

绕单星运行的温亚土星是自转-轨道对齐的 (Warm Sub-Saturns Orbiting Single Stars Are Spin-Orbit Aligned)

XIAN-YU WANG ^{1,*} AND SONGHU WANG ¹

¹Department of Astronomy, Indiana University, 727 East 3rd Street, Bloomington, IN 47405-7105, USA

ABSTRACT

在本工作中，我们表明：绕单星运行的温亚土星（warm sub-Saturns）以对齐为主，这与频繁出现失调（misaligned）的热亚土星形成鲜明对比，两个族群在 3.2σ 的水平上存在差异。由于这两个族群都是在低温恒星周围观测到的，它们不受 $T_{\text{eff}} - \lambda$ 依赖关系所引入的歧义影响。结合已确立的温木星对齐结论，这在单星系统中证明：自转-轨道失调专门产生于近距的“热木星类比”（hot-Jupiter-analog）区间——在该区间内潮汐圆化高效（ $\tau_e < \tau_{\text{age}}$ ），且预期高偏心率迁移能够运作。我们进一步发现，亚土星在对齐与失调之间的过渡发生在比木星更宽的轨道间距处（ $a_{\text{final}}/R_p \sim 340$ ，木星为 $a_{\text{final}}/R_p \sim 120$ ），这与如下预期一致：亚土星更低的质量（更小的 M_p/M_* ）与更强的潮汐耗散（更低的 Q_p ）使它们能够在自身寿命内被圆化到更宽的最终轨道。综合来看，这些结果提供了迄今为止最清晰的直接证据，表明在单星系统中自转-轨道失调是由高偏心率迁移产生的。若该框架正确，则自转-轨道失调也可能出现在其他质量区间的热木星类比天体中，包括绕热星、位于 $a_{\text{final}}/R_p \lesssim 100$ 的热褐矮星，以及孤立的、位于 $a_{\text{final}}/R_p \lesssim 1000$ 的热超级地球，其相应的过渡位置会因轨道圆化时标对 M_p/M_* 与 Q_p 的依赖而发生移动。

Keywords: 系外行星天文学 (486)、系外行星动力学 (490)、系外行星系统 (484)、系外行星 (498)、行星对齐 (1243)、行星理论 (1258)、恒星-行星相互作用 (2177)

1. 引言

当前支持“自转-轨道失调源自高偏心率迁移”这一观点的最有力证据之一是：热木星频繁失调 (K. C. Schlaufman 2010; J. N. Winn et al. 2010a; J. N. Winn & D. C. Fabrycky 2015; A. H. M. J. Trianaud 2018; S. H. Albrecht et al. 2022)，而绕单星运行的温木星通常对齐 (M. Rice et al. 2022b; X.-Y. Wang et al. 2024; J. I. Espinoza-Retamal et al. 2025)。正如 D.-H. Wu et al. 2023 与 J. Esposito et al. 2026 最近所指出的，如果自转-轨道失调是由激发轨道偏心率的同一套动力学过程所产生（例如，F. A. Rasio & E. B. Ford 1996; S. J. Weidenschilling & F. Marzari 1996; Y. Wu & N. Murray 2003; Y. Wu & Y. Lithwick 2011），那么这种反差是自然可期的。只有被驱动到足够小近星点的行星才会经历强到足以在系统寿命内完成圆化的潮汐，从而成为热木星，同时保留其自转-轨道失调——因为轨道偏心率与恒星倾角（obliquity）是在不同时标上被衰减的（例如，P. Hut 1981; B.

Jackson et al. 2008; F. C. Adams & G. Laughlin 2006; S. Albrecht et al. 2012; D. Lai 2012; G. Li & J. N. Winn 2016; J. J. Zanzizzi et al. 2024)。相较之下，圆化时标随近星点距离极其陡峭地增大，因此近星点稍大的行星无法完成高偏心率迁移，也就无法通过该通道高效地沉积为温木星 (C. Petrovich & S. Tremaine 2016)。因此，所观测到的温木星族群以动力学更“安静”的形成通道为主，例如盘迁移 (P. Goldreich & S. Tremaine 1980; D. N. C. Lin et al. 1996) 或原位形成 (A. C. Boley et al. 2016; K. Batygin et al. 2016)，这些通道保留了原初的自转-轨道对齐。

然而，这一图景由于恒星倾角（真实的 ψ 与天空投影的 λ ）对宿主星有效温度（ T_{eff} ）的强烈依赖而变得复杂：热木星几乎只在热星周围才失调 (K. C. Schlaufman 2010; J. N. Winn et al. 2010a; S. Albrecht et al. 2012; E. Knudstrup et al. 2024)。然而，当前对温木星的 Rossiter-McLaughlin (RM, R. A. Rossiter 1924; D. B. McLaughlin 1924) 测量绝大多数来自低温恒星系统——现将“低温”定义为 T_{eff} 低于最近更新的、位于约 6500 K 附近的过渡值 (Kraft 断点; R. P. Kraft 1967; A. C. Beyer & R. J. White 2024; X.-Y. Wang et al. 2026)。因此，尽管原初自转-轨道失调已在多种背景下被研究（例如，紧凑多行星系统: S. Albrecht et al. 2013 与 T. D. Morton & J. N. Winn 2014; 星-盘系统: C. A. Watson et al.

Corresponding author: Xian-Yu Wang
xwa5@iu.edu

Corresponding author: Songhu Wang
sw121@iu.edu

* Sullivan Prize Postdoctoral Fellow

2011、C. L. Davies 2019 与 L. I. Biddle et al. 2025), 但仅凭当前对木星质量行星的 Rossiter–McLaughlin 测量, 尚不能区分: 热星周围热木星所观测到的失调, 究竟反映的是热星的原初失调, 还是追踪着高偏心率迁移——后者的倾角印记之所以可能保留, 是因为潮汐重新对齐在热星中效率低下 (J. N. Winn et al. 2010a; S. Albrecht et al. 2012; S. H. Albrecht et al. 2022; E. Knudstrup et al. 2024; X.-Y. Wang et al. 2024)。

亚土星的恒星倾角分布有助于厘清这一图景。“绕低温恒星运行的亚土星仍可能严重失调”这一发现 (例如 HAT-P-11, J. N. Winn et al. 2010b; T. Hirano et al. 2011; R. Sanchis-Ojeda & J. N. Winn 2011; D. Deming et al. 2011; V. Bourrier et al. 2023; HATS-38, J. I. Espinoza-Retamal et al. 2024; GJ 436, V. Bourrier et al. 2018, 2022; GJ 3470, G. Stefánsson et al. 2022; TOI-1842, K. Hixenbaugh et al. 2023; TOI-2374, S. W. Yee et al. 2025; WASP-107, F. Dai & J. N. Winn 2017; R. A. Rubenzahl et al. 2021; V. Bourrier et al. 2023; TOI-1135, E. Dugan et al. 2025), 反驳了“失调是热星所独有的结果”这一想法。此外, 近期工作表明, 孤立的亚土星系统更可能失调, 而处于紧凑多行星系统中的亚土星通常对齐 (例如, S. Albrecht et al. 2013; S. Wang et al. 2018; G. Zhou et al. 2018; X.-Y. Wang et al. 2022; J. Lubin et al. 2023; E. Y. Zhang et al. 2025; B. T. Radzom et al. 2024, 2025; L. B. Handley et al. 2026), 这指向亚土星恒星倾角的动力学起源而非原初起源。然而, 尽管这些线索支持动力学起源, 它们本身并不能证明高偏心率迁移就是负责的机制。

在本工作中, 我们表明: 绕单星运行的温亚土星以对齐为主, 这与频繁失调的热亚土星形成鲜明对比。由于两个族群都在低温恒星周围观测到, 它们不受 $T_{\text{eff}} - \lambda$ 依赖关系引入的歧义影响。结合已确立的温木星对齐结论, 这在单星系统中证明: 自转-轨道失调专门产生于近距的“热木星类比”区间——在该区间内潮汐圆化高效 ($\tau_e < \tau_{\text{age}}$), 且预期高偏心率迁移能够运作。我们进一步发现, 亚土星在对齐与失调之间的过渡发生在比木星更宽的轨道间距处 ($a_{\text{final}}/R_p = 338 \pm 27$, 木星为 $a_{\text{final}}/R_p = 117 \pm 9$), 这与如下预期一致: 亚土星更低的质量 (更小的 M_p/M_*) 与更强的潮汐耗散 (更低的 Q_p) 使它们能在自身寿命内被圆化到更宽的最终轨道 (P. Goldreich & S. Soter 1966; P. Hut 1981; F. C. Adams & G. Laughlin 2006; B. Jackson et al. 2008)。综合来看, 这些结果提供了迄今为止最清晰的直接证据: 在单星系统中, 自转-轨道失调是由高偏心率迁移产生的。

2. 样本构建

我们利用系外行星与褐矮星恒星倾角星表 (SOCat²) 中的系统参数构建样本; 该星表基于 X.-Y. Wang et al.

