じサイズの恒星のごく近くを回っているガス巨星（軌道半径0.05 au程度）で、土星程度の重さ & 木星程度の大きさをもつ。

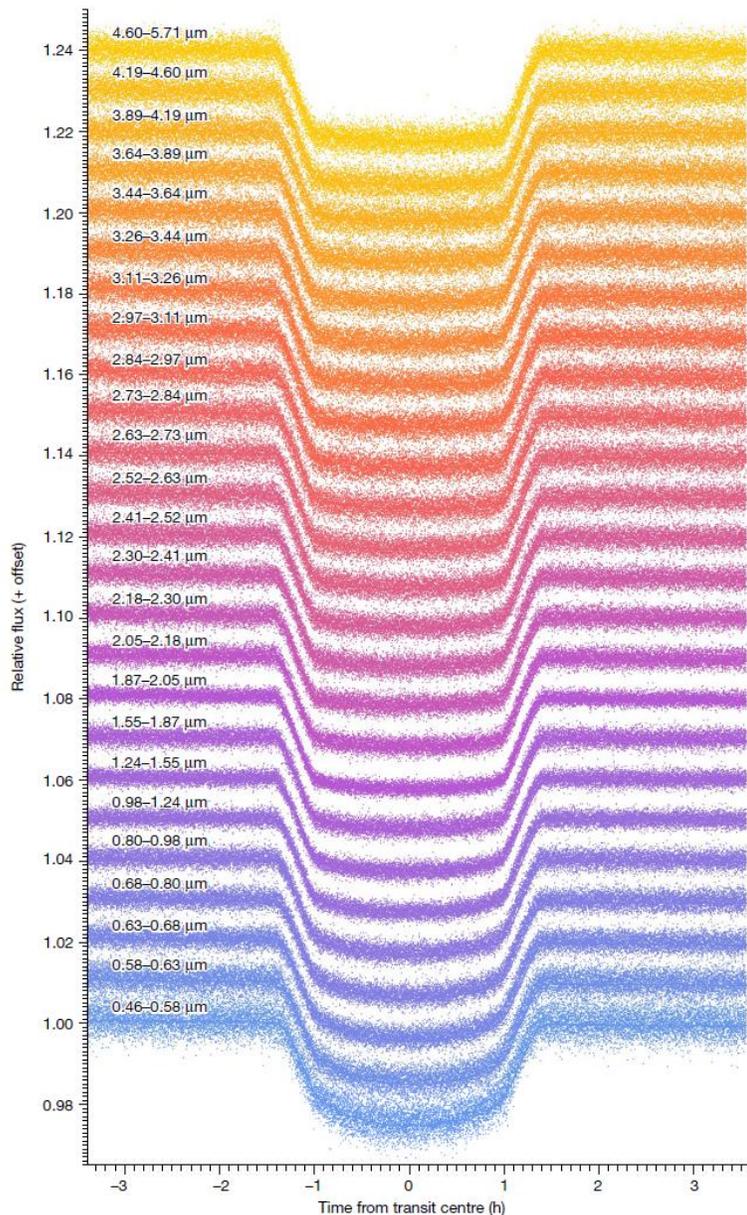
（かなり恒星の近くなので、熱で膨張。気温は1000 K程度）

この惑星が興味を持たれている理由は、大気中の金属量(\*)が通常の惑星形成理論から予測されるよりも高いことにある。現時点での推測では、この惑星は凍結線のかなり外側、つまり木星や土星よりももっと水などが多い外側で形成され、それが内側に移動してきたと考えられている。

\*天文分野では、HとHe以外の元素はすべて金属・重原子と呼ばれる。

ただWASP-39bの既存のデータは精度にやや難があり，金属量の見積もりに関して異論もある．  
そこで，JWSTのEarly Release Science Programの一つとしてより高精度な観測が行われた．

