

天文学b

第2回 太陽系外惑星 第二の地球を探せ

平居 悠 (ひらい ゆたか)

到達目標

- 太陽系外の宇宙について理解する。
- 宇宙を理解する手法について説明できる。
- 広い視野を持ち多角的に物事を捉えることができる。

授業資料

学内：<http://roy.e.koeki-u.ac.jp/>

学外：<https://www.koeki-prj.org/roy/>

東北公益文科大学 学生専用サーバ

重要連絡

[s4 アカウントの設定を](#) / [世界大学ランキングアンケート2025のお願い](#) [オンライン学習環境について](#) / [個人PCのネットワーク接続について](#) / [教育研究棟での無線LAN接続](#) / [教科書・参考書の購入](#) / [パスワード管理をしっかりと](#) / [情報PC端末使用上の注意](#) / [s4](#) / [設定変更・障害情報](#)

教員のページ

[神田](#) / [広瀬](#) / [西村](#) / [山本](#) / [植田](#) / [平居](#) / [廣瀬美](#) / [保科](#) / [宝賀](#) / [神田和](#) / [カロール](#) / [ヤグナ](#)

1年次(編入生)

- [各種マニュアル\(まずここ!\)](#)
- [Webページの書き方](#)
- [情報教室授業環境のショートカットキー](#)

学生専用サーバ→平居→天文学b

前回

4D2U

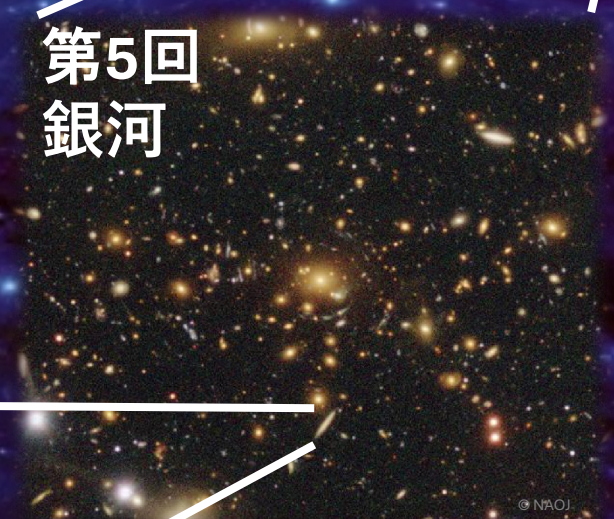
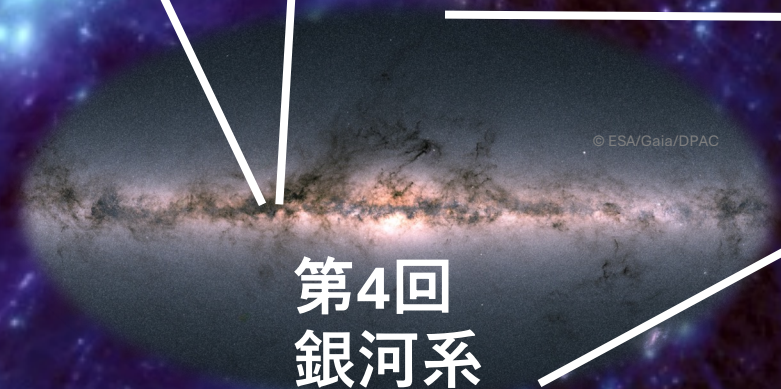
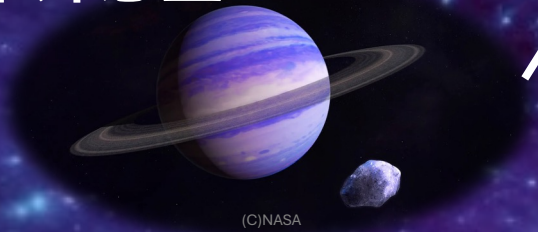
第6回
宇宙論

第5回
銀河

第3回
恒星

第2回
太陽系外惑星

第1回
宇宙の観測と理論



前回の目標

宇宙を理解するための観測と理論の手法について説明できる。

前回の内容

- 天文学とは
- 天体の明るさと等級
- 光赤外天文学
- シミュレーション天文学

天文学の目標

宇宙そのものとその中にある全ての天体の起源と進化と性質、およびそこで起きるさまざまな現象を理解すること

「天文学のすすめ」公益財団法人日本天文学会

<https://www.asj.or.jp/jp/epo/encouragement/>

なぜ天文学を学ぶのか？

ユニバーサルな視点

- 広大な空間（宇宙全体は 10^{23} km以上）、時間（宇宙誕生から138億年） スケール
- 多様な状態（極高温低温、極高密度、極希薄、極高エネルギー、極低エネルギー）

の理解

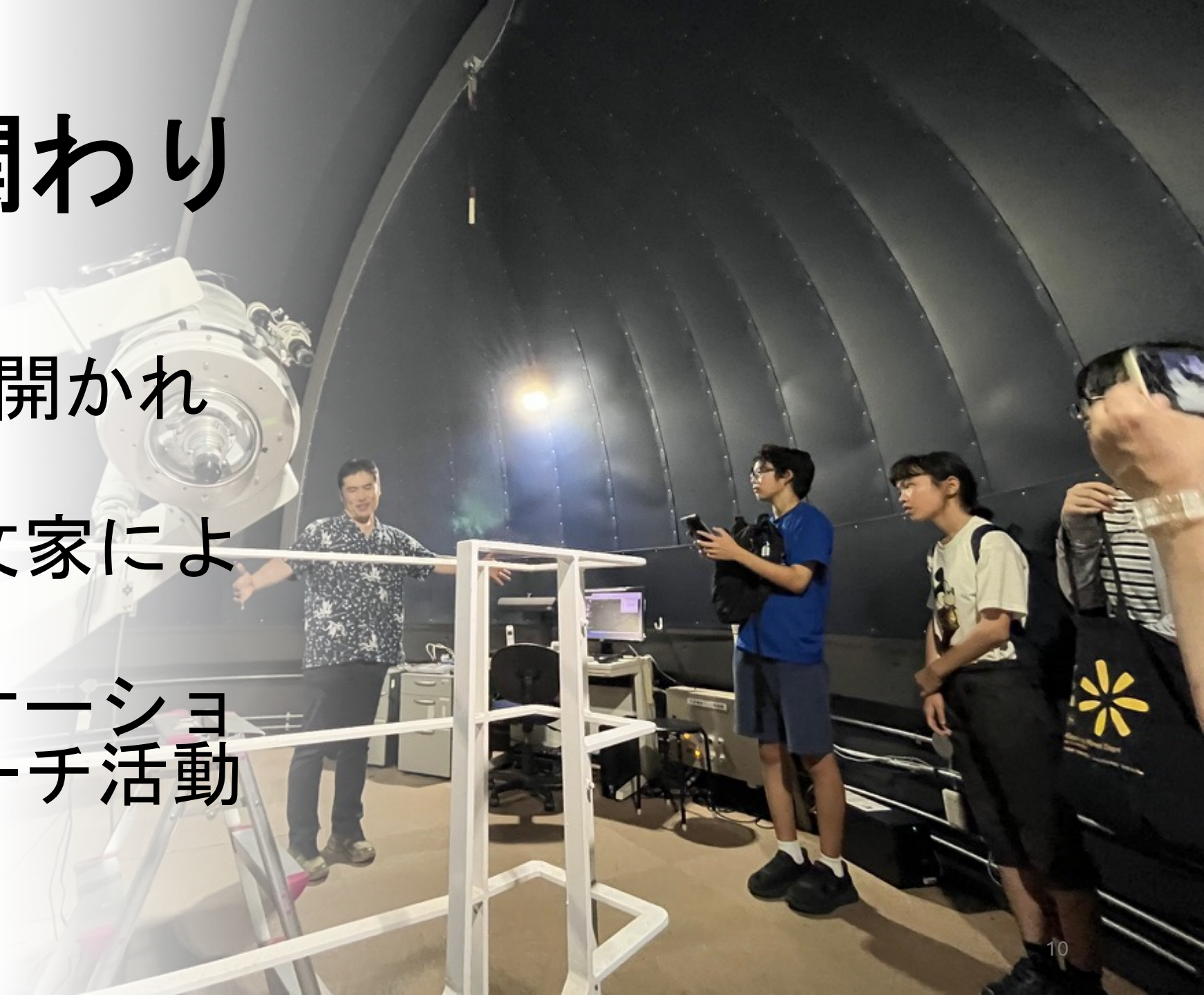


広い視野、全宇宙的（ユニバーサル）な視点に
立って考える力

社会との関わり

天文学は社会に開かれた学問

- アマチュア天文家による観測
- 科学コミュニケーション・アウトリーチ活動



多様な学問分野への入り口

経済経営
大規模プロジェクト

情報
データ分析

観光まちづくり
観光地としての
天文台

天文学

政策
宇宙政策

地域福祉
地域コミュニティ
の創出

国際
国際共同研究

見かけの等級

ポグソン (1829-91)

1等星は6等星の100倍
の明るさと定義

ポグソンの式：

$$m - n = -2.5 \log_{10}(I_m/I_n)$$



恒星の距離を表す単位

- 1 光年 = 光が1年間に進む距離 (1光年 = 9兆5千億 km)
- 1 パーセク (pc) = 年周視差が1"になる距離
 - 1" (秒) = 1' (分)の1/60
 - 1' (分) = 1° (度)の1/60
- 1 pc = 3.26光年