(2026a) 与 TEPcat³ (J. Southworth 2011, 2026) 开发。为避免不同倾角测量技术引入的观测偏差 (详见 S. H. Albrecht et al. 2022), 我们将分析限定于由 Rossiter–McLaughlin 效应获得的测量, 按优先级依次包括经典 RM 技术、多普勒阴影/层析测量 (S. Albrecht et al. 2007; A. Collier Cameron et al. 2010; G. Zhou et al. 2016; M. C. Johnson et al. 2017)、重载 RM (RRM, H. M. Cegla et al. 2016) 以及 RM 革命法 (RMR, V. Bourrier et al. 2021)。

参照 S. H. Albrecht et al. (2022)、X.-Y. Wang et al. (2024) 与 X.-Y. Wang et al. (2026), 我们剔除了不确定度过大的测量 ($|\sigma_\lambda| > 50^\circ$) 以及有争议的个例: CoRoT-1 (F. Bouchy et al. 2009; F. Pont et al. 2010)、CoRoT-19 (E. W. Guenther et al. 2012)、HATS-14 (G. Zhou et al. 2015)、HAT-P-27 (D. J. A. Brown et al. 2012)、HD 3167 (S. Dalal et al. 2019; V. Bourrier et al. 2021; H.-Y. Teng et al. 2025)、WASP-1 (E. K. Simpson et al. 2011; S. Albrecht et al. 2011)、WASP-2 (A. H. M. J. Triaud et al. 2010; S. Albrecht et al. 2011) 与 WASP-49 (A. Wyttenbach et al. 2017)。

无论从理论还是观测上, 双星伴星都被证明能在广泛的行星系统中诱发恒星倾角 (例如, Y. Wu & N. Murray 2003; D. Fabrycky & S. Tremaine 2007; K. Batygin 2012; S. Naoz et al. 2012; S. Naoz 2016; M. Hjorth et al. 2019; J. I. Espinoza-Retamal et al. 2023; J. Ruzsna et al. 2025; X.-Y. Wang et al. 2026), 从而进一步使确定自转-轨道失调起源的工作复杂化。因此, 我们利用 R. Schwarz et al. (2016)、C. Fontanive & D. Bardalez Gagliuffi (2021) 与 K. El-Badry et al. (2021) 的星表识别并剔除了已知具有恒星伴星的系统, 以及双星候选体——包括 Gaia RUWE 为 1.4 的 HAT-P-50, 以及位于拥挤星场、很可能与 Gaia DR3 6032746905476711680 成束缚的 K2-237。尽管足够宽的伴星在动力学上可能与当今的内侧行星系统解耦, X.-Y. Wang et al. (2026) 却出人意料地发现: 即便在很大的双星间距下, 已知双星中主星的自转与倾角分布, 也可能不同于表现单星。因此, 剔除已知具有恒星伴星的系统是一条有经验依据的样本选择判据, 但需注意某些表现单星可能存在尚未探测到的伴星。

此外, 我们的分析对行星与恒星质量都敏感, 因为本工作中系外行星类型的分类依赖于行星-恒星质量比; 因此, 没有精确质量测定 (例如只有上限) 的系统被剔除。

该筛选在剔除 92 个具有恒星伴星的系统后, 得到一个包含 170 个系统的单星样本。我们依据行星-恒星质量比 $q = M_p/M_*$ (相较仅用行星质量, 该参数与动力学演化的联系更直接 (例如, J. Ruzsna et al. 2025)) 将样本划分为四个质量比区间: 亚海王星与超级地球 ($q \leq 5 \times 10^{-5}$; 12 个系统)、亚土星 ($5 \times 10^{-5} < q \leq 3 \times 10^{-4}$; 39 个系统)、木星 ($3 \times 10^{-4} < q \leq 2 \times 10^{-3}$; 88 个系统)、以

² 版本日期 2026 年 7 月 17 日; www.stellarobliquity.com

³ 版本日期 2026 年 7 月 17 日; <https://www.astro.keele.ac.uk/jkt/tepcat/obliquity.html>

