



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

基于高精度测光和光谱观测的系外行星研究

作者姓名: 汪宪钰

指导教师: 武振宇 研究员 中国科学院国家天文台

学位类别: 理学博士

学科专业: 天体物理

培养单位: 中国科学院国家天文台

2022 年 12 月

**Study of exoplanets based on high-precision photometric and
spectroscopic observations**

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Astrophysics
By
WANG Xianyu
Supervisor: Professor WU Zhenyu**

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

December, 2022

摘要

系外行星，尤其是热木星的发现强烈冲击了人们基于太阳系行星所建立的传统行星形成理论。经过近 30 年的补充和完善，关于热木星是如何迁移到距离主星公转周期只有几天的轨道上这一问题，盘迁移和高偏心率迁移机制成为了最为有希望的两种解释。这两种机制有着截然不同的预测，盘迁移理论预测热木星处于多行星系统之中，且恒星自转轴和行星公转轴的夹角（以下简称为自转-公转角，亦可称之为恒星倾角）较小；高偏心率迁移理论预测热木星附近没有行星，且自转-公转角较大。为了研究主导的迁移机制，我们使用一系列高精度测光和光谱观测对热木星系统进行研究。

在使用大量的地基测光和光谱观测过程中，我们深刻感受到高精度后随观测的重要性。高精度后随观测不仅需要精密的仪器和高超的观测技术，还需要气象条件优异的观测台址。我们使用风云二号气象卫星数据为选址工作提供了高效的辅助工具。

本文将详细介绍使用高精度测光和光谱数据对系外行星的研究工作以及使用风云二号气象卫星数据计算可观测夜数的研究。

本文的第一章首先简述了系外行星过去近 30 年激动人心的搜寻历史，然后依次介绍了视向速度法、凌星法和天体测量法等主要的系外行星探测方法，之后通过对系外行星样本的介绍引出本文的主要研究对象和研究问题。

第二章详细介绍了凌星系外行星监测计划(Transit Exoplanet Monitoring Project, 以下简称 TEMP) 的发起动机、科学目标以及最近的科学成果。在 5 年的时间里，使用两台地基米级望远镜，我们收集了 39 个热木星行星系统的 127 条光变曲线。我们使用统一的方法对新得到的测光数据以及前人已经发表的测光和视向速度数据进行了详细分析。该分析使得每一个系外行星系统的物理和轨道参数质量都得到了显著的提升。主星和行星半径的精度分别好于 3% 和 5%。我们发现，由于 Lucy-Sweeney 偏差，前人的结果中的轨道偏心率被显著地高估了。此外，我们的后随测光观测显著提升了每一个行星系统的轨道历元。从我们新的观测所得到的和前人发表的测光数据所提取的凌星中心时刻没有显示出相较于线性历元显著的偏离，从而排除了在热木星系统中在 1:2、2:3、3:2、2:1 共振处存在质量分别大于 $0.39 - 5.0 M_{\oplus}$, $1.23 - 14.36 M_{\oplus}$, $1.65 - 21.18 M_{\oplus}$, 以及 $0.69 - 6.75 M_{\oplus}$ 的行星的可能。热木星系统中临近的共振行星的缺失不符合盘迁移模型的预测。

第三章以热木星和暖木星共存的系外行星系统 WASP-148 为例介绍了使用对 Rossiter-McLaughlin effect (以下简称 R-M 效应) 的观测测量该系统恒星倾角并探索热木星系统和多行星系统的恒星倾角差异的相关工作。我们使用 WIYN 天文台 3.5 m 望远镜搭载的 NEID 光谱仪和 Keck 天文台 10 m 望远镜配备的 HIRES 光谱仪对 WASP-148 进行了两次 R-M 效应的测量。这是新服役的 NEID 光谱仪所产出了第一批科学成果之一，也是继 WASP-47 之后，第二次对有着临

近行星伴星的热木星系统的恒星倾角进行测量。对 R-M 效应的拟合显示系外行星 WASP-148 b 的天空投影的自转-公转角为 $-8.2^{+8.7}_{-9.7}^{\circ}$ 。WASP-148 的恒星倾角和结构紧凑（相邻行星周期比小于 6）的多行星系统（包括我们的太阳系）的恒星倾角较小，意味着它们早期的迁移和吸积过程没有受到大的动力学影响。我们的统计结果显示，结构紧凑的多行星系统的恒星倾角的小于热木星系统的恒星倾角，但是二者的差异并不显著。

在第四章中，我们基于最新的测光和视向速度数据进一步研究系外行星系统 WASP-148 的构型，尤其是两行星公转轴的夹角（以下简称行星间夹角）。前人的研究显示，该系统中两行星的行星间夹角为 $41.0^{+6.2}_{-7.6}^{\circ}$ ，但是系统稳定的概率仅有 2.5%。结合历史数据和我们所获得的最新的测光和 NEID 视向速度数据，我们重新估计了该系统中两行星的行星间夹角。我们的结果显示，该系统的行星间夹角为 $26.5^{+5.3}_{-6.6}^{\circ}$ ，系统稳定概率为 99%。稳定性分析显示，该行星系统处于稳定-非稳定的边界。我们认为该系统处于多行星系统和热木星系统的过渡态，意味着上述两类行星系统的形成路径可能是连续的。WASP-148 的物理和轨道参数的精确定为统一的系外行星形成理论提供了观测支持。

第五章介绍了我们使用我国风云二号系列气象卫星数据进行可观测夜数统计的相关工作。这是我国风云气象卫星数据首次被应用于天文台站选址。可观测夜数是天文台址选择的重要参考依据。近些年来，气象卫星数据在可观测夜的识别和统计上扮演着重要的角色。本文提出了一种基于风云二号系列地球同步气象卫星和多个天文站点的天气记录的可观测夜数计算方法。为了对我们的方法进行验证，我们计算了印度尼西亚的 27 个地点和我国的两个天文站点的可观测夜比例。我们的计算结果与前人的研究结果一致。此外，我们计算了我国几个重要站点的可观测夜比例，从而为未来选址工作的开展提供可靠的参考。

最后，在第六章中，我对本文所述的工作进行了总结，并对未来有望开展工作进行了展望。

关键词：系外行星，测光，光谱，气象卫星，可观测夜

Abstract

The discovery of exoplanets, especially hot Jupiters, has strongly impacted the traditional picture of planet formation theory based on the configuration of our solar system. After nearly 30 years of additions and refinements to corresponding theory, disk migration and high eccentricity migration mechanisms have emerged as the two most promising explanations for how hot Jupiters migrate to orbit only a few days from their host stars. These two models have very different predictions: disk migration predicts that hot Jupiters are in multi-planet systems and that the angle between the stellar rotational axis and planetary orbital axes (hereafter referred to as the spin-orbit angle, or stellar obliquity) is small; high eccentricity migration predicts that there are no planets in the vicinity of hot Jupiter and that the spin-orbit angle is large. In search of observational evidence, we have carefully characterized the various hot Jupiter systems using a series of high-precision photometric and spectroscopic observations to distinguish these two migration models.

