

LAMOST助力解开热木星“从何而来”又“向何而去”之谜

谢基伟^{1*}, 陈迪昌², 周济林¹

1. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023

2. 中山大学物理与天文学院, 珠海 519080

* 联系人, E-mail: jwxie@nju.edu.cn

LAMOST helps unravel the mysteries of hot Jupiters: origins and fates

Ji-Wei Xie^{1*}, Di-Chang Chen² & Ji-Lin Zhou¹

¹ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

² School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519080, China

* Corresponding author, E-mail: jwxie@nju.edu.cn

doi: [10.1360/CSB-2025-6003](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-6003)

1995年, 飞马座51b的发现^[1]彻底打破了人类对行星系统的固有认知. 这颗质量与木星相当, 却在短短4.2天内就绕母星旋转一周的“热木星”, 不仅为其发现者赢得了诺贝尔奖, 也给天文学家提出了一个持续三十年的核心挑战: 这类“叛逆”的巨行星究竟从何而来?

依据基于太阳系建立的行星形成经典理论(如核吸积模型), 气态巨行星理应在原行星盘外围的“雪线”之外形成, 那里丰富的冰质物质才能堆积出足够大的核心, 进而吸附大量气体. 然而, 热木星却运行在紧贴恒星的炽热轨道上, 这意味着它们必然在形成后经历了轨道迁移, 从遥远的寒冷地带“搬迁”至此.

为解释这一迁徙过程, 学者提出了多种竞争性的物理机制^[2]: 有的认为它们在行星系统的“婴儿期”通过原行星盘迁移(disk migration), 在数百万年内即完成^[3]; 有的认为它们在“青春期”通过行星间的引力散射(planet-planet scattering)或Kozai-Lidov机制, 在几千万到几亿年之内到达; 还有观点认为, 它们可能经历了一种历时数亿甚至数十亿年的“长期混沌(secular chaos)”过程^[4], 才步履蹒跚地抵达现在的轨道. 然而, 何种机制占主导? 不同机制的定量贡献如何? 这些关键问题长期悬而未决.

热木星的奥秘不仅在于其“从何而来”的起源, 还关乎其“向何而去”的最终命运. 由于距离宿主恒星极近, 热木星与恒星之间会发生强烈的潮汐相互作用. 这种潮汐作用主要体

现为两个方面: 一是恒星对行星内部造成的潮汐, 即行星潮汐; 二是行星对恒星内部造成的潮汐, 即恒星潮汐.

行星潮汐会推动行星的自转与公转逐渐趋于同步, 而恒星潮汐则促使恒星的自转与其公转同步. 由于行星质量相对较小, 其轨道同步通常在演化早期即可实现; 而恒星质量极大, 其轨道同步往往难以达成, 因此恒星潮汐会一直持续作用. 在热木星系统长期演化的大部分时间里, 恒星潮汐占据主导地位.

在典型情况下, 恒星的自转速度慢于行星的公转速度. 因此, 恒星潮汐的主要效应表现为: 行星公转“拖拽”着恒星自转加速, 使恒星获得角动量; 与此同时, 行星公转逐渐失去角动量, 导致其轨道持续收缩. 这一机制与地月系统的潮汐作用原理相同, 但情况相反: 地球自转速度快于月球公转, 地球自转减速并将角动量转移给月球, 使得月球公转轨道扩张, 月球逐渐远离地球.

在恒星潮汐长期持续的作用下, 行星的轨道角动量会不断耗散, 导致轨道逐渐收缩, 最终可能被恒星吞噬. 这一过程的快慢取决于一个关键物理参数——恒星的潮汐品质因子(Q). Q 值越小, 表示潮汐耗散越有效, 轨道衰减越快. 然而, 学界对 Q 的估计存在巨大分歧, 不同研究给出的数值跨越多达5个数量级^[5]. 一个突出的矛盾是: 目前唯一被确认为轨道正在收缩的热木星WASP-12b^[6], 其观测数据暗示 $\log_{10}(Q) \approx 5.1$; 而先前基于热木星整体分布统计的研究则倾向于 $\log_{10}(Q) = 6 \sim 9$.

引用格式: 谢基伟, 陈迪昌, 周济林. LAMOST助力解开热木星“从何而来”又“向何而去”之谜. 科学通报, 2026, 71: 2323–2325

Xie J-W, Chen D-C, Zhou J-L. LAMOST helps unravel the mysteries of hot Jupiters: origins and fates (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2323–2325, doi: [10.1360/CSB-2025-6003](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-6003)

前者预言应有较多正处于收缩中的热木星,与当前仅发现一例的事实不符;后者则预言轨道收缩极慢,难以被当前观测探测到.这一矛盾凸显了单一案例与群体统计之间的脱节.

无论是追溯起源还是预测最终演化命运,时间(即宿主恒星的年龄)都是最关键的因素.不同迁移机制作用于迥异的时间尺度,而恒星潮汐作用的效率则决定了热木星“坠落”的时标.因此,精确绘制热木星出现频率随宿主恒星年龄演变的图谱,成为破解双重谜题的关键.