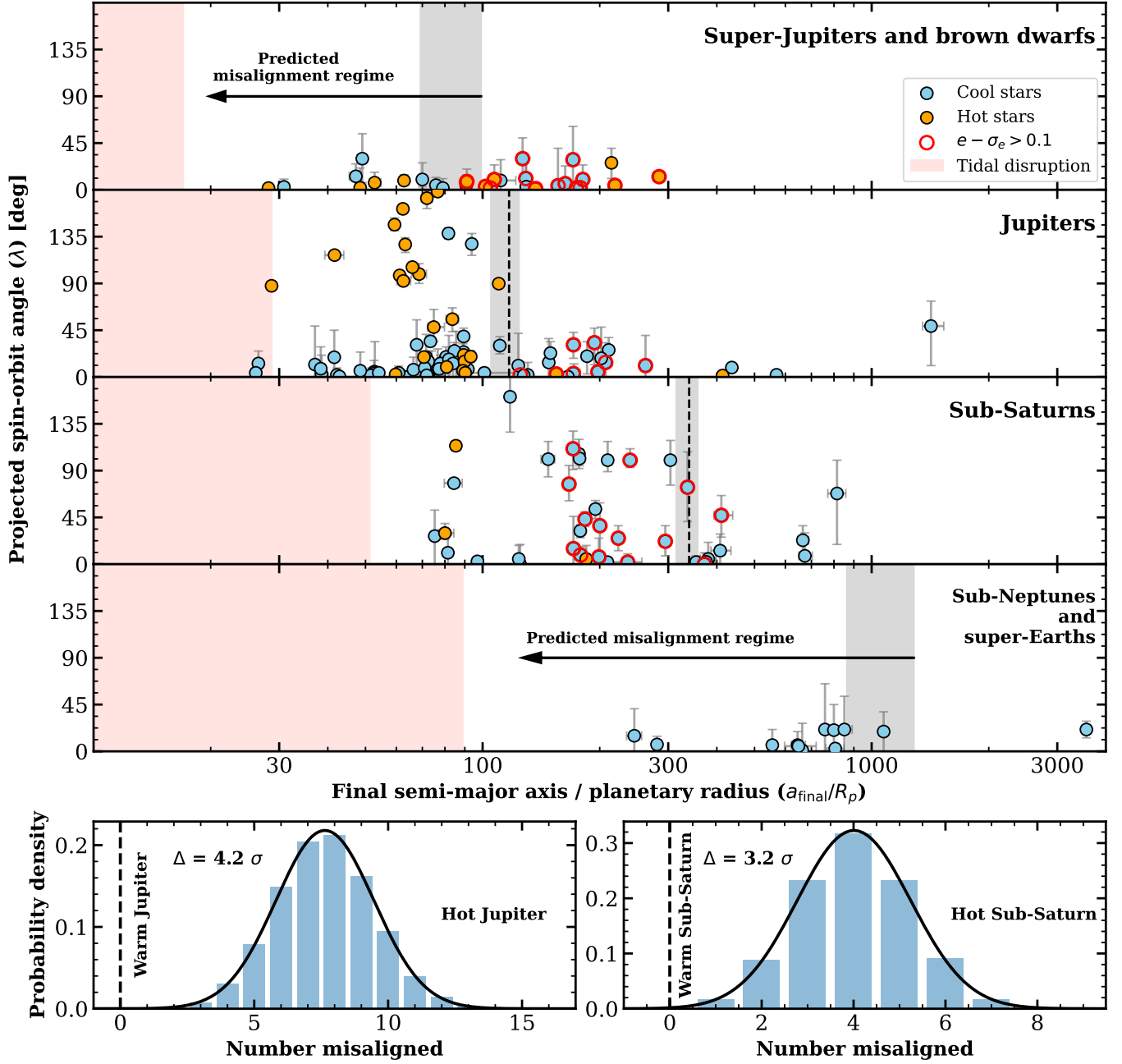


Figure 1. 上方四个子图展示投影自转-轨道角 $|\lambda|$ 作为以行星半径归一化的轨道间距 (a_{final}/R_p) 的函数。样本自上而下按质量比划分为四个区间：超级木星与褐矮星 ($q > 0.002$)、木星 ($0.0003 < q \leq 0.002$)、亚土星 ($0.00005 < q \leq 0.0003$)、以及亚海王星与超级地球 ($q \leq 0.00005$)。蓝色与橙色符号分别表示宿主星有效温度 (在 1σ 意义上) 低于与高于 6500 K 的系统。红色空心圆表示显著偏心的轨道 ($e - \sigma_e > 0.1$)。潮汐瓦解区由每个子图的中位质量比计算, $a/R_p < 2.7 (M_*/M_p)^{1/3}$ (J. Guillochon et al. 2011)。带阴影带的竖直虚线标出通过自助法 (bootstrap) Kolmogorov-Smirnov 检验确定的、最优分隔近距与宽轨道系统 $|\lambda|$ 分布的 a_{final}/R_p 边界。在第一和第四子图中, 灰色带并非实测, 而是通过潮汐圆化标度关系由木星边界预测得到 (超级木星与褐矮星取 $Q_p = 5 \times 10^5$, 岩质行星取 $Q_p = 100$; 见第 4.2 节); 预期失调轨道位于其内侧。下方两个子图展示: 从近距族群中不放回随机抽样、每次抽样规模与观测到的宽轨道族群相同时, 所期望的失调系统数目。黑色虚线标出实际观测到的宽轨道失调系统数目。本图所依据的完整机读系统表可见[此处](#)。

及超级木星与褐矮星 ($q > 2 \times 10^{-3}$; 31 个系统)。对于太阳质量的宿主星, 这些边界大致对应 $17 M_{\oplus}$ 、 $93 M_{\oplus}$ 与 $2 M_J$ 。

3. 统计分析

3.1. 以 a_{final}/R_p 作为失调起源的度量

在恒星倾角研究中, “热”与“温”行星的传统区分通常基于归一化轨道间距 a/R_* , 边界约在 $a/R_* \sim 8-10$ (例如, S. Albrecht et al. 2012; M. Rice et al. 2022b; J. J. Zanazzi et al. 2024; X.-Y. Wang et al. 2024)。该判据的动机来自潮汐重新对齐理论, 其中对齐时标对轨道间距高度敏感, 对具有对流包层的低温恒星近似标度为 $(a/R_*)^6$, 对具有辐射包层的热星则为 $(a/R_*)^{17/2}$ (J.-P. Zahn 1977; S. Albrecht et al. 2012; D. Lai 2012; G. Li & J. N. Winn 2016)。在该框架下, a/R_* 充当潮汐重新对齐效率的替代量, 因而主要追踪恒星倾角在迁移后的演化。

然而, 对于亚土星, 由于其行星质量较低, 迁移后的恒星倾角只受潮汐重新对齐的微弱影响, 因为它们在宿主星上激起的潮汐远弱于类木行星。因此, 它们更可能保留原初的恒星倾角, 从而更直接地追踪其动力学历史。若单星系统中的大恒星倾角主要由高偏心率迁移产生 (例如, F. A. Rasio & E. B. Ford 1996; S. J. Weidenschilling & F. Marzari 1996; Y. Wu & N. Murray 2003; D. Fabrycky & S. Tremaine 2007; S. Naoz 2016; Y. Wu & Y. Lithwick 2011; C. Petrovich 2015; M. Rice et al. 2022a; D.-H. Wu et al. 2023; Y. Kawai et al. 2025; J. Esposito et al. 2026), 则关键量就变为这种迁移能否高效运作。高偏心率迁移需要足够的潮汐耗散来圆化初始偏心的轨道, 其圆化时标 $\tau_{\text{circ}} \propto (a_{\text{final}}/R_p)^5$, 其中 $a_{\text{final}} = a(1 - e^2)$ 是在近似守恒轨道角动量假设下的最终圆化半长轴 (P. Goldreich & S. Soter 1966; P. Hut 1981; F. C. Adams & G. Laughlin 2006; B. Jackson et al. 2008)。在此意义上, a_{final}/R_p 充当高偏心率迁移效率的替代量 (见 F. C. Adams & G. Laughlin 2006 的方程 1)。

因此, 我们采用 a_{final}/R_p 作为在观测恒星倾角分布中经验性识别热-温区间过渡的主坐标。在该框架下, 位于小 a_{final}/R_p 的系统对应高偏心率迁移高效的情形, 而位于大 a_{final}/R_p 的系统则不太可能经历过这类动力学激发的潮汐迁移。

3.2. 经验边界的推导

图 1 展示 $a_{\text{final}}/R_p - \lambda$ 分布, 说明在木星与亚土星两个族群中都存在从失调的热行星到对齐的温行星的清晰过渡。为确定分隔失调与对齐系统的 a_{final}/R_p 边界, 我们对一组候选切分 (定义在相邻不重复 a_{final}/R_p 值的中点处) 评估了双样本 Kolmogorov-Smirnov (K-S; J. L. Hodges 1958) 检验的 p 值。

对每个候选切分, 我们用 SciPy (P. Virtanen et al. 2020) 实现的双样本 K-S 检验, 比较 a_{final}/R_p 小于该切分与大于或等于该切分的系统的 $|\lambda|$ 分布。我们通过自助法分析估计边界位置及其不确定度。在 100,000 次

实现的每一次中, 我们对系统进行有放回重采样, 并按各自报告的测量不确定度独立扰动 a_{final}/R_p 与 $|\lambda|$, 然后重复双样本 K-S 分析以确定最优切分。所得最优切分分布呈多峰, 反映了系统在 a_{final}/R_p 上离散且不均匀的采样。我们采用最高 a_{final}/R_p 的峰——它对应观测失调族群的外边界——并由该峰导出边界值及其不确定度。

我们对木星与亚土星样本应用上述边界推导流程, 分别得到 $a_{\text{final}}/R_p = 117 \pm 9$ 与 $a_{\text{final}}/R_p = 338 \pm 27$ 。

3.3. 温亚土星对齐的显著性

为量化温亚土星对齐倾向的显著性, 我们在“温亚土星与热亚土星具有相同倾角分布”的零假设下构建参考分布。我们从热亚土星样本中不放回地随机抽取八个天空投影倾角测量 (等于具有 RM 测量的温亚土星系统总数, 且它们全部对齐)。对每次实现, 我们统计满足失调判据 ($|\lambda| - 3\sigma_\lambda > 0$ 且 $|\lambda| > 10^\circ$; M. Rice et al. 2022b; X.-Y. Wang et al. 2024; L. B. Handley et al. 2026) 的系统数目。该流程重复 100,000 次, 以在零假设下生成失调系统数目的期望分布。我们用均值 $\mu = 4.01$ 、标准差 $\sigma = 1.24$ 的高斯近似该分布。观测到的失调温亚土星系统数目为零, 使该样本位于零分布期望之下 $(\mu - 0)/\sigma \approx 3.2\sigma$ 处。

我们对木星样本执行相同分析, 发现单星温木星的对齐倾向在 4.2σ 水平上显著。值得注意的是, 尽管木星与亚土星都表现出依赖间距的倾角过渡, 它们的宿主星分布却不同: 对木星而言, 几乎所有失调系统都出现在热星周围, 因此观测趋势仍与 $T_{\text{eff}} - \lambda$ 依赖关系纠缠在一起; 而对亚土星而言, 对齐与失调系统都在低温恒星周围观测到, 使这种反差不受该歧义影响。木星与亚土星的失调系统数目对应分布见图 1 的下方子图。