Using a large number of ground-based photometric and spectroscopic observations, we have realized the great importance of high-precision follow-up observations. High-precision follow-up observations require sophisticated instruments and superior observational skills, and astronomical sites with excellent meteorological conditions. Inspired by China's increasingly active site selection campaigns in recent years, we use Feng-Yun 2 (hereafter FY-2) meteorological satellite data to provide an efficient tool for site selection.

In this paper, we describe the work of exoplanet characterization using high-precision photometric and spectroscopic data and the study on estimating the number of observable nights using FY-2 meteorological satellite data.

The first chapter of this paper begins with a brief history of the exciting search for exoplanets over the past 30 years, then introduces the main exoplanet detection methods, such as the radial velocity method, and the astrometry method. Before introducing the main object and research questions of this paper, we present the current sample and types of exoplanets. In addition, this chapter reviews the history and importance of using meteorological satellites to facilitate site selection and leads to the research on this problem.

Chapter 2 details the motivation, scientific goals, and recent results of the Transit Exoplanet Monitoring Project (TEMP). Over a 5-year period, with two ground-based 1-m class telescopes, we have collected 127 light curves of 39 hot Jupiters. We used a homogenous approach to perform a detailed analysis of our newly-collected photometric data as well as previously published photometric and radial velocity data. This

analysis has led to a significant improvement in the physical and orbital parameters of each system. All of our stellar radii are constrained to accuracies of better than 3%. The planetary radii are determined to accuracies of better than 5%. Compared to our results, the literature eccentricities are preferentially overestimated due to the Lucy-Sweeney bias. Our new photometric observations therefore allow for significant improvement in the orbital ephemerides of each system. The measured transit mid-times for both literature light curves and our new photometry show no significant deviations from the updated linear ephemerides, ruling out the presence of companion planets with masses greater than $0.39 - 5.0 M_{\oplus}$, $1.23 - 14.36 M_{\oplus}$, $1.65 - 21.18 M_{\oplus}$, and $0.69 - 6.75 M_{\oplus}$ near the 1:2, 2:3, 3:2, and 2:1 resonances with the hot Jupiters, respectively. The absence of resonant companion planets in the hot Jupiter systems is inconsistent with the conventional expectation from disk migration.

Chapter 3 presents work related to the use of the Rossiter-McLaughlin effect (hereafter R-M effect) to explore the differences in stellar obliquity between hot Jupiter systems and multi-planet systems, specifically considering the case of the exoplanet system WASP-148, where a hot Jupiter and a warm Jupiter coexist. We present spectroscopic measurements of the Rossiter-McLaughlin effect for WASP-148b from the NEID spectrograph at WIYN 3.5 m telescope and HIRES spectrograph at Keck 10 m telescope. This is one of the first scientific results reported from the newly commissioned NEID spectrograph, as well as the second obliquity constraint for a hot Jupiter system with a close-in companion, after WASP-47. WASP-148b is consistent with being in alignment with the sky-projected spin axis of the host star, with $\lambda = -8.2^{+8.7}_{-9.7}^{\circ}$. The low obliquity observed in the WASP-148 system is consistent with the orderly alignment of most compact multi-planet systems around cool stars with obliquity constraints, including our solar system, and may point to an early history for these well-organized systems in which migration and accretion occurred in isolation and with relatively little disturbance. Our statistical result suggests that, compared with isolated-hot-Jupiter systems, compact-multi-planet systems tend to be aligned. But the difference in stellar obliquity between these two samples is not significant.

In Chapter 4, we further investigate the configuration of the exoplanet system WASP-148 based on the latest photometric and radial velocity data, especially the mutual inclination of the orbital axes of two planets. Previous studies have shown that the mutual inclination of the two planets in this system is $41.0^{+6.2}_{-7.6}^{\circ}$, but the probability of the system being stable is only 2.5%. We re-estimated the mutual inclination of the two planets in this system by combining the literature data with our obtained photometric and NEID radial velocity measurements. Our results show that the mutual inclination of the system is $26.5^{+5.3}_{-6.6}^{\circ}$, and the system stability probability is 99%. The stability analysis shows that the planetary system is at the stable-unstable boundary. We suggest

that the system is in the transition phase between multi-planet systems and hot Jupiter systems, implying that the formation paths of the two types of planetary systems mentioned above could be continuous. Thus, a detailed characterization of the physical and orbital parameters of WASP-148 provides observational evidence for a unified theory of exoplanet formation.

Chapter 5 presents our research related to the use of our FY-2 series of meteorological satellite data for the determination of observable night. This is the first time that FY-2 series of meteorological satellite data has been applied to astronomical site selection. The fraction of observable nights is an essential parameter for selecting astronomical sites. In recent years, meteorological satellite data have played an essential role in recognizing and providing statistics for observable nights. We present a method to estimate the fraction of observable nights based on the FY-2 series of geostationary meteorological satellites and weather records of multiple astronomical sites. We have calculated the fraction of observable nights at 27 sites in Indonesia and two astronomical sites in China to validate the method. The results derived from our method show good agreement with previous works. Furthermore, we have derived the yearly distribution of the fraction of observable nights of several astronomical sites in China, facilitating future astronomical site selection works.

Finally, in Chapter 6, I summarize the work described in this paper and give an outlook on the promising work.

Key Words: Exoplanets, Photometry, Spectroscopy, Meteorological Satellites, Observable Nights

目 录

第1章 绪论	1
1.1 系外行星探测简史	1
1.2 系外行星探测方法	3
1.2.1 视向速度法	3
1.2.2 凌星法	6
1.2.3 凌星中心时刻变化法	7
1.2.4 微引力透镜法	7
1.2.5 直接成像法	8
1.2.6 天体测量法	9
1.2.7 轨道亮度调制法	10
1.3 系外行星样本	10
1.4 本文立意	13
第2章 凌星系外行星监测计划	15
2.1 引言	15
2.2 观测目标的选取	16
2.3 观测与数据的处理	17
2.3.1 兴隆 60/90 cm 施密特望远镜	17
2.3.2 兴隆 60 cm 望远镜	17
2.4 数据的拟合和分析	19
2.4.1 行星系统参数与全局拟合	19
2.4.2 凌星中心时刻的获取	20
2.5 结果与讨论	24
第3章 系外行星系统中恒星倾角的研究	41
3.1 引言	41
3.2 Rossiter-McLaughlin 效应	42
3.3 观测和数据的处理	44
3.3.1 WIYN/NEID 的观测	44
3.3.2 Keck/HIRES 的观测	44
3.3.3 同步测光观测	45
3.4 恒星参数的获取	48
3.4.1 从 HIRES 光谱中获取恒星参数	48

