

突破传统行星理论

和木星类似，飞马座51b是一颗气态巨行星，但它的轨道离宿主恒星太近了。有多近？地球到太阳距离的二十分之一。

离太阳最近的行星是水星，上面根本没有水，白天时是一片极端炎热的世界，飞马座51b离其宿主恒星比水星离太阳还要近得多。

“这是一个与直觉相悖的发现。飞马座51b超越了传统行星形成和演化理论。”南京大学天文与空间科学学院谢基伟教授介绍，人类认识行星，就是从研究太阳系的八大行星开始的。内太阳系有水星、金星、地球和火星，它们体积和质量较小，属于岩质行星，也称类地行星。外太阳系则分布着木星、土星、天王星、海王星这四颗气态巨行星和冰巨星。

为什么太阳系呈现出这种“内小外大”的构型？经典的行星形成理论提出了“雪线”的概念。

正如地球上的高峰都有一道鲜明的“雪线”，在雪线以下，降雪就难以形成积雪。太阳系的雪线大致在火星和木星之间，即小行星带的位置。在雪线以外，水汽凝结成冰，能够更快地形成足够大的固态核心，并不断加速吸附气体等物质，最终形成巨行星。雪线以内受恒星活动影响更大，不仅难以形成较大的固态核心，可供吸附的物质也较少。

环境如此恶劣，飞马座51b何以安居恒星的“卧榻之侧”？就好比大火炉的旁边怎么可能放得住一个大雪球呢，分分钟就融化了。

为了解决种种矛盾和谜题，一个全新的行星类型——热木星，被划分出来。

谢基伟说，热木星的发现堪称天文学上的里程碑。它为人类打开了一扇新世界的大门，拓展了人类对行星的认知边界，飞马座51b的两位发现者也于2019年获得诺贝尔物理学奖。

截至目前，人类已发现6000多颗系外行星，其中有数百颗是热木星。尽管前人已经对热木星做过不少研究，但它们到底如何形成、如何演化，仍有不少问题留待解答。

热木星也“三迁”

为什么热木星会出现在它本不该出现的位置，目前天文学界的主流观点仍倾向于在传统理论的基础上“打补丁”，也就是认为热木星还是在远离恒星的寒冷地带形成的，只不过在某种机制作用下迁移到了离恒星极近的轨道。

具体是什么机制，天文学界莫衷一是，大致有三种模型。

首先是“盘迁移模型”，认为气态巨行星形成后，与原行星盘相互作用，在此过程中，行星消耗了自身的能量，被拉向恒星，根据该模型的测算，实现轨道迁移只需几百万年。

其次叫“散射迁移模型”，认为原行星盘消散后，各大行星近距离交汇，犹如一场大型交通事

我国天文学家揭开热木星轨道“内迁”之谜

「大火炉」之侧岂容「大雪球」，热木星「搬家」不是为了取暖



这是热木星与其宿主恒星的艺术想象图。（南京大学供图）

故，导致一些行星被“排挤”到恒星附近，形成热木星。理论上，这种迁移的速度比盘迁移慢，但基本可以在1亿年内完成。

此外还有“长期混沌”等机制，轨道内迁用时更漫长，可能需要上亿乃至数十亿年。

原来热木星也有“三迁”。谢基伟所领导的国际研究团队，目标就是想精确地测算出这几种迁移机制分别贡献了多少热木星。

如何下手呢？谢基伟在热木星与宿主恒星的年龄上找到了突破口。

由于离宿主恒星太近，热木星都处于“潮汐锁定”的状态。月球就被地球潮汐锁定，永远以同一面对着地球，热木星也是如此。在潮汐耗散作用下，热木星逐渐失去轨道角动量，不断向恒星跌落，最终被恒星撕裂、吞噬。