4. 讨论

4.1. $a_{\text{final}}/R_p - \lambda$ 关系的本质

正如第 3.1 节所讨论, a_{final}/R_p 设定潮汐圆化时标, 因此追踪高偏心率迁移能否在系统寿命内高效运作。为定量检验自转-轨道失调与高偏心率迁移之间的联系, 我们用 P. Goldreich & S. Soter (1966)、P. Hut (1981) 与 B. Jackson et al. (2008) 的偏心率衰减形式为每个系统计算 τ_e :

$$\frac{1}{\tau_e} = \frac{1}{\tau_{e,p}} + \frac{1}{\tau_{e,*}} \quad (1)$$

其中伴星潮汐项为

$$\tau_{e,p} = \frac{4Q_p}{63} \left(\frac{a_{\text{final}}^3}{GM_*} \right)^{1/2} \frac{M_p}{M_*} \left(\frac{a_{\text{final}}}{R_p} \right)^5 \quad (2)$$

恒星潮汐项为

$$\tau_{e,*} = \frac{16Q_*}{171} \left(\frac{a_{\text{final}}^3}{GM_*} \right)^{1/2} \frac{M_*}{M_p} \left(\frac{a_{\text{final}}}{R_*} \right)^5 \quad (3)$$

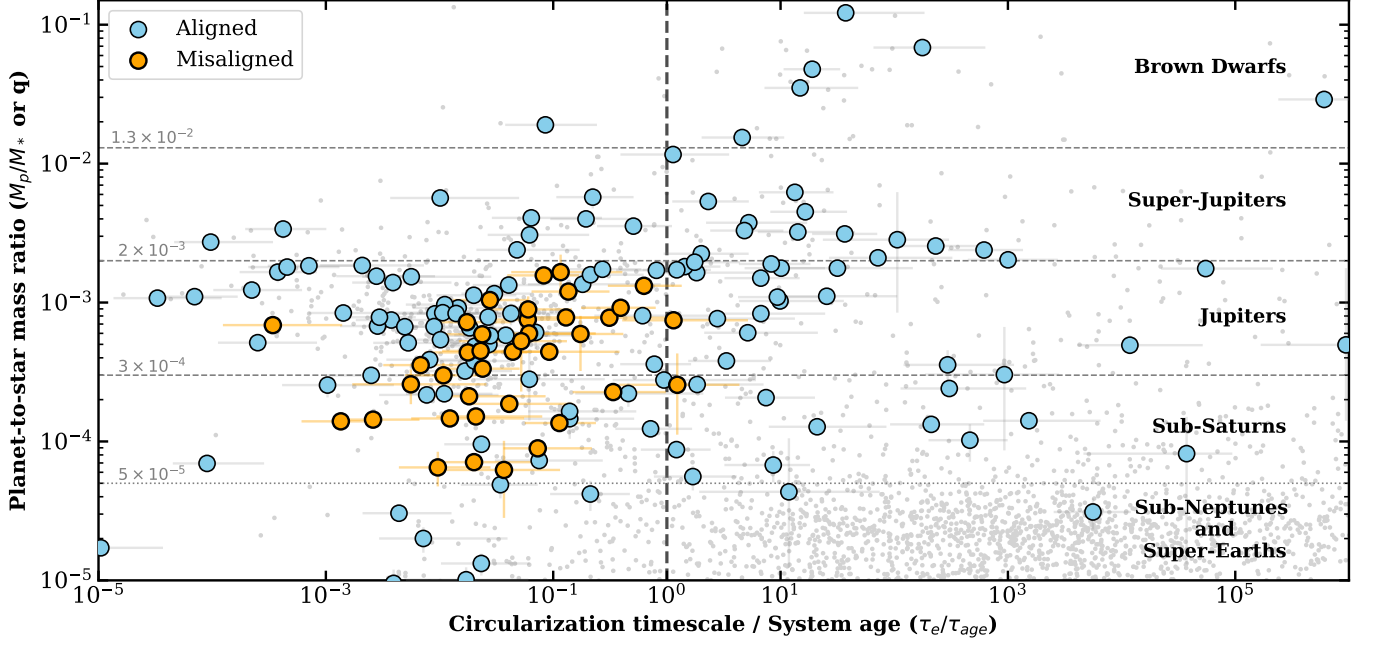


Figure 2. 行星-恒星质量比 q 作为偏心率衰减时标 τ_e (以系统年龄 τ_{age} 归一化) 的函数。蓝色与橙色圆分别表示倾角样本中的对齐与失调系统。灰色点展示更广泛的系外行星族群, 取自 NASA 系外行星档案的 PSCCompPars 表 (NASA Exoplanet Science Institute 2020, 限于有半径测量的单星), 以及取自 K. Barkaoui et al. (2025) 汇编的凌星褐矮星。竖直黑线标出 $\tau_e = \tau_{\text{age}}$ 。水平虚线划出亚海王星与超级地球、亚土星、木星、超级木星与褐矮星之间的质量比边界。位于黑线左侧的系统能够经由高偏心率迁移产生。

其中 M_* 、 R_* 、 M_p 、 R_p 与 a 分别为恒星质量、恒星半径、行星质量、行星半径与轨道半长轴, Q_* 与 Q_p 分别为恒星与行星的潮汐品质因子。

本工作中, 我们参照 K. Penev & D. Sasselov (2011) 与 F. Gallet et al. (2017)⁴, 为所有宿主星假设类太阳的恒星潮汐品质因子 $Q_* = 4 \times 10^8$ 。对于行星与次恒星伴星, 我们参照 (P. Goldreich & S. Soter 1966; B. Jackson et al. 2008; Y. Kawai et al. 2025; R. Heller et al. 2010), 对木星、超级木星与褐矮星取标称值 $Q_p = 5 \times 10^5$, 对亚土星取 $Q_p = 6 \times 10^4$, 对亚海王星与超级地球取 $Q_p = 100$ 。为将潮汐耗散中的巨大不确定度传播到 τ_e , 我们在所有质量区间对 Q_p 假设 0.3 dex (约 ~ 2 倍) 的对数正态不确定度, 这与 Y. Kawai et al. (2025) 的经验定标 $Q_{\text{Jup}} = 4.9^{+3.5}_{-2.5} \times 10^5$ 一致。

图 2 展示所得的 $M_p/M_* - \tau_e/\tau_{\text{age}}$ - 失调分布。正如 Y. Kawai et al. (2025) 最近发现的, $\tau_e < \tau_{\text{age}}$ 的木星可以呈现广泛的恒星倾角, 而 $\tau_e > \tau_{\text{age}}$ 的木星倾向于对齐。我们发现亚土星系统遵循相同的模式。我们样本中所有失调系统都满足 $\tau_e \leq \tau_{\text{age}}$, 这与如下解释一致: 自转-轨道失调集中于潮汐圆化高效、且预期高偏心率迁移能运作的区间。

重要的是, 由于失调的热亚土星与对齐的温亚土星都在低温恒星周围观测到, 二者之间的反差不受 $T_{\text{eff}} - \lambda$ 关系所引入的歧义影响 (K. C. Schlaufman 2010; J. N.

Winn et al. 2010a)。结合“热木星可以失调而温木星通常对齐”这一已确立的模式 (例如, S. Wang et al. 2021; M. Rice et al. 2022b; J. Wright et al. 2023; X.-Y. Wang et al. 2024; J. I. Espinoza-Retamal et al. 2025), 这在单星系统中表明: 自转-轨道失调专门产生于近距的“热木星类比”区间——在该区间内潮汐圆化高效 ($\tau_e < \tau_{\text{age}}$), 且预期高偏心率迁移能够运作。温巨行星的对齐最自然地解释为源自一条不同于高偏心率迁移的演化通道。若该解释正确, 则当前温木星的对齐趋势 (尽管以低温恒星周围的测量为主) 也应推广到绕热星运行的温木星。

此外, 我们发现亚土星在对齐与失调之间的过渡发生在比木星更大的归一化间距处 ($a_{\text{final}}/R_p = 338 \pm 27$, 木星为 $a_{\text{final}}/R_p = 117 \pm 9$), 这与如下预期一致: 亚土星更低的质量 (更小的 M_p/M_*) 与更强的潮汐耗散 (更低的 Q_p) 使潮汐圆化能够在系统寿命内运作至更大的 a_{final}/R_p , 正如标度关系 $\tau_e \propto (a_{\text{final}}/R_p)^5 (M_p/M_*) Q_p$ 所提示 (P. Goldreich & S. Soter 1966; P. Hut 1981; F. C. Adams & G. Laughlin 2006)。