3.4.2 通过 SED 拟合获取恒星参数	48
3.5 数据拟合和分析	49
3.6 结果与讨论	52
3.6.1 结构紧凑的多行星系统中 alignment 趋势的统计显著性	52
3.6.2 大的自转-公转角的意义	54
第 4 章 系外行星系统中行星间夹角的研究	59
4.1 引言	59
4.2 光变曲线	60
4.2.1 <i>TESS</i> 光变曲线	60
4.2.2 地基光变曲线	61
4.3 视向速度数据	61
4.4 数据拟合	62
4.4.1 TTV 和 RV 数据生成器	62
4.4.2 参数优化	64
4.4.3 MCMC 采样	65
4.4.4 TTV \times RV 联合拟合	66
4.5 结果分析与讨论	68
4.5.1 系统稳定性分析	68
4.5.2 处于稳定边界的行星系统存在的物理意义	68
第 5 章 基于风云二号卫星数据的天文站点的可观测夜数分析 ..	73
5.1 引言	73
5.2 气象卫星数据	75
5.2.1 总云量	76
5.2.2 对流层上层相对湿度	76
5.3 地面数据	77
5.3.1 兴隆观测站数据	77
5.3.2 德令哈观测站数据	77
5.3.3 丽江观测站数据	78
5.4 方法	79
5.5 对比分析和讨论	81
5.6 结论	86
第 6 章 总结与展望	89
6.1 总结	89
6.2 展望	90

参考文献 ······	91
致谢 ······	109
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果 ·	113

图目录

图 1-1 Perryman 树状图。上图展示了由不同方法发现的系外行星数量 (截至 2022 年 1 月 1 日)。	2
图 1-2 视向速度法示意图。图片引自拉斯坎帕纳斯天文台官网。	3
图 1-3 凌星过程中光度变化的示意图。图片引自 Perryman (2018)。	4
图 1-4 系外行星 KOI-872 b 的具有 TTV 信号的光变曲线。图片引自 Perryman (2018)。	5
图 1-5 微引力透镜法的示意图。图片引自路易斯维尔大学天文和物理教育百科。	6
图 1-6 HR 8977 的直接成像图。该图由 NRC-HIA、C. Marois 和 Keck 天文台共同制作。	8
图 1-7 天体测量法示意图。图片引自欧洲空间局官网。	9
图 1-8 轨道亮度调制法示意图。行星系统整体亮度和行星位置的关系。图片引自 Lillo-Box et al. (2021)。	10
图 1-9 系外行星类型及其周期和质量的分布。	11
图 1-10 盘迁移机制 (左图) 和高偏心率迁移机制 (右图) 及其各自的预测	13
图 2-1 本文所涉及的 TEMP 39 个目标在天球上的分布 (红点)。在 2013 年 12 月 11 日到 2018 年 05 月 08 日期间, 我们对该 39 个系外行星系统进行了长时间的后随测光观测, 共收集到 127 条光变曲线。在我们的样本中, 最亮的星是 WASP-38 ($V = 9.48$ mag), 最暗的星是 HAT-P-53 ($V = 13.73$ mag)。其他的已经被证认的系外行星系在上图中以蓝点表示。	17
图 2-2 在本工作中所使用的 396 条光变曲线。其中蓝色的部分代表我们所收集的前人工作中的光变曲线, 黄色的部分是从我们的后随测光观测得到的光变曲线。	18
图 2-3 本工作中我们收集的 127 条光变曲线。我们同时拟合这些光变曲线以及我们从历史文献中收集到的光变曲线和视向速度数据来获取系统参数。其中有 4 条质量较差的光变曲线以绿色表示。红色的实线是最佳的拟合模型。	21
图 2-4 使用本工作所更新的周期进行相位折叠后的从历史文献中收集的视向速度数据。最佳的轨道参数来源于视向速度和光变曲线联合拟合的结果。最佳的模型在上图中以红色的实线表示。	22
图 2-5 本工作中所研究的目标的凌星中心时刻的变化。图中的红色虚线表示线性历元的误差随着历元的传播, 内部的实线和外部的虚线分别表示 1σ 和 3σ 的差异。在 3σ 的水平上, 我们没有发现显著的 TTV 信号。	23

- 图 2-6 本工作所得的和前人给出的系统参数的比较。上图中所展示的参数有有效温度 (T_{eff} , 子图 a)、金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}]$, 子图 b)、恒星表面重力 ($\log g$, 子图 c)、恒星半径 (R_* , 子图 d)、恒星质量 (M_* , 子图 e)、轨道偏心率 (e , 子图 f)、轨道周期 (P , 子图 g)、行星和主星半径之比 (R_{P}/R_* , 子图 h)、轨道半长轴 (a/R_* , 子图 i)、凌星持续时间 (T_{14} , 子图 j)、行星半径 (R_{P} , 子图 k)、行星质量 (M_{P} , 子图 l)。红色实线代表我们的和前人的结果完全一致。 26
- 图 2-7 系统参数相对误差的分布。上图中所展示的参数有有效温度 (T_{eff} , 子图 a)、金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}]$, 子图 b)、恒星表面重力 ($\log g$, 子图 c)、恒星半径 (R_* , 子图 d)、恒星质量 (M_* , 子图 e)、轨道偏心率 (e , 子图 f)、轨道周期 (P , 子图 g)、行星和主星半径之比 (R_{P}/R_* , 子图 h)、轨道半长轴 (a/R_* , 子图 i)、凌星持续时间 (T_{14} , 子图 j)、行星半径 (R_{P} , 子图 k)、行星质量 (M_{P} , 子图 l)。 27
- 图 2-8 我们所更新的历元公式和历史的历元公式对凌星中心时刻的预测随着时间的变化。在詹姆斯·韦布望远镜发射之前，我们的 39 个目标中有 29 个的差异小于 10 分钟。对于其他 10 个目标，中心时刻的差异都超过了 10 分钟。其中，WASP-56 b 的差异可以达到 72 分钟。 28
- 图 2-9 凌星热木星附近可能存在的额外系外行星的质量上限。黑色实线表示能够产生目前我们探测到的 O-C 的 rms 大小的可能存在的额外系外行星的质量和周期。在轨道共振处，行星质量会受到更为严格的限制。此外，我们还使用 MEGNO 指数来识别准周期（蓝色）、可能不稳定（红色）和混沌区域（黄色）。需要说明的是，随着质量的增加，稳定区域会快速地过渡到混沌区域，所以可能不稳定区域非常稀薄。 30
- 图 3-1 Rossiter-McLaughlin 效应示意图。上部分取自维基百科 Rossiter-McLaughlin 效应词条，下部分取自 Gaudi et al. (2007)。 42
- 图 3-2 恒星自转转轴和行星公转轴夹角及其投影的几何关系示意图。图片取自 Albrecht et al. (2021)。 43
- 图 3-3 对 WASP-148 的视向速度测量。左图展示的是 NEID 的数据，中间的图给出的是从 Keck 得到的视向速度，最右侧是二者的叠加。在各个图中，数据点以带误差棒的点表示，最佳的模型以红色的虚线表示。在上述三个拟合中，WASP-148 b 的自转-公转轴都较小。在拟合过程中，Allesfitter 会使用 RV 的误差进行加权，并对其进行放缩。上图中的误差是数据的原始误差。 45
- 图 3-4 在使用 Keck 配备的 HIRES 光谱仪测量 R-M 效应的同时对 WASP-148 b 的凌星事件的观测。在上图中，拟合的模型以红线显示，而数据则以灰点显示。残差显示在下面的子图中。我们发现在凌星期间没有明显的恒星黑子信号，这将表明该系统的主星表面活动并不活跃。 48