年周視差を p とすると、

$$d[\text{pc}] = \frac{1}{p}$$
$$d[\text{光年}] = \frac{3.26}{p}$$

絶対等級

恒星を10 pcの距離においてみたと
仮定したときの等級

太陽の見かけの等級は -26.7 等級だが、
絶対等級は 4.8 等級

撮像と分光

- 撮像観測

- 天体の写真を撮る。

- 分光観測

- 天体の光を波長毎に分ける。

自然科学におけるシミュレーションとは？

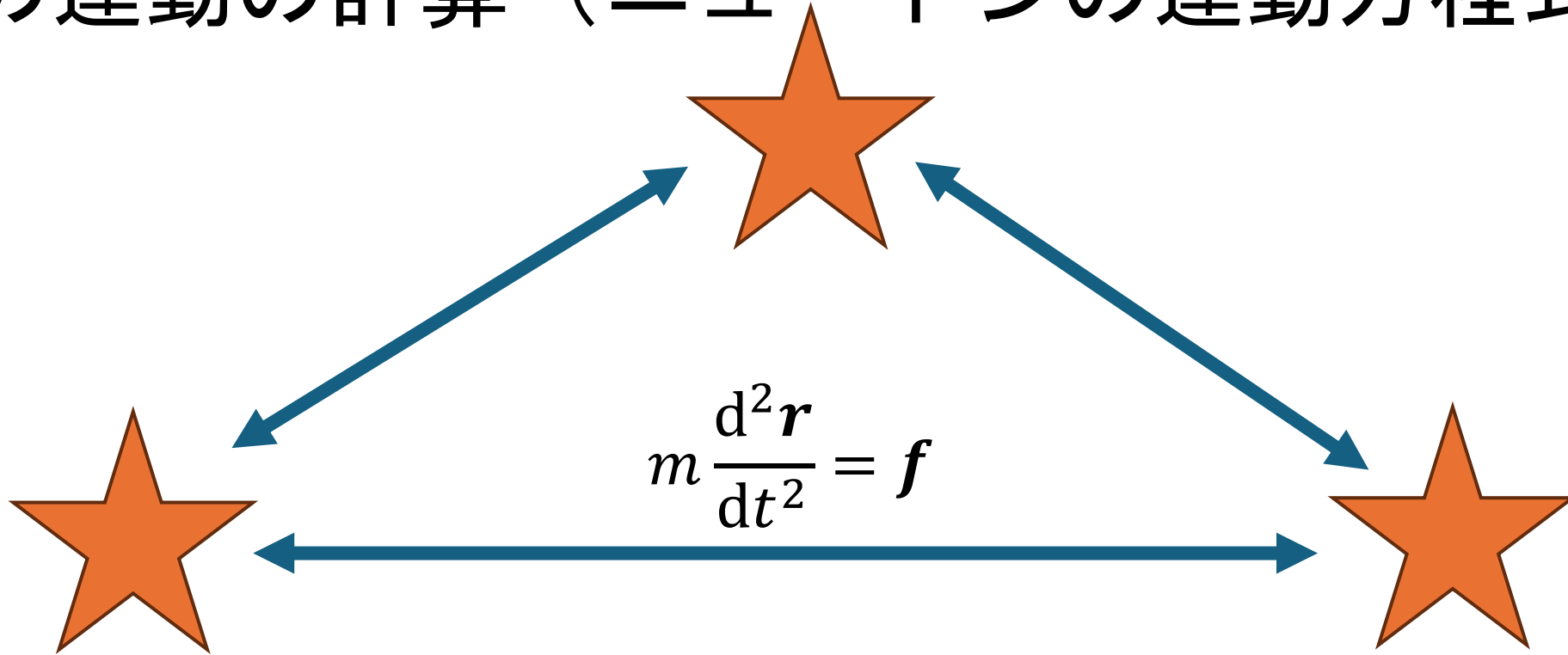
自然現象をコンピュータの中に再現すること

シミュレーションの方法

天体や現象をモデル化する

例：

星の運動の計算（ニュートンの運動方程式）



今回

4D2U

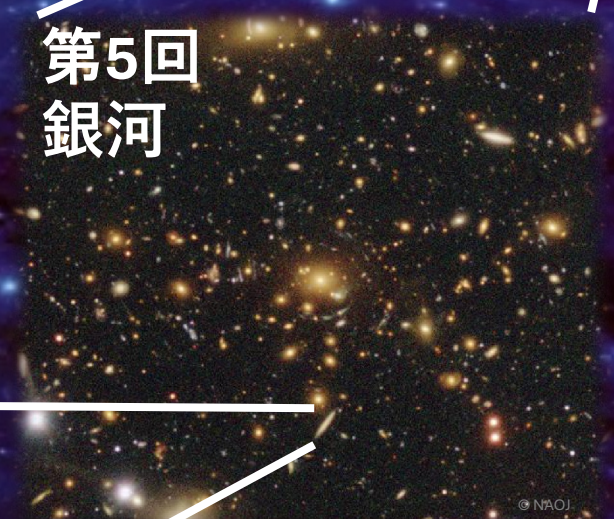
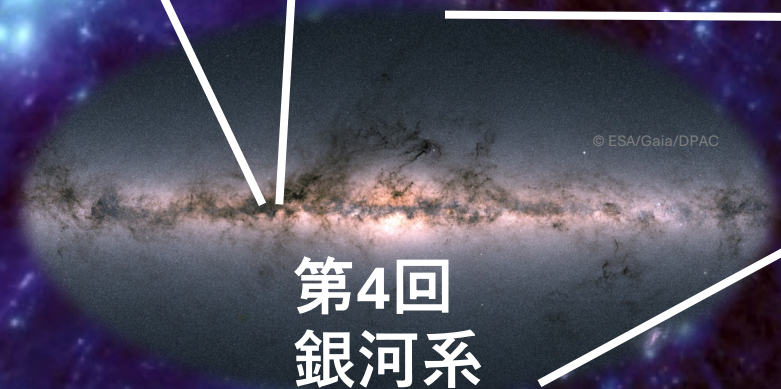
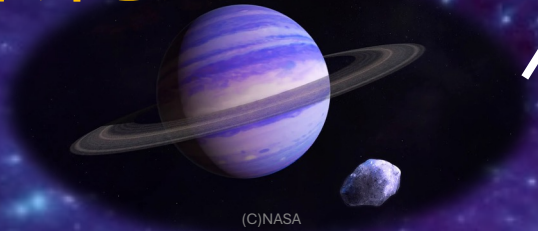
第6回
宇宙論

第5回
銀河

第3回
恒星

第2回
太陽系外惑星

第1回
宇宙の観測と理論



今回の目標

太陽系外惑星の観測手法
について説明できる。

今回の内容

- 太陽系外惑星発見の歴史
- 系外惑星の観測手法
- 第二の地球

今回の内容

- 太陽系外惑星発見の歴史
- 系外惑星の観測手法
- 第二の地球

太陽系外惑星とは

太陽以外の恒星の周囲を回る惑星
系外惑星とも呼ぶ

1995年

12年間にわたる分光観測の結果

1995年8月

「21個の恒星の周りに巨大惑星は存在しない。」

Walker et al. (1995), *Icarus*, 116, 359



Goldon Walker

マイヨールとケロツツ



Michel Mayor



Didier Queloz

初めての太陽系外惑星の発見

1995年11月

「太陽に似た恒星ペガス座51番星を木星質量の半分程度の巨大惑星がたった4日の公転周期で回っている。」

Articles | Published: 01 November 1995

A Jupiter-mass companion to a solar-type star

[Michel Mayor](#) & [Didier Queloz](#)

[Nature](#) 378, 355–359 (1995) | [Cite this article](#)

45k Accesses | 3699 Citations | 1421 Altmetric | [Metrics](#)

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

ペガサス座51番星

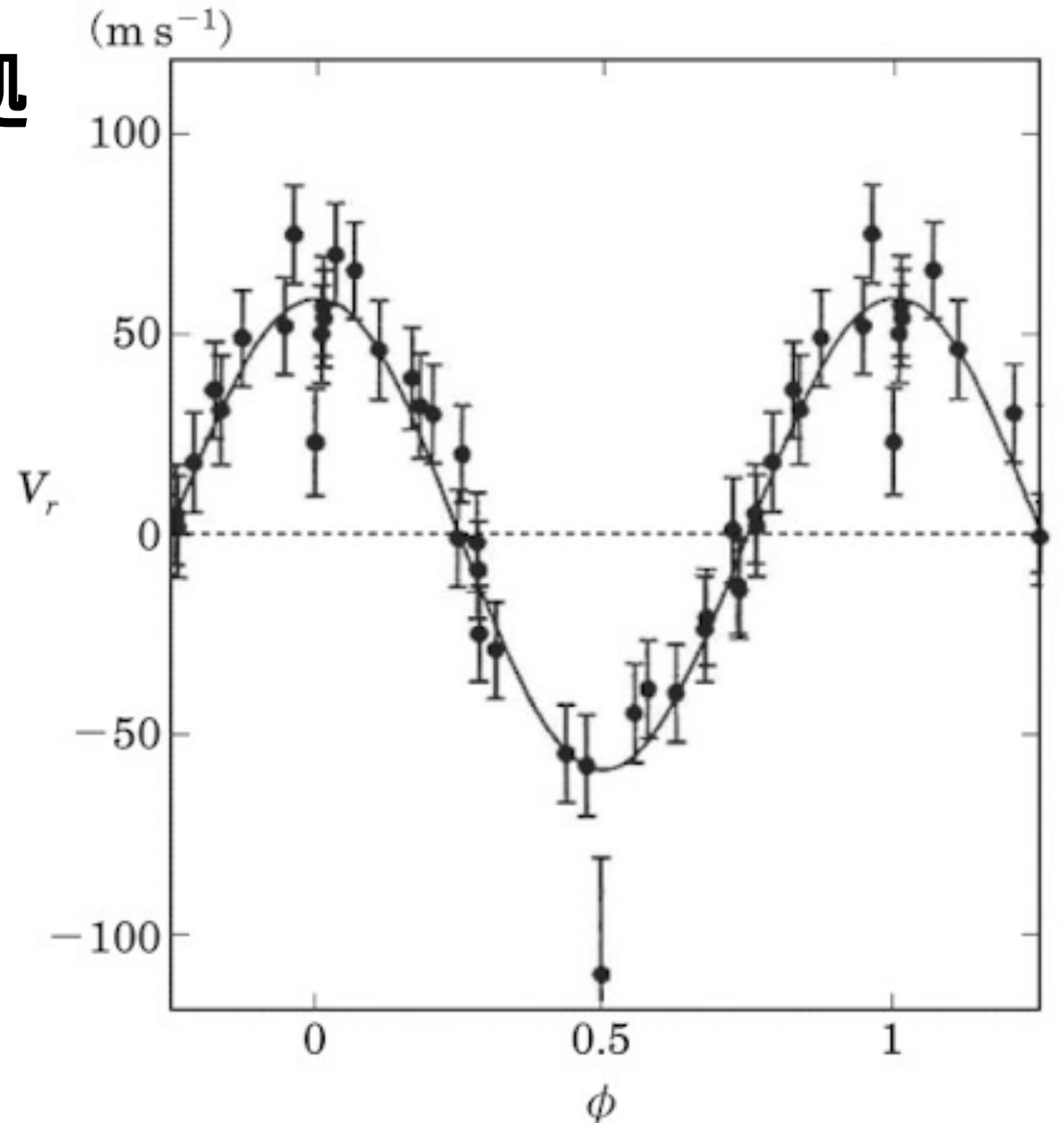


ペガサス座51番星の証拠

横軸：時間（位相）

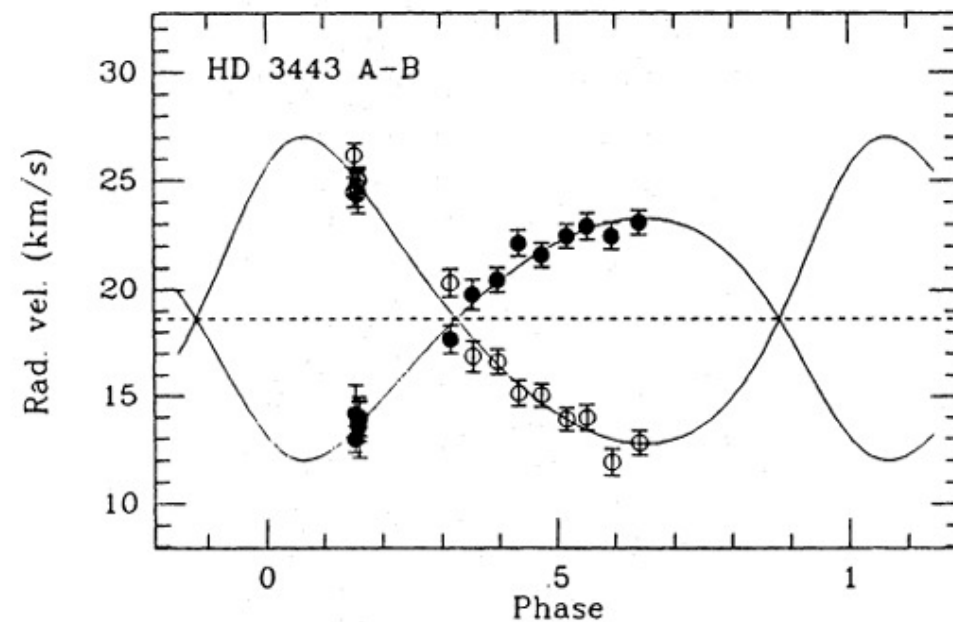
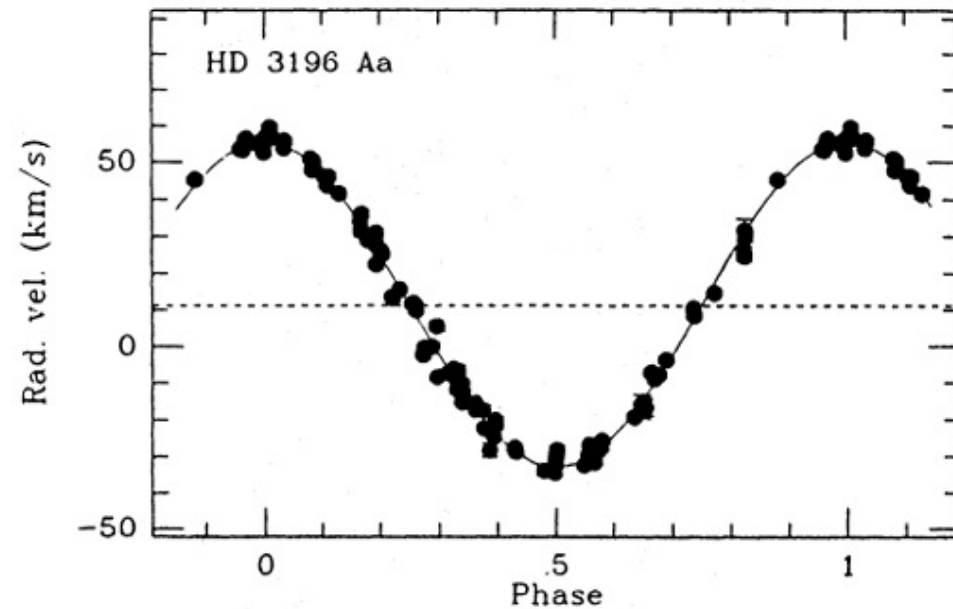
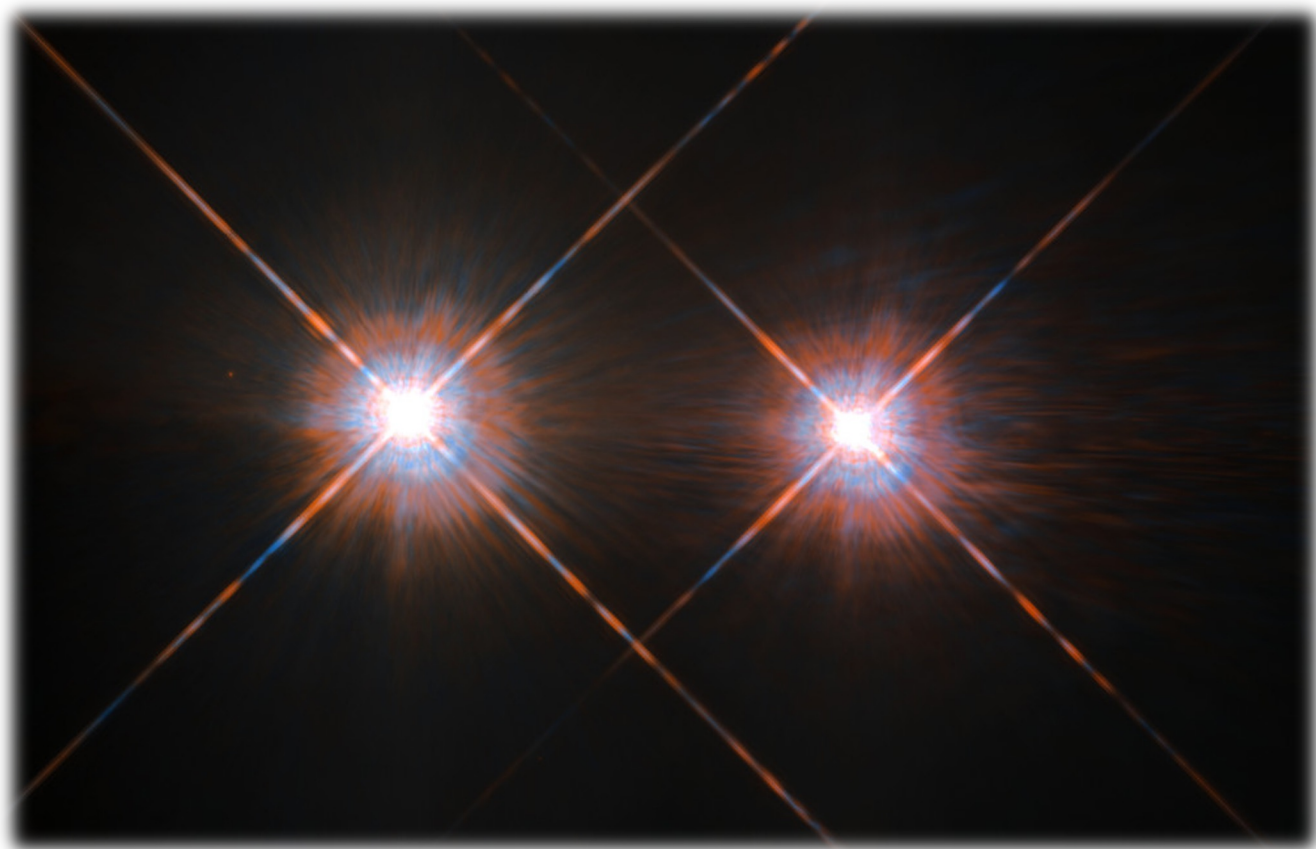
縦軸：視線速度の振幅