然而,精确测定单颗恒星的年龄本身就是一个难题.传统恒星演化模型对系外行星宿主恒星给出的年龄估计往往误差较大(中值误差可达50%^[7]).我们另辟蹊径,采用恒星运动学方法来估算恒星群体的平均年龄.其原理在于,恒星在银河系引力势中的运动速度弥散会随该星群年龄的增长而增加.依托我国大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST,也称郭守敬望远镜)提供的大规模、均匀恒星光谱数据,结合Gaia卫星的高精度天体测量信息,我们成功重新标定了速度弥散与年龄的关系,将恒星群体年龄的估算误差显著降低至约15%^[8],为在时间维度上研究行星演化奠定了坚实基础.

基于我们新的年龄估计,我们在2023年的工作^[9]中发现热木星的数量随恒星变老而整体减少,并成功解释了观测上的两个长期谜题:(1) 视向速度法样本和凌星法样本中热木星出现率不一致;(2) 1999年哈勃空间望远镜未能在球状星团中发现热木星.这两个谜题的根源均在于未充分考虑热木星出现率随恒星年龄演变的效应.具体而言,第一个谜题是由于两种样本中的恒星年龄存在显著系统差异所致;在扣除

该年龄系统差后,两种方法得到的热木星出现率趋于一致.第二个谜题则源于1999年预测球状星团中热木星数量(预估为17颗)时,未考虑热木星会因球状星团中恒星的极高年龄(通常超过百亿年)而显著减少.我们基于该年龄效应重新评估了当年的观测数据,预计可探测热木星约为0.8颗,与当时实际“零发现”的结果吻合.

2025年这次最新研究^[10],我们更进一步:从“定性”走向“定量”,从“描述现象”到“锁定理论”.通过对LAMOST和Gaia等数据的分析,我们绘制出了更精确的“热木星年龄图谱”.一个突破性的发现是:热木星数量衰减并非匀速,而是在恒星年龄约20亿年处出现一个明显的“拐点”:前期减少得慢,后期减少得快(图1(a)).这揭示了热木星家族由两大“族群”构成.“早期到达者”在恒星诞生后数千万年内就迅速就位(图1(b)).“晚期到达者”不紧不慢,在数千万年乃至数十亿年的时间里才陆续就位(图1(c)).这两大族群共同作用,塑造了先缓后急的“分段”衰减曲线.

“晚期到达”族群还展现出与“长期混沌”机制高度吻合的特征:它们更倾向于环绕金属丰度较高的恒星,且其轨道面与恒星自转轴往往存在较大夹角.这为“长期混沌”是其主要形成通道提供了强有力的旁证.

通过将观测图谱与包含“早期”和“晚期”形成机制的混合物理模型进行精细拟合,我们首次实现了对热木星起源的定量分解:约62%的热木星通过盘迁移、散射等较快机制形成(“早期到达者”),而约38%则源自“长期混沌”这一慢速通道(“晚期到达者”).同时,我们首次从群体演化角度,将类太阳

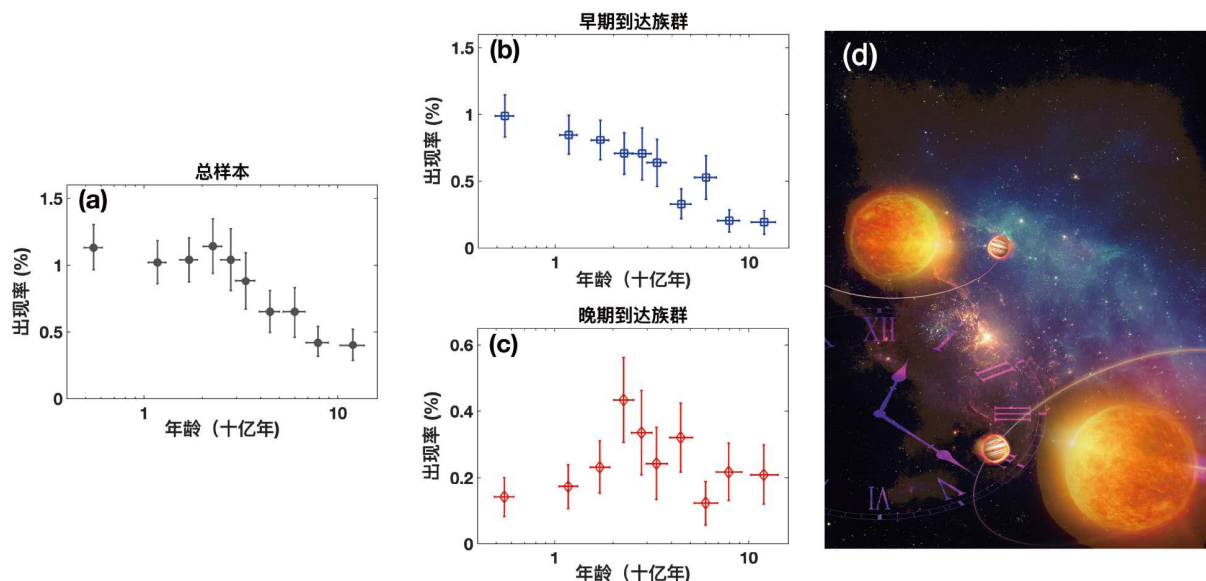


图1 (网络版彩色)热木星出现率的分段衰减与多机制形成示意图。(a) 总样本的演化规律;(b) 早期到达族群;(c) 晚期到达族群;(d) 两个族群轨道构型示意. 详见文献^[10]