长期以来人们就已认识到、并有多重解释 (H. Beust et al. 2012; C. Petrovich et al. 2020; H. Yu & F. Dai 2024; J. Gao & G. Li 2025; T. Lu et al. 2025; H. Im et al. 2026): 某些失调的亚土星系统尽管满足 $\tau_e < \tau_{\text{age}}$, 却仍保有非零偏心率 (著名的如 GJ 436; H. Beust et al. 2012; V. Bourrier et al. 2018)。然而, 正如 X.-Y. Wang et al. (2026b) 最近所指出的, 更深层的问题是: 同样被认为由高偏心率迁移运输而来的失调热木星与失调热亚土星, 为何呈现如此不同的偏心率结局, 如图 1 中红色圆所强调: 前者几乎总是被圆化, 而后者却可以保持偏

⁴ <https://obswww.unige.ch/Recherche/evol/starevol/Galletetal17.php>

心（参见 C. Petrovich & H. Gautham Bhaskar 2026 最近提出的、引人注目的方案，其援引亚土星内部受热调控的粘弹性潮汐）。

4.2. 隐藏族群：

失调的大质量伴星与小行星

在我们的整个样本中，失调系统集中于热木星与热亚土星区间。相较之下，在类比的短周期区间内，无论是更大质量的伴星（包括超级木星与褐矮星）⁵，还是小行星（包括亚海王星、超级地球及更小的行星），都没有在单星周围显示出自转-轨道失调的清晰证据。我们认为这类系统可能尚未在观测上被揭示。

对于大质量伴星，J. Ruzsna et al. (2025) 发现其对齐倾向与轨道间距无关，并提出这类天体可能缺乏能够触动力学不稳定的额外近距伴星 (W. Xu & S. Wang 2024)。然而，拥有多个紧凑大质量伴星的系统虽罕见却确实存在。例如，TIC 279401253 (V. Bozhilov et al. 2023) 拥有两颗超级木星， $P_b = 77$ d, $M_b = 6 M_J$ 与 $P_c = 155$ d, $M_c = 8 M_J$ ，绕一颗类太阳恒星 ($M_* = 1 M_\odot$) 运行。因此，该区间内由动力学不稳定驱动的潮汐迁移不能被完全排除 (Y. Wu et al. 2025)。利用第 4.1 节所述的潮汐品质因子，我们因而预测：若超级木星与褐矮星的最终归一化半长轴足够小 ($a_{\text{final}}/R_p \lesssim 69-99$ ，见图 1)，它们同样可以表现出自转-轨道失调。由于这类大质量伴星能够高效地使具有厚对流包层的宿主星重新对齐 (S. Albrecht et al. 2012; D. Lai 2012)，该预测预期仅适用于热星——而对近距超级木星与褐矮星，当前的 RM 测量仍极为稀少（例如 CoRoT-3, A. H. M. J. Triana et al. 2009; GPX-1, S. Giacalone et al. 2024; HAT-P-34, S. Albrecht et al. 2012; HAT-P-69, G. Zhou et al. 2019a; HATS-70, G. Zhou et al. 2019b; HIP 33609, N. Vowell et al. 2026; KELT-1, R. J. Siverd et al. 2012; TOI-2109, I. Wong et al. 2021; TOI-3362, J. I. Espinoza-Retamal et al. 2023; B. Prinoth et al. 2024; TOI-558, J. I. Espinoza-Retamal et al. 2025; WASP-120, J. Zak et al. 2024)。对该质量区间的伴星，恒星上激起的潮汐也可能对轨道圆化有贡献。然而，被恒星潮汐高效圆化的系统也可能经历恒星倾角衰减而变得优先对齐；因此，该预测只考虑伴星上激起的潮汐。

对于小行星，迄今为止的恒星倾角测量几乎全部来自紧凑多行星系统（例如，S. Albrecht et al. 2013; X.-Y. Wang et al. 2022; G. Zhou et al. 2018; F. Dai et al. 2023; B. T. Radzom et al. 2024, 2025; L. B. Handley et al. 2026），这类系统预期在其原生盘中安静地形成与演化。因此，超级地球表观上的对齐，可能主要反映这一动力学“冷”样本的观测选择效应，而非失调的真正缺失。类比热木星的标准高偏心率迁移图景，我们提出：

⁵ 尽管 $68 M_J$ 的褐矮星 HIP 33609 b ($\lambda = 12.7 \pm 1.3^\circ$) 在形式上满足我们的失调判据，我们并不认为仅约 $\sim 10^\circ$ 的投影倾角构成其真正失调的有力证据。因此，我们在分析中将该系统归类为对齐，这与 N. Vowell et al. (2026) 所采用的分类一致。

若初始的冷超级地球链发生动力学不稳定，某些行星可能潮汐向内迁移，成为孤立、失调的热超级地球。取 $Q_p = 100$ ，我们发现这类系统可被圆化到更宽的归一化间距， $a_{\text{final}}/R_p \lesssim 1000$ （见图 1）。相较之下，亚海王星的潮汐品质因子可能更接近气态巨行星，意味着它们只能被输运到近得多的轨道。该图景只与孤立行星相关，因为紧凑多行星构型在很大程度上排除了高偏心率迁移起源。

5. 总结

我们发现，绕单星运行的温亚土星以对齐为主，这与频繁失调的热亚土星形成鲜明对比，两个族群在 3.2σ 水平上存在差异。由于两个族群都在低温恒星周围被发现，它们不受 $T_{\text{eff}} - \lambda$ 依赖关系引入的歧义影响 (K. C. Schlaufman 2010; J. N. Winn et al. 2010a; S. Albrecht et al. 2012)。结合此前对木星质量行星所观测到的类似的、依赖间距的恒星倾角过渡 (M. Rice et al. 2022b; X.-Y. Wang et al. 2024)，这在单星系统中证明：自转-轨道失调专门产生于近距的“热木星类比”区间——在该区间内潮汐圆化高效 ($\tau_e < \tau_{\text{age}}$)，且预期高偏心率迁移能够运作。

我们进一步发现，亚土星在对齐与失调之间的过渡发生在比木星更宽的轨道间距处 ($a_{\text{final}}/R_p = 338 \pm 27$ ，木星为 $a_{\text{final}}/R_p = 117 \pm 9$)，这与如下预期一致：亚土星更低的质量（更小的 M_p/M_* ）与更强的潮汐耗散（更低的 Q_p ）使它们能在自身寿命内被圆化到更宽的最终轨道 (P. Goldreich & S. Soter 1966; P. Hut 1981; F. C. Adams & G. Laughlin 2006)。

若该框架正确，则自转-轨道失调也应出现在其他质量区间的热木星类天体中，包括绕热星、位于 $a_{\text{final}}/R_p \lesssim 100$ 的热褐矮星，以及孤立的、位于 $a_{\text{final}}/R_p \lesssim 1000$ 的热超级地球，其相应但发生移动的过渡位置反映了它们不同的潮汐性质。

最近由 X.-Y. Wang et al. 2026 强调的一个尚存谜题是：同样被认为由高偏心率迁移输运而来的失调热木星与失调热亚土星，为何呈现如此不同的偏心率结局：前者几乎总是被圆化，而后者却可以保持偏心⁶。

ACKNOWLEDGMENTS

我们衷心感谢审稿人富有建设性的意见，这些意见有助于改进文稿的清晰度与质量。本文部分受启发于 Eric Ford 在 2024 年 51 Pegasi b 峰会上提出的一个问题：为什么温亚土星是失调的？我们感谢与 Cristobal Petrovich、Hareesh Gautham Bhaskar、Juan I. Espinoza-Retamal、Malena Rice、Gongjie Li 与 Ji-Wei Xie 的有益讨论。本工作部分得到以下资助：NASA 系外行星研究计划 NNH23ZDA001N-XRP（资助号

⁶ 在本文稿评审期间，C. Petrovich & H. Gautham Bhaskar (2026) 提出了一个引人注目的可能解释，其中亚土星内部受热调控的粘弹性潮汐维持了长寿命的偏心态。