実線は軌道運動のベストフィット



マイヨールとケロッツはなぜ
惑星を発見できたのか？

13年間にわたる連星の 分光学的研究



Duquennoy & Mayor (1991), A&A, 248, 485

複数回の追観測による確認

- 1994年4月 オートプロバンス天文台で系外惑星探査開始
- 1994年9月 最初にペガスス座51番星を観測
- 1995年1月 ペガスス座51番星に速度のふらつきの兆候を発見
- 1995年8月 複数回の追調査の後観測結果を自ら確認し論文投稿
- 1995年9月 自ら追観測を実施
- 1995年11月 論文出版

複数の系外惑星の発見

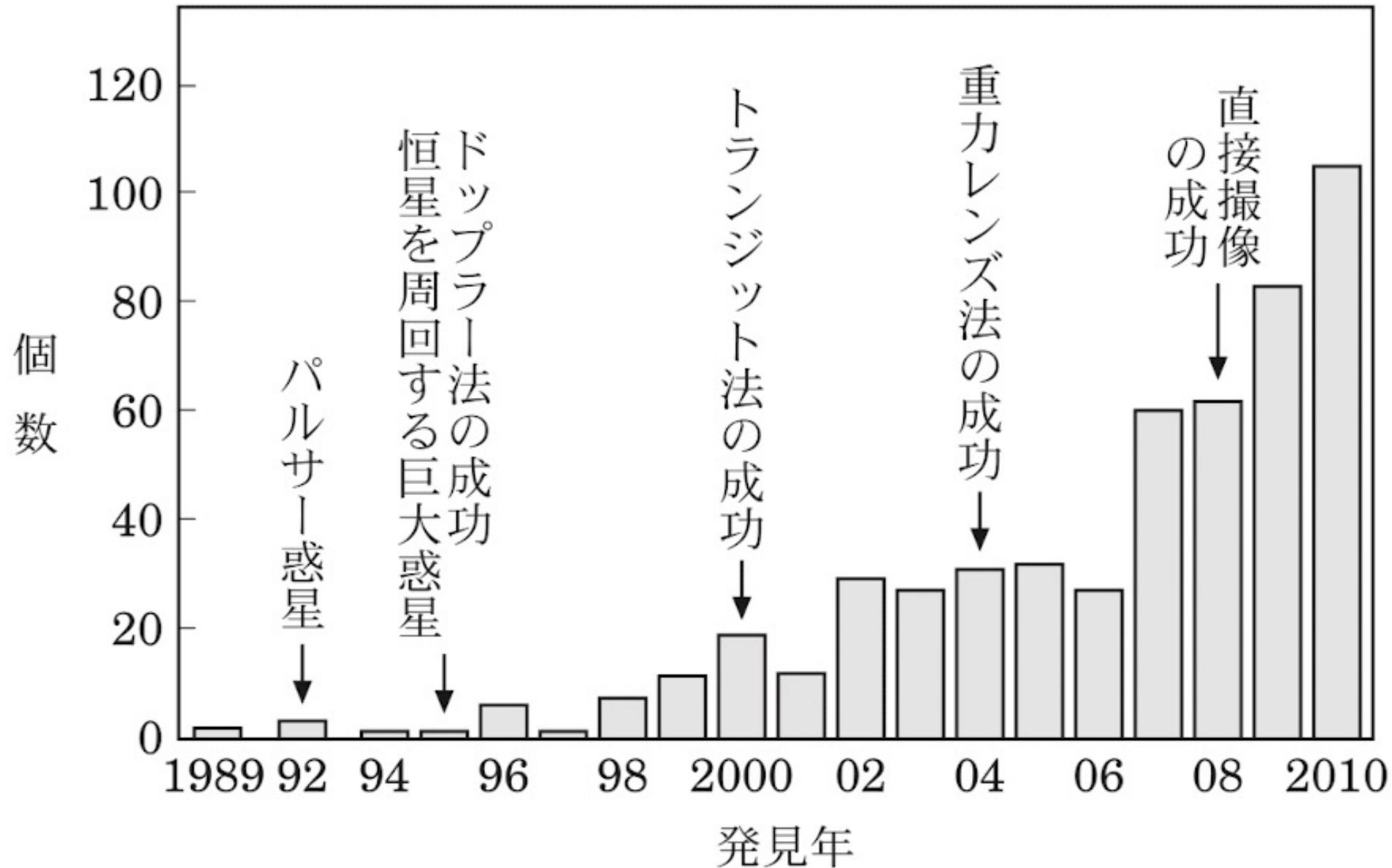
1996年、アメリカの
マーシーとバトラー
は

- おとめ座70星
- おおぐま座47番星
- かに座ロー星
- うしかい座タウ星
に惑星を発見



Geoffrey W. Marcy

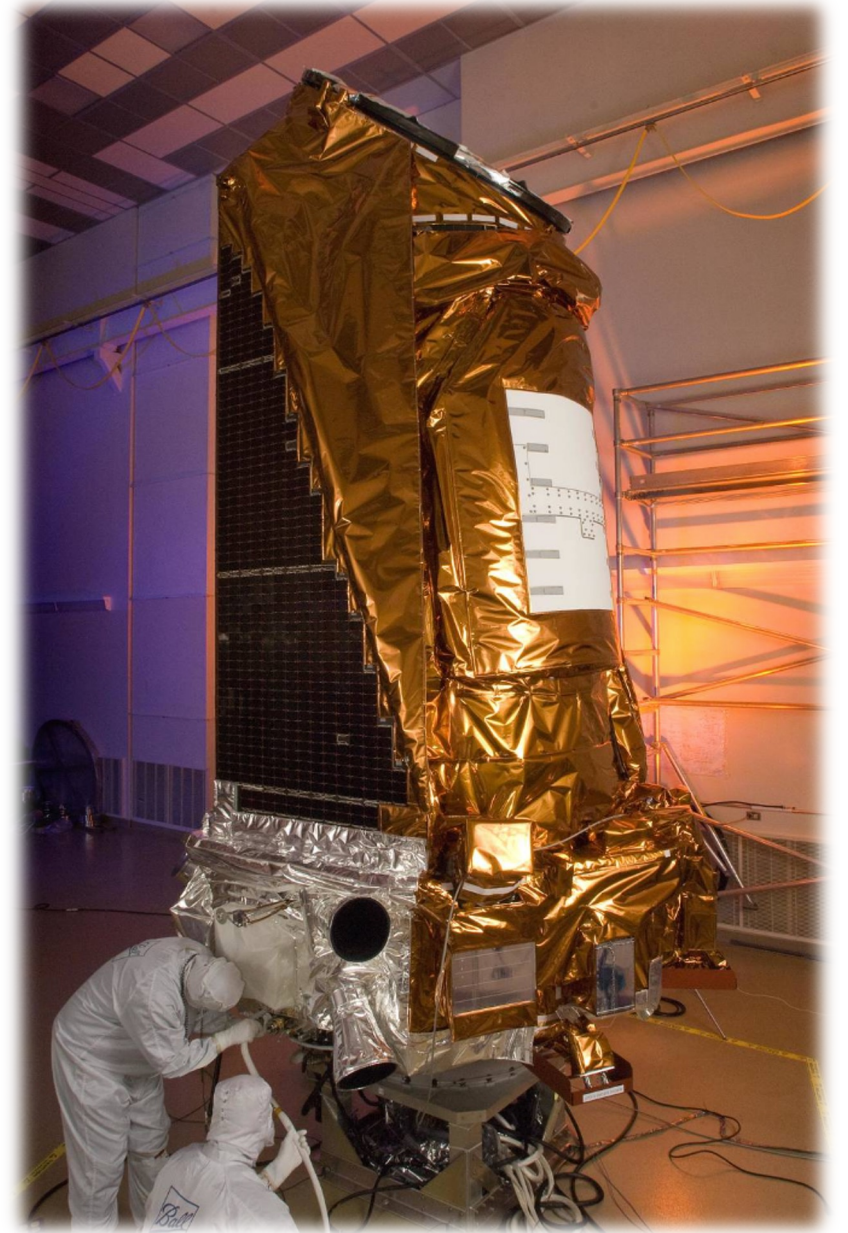
2010年までの系外惑星数



田村元秀 (2015) 『太陽系外惑星』 日本評論社

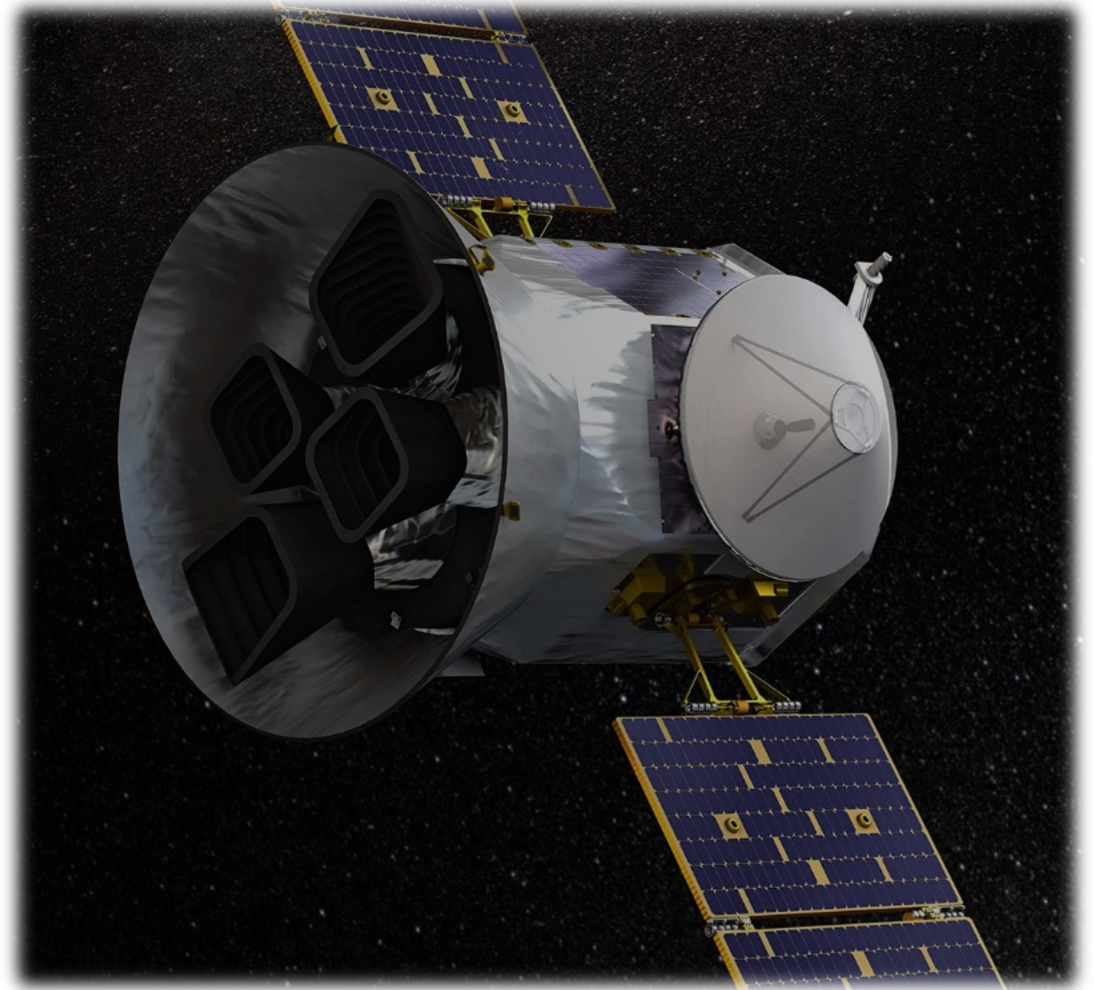
ケプラー衛星

- トランジット法による太陽系外惑星探査専用の宇宙望遠鏡
- 2009年打ち上げ
- 3,333個の系外惑星を発見
- 2018年運用終了



TESS衛星

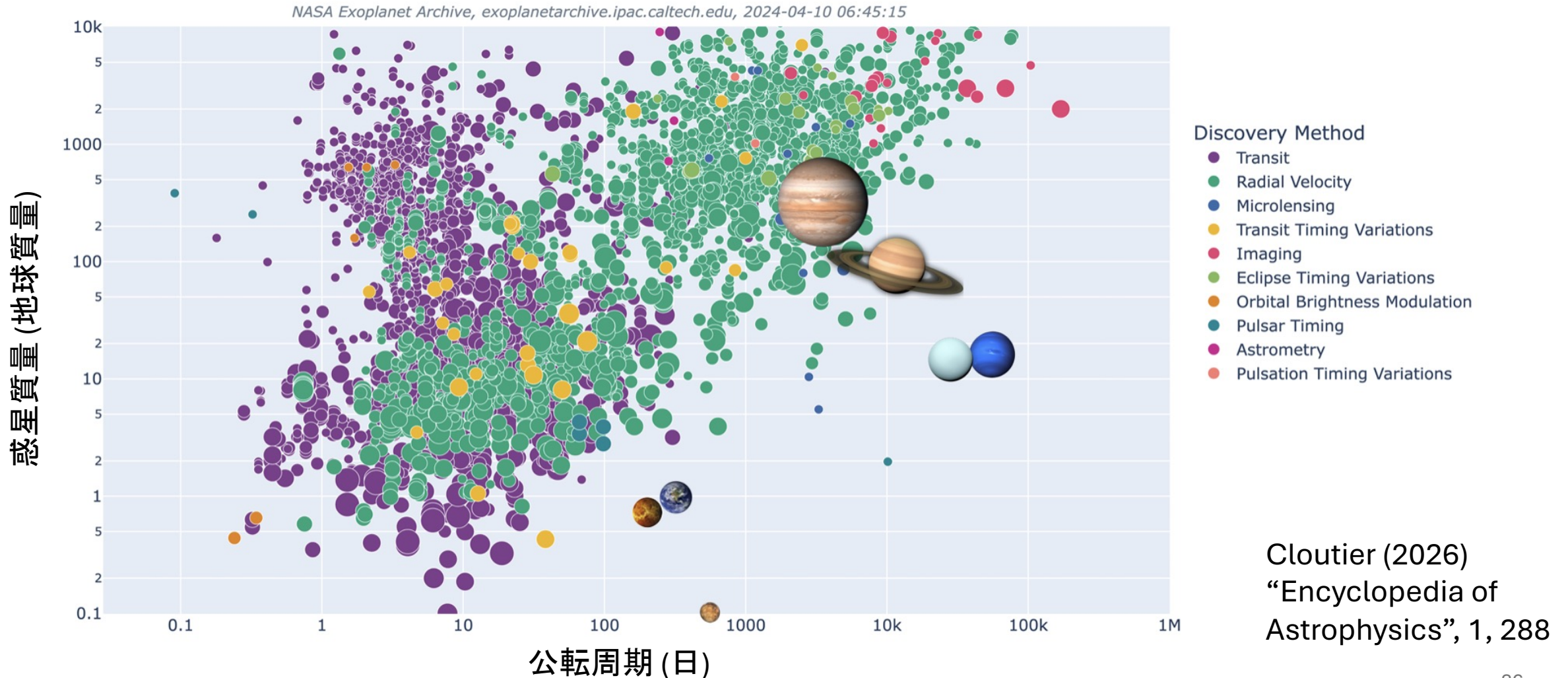
- ケプラー衛星の後継機
- 2018年打ち上げ
- 運用中
- 2026年6月13日現在で
897個の系外惑星を発見