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the piecewise decline in occurrence rate of hot Jupiters and multi-mechanism formation. (a) Evolutionary pattern of the total sample; (b) early arrival population; (c) late arrival population; (d) schematic representation of orbital configurations for the two populations. For details, see Ref. ^[10]

恒星的潮汐品质因子约束在 $\log_{10}(Q)=5.4\sim 6.1$ 。基于这一结果所预测的、当前应处于可探测轨道衰减阶段的热木星数量,也与实际观测到的候选体数目吻合,从而弥合了以往研究中的矛盾。

该研究是“行星的空间分布和年龄演化”(Planets Across Space and Time, PAST)系列研究的第七项核心成果(PAST-7)。该计划旨在绘制行星系统的“时空演化图谱”,追溯不同行星族群的完整“生命史”^[11,12]。该工作通过对“年龄”这一关键维度的深度挖掘,首次构建了一个能自洽统一解释热木星“起

源-迁移-潮汐演化”全过程的物理框架。

展望未来,随着TESS、GAIA、PLATO以及我国系外地球2.0(ET 2.0)搜寻等项目^[13~15]的推进,系外行星研究将迈入“十万级样本”时代。这不仅能让人们对热木星进行更多维、更系统的研究,还有望揭示更多行星族群(如超级地球、亚海王星)的形成与演化历史。通过将日益丰富的系外行星统计数据与我们的太阳系进行深度比较,人类终将更清晰地回答那个根本性问题:我们的太阳系在宇宙中是否特殊?如果特殊,它又是如何形成并演变成今天这般模样的。

推荐阅读文献

- 1 Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378: 355–359
- 2 Dawson R I, Johnson J A. Origins of hot Jupiters. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2018, 56: 175–221
- 3 Lin D N C, Bodenheimer P, Richardson D C. Orbital migration of the planetary companion of 51 Pegasi to its present location. *Nature*, 1996, 380: 606–607
- 4 Wu Y, Lithwick Y. Secular chaos and the production of hot Jupiters. *Astrophys J*, 2011, 735: 109
- 5 Ogilvie G I. Tidal dissipation in stars and giant planets. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2014, 52: 171–210
- 6 Yee S W, Winn J N, Knutson H A, et al. The orbit of WASP-12b is decaying. *Astronophys J Lett*, 2020, 888: L5
- 7 Berger T A, Huber D, van Saders J L, et al. The Gaia–Kepler stellar properties catalog. I. Homogeneous fundamental properties for 186,301 Kepler stars. *Astron J*, 2020, 159: 280
- 8 Chen D C, Xie J W, Zhou J L, et al. Planets Across Space and Time (PAST). I. Characterizing the memberships of Galactic components and stellar ages: revisiting the kinematic methods and applying to planet host stars. *Astrophys J*, 2021, 909: 115
- 9 Chen D C, Xie J W, Zhou J L, et al. The evolution of hot Jupiters revealed by the age distribution of their host stars. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2023, 120: e2304179120
- 10 Chen D C, Xie J W, Zhou J L, et al. The origin and tidal evolution of hot Jupiters constrained by a broken age–frequency relation. *Nat Astron*, 2026, 10: 92–104
- 11 Yang J Y, Chen D C, Xie J W, et al. Planets Across Space and Time (PAST). IV. The occurrence and architecture of Kepler planetary systems as a function of kinematic age revealed by the LAMOST–Gaia–Kepler sample. *Astron J*, 2023, 166: 243
- 12 Tu P W, Xie J W, Chen D C, et al. Age dependence of the occurrence and architecture of ultra-short-period planet systems. *Nat Astron*, 2025, 9: 995–1006
- 13 Kunimoto M, Winn J, Ricker G R, et al. Predicting the exoplanet yield of the TESS prime and extended missions through years 1–7. *Astron J*, 2022, 163: 290
- 14 Rauer H, Aerts C, Cabrera J, et al. The PLATO mission. *Exp Astron*, 2025, 59: 26
- 15 Ge J, Chen W, Chen Y, et al. Search for a Second Earth – the Earth 2.0 (ET) Space Mission (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2024, 44: 400–424 [葛健, 陈雯, 陈永和, 等. 搜寻第二个地球系外地球(ET)巡天计划. 空间科学学报, 2024, 44: 400–424]