# 観測



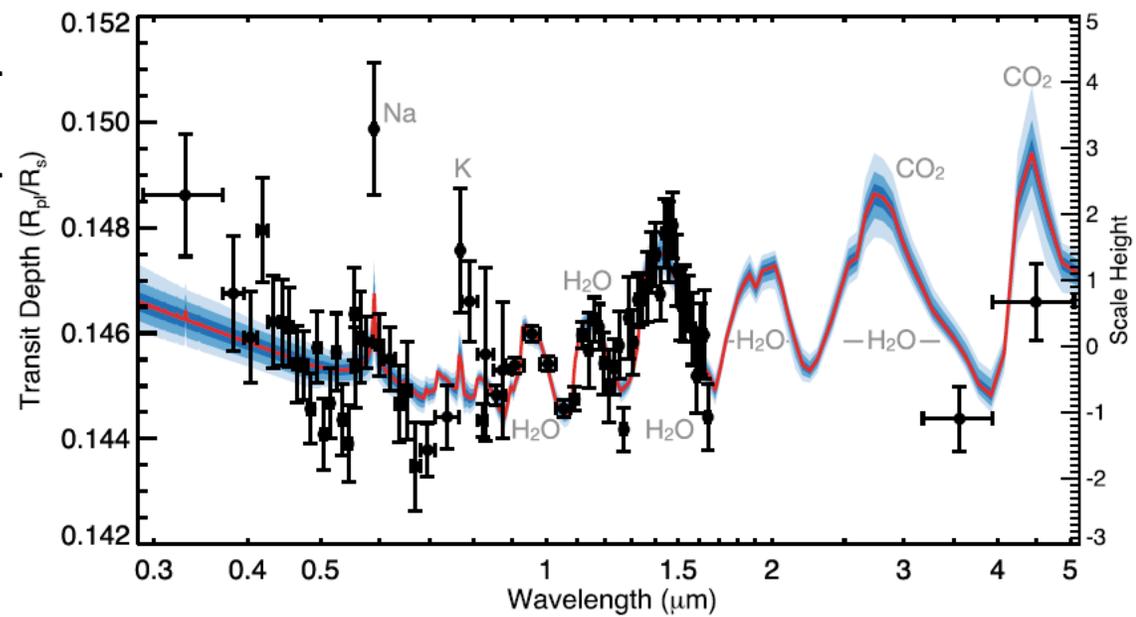
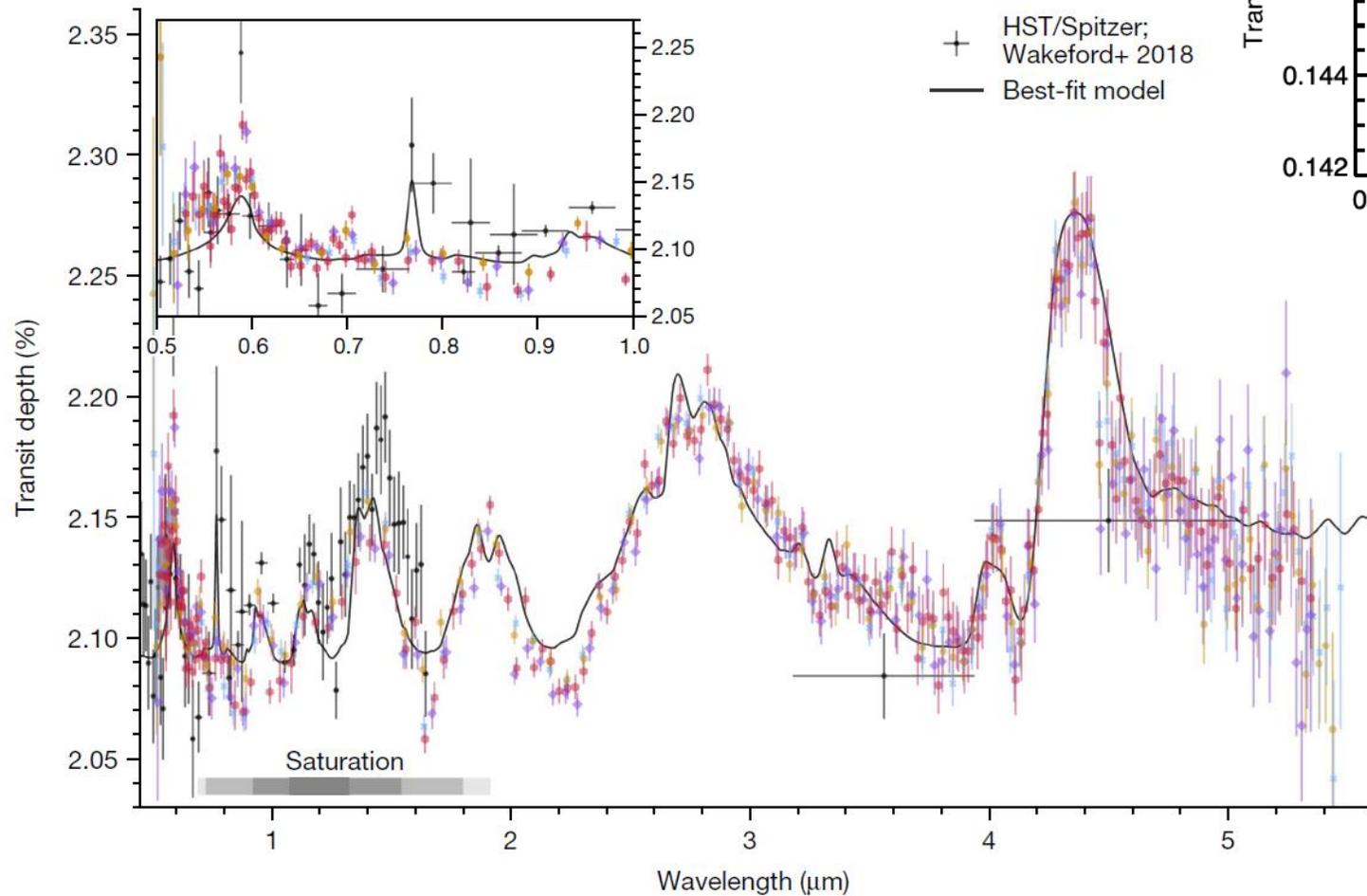
こんな感じの，いろいろな波長で同時観察したトランジットのデータを処理，各波長での吸収に変換する。