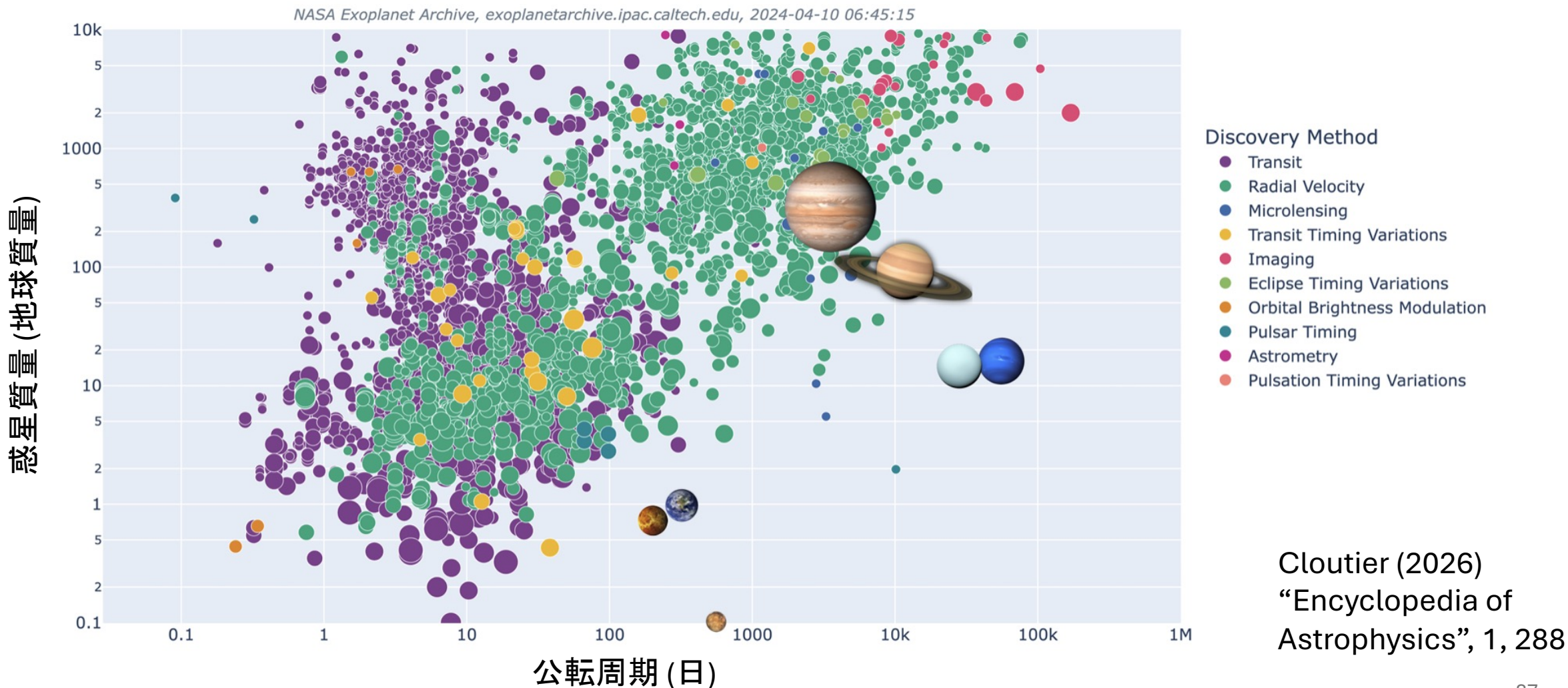
太陽系外惑星の分布

2026年6月13日現在、**6298個**の系外惑星が確認されている。

<https://science.nasa.gov/exoplanets/>



発見された系外惑星はなぜ以下のような質量-公転周期の分布をしているのか？



2019年ノーベル物理学賞



Michel Mayor



Didier Queloz



今回の内容

- 太陽系外惑星発見の歴史
- **系外惑星の観測手法**
- 第二の地球

系外惑星の観測は難しい

系外惑星は主星と比べて

15から30等級

暗い

系外惑星の観測手法

- ドップラー分光法
- トランジット法
- 直接撮像法

系外惑星の観測手法

- ドップラー分光法
- トランジット法
- 直接撮像法

ドップラー分光法とは？

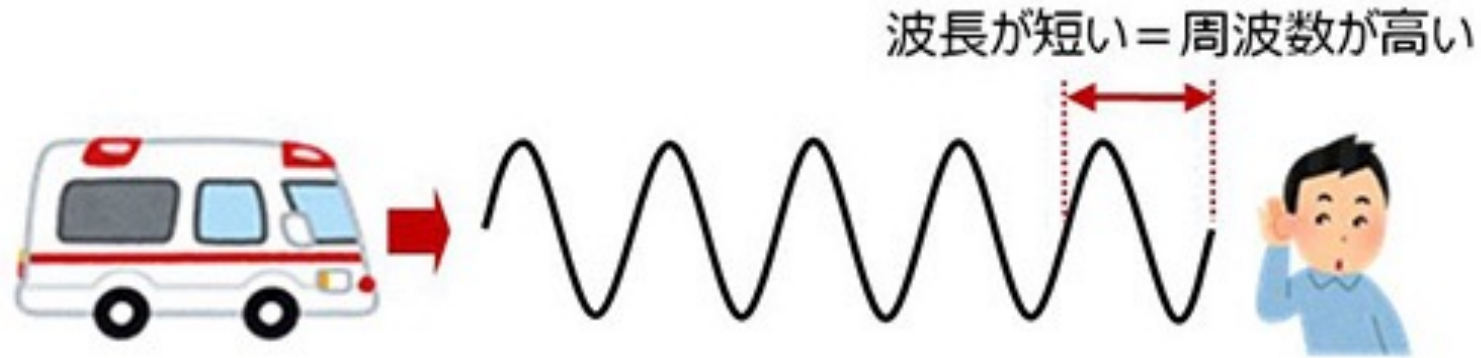
- 惑星の公転に伴う主星（恒星）の速度ふらつきを、恒星のスペクトル線の移動から測定する方法。
- ドップラー法、動径速度法、視線速度法とも呼ばれる。

ドップラー効果

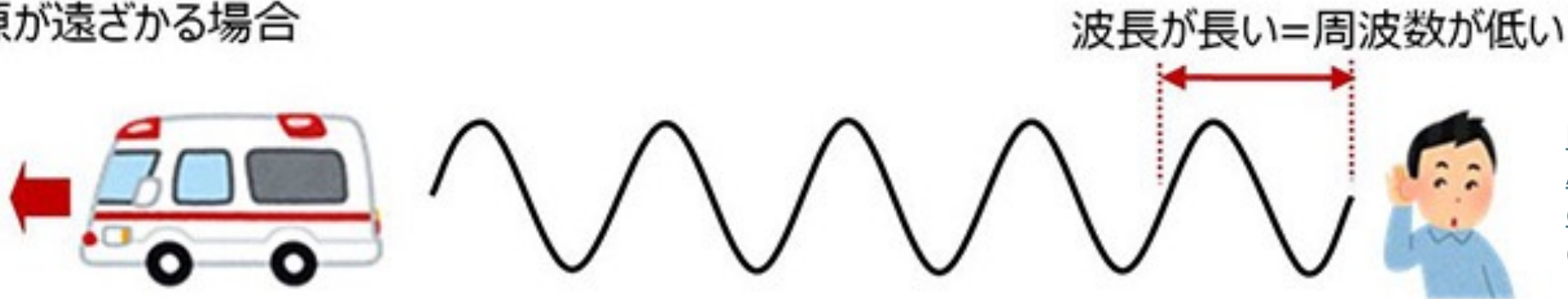
音源が静止している場合



音源が近づく場合



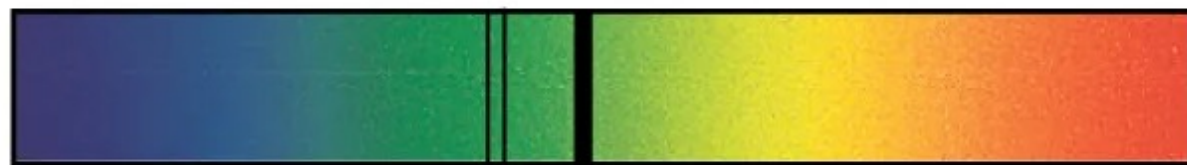
音源が遠ざかる場合



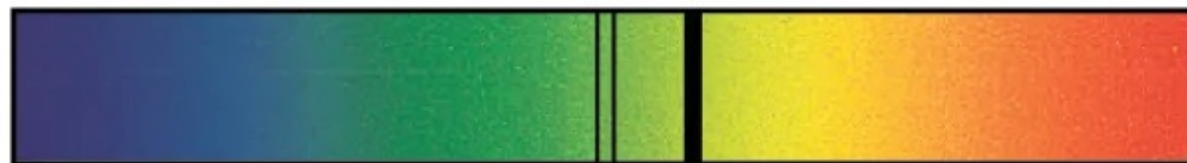
<https://www.fbnews.jp/201909/unnyouki/index2.html>
(2026年6月13日参照)