80NSSC24K0153)、NASA TESS 总研究者计划第 7 周期 NNNH23ZDA001N-TESS(资助号 80NSSC25K7912), 以及 Heising-Simons 基金会 (资助 #2023-4050)。我们感谢 NASA 经由空间望远镜科学研究所 JWST 总观测者计划 #9025 下提供的资助 JWST-GO-09025.010-A。此外, X.Y.W. 感谢 Sullivan Prize Fellowship 的支持。

本研究部分得到 Lilly Endowment, Inc. 经由其对印第安纳大学普适技术研究所的支持。

Facilities: NASA Exoplanet Archive

Software: matplotlib (J. D. Hunter 2007), numpy (T. E. Oliphant 2006; S. v. d. Walt et al. 2011; C. R. Harris et al. 2020), pandas (W. McKinney 2010), scipy (P. Virtanen et al. 2020)

REFERENCES

- Adams, F. C., & Laughlin, G. 2006, *ApJ*, 649, 1004, doi: [10.1086/506145](https://doi.org/10.1086/506145)
- Albrecht, S., Reffert, S., Quirrenbach, A., Mitchell, D. S., & Snellen, I. 2007, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 370, *Solar and Stellar Physics Through Eclipses*, ed. O. Demircan, S. O. Selam, & B. Albayrak, 218
- Albrecht, S., Winn, J. N., Marcy, G. W., et al. 2013, *ApJ*, 771, 11, doi: [10.1088/0004-637X/771/1/11](https://doi.org/10.1088/0004-637X/771/1/11)
- Albrecht, S., Winn, J. N., Johnson, J. A., et al. 2011, *ApJ*, 738, 50, doi: [10.1088/0004-637X/738/1/50](https://doi.org/10.1088/0004-637X/738/1/50)
- Albrecht, S., Winn, J. N., Johnson, J. A., et al. 2012, *ApJ*, 757, 18, doi: [10.1088/0004-637X/757/1/18](https://doi.org/10.1088/0004-637X/757/1/18)
- Albrecht, S. H., Dawson, R. I., & Winn, J. N. 2022, *PASP*, 134, 082001, doi: [10.1088/1538-3873/ac6c09](https://doi.org/10.1088/1538-3873/ac6c09)
- Barkaoui, K., Sebastian, D., Zúñiga-Fernández, S., et al. 2025, *A&A*, 696, A44, doi: [10.1051/0004-6361/202453508](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202453508)
- Batygin, K. 2012, *Nature*, 491, 418, doi: [10.1038/nature11560](https://doi.org/10.1038/nature11560)
- Batygin, K., Bodenheimer, P. H., & Laughlin, G. P. 2016, *ApJ*, 829, 114, doi: [10.3847/0004-637X/829/2/114](https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/2/114)
- Beust, H., Bonfils, X., Montagnier, G., Delfosse, X., & Forveille, T. 2012, *A&A*, 545, A88, doi: [10.1051/0004-6361/201219183](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219183)
- Beyer, A. C., & White, R. J. 2024, *apj*, 973, 28, doi: [10.3847/1538-4357/ad6b0d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad6b0d)
- Biddle, L. I., Bowler, B. P., Morgan, M., Tran, Q. H., & Wu, Y.-L. 2025, *Nature*, 644, 356, doi: [10.1038/s41586-025-09324-0](https://doi.org/10.1038/s41586-025-09324-0)
- Boley, A. C., Granados Contreras, A. P., & Gladman, B. 2016, *ApJL*, 817, L17, doi: [10.3847/2041-8205/817/2/L17](https://doi.org/10.3847/2041-8205/817/2/L17)
- Bouchy, F., Moutou, C., Queloz, D., & CoRoT Exoplanet Science Team. 2009, in *IAU Symposium*, Vol. 253, *Transiting Planets*, ed. F. Pont, D. Sasselov, & M. J. Holman, 129–139, doi: [10.1017/S174392130802632X](https://doi.org/10.1017/S174392130802632X)
- Bourrier, V., Lovis, C., Beust, H., et al. 2018, *Nature*, 553, 477, doi: [10.1038/nature24677](https://doi.org/10.1038/nature24677)
- Bourrier, V., Lovis, C., Cretignier, M., et al. 2021, *A&A*, 654, A152, doi: [10.1051/0004-6361/202141527](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141527)
- Bourrier, V., Zapatero Osorio, M. R., Allart, R., et al. 2022, *A&A*, 663, A160, doi: [10.1051/0004-6361/202142559](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142559)
- Bourrier, V., Attia, M., Mallonn, M., et al. 2023, *A&A*, 669, A63, doi: [10.1051/0004-6361/202245004](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245004)
- Bozhilov, V., Antonova, D., Hobson, M. J., et al. 2023, *ApJL*, 946, L36, doi: [10.3847/2041-8213/acbd4f](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acbd4f)
- Brown, D. J. A., Collier Cameron, A., Díaz, R. F., et al. 2012, *ApJ*, 760, 139, doi: [10.1088/0004-637X/760/2/139](https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/2/139)
- Cegla, H. M., Lovis, C., Bourrier, V., et al. 2016, *A&A*, 588, A127, doi: [10.1051/0004-6361/201527794](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527794)
- Collier Cameron, A., Bruce, V. A., Miller, G. R. M., Triard, A. H. M. J., & Queloz, D. 2010, *MNRAS*, 403, 151, doi: [10.1111/j.1365-2966.2009.16131.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16131.x)
- Dai, F., & Winn, J. N. 2017, *AJ*, 153, 205, doi: [10.3847/1538-3881/aa65d1](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa65d1)
- Dai, F., Masuda, K., Beard, C., et al. 2023, *AJ*, 165, 33, doi: [10.3847/1538-3881/aca327](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aca327)
- Dalal, S., Hébrard, G., Lecavelier des Étangs, A., et al. 2019, *A&A*, 631, A28, doi: [10.1051/0004-6361/201935944](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935944)
- Davies, C. L. 2019, *MNRAS*, 484, 1926, doi: [10.1093/mnras/stz086](https://doi.org/10.1093/mnras/stz086)
- Deming, D., Sada, P. V., Jackson, B., et al. 2011, *ApJ*, 740, 33, doi: [10.1088/0004-637X/740/1/33](https://doi.org/10.1088/0004-637X/740/1/33)
- Dugan, E., Wang, X.-Y., Heron, A., et al. 2025, *ApJL*, 994, L23, doi: [10.3847/2041-8213/ae18c7](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ae18c7)
- El-Badry, K., Rix, H.-W., & Heintz, T. M. 2021, *MNRAS*, 506, 2269, doi: [10.1093/mnras/stab323](https://doi.org/10.1093/mnras/stab323)
- Espinoza-Retamal, J. I., Brahm, R., Petrovich, C., et al. 2023, *ApJL*, 958, L20, doi: [10.3847/2041-8213/ad096d](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad096d)
- Espinoza-Retamal, J. I., Stefánsson, G., Petrovich, C., et al. 2024, *AJ*, 168, 185, doi: [10.3847/1538-3881/ad70b8](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad70b8)
- Espinoza-Retamal, J. I., Jordán, A., Brahm, R., et al. 2025, *AJ*, 170, 70, doi: [10.3847/1538-3881/ade22e](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ade22e)
- Esposito, J., Li, G., & Wang, S. 2026, *arXiv e-prints*, arXiv:2603.22409, doi: [10.48550/arXiv.2603.22409](https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.22409)
- Fabrycky, D., & Tremaine, S. 2007, *ApJ*, 669, 1298, doi: [10.1086/521702](https://doi.org/10.1086/521702)