因此，年龄越大的恒星系，出现热木星的概率应该越低。

2023年，谢基伟团队小试牛刀，根据74颗热木星的观测数据，首次发现热木星的出现率确实随着恒星系的年龄增长而下降。

虽然这只是一个定性的结论，却解决了困扰研究人员20多年的问题——1999年，哈勃望远镜曾对准球状星团，试图以其强大的光学成像能力探测到热木星，结果却一无所获。现在回头看原因很简单，当时的研究人员忽视了年龄这个要素。球状星团虽然是一片稠密星区，但其中不少恒星已经上百亿岁，即便曾经存在热木星，绝大多数也会因为潮汐作用而湮没在恒星的光辉中。

这一次，谢基伟团队利用中国郭守敬望远镜和欧洲航天局“盖亚”空间探测器等国内外天文设备的观测数据，将样本扩大到123颗热木星，得出了更加精确的定量分析结论。

结果显示，随着恒星年龄增

长，热木星的出现率并非一成不变地匀速下降，而是“分段衰减、前慢后快”，以20亿年为拐点，在此之前减少得慢，后期减少得快。

进一步研究发现，热木星分为“早来族”和“晚来族”，而且“早的很早，晚的很晚”。前者约占六成，在宿主恒星形成的最初几千万年内便已“内迁”；剩下约四成“晚来族”，则是在接下来上亿乃至数十亿年的漫长岁月里，与其他天体长期相互作用，通过“长期混沌”机制偶然被输送到恒星附近的。

研究团队还对比了两大族群的“身份特征”，发现“晚来族”更喜欢出现在金属元素丰富的恒星周围，且其轨道面与恒星自转轴存在显著夹角。这些特征完美印证了“长期混沌”机制的理论假设，强有力地证明该机制正是“晚来族”的主要来源。

“天文学上将所有比氢和氦重的元素统称为金属。我们知道恒星绝大部分物质是氢和氦，它们进行核聚变，就会产生更重的元素。”谢基伟说，“初代恒星完全由氢和氦组成，它寿终正寝时，会通过爆炸释放出体内所有的物质，包括聚变产生的金属元素，这些金属元素与其他星际物质共同孕育下一代恒星。因此，如果一颗恒星的金属丰度偏高，说明它是‘晚辈’。”

谢基伟告诉记者，此次研究产出的定量结果将用于优化以往的热木星迁移模型，还可用于预测一些恒星附近是否存在热木星。

穿越过去，看到未来

10月31日，谢基伟团队将上述研究成果以论文的形式发表在国际学术期刊《自然-天文学》上。这也是团队“行星的空间分布和年龄演化”研究计划近5年来发表的第7

篇系列成果。

“行星的空间分布和年龄演化”英文缩写为PAST，直译为“过去”，但谢基伟重新起了一个中文简称——“穿越”。

“我们觉得‘过去’可能听起来有些消极的含义，实际上天文学研究的就是过去，几万甚至几十亿年前的光，跨过遥远的宇宙，触达我们的视网膜，让我们得以看到过去，这不就是‘穿越’吗。”谢基伟说。

近几年，团队依托中国郭守敬望远镜的大样本巡天优势，相继构建了包含数千颗系外行星的时空数据库，开展了各类行星系统的普查和统计研究，并在揭示热木星和极短周期行星演化规律方面取得了重要研究成果。

此次热木星定量研究的价值，也远不止绘制几张图表、发表一篇论文那么简单。在谢基伟看来，更深层的意义在于识人明己、鉴往知来。

尽管热木星与地球的性质相去甚远，但研究热木星是如何被恒星拉近、潮汐锁定，再一步步耗散、吞噬的，也能够推测太阳进入红巨星阶段以后，水星、金星、地球的命运。

谢基伟表示，团队计划将研究范围拓展到其他行星类型，通过分析恒星系统中的岩质行星如何形成、演化，不仅能“看到”地球的未来，还有助于寻找其他宜居行星。

就在10月31日晚，神舟二十号载人飞船发射升空。“我们现在还在使用欧洲航天局‘盖亚’空间探测器拍摄的数据，今年3月它已经退役了。不久的将来，我国也会发射我们中国人自己的空间望远镜，届时，我们将有更有力的工具去搜寻地球这样的系外行星，解开更多行星演化的奥秘。”谢基伟满怀期待。

据新华社