光のドップラー効果

恒星が近づくとき



波長の短い側（青色）にシフト
← shift →

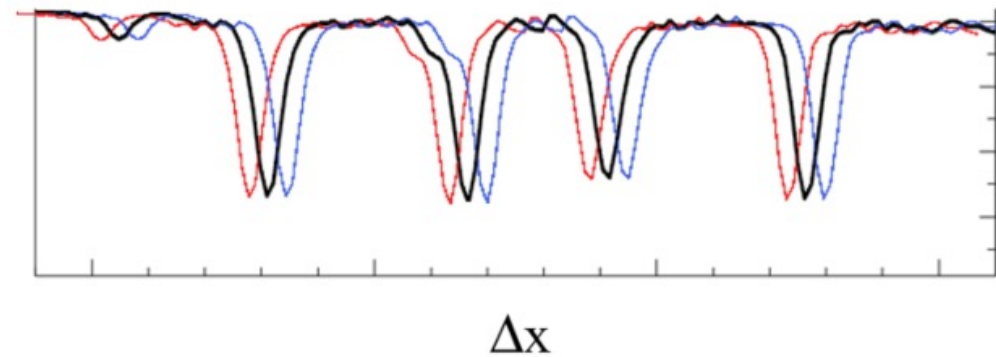
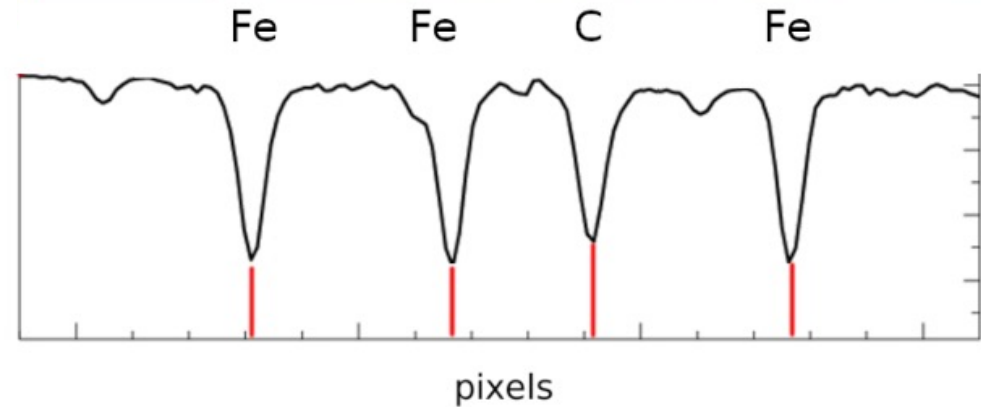
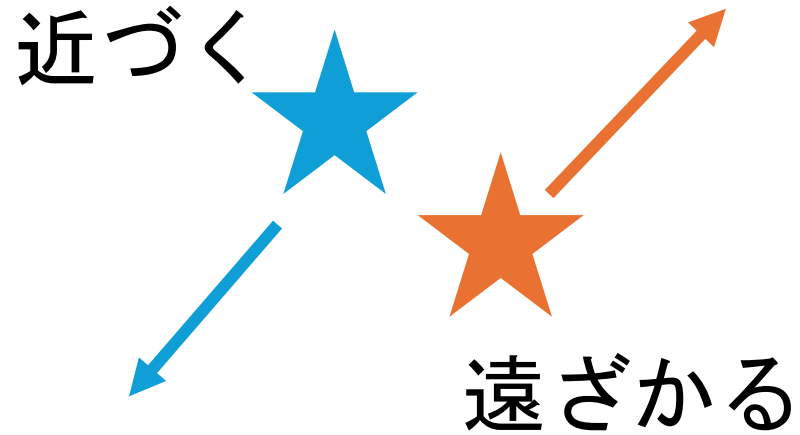


波長の長い側（赤色）にシフト
← shift →

恒星が遠ざかるとき



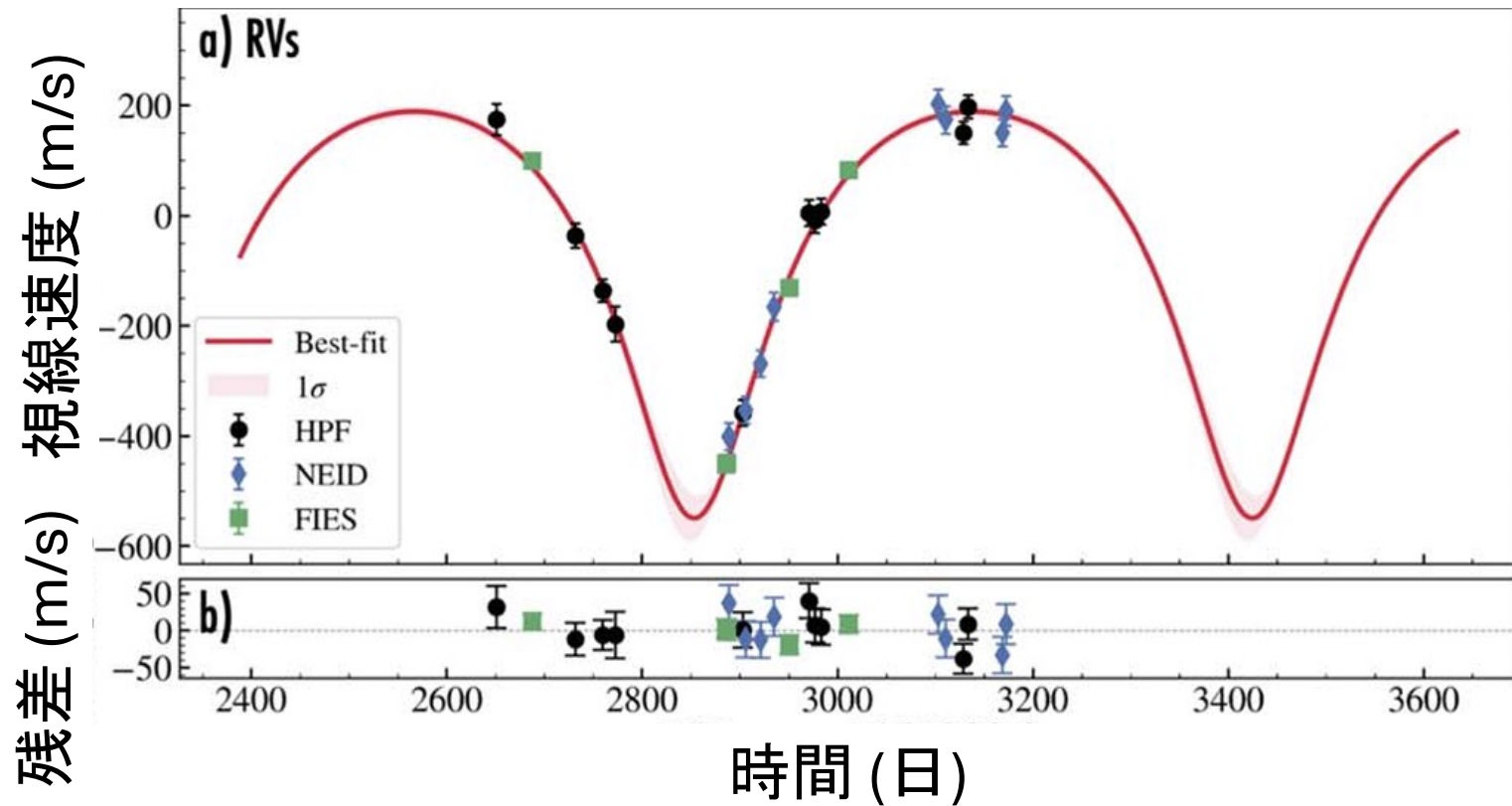
ドップラー分光法での観測イメージ



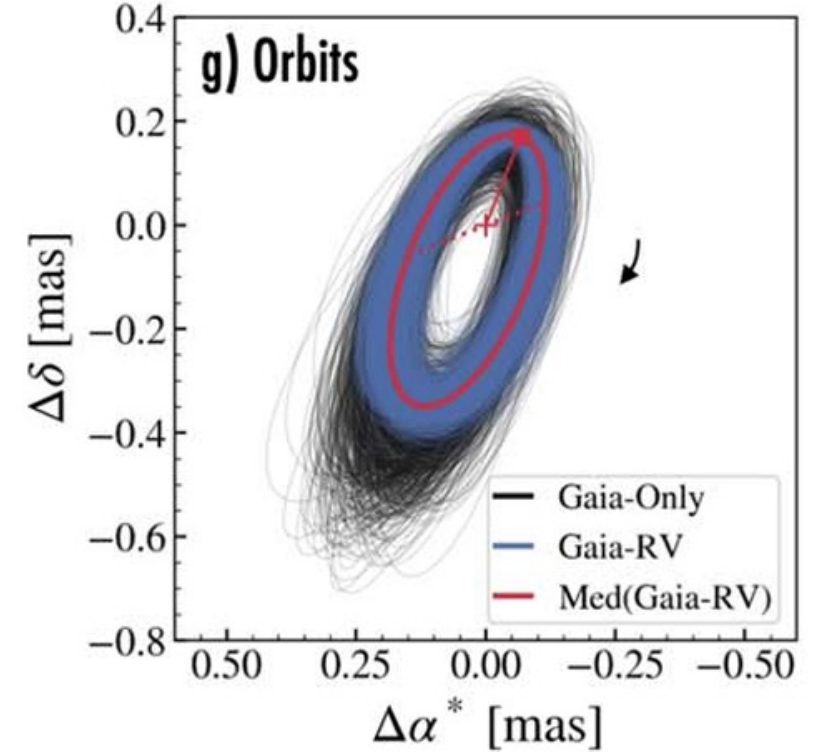
Trifonov (2026), "Encyclopedia of Astrophysics", 1, 320

ドップラー法観測例

視線速度



軌道



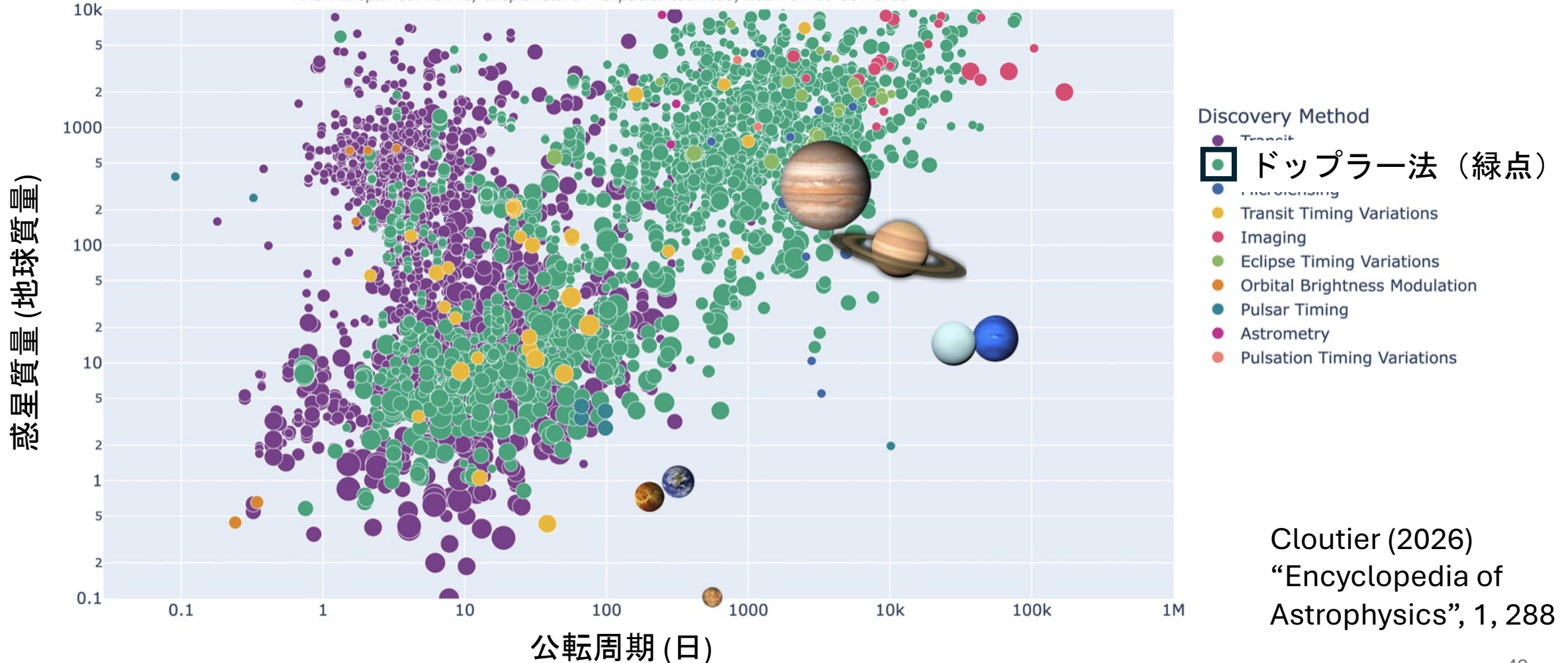
Stefansson et al. (2025), ApJ, 169, 107

ドップラー法のバイアス

- 重い惑星を検出しやすい。
- 主星に近い惑星を検出しやすい。

太陽系外惑星の分布

NASA Exoplanet Archive, exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, 2024-04-10 06:45:15