图 3-5 按照恒星温度排序的结构紧凑的多行星系统以及它们的 λ 示意图。 对于每一个系统，恒星自转轴和行星公转轴在天空上的投影 λ 以及其不确定度都已标记。如果主星上的黑线竖直向上代表 $\lambda = 0^\circ$ 。用于计算 λ 的行星在图中以黑色标记，其他的行星以灰色标记。TOI-942 和 V1298 Tau 系统中的行星质量由 Chen et al. (2017) 给出的行星质量和半径的关系式给出。	51
图 3-6 上图：通过 R-M 效应和多普勒层析技术得到的 112 个系外行星系统的天空投影的恒星倾角 (λ) 随着主星温度的分布。其中，热木星以黄色的圆点表示，温木星以蓝色的菱形表示。竖直的红线表示恒星温度为 6250 K。下图：misaligned 的热木星的个数在随机挑选的 12 个热木星里的比例的概率分布。在每一个子图中，竖直的线代表 12 个结构紧凑的多行星系统中唯一的 misaligned 的系统-K2-290 A。弱潮汐作用的单行星系统包括拥有小质量行星的、大的轨道半长轴的以及主星温度超过 6350 K 的系统。	53
图 4-1 我们目前收集到的 WASP-148 b 的光变曲线。中间的蓝色虚线是使用线性历元公式预测的中心时刻。光变曲线的数据点以灰色表示，最佳的拟合模型以红色实线表示。	61
图 4-2 在 2021 年 06 月 20 日到 2022 年 06 月 02 日期间，NEID 光谱仪对 WASP-148 所进行的 21 次 RV 测量。其中，红色虚线是最佳的拟合模型。	62
图 4-3 TTV \times RV 拟合算法流程图	63
图 4-4 通过 WASP-148 的 TTV \times RV 的全局拟合得到的系统参数的后验概率分布	64
图 4-5 TTV \times RV 拟合的全部和部分 (1000 组) 样本分布。黄色的部分是总体样本，蓝色虚线部分代表的是抽取的样本。由 K-S 检验计算出的 p 值代表这个两个样本的一致性。	67
图 4-6 TTV 和 RV 数据以及我们拟合给出的模型	69
图 4-7 系外行星系统 WASP-148 的轨道在 X-Y-Z 平面的投影。左上、坐下、和右下依次是该系统位于 X-Z、X-Y 和 Z-Y 平面的投影。红色的线表示内部行星的轨迹，外部行星的轨迹用蓝色表示。图中的虚线表示的是近星点的位置。	70
图 5-1 左图展示的是可观测天空的示意图。黑点表示当前天文地点的位置。可观测天空在气象卫星上的投影是指在天顶距 60° 以内的区域。右图是兴隆观测站的可观测天空在卫星图像上的投影的实例。对于该点，可观测天空的投影由 12 个像素点组成。	80
图 5-2 根据不同的 CTA 和 UTH 阈值计算出的晴夜数比例和我们从地基数据得到的结果的差异的 rms 的分布。其中，黑色的星点代表具有最低的 rms 的 CTA 和 UTH 阈值。	81

图 5-3 左图：兴隆、德令哈和丽江观测站的年可观测夜比例；右图：阿里 A 点和稻城观测站的年可观测夜比例。 83

图 5-4 本工作得到的年可观测夜比例和前人工作的比较。上图所展示的是从地基数据得到的可观测夜比例减去我们从气象卫星数据得到的可观测夜比例，涉及的 5 个天文站点包括阿里 A 点、稻城、德令哈、丽江和兴隆观测站；下图是前人通过不同的气象卫星的数据减去我们的结果（包括印度尼西亚的 27 个地点，Hidayat et al. 2012，阿里 A 点和稻城观测站，Cao et al. 2020）。对于所有地点而言，二者差异的中值为 +4.78%，仅对与印度尼西亚的 27 个地点，该值为 +5.77%。 85

表目录

表 2-1 39 个 TEMP 目标的观测日志	31
表 2-2 TEMP 目标的测光数据	34
表 2-3 TEMP 目标的凌星中心时刻数据	34
表 2-4 本工作所得到的和前人工作给出的 TEMP 目标的系统参数	35
表 2-5 TMEP 中 39 个系外行星系统的恒星参数	37
表 2-6 TMEP 中 39 个系外行星系统的行星参数	38
表 3-1 从 Allesfitter 拟合中得到的 WASP-148 的系统参数	56
表 4-1 WASP-148 的 NEID 视向速度测量数据	60
表 4-2 WASP-148 的 RV \times TTV 拟合的先验和系统参数	71
表 5-1 VISSR-2 辐射计的主要技术参数	75
表 5-2 本工作中使用的卫星数据	77
表 5-3 从地基数据得出的兴隆、德令哈和丽江观测站的逐月可观测夜比例	78
表 5-4 从 2008 到 2010 年的印度尼西亚 27 个地点的年可观测夜比例	82
表 5-5 阿里 A 点和稻城观测站的年可观测夜比例	87

第1章 绪论

我们生活在现代天文学最为激动人心的时代。在人类历史上，我们可以第一次探索并研究那些超越太阳系之外的行星（即系外行星）并回答关于行星的多样性、起源以及生命存在的可能性的相关问题。

本章节首先回顾系外行星探测历史上那些激动人心的时刻，之后将介绍系外行星的主要探测方法，然后过渡到对系外行星样本的介绍。在对以上内容介绍的同时，我将列出当前系外行星领域中一些尚未解决的重要问题，从而引出本文主要的研究内容。