※この際，大気の混合度合いなどいろいろなパラメータが入ることから，データ処理の方法によって多少結果が変わることがある。

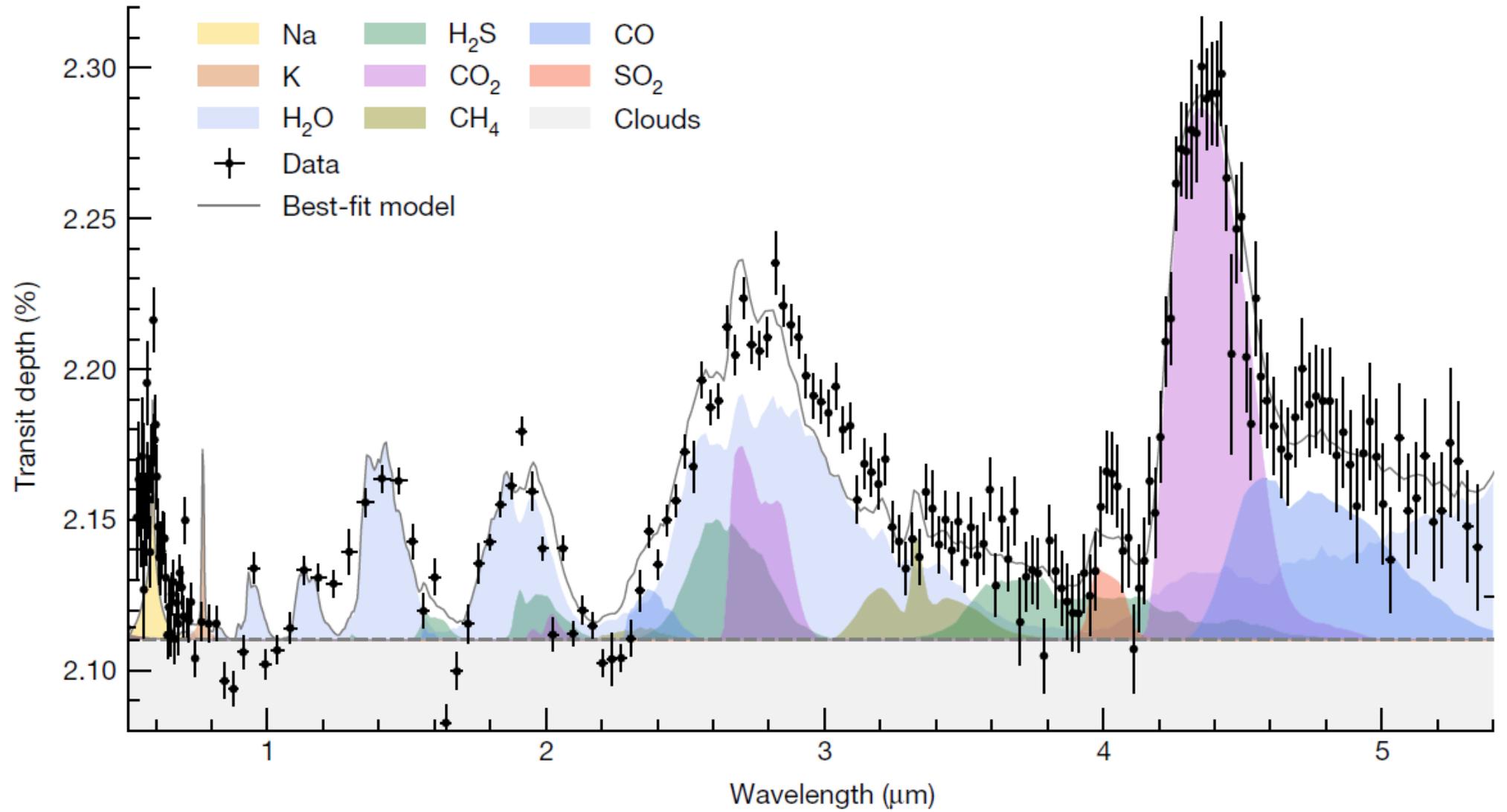
(論文ではいろいろ検討されている)

このへんが，直接測定できる実験室系での実験とは異なる点の一つ

以前の結果（右）と比べると，特に長波長側でデータの量・質が大幅に改善。



スペクトルを、この手の惑星の環境に存在しそうな分子の吸収の和として解析。



- 以前に見つかっていたH<sub>2</sub>Oに加え，CO<sub>2</sub>やCOもかなりの量が存在してそう。
- SO<sub>2</sub>などもおそらくいると思われる。
- 今後，このデータも踏まえてこの惑星がどこで生まれ，どのように化学的に進化してきたのかの議論がすすむのでは。