Cloutier (2026)
“Encyclopedia of
Astrophysics”, 1, 288

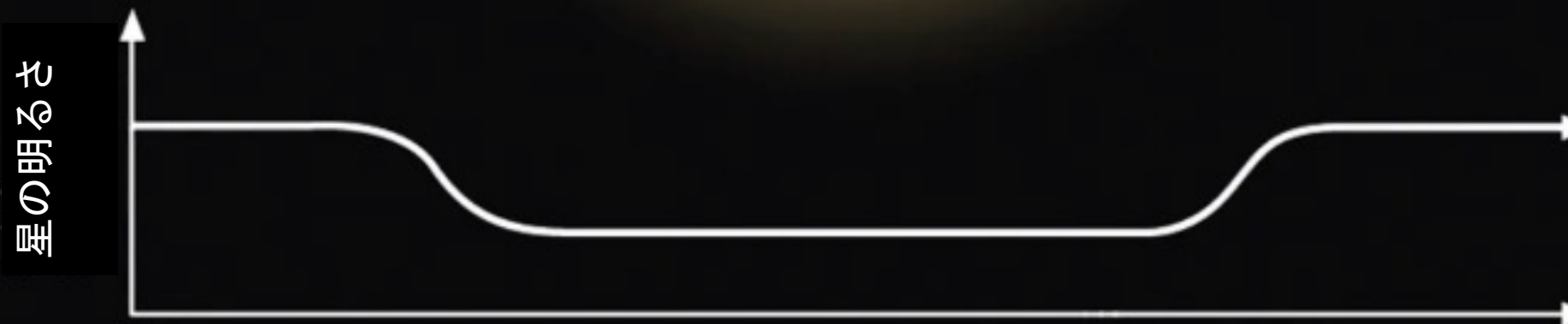
系外惑星の観測手法

- ドップラー分光法
- トランジット法
- 直接撮像法

トランジット法とは

系外惑星が主星の前面を通過するときの明るさやスペクトル変化を観測する方法。

トランジット法の原理

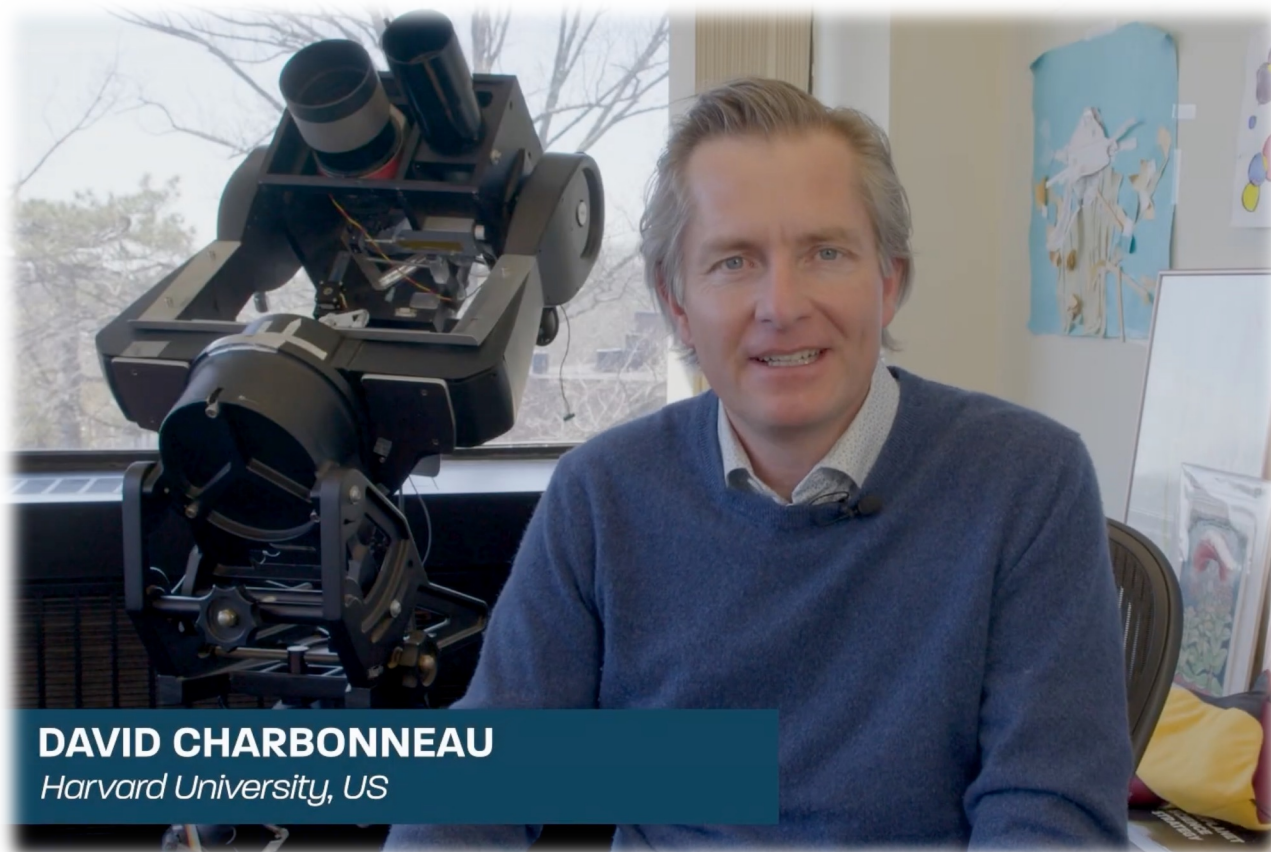


<https://www.skvatnightmagazine.com/space-science/exoplanets-transit-method>
(2026年6月13日参照)

トランジット法で系外惑星を
検出するにはどれくらいの大
きさの望遠鏡が必要か？

トランジット法最初の観測例

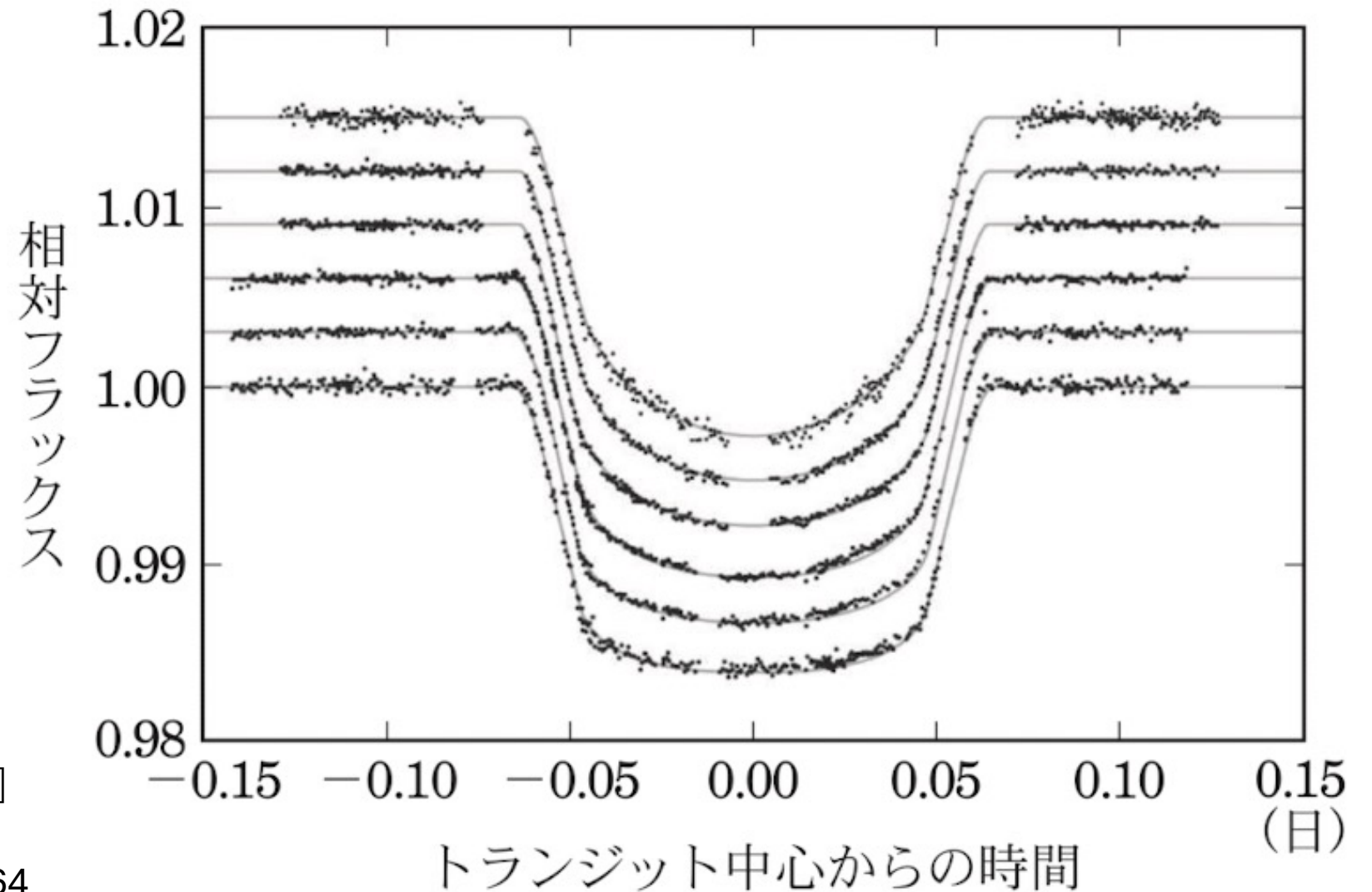
2000年、シャルボノー
(Charboneau et al.
2000)とヘンリー (Henry
et al. 2000)によりトラ
ンジット法で系外惑星
の検出が報告



https://youtu.be/wGaYkc_HuFI?si=oBY_Mib77bAG1TuG

(2026年6月13日参照)

系外惑星HD209458bのトランジットによる光度曲線



田村元秀 (2015) 『太陽系外惑星』
日本評論社 ;
Knutson et al. (2007), ApJ, 655, 564

惑星トランジットと間違えやすい現象 (偽陽性)