- Fontanive, C., & Bardalez Gagliuffi, D. 2021, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8, 16, doi: [10.3389/fspas.2021.625250](https://doi.org/10.3389/fspas.2021.625250)
- Gallet, F., Bolmont, E., Mathis, S., Charbonnel, C., & Amard, L. 2017, *A&A*, 604, A112, doi: [10.1051/0004-6361/201730661](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730661)
- Gao, J., & Li, G. 2025, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, Vol. 245, American Astronomical Society Meeting Abstracts, 413.06
- Giacalone, S., Dai, F., Zanazzi, J. J., et al. 2024, *AJ*, 168, 189, doi: [10.3847/1538-3881/ad785a](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad785a)
- Goldreich, P., & Soter, S. 1966, *Icarus*, 5, 375, doi: [10.1016/0019-1035\(66\)90051-0](https://doi.org/10.1016/0019-1035(66)90051-0)
- Goldreich, P., & Tremaine, S. 1980, *ApJ*, 241, 425, doi: [10.1086/158356](https://doi.org/10.1086/158356)
- Guenther, E. W., Díaz, R. F., Gazzano, J. C., et al. 2012, *A&A*, 537, A136, doi: [10.1051/0004-6361/201117706](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117706)
- Guillochon, J., Ramirez-Ruiz, E., & Lin, D. 2011, *ApJ*, 732, 74, doi: [10.1088/0004-637X/732/2/74](https://doi.org/10.1088/0004-637X/732/2/74)
- Handley, L. B., Howard, A. W., Dai, F., et al. 2026, *arXiv e-prints*, arXiv:2603.23713, doi: [10.48550/arXiv.2603.23713](https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.23713)
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. 2020, *Nature*, 585, 357
- Heller, R., Jackson, B., Barnes, R., Greenberg, R., & Homeier, D. 2010, *A&A*, 514, A22, doi: [10.1051/0004-6361/200912826](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912826)
- Hirano, T., Narita, N., Shporer, A., et al. 2011, *PASJ*, 63, 531, doi: [10.1093/pasj/63.sp2.S531](https://doi.org/10.1093/pasj/63.sp2.S531)
- Hixenbaugh, K., Wang, X.-Y., Rice, M., & Wang, S. 2023, *ApJL*, 949, L35, doi: [10.3847/2041-8213/acd6f5](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acd6f5)
- Hjorth, M., Justesen, A. B., Hirano, T., et al. 2019, *MNRAS*, 484, 3522, doi: [10.1093/mnras/stz139](https://doi.org/10.1093/mnras/stz139)
- Hodges, J. L. 1958, *Arkiv för Matematik*, 3, 469. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:121451525>
- Hunter, J. D. 2007, *Computing in science & engineering*, 9, 90
- Hut, P. 1981, *A&A*, 99, 126
- Im, H., Lu, T., Rice, M., et al. 2026, *arXiv e-prints*, arXiv:2604.09834, doi: [10.48550/arXiv.2604.09834](https://doi.org/10.48550/arXiv.2604.09834)
- Jackson, B., Greenberg, R., & Barnes, R. 2008, *ApJ*, 678, 1396, doi: [10.1086/529187](https://doi.org/10.1086/529187)
- Johnson, M. C., Cochran, W. D., Addison, B. C., Tinney, C. G., & Wright, D. J. 2017, *AJ*, 154, 137, doi: [10.3847/1538-3881/aa8462](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa8462)
- Kawai, Y., Fukui, A., Watanabe, N., Fukazawa, S., & Narita, N. 2025, *AJ*, 170, 299, doi: [10.3847/1538-3881/ae0a11](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ae0a11)
- Knudstrup, E., Albrecht, S. H., Winn, J. N., et al. 2024, *A&A*, 690, A379, doi: [10.1051/0004-6361/202450627](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450627)
- Kraft, R. P. 1967, *ApJ*, 150, 551, doi: [10.1086/149359](https://doi.org/10.1086/149359)
- Lai, D. 2012, *MNRAS*, 423, 486, doi: [10.1111/j.1365-2966.2012.20893.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20893.x)
- Li, G., & Winn, J. N. 2016, *ApJ*, 818, 5, doi: [10.3847/0004-637X/818/1/5](https://doi.org/10.3847/0004-637X/818/1/5)
- Lin, D. N. C., Bodenheimer, P., & Richardson, D. C. 1996, *Nature*, 380, 606, doi: [10.1038/380606a0](https://doi.org/10.1038/380606a0)
- Lu, T., An, Q., Li, G., et al. 2025, *ApJ*, 979, 218, doi: [10.3847/1538-4357/ad9b79](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad9b79)
- Lubin, J., Wang, X.-Y., Rice, M., et al. 2023, *ApJL*, 959, L5, doi: [10.3847/2041-8213/ad0fea](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad0fea)
- McKinney, W. 2010, in *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, Vol. 445, Austin, TX, 51–56
- McLaughlin, D. B. 1924, *ApJ*, 60, 22, doi: [10.1086/142826](https://doi.org/10.1086/142826)
- Morton, T. D., & Winn, J. N. 2014, *ApJ*, 796, 47, doi: [10.1088/0004-637X/796/1/47](https://doi.org/10.1088/0004-637X/796/1/47)
- Naoz, S. 2016, *ARA&A*, 54, 441, doi: [10.1146/annurev-astro-081915-023315](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081915-023315)
- Naoz, S., Farr, W. M., & Rasio, F. A. 2012, *The Astrophysical Journal Letters*, 754, L36
- NASA Exoplanet Science Institute. 2020, *Planetary Systems Composite Table*, Last Accessed: 2026-07-16 IPAC, doi: [10.26133/NEA13](https://doi.org/10.26133/NEA13)
- Oliphant, T. E. 2006, *A guide to NumPy*, Vol. 1 (Trelgol Publishing USA)
- Penev, K., & Sasselov, D. 2011, *ApJ*, 731, 67, doi: [10.1088/0004-637X/731/1/67](https://doi.org/10.1088/0004-637X/731/1/67)
- Petrovich, C. 2015, *ApJ*, 799, 27, doi: [10.1088/0004-637X/799/1/27](https://doi.org/10.1088/0004-637X/799/1/27)
- Petrovich, C., & Gautham Bhaskar, H. 2026, *arXiv e-prints*, arXiv:2606.14983, doi: [10.48550/arXiv.2606.14983](https://doi.org/10.48550/arXiv.2606.14983)
- Petrovich, C., Muñoz, D. J., Kratter, K. M., & Malhotra, R. 2020, *ApJL*, 902, L5, doi: [10.3847/2041-8213/abb952](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abb952)
- Petrovich, C., & Tremaine, S. 2016, *ApJ*, 829, 132, doi: [10.3847/0004-637X/829/2/132](https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/2/132)
- Pont, F., Endl, M., Cochran, W. D., et al. 2010, *MNRAS*, 402, L1, doi: [10.1111/j.1745-3933.2009.00785.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2009.00785.x)
- Prinnoth, B., Sedaghati, E., Seidel, J. V., et al. 2024, *AJ*, 168, 133, doi: [10.3847/1538-3881/ad5a7f](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad5a7f)
- Radzom, B. T., Dong, J., Rice, M., et al. 2025, *AJ*, 169, 189, doi: [10.3847/1538-3881/ad9dd5](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad9dd5)
- Radzom, B. T., Dong, J., Rice, M., et al. 2024, *AJ*, 168, 116, doi: [10.3847/1538-3881/ad61d8](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad61d8)
- Rasio, F. A., & Ford, E. B. 1996, *Science*, 274, 954, doi: [10.1126/science.274.5289.954](https://doi.org/10.1126/science.274.5289.954)
- Rice, M., Wang, S., & Laughlin, G. 2022a, *ApJL*, 926, L17, doi: [10.3847/2041-8213/ac502d](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac502d)
- Rice, M., Wang, S., Wang, X.-Y., et al. 2022b, *AJ*, 164, 104, doi: [10.3847/1538-3881/ac8153](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac8153)
- Rossiter, R. A. 1924, *ApJ*, 60, 15, doi: [10.1086/142825](https://doi.org/10.1086/142825)