1.1 系外行星探测简史

1984年4月，人类第一次使用拉斯坎帕纳斯天文台（Las Campanas Observatory）的2.5 m望远镜观测到绘架座 β （又名老人增四）的行星盘（Smith et al., 1984）。1990年4月，在日后的系外行星搜寻运动中有着重要的地位的哈勃空间望远镜（Hubble Space Telescope）发射升空。它不仅首次观测到了由于系外行星凌星导致的主星光度下降（Charbonneau et al., 2000），还首次观测到了系外行星的大气（Charbonneau et al., 2002）。1992年1月，Wolszczan et al. (1992) 通过脉冲星计时法发现了围着脉冲星绕转的系外行星 PSR 1257+12 b 和 c。1995年10月，Mayor et al. (1995) 通过视向速度法发现了第一颗主星为主序星的系外行星 51 Peg b，从而拉开了系外行星研究的帷幕。1999年，Charbonneau et al. (2000) 观测到了通过视向速度法发现的凌星系外行星 HD 209458 b 的凌星事件。1999年，Butler et al. (1999) 通过视向速度法发现了第一个多行星系外行星系统 *v* Andromedae。2001年4月，Naef et al. (2001) 通过 CORALIE 光谱仪发现了第一颗处于宜居带的系外行星 HD 28185 b。2001年10月，Charbonneau et al. (2002) 通过哈勃空间望远镜的光谱仪得到了凌星期间的 HD 209458 的光谱，并成功地分析了其行星 HD 209458 b 的大气成分。2002年7月，Konacki et al. (2003) 首次通过凌星法发现了系外行星 OGLE-TR-56 b。2003年8月，*Spitzer* 空间望远镜升空。它在红外波段的观测在系外行星大气相关研究中起到了重要作用。2007年2月，人类使用 *Spitzer* 空间望远镜第一次获得了系外行星的光谱（HD 189733 b, Grillmair et al. 2007, HD 209458 b, Richardson et al. 2007）。2009年3月，*Kepler* 空间望远镜升空。它在3.5年的任务期里观测15万颗恒星，并将在日后的十余年里贡献超过半数的被证认的系外行星。2011年1月，*Kepler* 空间望远镜发现了第一颗岩石行星 Kepler-10 b (Batalha et al., 2011)。该行星的半径是地球半径的1.4倍，质量是地球的4倍，轨道半长轴只有我们的水星到太阳的二十分之一。2013年12月，欧洲空间局（ESA）的天体测量卫星 *Gaia* 升空。随着2022年6月的 *Gaia* 第三次数据释放，(Panahi et al., 2022) 公布了 *Gaia* 发现的第一批系外行星 *Gaia-1 b*

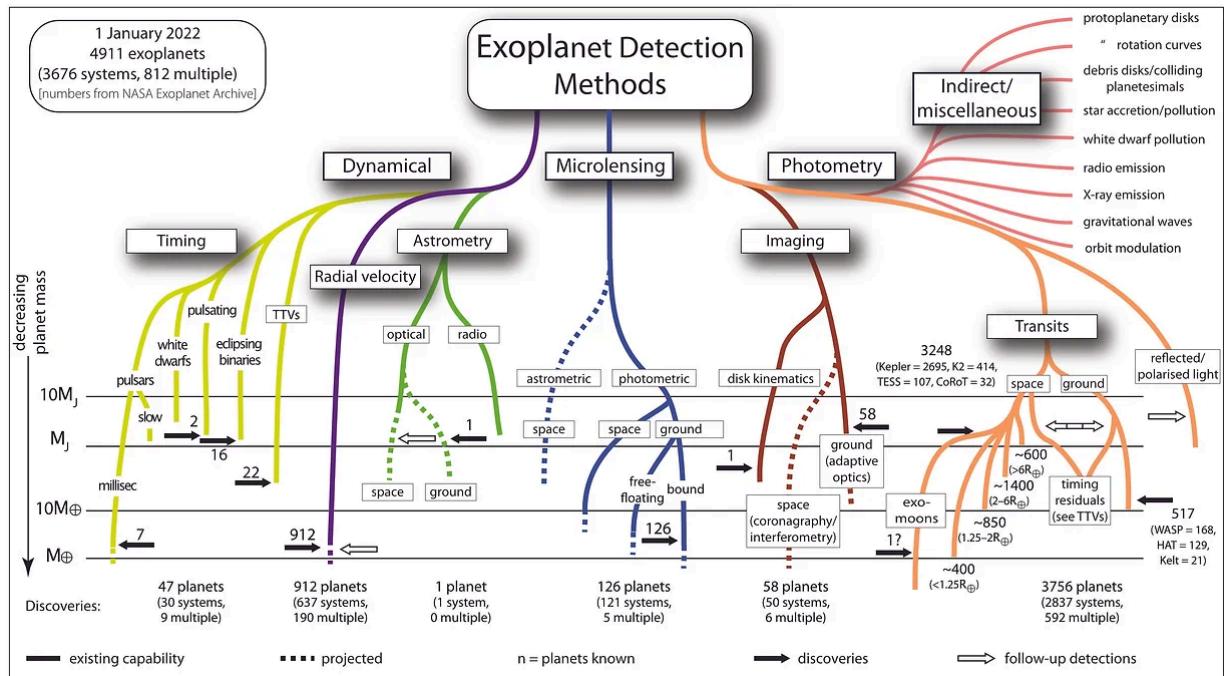


图 1-1 Perryman 树状图。上图展示了由不同方法发现的系外行星数量（截至 2022 年 1 月 1 日）。

Figure 1-1 Perryman tree, shows the number of confirmed exoplanets at Jan 1st, 2022, classified according to discovery methods. Credit: <https://www.michaelperryman.co.uk/exoplanets>.

和 Gaia-2 b。2014 年 4 月，第一颗处于宜居带的类地球系外行星，Kepler-186 f 被 Kepler 空间望远镜所发现 (Bolmont et al., 2014)。2014 年 6 月，由于 Kepler 空间望远镜的转向轮的损坏，K2 (Howell et al., 2014) 从 Kepler 手中接过通过凌星法寻找系外行星的重任。2016 年 5 月，Kepler 一次性释放了超过 1200 颗系外行星，其中 40% 是和地球类似的岩石行星。2016 年 8 月，Anglada-Escudé et al. (2016) 发现了目前距离我们最近 (4.2 光年) 的系外行星-Proxima Centauri b。2017 年 2 月，7 个地球大小的系外行星共存的系统，TRAPPIST-1，被发现 (Gillon et al., 2017)。2017 年 2 月，系外行星系统 Kepler-90 中第 8 个系外行星被发现 (Shallue et al., 2018)。2018 年 4 月，凌星系外行星监测卫星 (Transiting Exoplanet Survey Satellite, TESS, Ricker et al. 2015) 升空。2018 年 11 月，Kepler 空间望远镜由于燃料耗尽而退役。2019 年 1 月，TESS 发布了其发现的第一批系外行星：LHS 3844 b (Vanderspek et al., 2019)、Pi Mensae c (Huang et al., 2018) 和 HD 21749 b (Dragomir et al., 2019)。2021 年 12 月，哈勃空间望远镜的继任者，詹姆斯·韦布空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 升空。它于 2022 年 7 月在距离我们 1150 光年的系外行星 WASP-96 b 的透射光谱中发现了明显的水分子信号。