1. 背景星と混じった食連星
2. 部分食連星
3. 惑星サイズだが惑星ではない天体（白色矮星、褐色矮星など）によるトランジット

惑星確認にはドップラー法による追観測が必要。

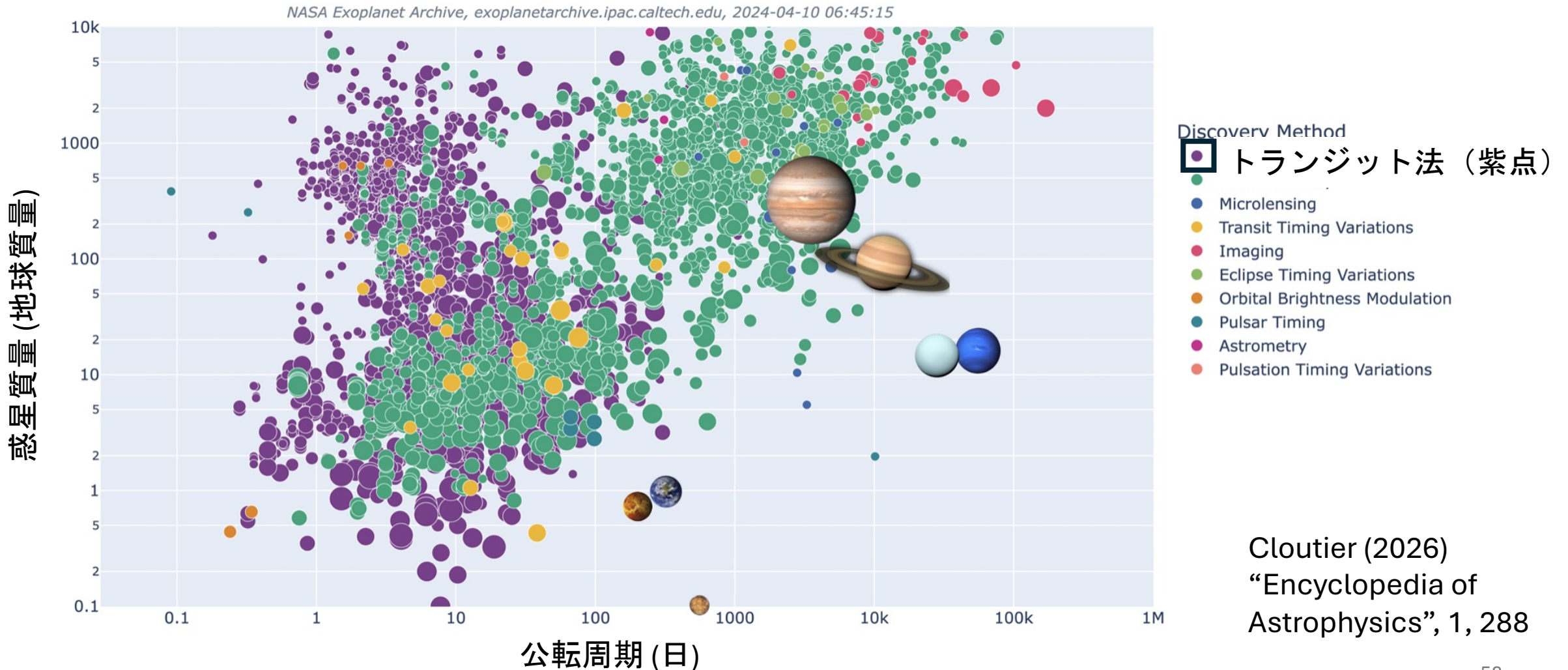


(c)NASA

トランジット法のバイアス

惑星が主星に近いほど、惑星半径が大きいほど、トランジットは起こりやすい。

太陽系外惑星の分布



系外惑星の観測手法

- ドップラー分光法
- トランジット法
- 直接撮像法

直接撮像法とは

系外惑星を直接撮像すること。

直接撮像法の困難

惑星は非常に暗いかつ明るい主星のそばにあるため、

- 高感度
 - 高解像度
 - 高コントラスト
- な撮像を行う必要がある。

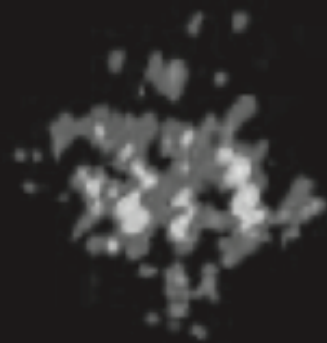
直接撮像の方法

- 大気ゆらぎによる像のにじみを補正する（補償光学）
- 主星の光を隠す（コロナグラフ）

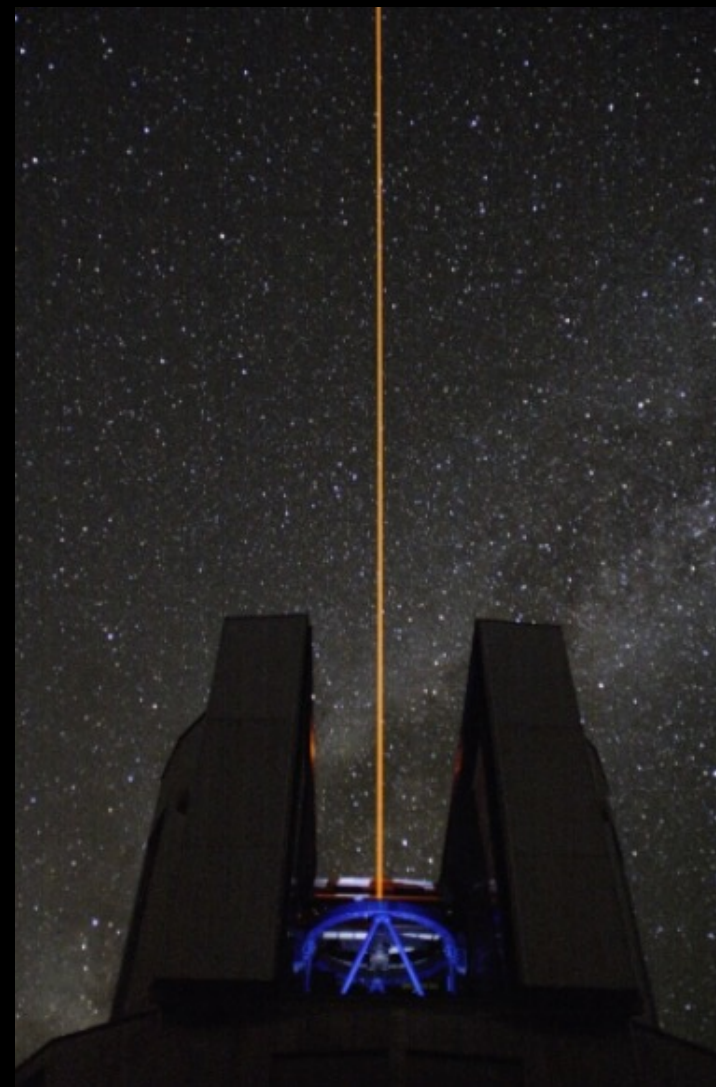
補償光学

人工的に作った星（レーザーガイド星）
を使って星の像のゆらぎを補正

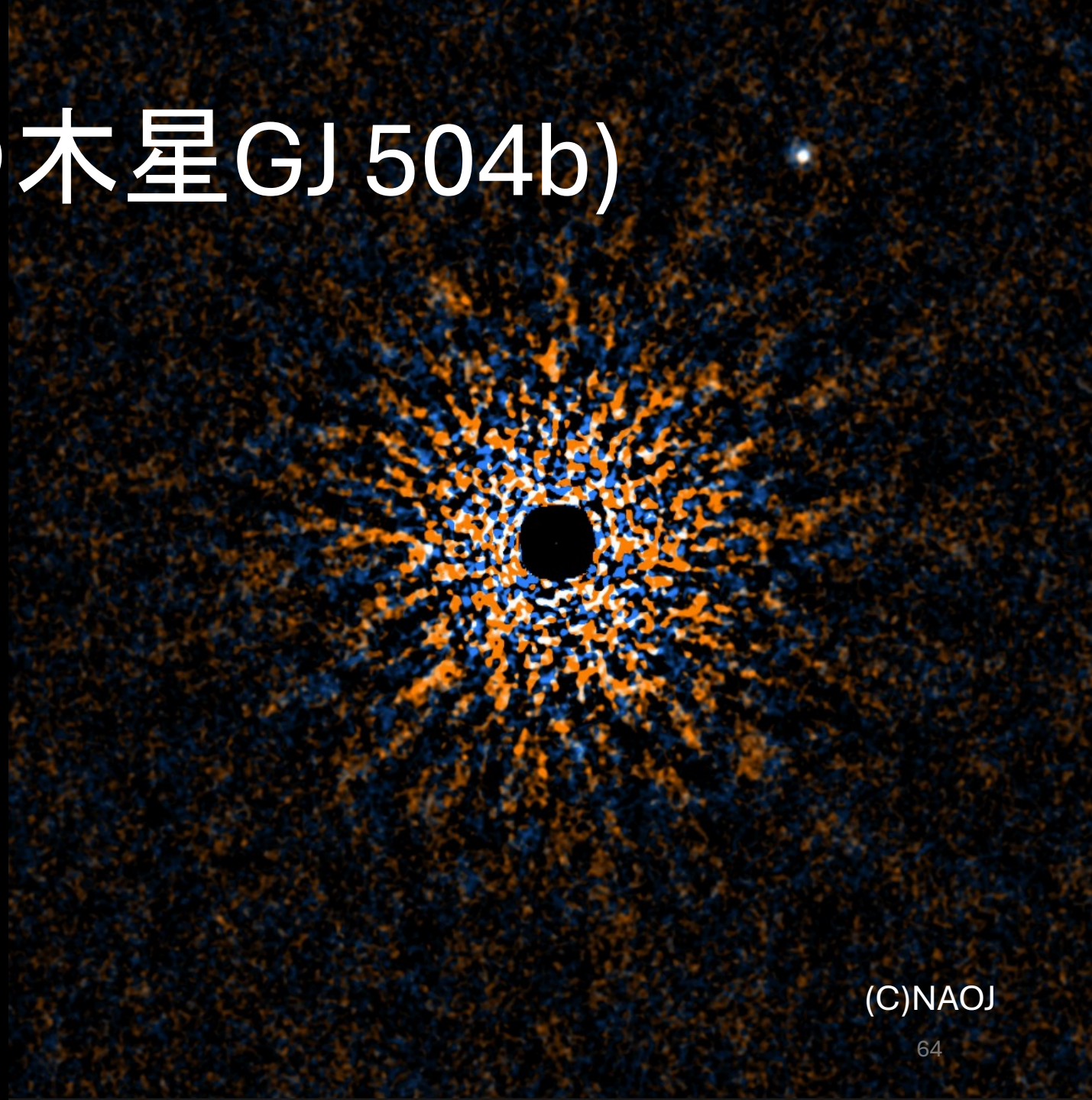
補正前の星



補正後の星



観測例 (第二の木星GJ 504b)