- Rubenzahl, R. A., Dai, F., Howard, A. W., et al. 2021, *AJ*, 161, 119, doi: [10.3847/1538-3881/abd177](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd177)
- Rusznak, J., Wang, X.-Y., Rice, M., & Wang, S. 2025, *ApJL*, 983, L42, doi: [10.3847/2041-8213/adc129](https://doi.org/10.3847/2041-8213/adc129)
- Sanchis-Ojeda, R., & Winn, J. N. 2011, *ApJ*, 743, 61, doi: [10.1088/0004-637X/743/1/61](https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/1/61)
- Schlaufman, K. C. 2010, *ApJ*, 719, 602, doi: [10.1088/0004-637X/719/1/602](https://doi.org/10.1088/0004-637X/719/1/602)
- Schwarz, R., Funk, B., Zechner, R., & Bazsó, Á. 2016, *MNRAS*, 460, 3598, doi: [10.1093/mnras/stw1218](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1218)
- Simpson, E. K., Pollacco, D., Cameron, A. C., et al. 2011, *MNRAS*, 414, 3023, doi: [10.1111/j.1365-2966.2011.18603.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18603.x)
- Siverd, R. J., Beatty, T. G., Pepper, J., et al. 2012, *ApJ*, 761, 123, doi: [10.1088/0004-637X/761/2/123](https://doi.org/10.1088/0004-637X/761/2/123)
- Southworth, J. 2011, *MNRAS*, 417, 2166, doi: [10.1111/j.1365-2966.2011.19399.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19399.x)
- Southworth, J. 2026, *Universe*, 12, 62, doi: [10.3390/universe12030062](https://doi.org/10.3390/universe12030062)
- Stefánsson, G., Mahadevan, S., Petrovich, C., et al. 2022, *ApJL*, 931, L15, doi: [10.3847/2041-8213/ac6e3c](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6e3c)
- Teng, H.-Y., Dai, F., Howard, A. W., et al. 2025, *AJ*, 170, 51, doi: [10.3847/1538-3881/addab9](https://doi.org/10.3847/1538-3881/addab9)
- Triaud, A. H. M. J. 2018, in *Handbook of Exoplanets*, ed. H. J. Deeg & J. A. Belmonte, 2, doi: [10.1007/978-3-319-55333-7_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-55333-7_2)
- Triaud, A. H. M. J., Queloz, D., Bouchy, F., et al. 2009, *A&A*, 506, 377, doi: [10.1051/0004-6361/200911897](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200911897)
- Triaud, A. H. M. J., Collier Cameron, A., Queloz, D., et al. 2010, *A&A*, 524, A25, doi: [10.1051/0004-6361/201014525](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014525)
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. 2020, *Nature methods*, 17, 261
- Vowell, N., Dong, J., Rodriguez, J. E., et al. 2026, *MNRAS*, 545, staf2161, doi: [10.1093/mnras/staf2161](https://doi.org/10.1093/mnras/staf2161)
- Walt, S. v. d., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. 2011, *Computing in Science & Engineering*, 13, 22
- Wang, S., Addison, B., Fischer, D. A., et al. 2018, *AJ*, 155, 70, doi: [10.3847/1538-3881/aaa2fb](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaa2fb)
- Wang, S., Winn, J. N., Addison, B. C., et al. 2021, *AJ*, 162, 50, doi: [10.3847/1538-3881/ac0626](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac0626)
- Wang, X.-Y., Wang, S., & Batygin, K. 2026a, *arXiv e-prints*, arXiv:2605.28719, doi: [10.48550/arXiv.2605.28719](https://doi.org/10.48550/arXiv.2605.28719)
- Wang, X.-Y., Wang, S., & Batygin, K. 2026b, *arXiv e-prints*, arXiv:2605.28719, doi: [10.48550/arXiv.2605.28719](https://doi.org/10.48550/arXiv.2605.28719)
- Wang, X.-Y., Wang, S., & Batygin, K. 2026, under review
- Wang, X.-Y., Wang, S., & Ong, J. M. J. 2026, *ApJL*, 996, L7, doi: [10.3847/2041-8213/ae21c5](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ae21c5)
- Wang, X.-Y., Rice, M., Wang, S., et al. 2022, *ApJL*, 926, L8, doi: [10.3847/2041-8213/ac4f44](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac4f44)
- Wang, X.-Y., Rice, M., Wang, S., et al. 2024, *ApJL*, 973, L21, doi: [10.3847/2041-8213/ad7469](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad7469)
- Watson, C. A., Littlefair, S. P., Diamond, C., et al. 2011, *MNRAS*, 413, L71, doi: [10.1111/j.1745-3933.2011.01036.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2011.01036.x)
- Weidenschilling, S. J., & Marzari, F. 1996, *Nature*, 384, 619, doi: [10.1038/384619a0](https://doi.org/10.1038/384619a0)
- Winn, J. N., Fabrycky, D., Albrecht, S., & Johnson, J. A. 2010a, *ApJL*, 718, L145, doi: [10.1088/2041-8205/718/2/L145](https://doi.org/10.1088/2041-8205/718/2/L145)
- Winn, J. N., & Fabrycky, D. C. 2015, *ARA&A*, 53, 409, doi: [10.1146/annurev-astro-082214-122246](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082214-122246)
- Winn, J. N., Johnson, J. A., Howard, A. W., et al. 2010b, *ApJL*, 723, L223, doi: [10.1088/2041-8205/723/2/L223](https://doi.org/10.1088/2041-8205/723/2/L223)
- Wong, I., Shporer, A., Zhou, G., et al. 2021, *AJ*, 162, 256, doi: [10.3847/1538-3881/ac26bd](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac26bd)
- Wright, J., Rice, M., Wang, X.-Y., Hixenbaugh, K., & Wang, S. 2023, *AJ*, 166, 217, doi: [10.3847/1538-3881/ad0131](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad0131)
- Wu, D.-H., Rice, M., & Wang, S. 2023, *AJ*, 165, 171, doi: [10.3847/1538-3881/acbf3f](https://doi.org/10.3847/1538-3881/acbf3f)
- Wu, Y., Hadden, S., Dewberry, J., El-Badry, K., & Matzner, C. D. 2025, *ApJL*, 982, L34, doi: [10.3847/2041-8213/adb751](https://doi.org/10.3847/2041-8213/adb751)
- Wu, Y., & Lithwick, Y. 2011, *ApJ*, 735, 109, doi: [10.1088/0004-637X/735/2/109](https://doi.org/10.1088/0004-637X/735/2/109)
- Wu, Y., & Murray, N. 2003, *ApJ*, 589, 605, doi: [10.1086/374598](https://doi.org/10.1086/374598)
- Wytttenbach, A., Lovis, C., Ehrenreich, D., et al. 2017, *A&A*, 602, A36, doi: [10.1051/0004-6361/201630063](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630063)
- Xu, W., & Wang, S. 2024, *ApJL*, 962, L4, doi: [10.3847/2041-8213/ad1ee1](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad1ee1)
- Yee, S. W., Tamburo, P., Stefánsson, G., et al. 2025, *AJ*, 170, 275, doi: [10.3847/1538-3881/ae070b](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ae070b)
- Yu, H., & Dai, F. 2024, *ApJ*, 972, 159, doi: [10.3847/1538-4357/ad5ffb](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad5ffb)
- Zahn, J.-P. 1977, *Astronomy and Astrophysics*, 500, 121
- Zak, J., Bocchieri, A., Sedaghati, E., et al. 2024, *A&A*, 686, A147, doi: [10.1051/0004-6361/202349084](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202349084)
- Zanazzi, J. J., Dewberry, J., & Chiang, E. 2024, *ApJL*, 967, L29, doi: [10.3847/2041-8213/ad4644](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad4644)
- Zhang, E. Y., Teng, H.-Y., Dai, F., et al. 2025, *AJ*, 170, 175, doi: [10.3847/1538-3881/adf339](https://doi.org/10.3847/1538-3881/adf339)
- Zhou, G., Bayliss, D., Hartman, J. D., et al. 2015, *ApJL*, 814, L16, doi: [10.1088/2041-8205/814/1/L16](https://doi.org/10.1088/2041-8205/814/1/L16)
- Zhou, G., Rodriguez, J. E., Collins, K. A., et al. 2016, *AJ*, 152, 136, doi: [10.3847/0004-6256/152/5/136](https://doi.org/10.3847/0004-6256/152/5/136)
- Zhou, G., Rodriguez, J. E., Vanderburg, A., et al. 2018, *AJ*, 156, 93, doi: [10.3847/1538-3881/aad085](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad085)

Zhou, G., Huang, C. X., Bakos, G. Á., et al. 2019a, AJ,
158, 141, doi: [10.3847/1538-3881/ab36b5](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab36b5)

Zhou, G., Bakos, G. Á., Bayliss, D., et al. 2019b, AJ, 157,
31, doi: [10.3847/1538-3881/aaf1bb](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaf1bb)