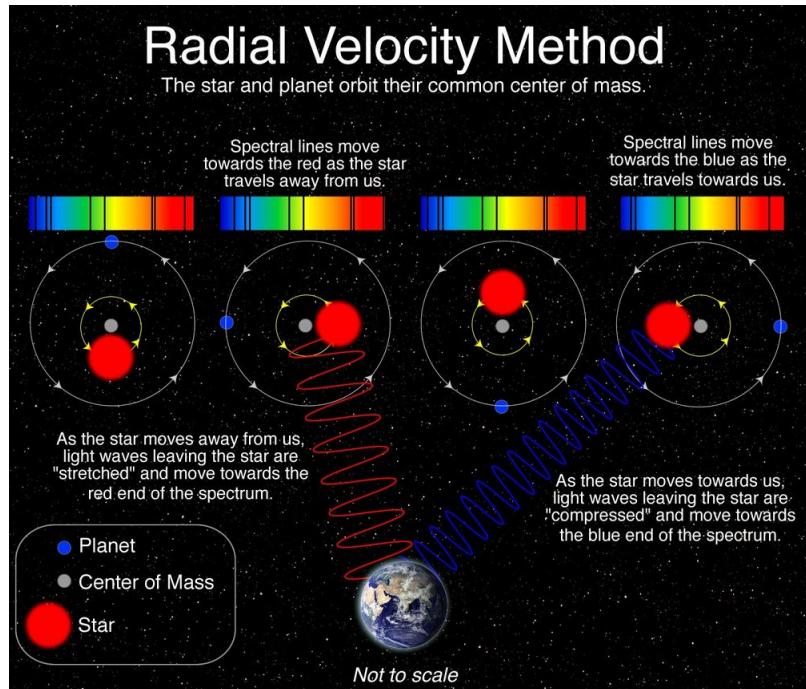


图 1-2 视向速度法示意图。图片引自拉斯坎帕纳斯天文台官网。

Figure 1-2 Schematic diagram for RV method, which is from Las Cumbres Observatory website. Credit: introduction to Radial Velocity method from LCO website.

1.2 系外行星探测方法

截至 2022 年 11 月 14 日，人类已经发现并证认了 5221 颗系外行星¹。尽管目前人类有着超过 10 种可以用于探测系外行星的方法（见图 1-1），例如视向速度法、凌星法、凌星中心时刻变化法、微引力透镜法、直接成像法、天体测量法、轨道亮度调制法等，其中视向速度法和凌星法所发现的系外行星的总数占总发现数目的 95% 以上。因此在下面的介绍中，我将主要介绍这两种方法。

1.2.1 视向速度法

视向速度法是最早被提出来被用于探测系外行星的技术之一 (Struve, 1952)。当行星公转轴的指向和我们的视线方向不平行的时候，我们可以通过多普勒效应² (Doppler effect) 探测到由于系外行星的存在而导致的其主星围绕二者公共质心的运动。如图1-2所示，由于多普勒效应的存在，当恒星远离或者靠近我们的时候，对应地，其光谱向红端或者蓝端移动。通过持续测量恒星光谱中吸收线的移动，我们便可以获得恒星在沿视线方向上的速度（即视向速度，Radial Velocity, RV）变化，从而探测到可能存在的系外行星，进而求解出其参数。

非共振多行星系统的视向速度模型 (Wright et al., 2009, 公式 1) 可以表示为，

¹数据源自 <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>。

²多普勒效应指是波源和观察者有相对运动时，观察者接受到波的频率与波源发出的频率并不相同的现象。波源和观察者相向运动时，波频率变高，波长变短；波源和观察者按相反方向运动时，频率变低，波长变长。

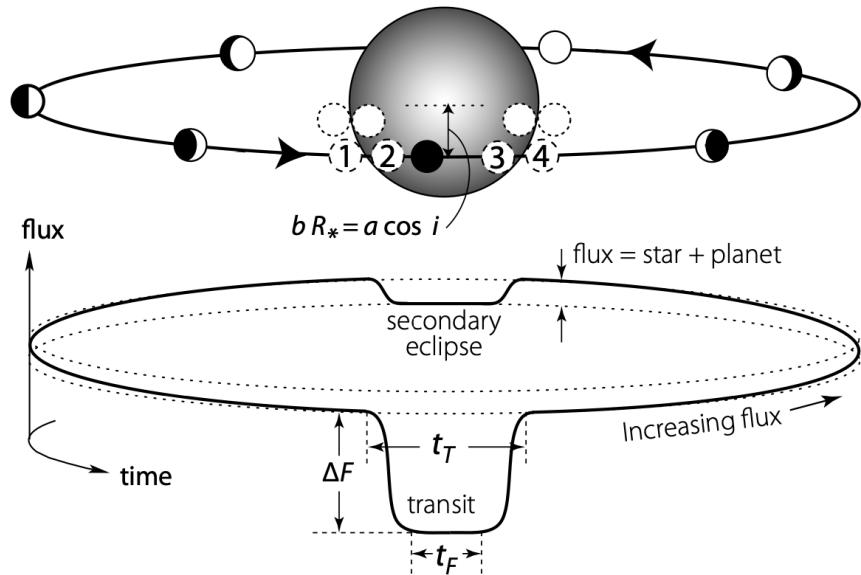


图 1.3 凌星过程中光度变化的示意图。图片引自 [Perryman \(2018\)](#)。

Figure 1-3 Schematic plot for transit. Credit: [Perryman \(2018\)](#).

$$v_r(t) = \sum_{j=1}^n [K_j (\cos(\omega_j + f_j(t)) + e_j \cos \omega_j)] + \gamma + d \cdot (t - t_0) \quad (1-1)$$

其中 $v_r(t)$ 是随时间变化的视向速度, t 是时间, n 是行星的个数, j 是每个行星的编号, K_j 、 ω_j 、 f_j 和 e_j 分别是第 j 个行星的视向速度振幅、近星点幅角、真近点角和偏心率, γ 是与时间无关的视向速度偏移量, d 是线性趋势项的斜率, t_0 是参考历元。视向速度的振幅 K 的表达式 ([Cumming et al., 1999](#), 公式 1) 为,

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_* + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}} \quad (1-2)$$

其中 G 为引力常数, P 为行星公转周期, M_p 是行星质量, M_* 是恒星质量, i 是行星轨道倾角, e 是轨道偏心率。由于行星系统中主星的质量远远大于行星, 通过上式可以得知视向速度的振幅正比于 $M_p \sin i$, 反比于 $P^{1/3}$ 。因此, 视向速度法对短周期的大质量系外行星更为敏感。

在我们的太阳系中, 木星造成的视向速度的振幅为 12 m s^{-1} , 对于地球来说, 这一振幅仅为 0.09 m s^{-1} 。目前世界上大多数光谱仪的视向速度精度还未达到 0.1 m s^{-1} , 所以, 我们还无法利用这种方法大规模地探测围着类太阳恒星绕转的地球大小的行星。目前, 研究人员不断尝试使用新的仪器和观测策略提高视向速度法的观测精度。世界上视向速度观测精度最高的光谱仪 **ESPRESSO** 的实际观测精度好于 0.25 m s^{-1} ([Pepe et al., 2021](#))。考虑到光子噪声和恒星抖动的影响, **ESPRESSO** 的实际仪器精度已经达到 0.10 m s^{-1} 。对于处于共振的多行星系统而言, 比如著名的多行星系统 **GJ 876**, 通过线性叠加单个行星的视向速度模