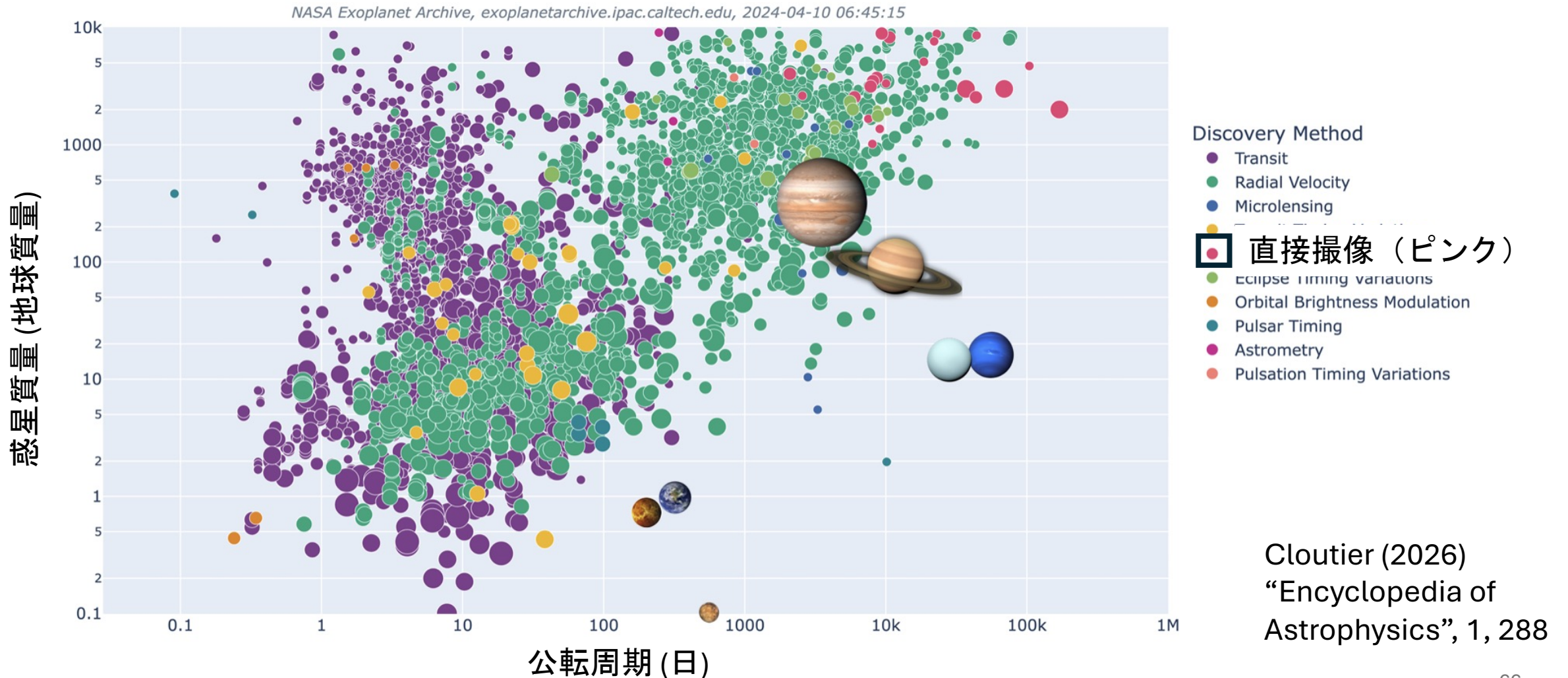


(C)NAOJ

直接撮像法のバイアス

主星から遠く離れた巨大惑星を検出しやすい。

太陽系外惑星の分布



今回の内容

- 太陽系外惑星発見の歴史
- 系外惑星の観測手法
- **第二の地球**

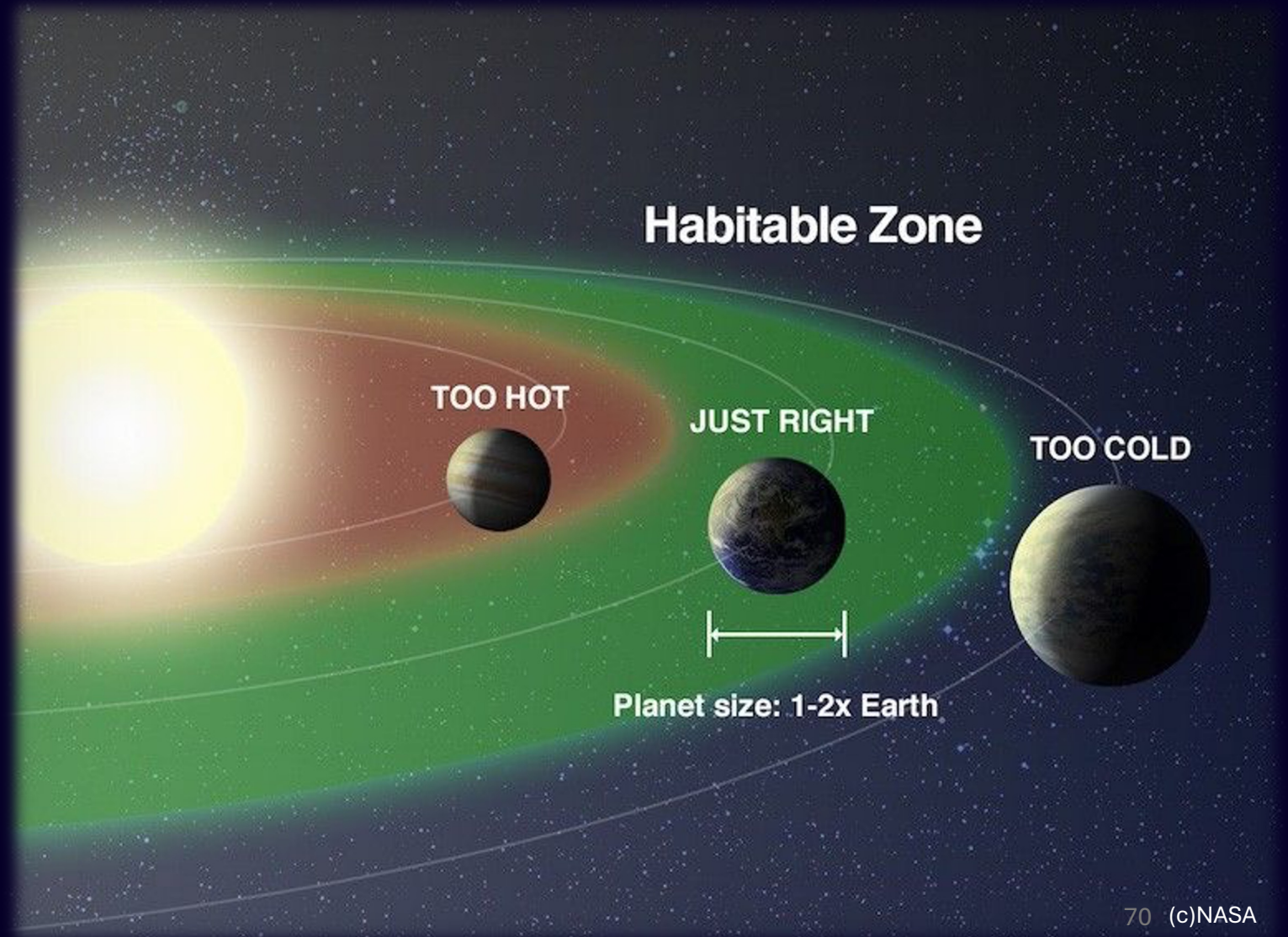
**地球のように生命を宿す惑星
となる条件は何か？**

ハビタブル惑星

表面の少なくとも一部が一定の期間安定な液体に覆われている惑星

ハビタブルゾーン

安定な液体を持つ惑星が存在しうる領域



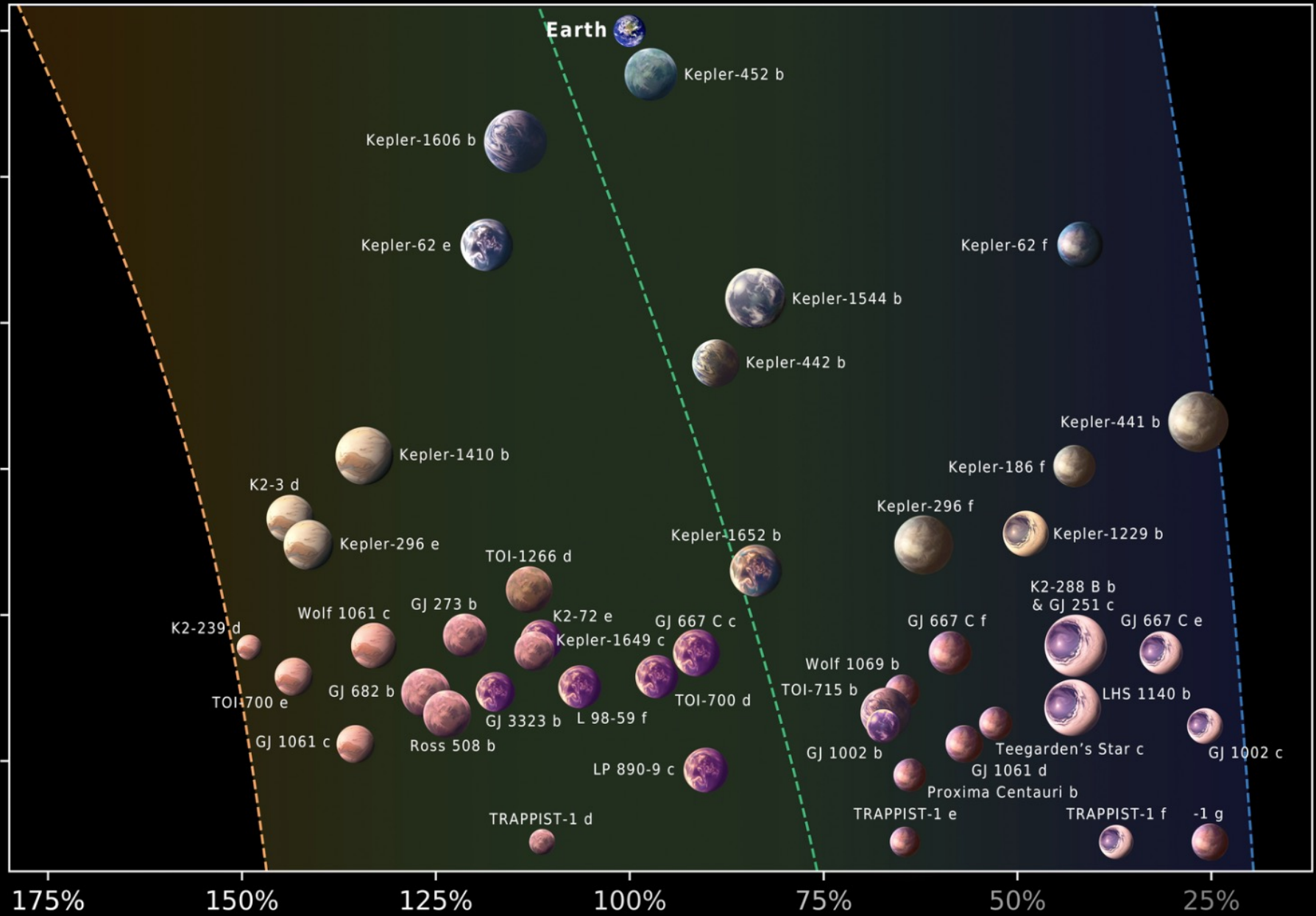
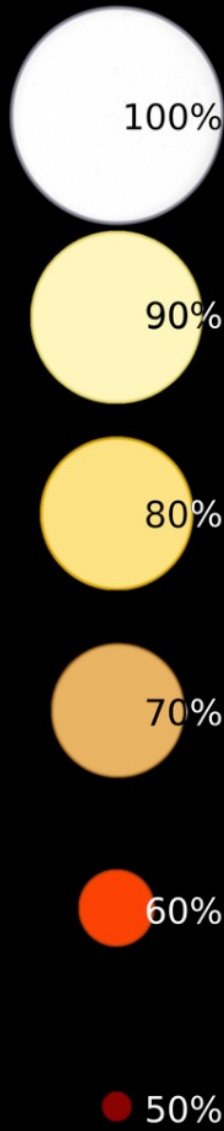
ハビタブル惑星候補

液体の水を宿す可能性の高い岩石惑星は29個 (2026年6月13日現在)

Optimistic Habitable Zone

Conservative Habitable Zone

太陽と比較した主星の温度



Gillis Lowry / CSI, insp. by Chester Harman
Planets: Pablo Carlos Budassi (Celestialobjects)

地球と比較した主星からの光の強さ

今回の目標

太陽系外惑星の観測手法
について説明できる。

今回の内容

- 太陽系外惑星発見の歴史
- 系外惑星の観測手法
- 第二の地球

基本課題

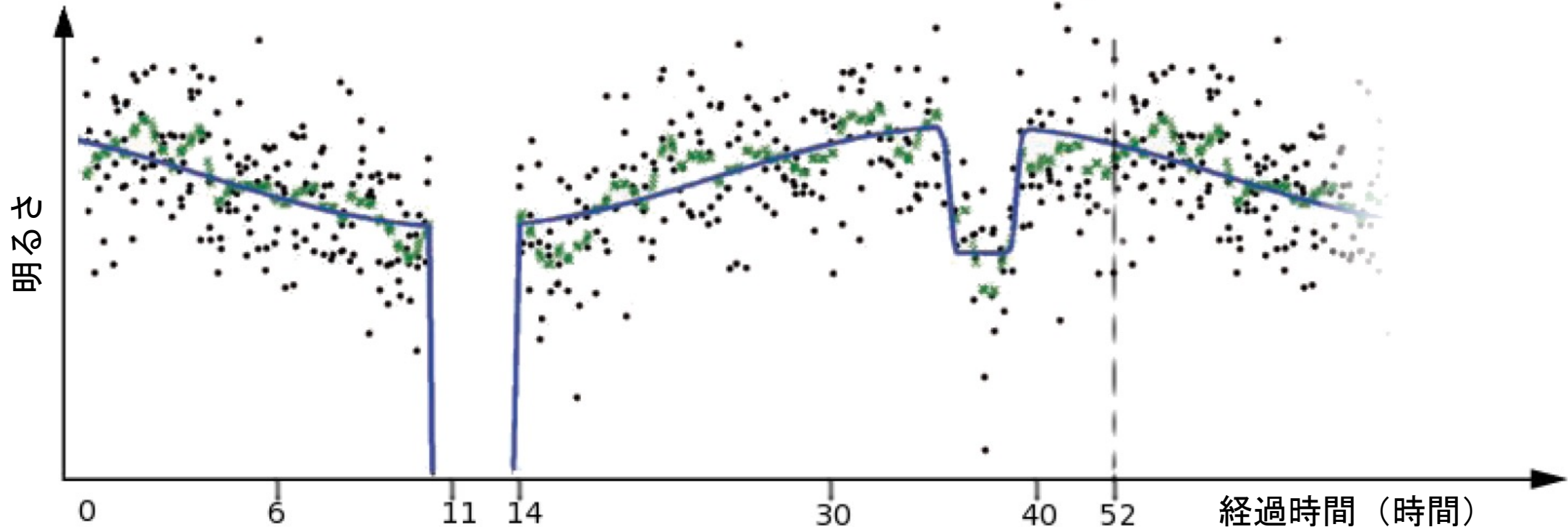
国立天文台・森万由子さん講演「太陽系の外の世界に生命を探す」

(<https://www.youtube.com/live/ws0x25OJN1Y>)

を視聴し、講演内容で重要だと考えた点、疑問に思った点について200字程度でまとめよ。

ボーナス課題

下の図はある系外惑星のトランジットによる主星の減光を示す。11時間頃の深い減光の他に37時間頃に浅い減光が見られる。この理由を説明せよ。



課題提出方法

s4 「天文学b」 「#02 課題」 に書き込む。

提出期限：6月19日（金）

もっと学びたい方へ

田村元秀 (2015) 『太陽系外惑星』
日本評論社



次回

4D2U

第6回
宇宙論

第5回
銀河

第3回
恒星

第2回
太陽系外惑星

第1回
宇宙の観測と理論