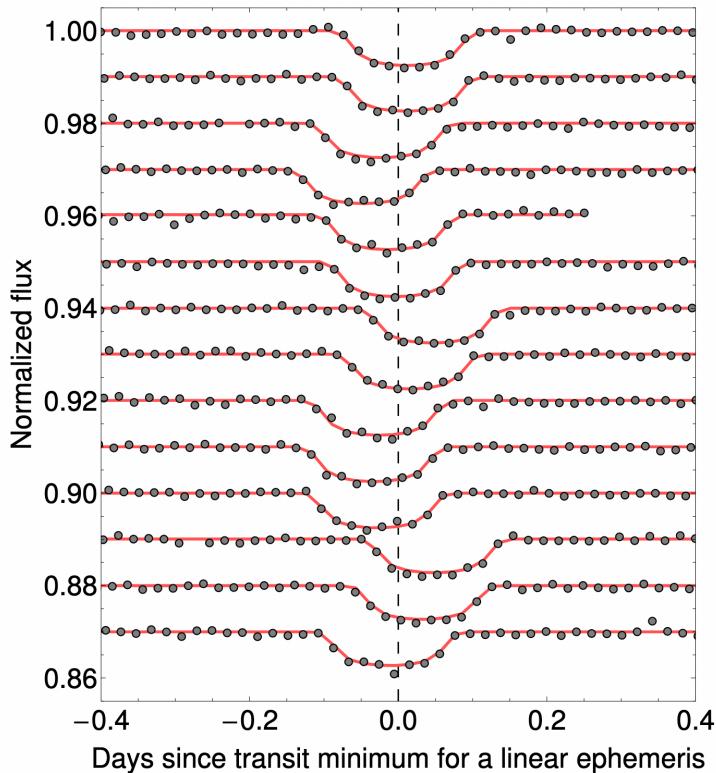


图 1-4 系外行星 KOI-872 b 的具有 TTV 信号的光变曲线。图片引自 [Perryman \(2018\)](#)。

Figure 1-4 The light curves of KOI-872 b with TTV signal. Credit: [Perryman \(2018\)](#).

型无法拟合由于轨道共振引起的视向速度变化。此类系外行星系统的视向速度数据往往需要借助于动力学方法进行拟合 ([Millholland et al., 2018](#))。

视向速度测量精度的进一步提高面临着诸多困难。视向速度的提取依赖于对恒星光谱中各个吸收线波长的精确确定。恒星自身的活动，如黑子、星震等，也会造成恒星视向速度的微小移动。因此，在选取目标的时候，活动性较弱且具有众多吸收线的 FGK 型恒星是最佳的目标。自转较快的 AB 型恒星的光谱具有强烈的旋转致宽效应，从而使得吸收线的位置无法被精确测量，进而影响视向速度的测量。相比其他恒星，M 型恒星系统中的类地行星可以产生更强的视向速度信号，因此被认为是最有可能发现类地宜居行星的恒星类型 ([Jeffers et al., 2022](#))。M 型恒星具有较大的质量范围 ($0.1 - 0.6 M_{\odot}$)，同时其恒星活动强度也有较大的跨度（从平静到非常活跃）。非常活跃的 M 型恒星会导致非对称的光谱吸收线轮廓，从而产生类似行星存在导致的视向速度信号。目前，最为著名的以 M 型恒星系统为观测对象的宜居行星搜寻计划—CARMENES (Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exo-earths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs, [Quirrenbach et al., 2018](#)) 已经对超过 300 个 M 型恒星进行了观测，并探测到了 30 颗系外行星³。

³数据源自 <https://carmenes.caha.es/ext/science/index.html#anchor:planets>，获取时间为 2022 年 11 月 14 日。

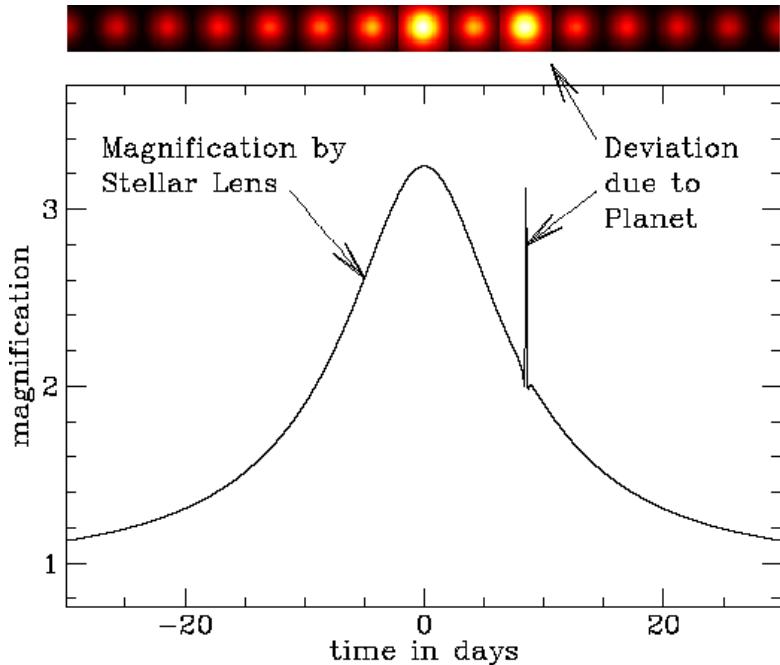


图 1-5 微引力透镜法的示意图。图片引自路易斯维尔大学天文和物理教育百科。

Figure 1-5 The schematic diagram for gravitational microlensing. Credit: [Physics & Astronomy Education at the University of Louisville](#).

1.2.2 凌星法

当我们的视线方向和行星轨道面平行的时候，在行星公转的过程中，行星会遮挡住主星的光，因此恒星的光度会有平稳-降低-平稳-升高-平稳的变化过程，这一现象称之为凌星。凌星事件的示意图和产生的光度变化曲线在图1-3中给出。

在系外行星研究的早期，由于测光精度的限制，使用凌星法探测系外行星没有显著的进展。进入 21 世纪，随着观测技术和仪器的不断升级，在第一个热木星 HD 209458 b 的凌星事件被探测到以后 (Charbonneau et al., 2000)，众多的地基凌星观测项目如雨后春笋般涌现，如 SuperWASP (Pollacco et al., 2006)，HATNet (Bakos et al., 2004)，HATSouth (Bakos et al., 2013)，the Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE, Udalski et al. 2002)，the Trans-Atlantic Exoplanet Survey (TrES, Alonso et al. 2004) 等。这些项目的成功毫无疑问地推动了用于搜寻系外行星的空间望远镜的发展 (例如，Kepler 和 TESS 空间望远镜)。截至 2022 年 11 月 28 日，Kepler 空间望远镜使用凌星法发现了 2710 颗系外行星，是世界上最高产的系外行星搜寻项目。和 Kepler 空间望远镜长期凝视一块天区的观测模式不同，它的继任者，TESS 空间望远镜对全天进行观测，并提供高精度的测光数据以供科学家深入刻画系外行星。截至 2022 年 11 月 29 日，TESS 已经发布了 6052 个系外行星候选体。

如图1-3所示，系外行星的参数和凌星时间造成的光度变化曲线（以下简称为光变曲线）紧密相关。凌星的深度 (ΔF) 等于或约等于行星和恒星半径之比的平方；凌星持续时间 (t_T) 和周期、行星和恒星半径之比、行星轨道半长轴、

行星轨道倾角以及偏心率有关系；入食和出食的时间 ($t_T - t_F$) 可以用来约束恒星的临边昏暗系数；光变曲线的凌星部分的形状还限制着行星的轨道倾角的余弦值 ($\cos i$) 和轨道半长轴 (a) 的乘积 ($a \cos i$)。Mandel et al. (2002) 给出的用于描述光变曲线的分析模型深入地探讨了光变曲线的几何形状与系外行星系统的物理和轨道参数的关系。

凌星法有着两个显著的缺点。第一个是，凌星法只能观测到那些行星公转面和我们的视线接近或者严格平行的那些系外行星。此外，我们可以观测到的凌星事件的发生率随着行星周期的增加而减少。第二个缺点是，凌星法有着非常高的虚警概率。Santerne et al. (2012) 是有一系列 SOPHIE 的视向速度数据对 *Kepler* 候选体进行了分析。分析结果显示虚警概率为 3.5%。这些虚警的信号大多来自于双星系统，因为双星的相互遮掩所产生的光变曲线的形状和具有较大的倾角的行星系统所产生的光变曲线非常相似。

凌星法贡献了占目前已被证认的系外行星总数的 50% 以上的系外行星，为我们了解系外行星的基本性质和其形成以及演化的相关理论提供了重要的观测证据。

1.2.3 凌星中心时刻变化法

对于单行星系统而言，凌星事件的发生时间可以很好地使用线性历元公式进行预测，但是如果系统中有除凌星行星以外的行星存在，那么由于行星之间的相互作用，凌星事件的发生时间会提前或者滞后，从而导致凌星时间偏离线性历元，即凌星时间变化，或者凌星中心时刻变化 (Transit Timing Variations, TTV, 如图 1-4 所示)。

TTV 信号可以帮助我们发现已知行星附近的行星以及刻画它们的性质。长时间的后随测光观测所积累的光变曲线可以提供大量的凌星中心时刻，从而帮助我们探测 TTV 信号。但是截至目前，除了 WASP-47 (Hébrard et al., 2020)、TOI-1130 (Huang et al., 2020a)、Kepler-730 (Cañas et al., 2019) 以及 WASP-132 (Hord et al., 2022)，对数百个热木星的长期观测没有找到显著的 TTV 信号 (例如，Ivshina et al., 2022)，这意味着绝大多数热木星没有临近的行星。这对于区分不同的热木星形成机制 (例如，盘迁移和高偏心率迁移机制) 有着重要的作用。

1.2.4 微引力透镜法

广义相对论 (Einstein, 1936) 预言，背景天体的光线可以被前景天体的引力场扭曲。通过这种类似透镜的效应，背景天体的亮度会增加，这种现象称之为引力透镜。大型星系或包括黑洞在内的致密天体可以引发强引力透镜效应，导致多个背景源的像或者光环、弧的产生。对于恒星而言，引力透镜效应同样存在，但是引力效应较弱的恒星只能导致亮度的增加，称之为微引力透镜效应。这种效应通常可以持续数天到数周。如果前景恒星处于一个行星系统中，那么在微引力透镜效应发生的过程中，行星的存在会使得在原本的引力透镜效应上叠加一个由行星产生的引力透镜效应，从而使得整体的亮度发生通常持续数个小时的增幅 (如

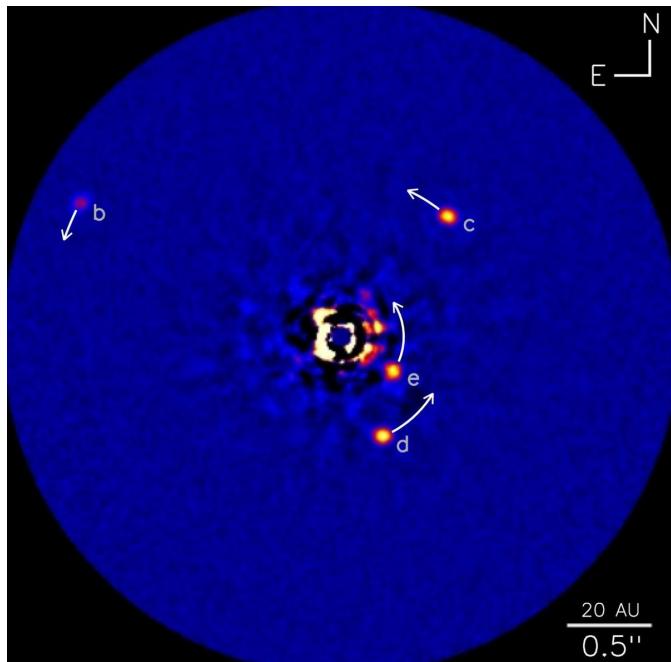


图 1-6 HR 8977 的直接成像图。该图由 NRC-HIA、C. Marois 和 Keck 天文台共同制作。

Figure 1-6 The direct image of HR 8977 from NRC-HIA, C. Marois, and Keck Observatory.

图 1-5所示)。1991-1992 年, [Mao et al. \(1991\)](#) 和[Gould et al. \(1992\)](#) 相继提出使用微引力透镜法搜寻系外行星。这是第一个可以探测到围着主序星绕转的地球大小的系外行星的方法。截至 2022 年 11 月 29 日, 该方法已经发现了 141 颗系外行星。

相比视向速度法和凌星法, 微引力透镜对于 1-10 个天文单位 (后文中记为 AU) 的长周期系外行星更为敏感。目前, 人类所发现的系外行星样本大部分是短周期行星。使用微引力透镜效应进行大规模的系外行星搜寻可以为我们目前的行星样本补上长周期系外行星这块缺失的部分 ([Bond et al., 2004](#); [Bennett et al., 2018](#))。尽管通过微引力透镜方法发现的系外行星在后随观测中难以证认, 而且不容易获取系统参数, 但是随着所发现的长周期系外行星的数量的增加, 其统计特性将为我们理解系外行星, 尤其是长周期系外行星和自由飘荡 (Free-float) 行星的形成和演化提供重要的依据。

1.2.5 直接成像法

正如我们能观测到太阳系内行星反射的太阳光一样, 我们可以对系外行星系统进行直接成像。相对于恒星的光而言, 行星反射的光及其微弱。这种微小的信号很容易消失在恒星像的噪声之中。当主星可以产生足够的辐射以及行星距离其主星足够远时, 我们可以通过系外行星产生的热辐射信号探测到它们。

相比于其他方法, 直接成像法更倾向于探测轨道面和我们的视线垂直的系外行星系统。通过行星的温度和主星的年龄, 我们可以给出对行星半径和质量的大致的估计。通过直接成像法发现的最为著名的系外行星系统是通过 Keck 和

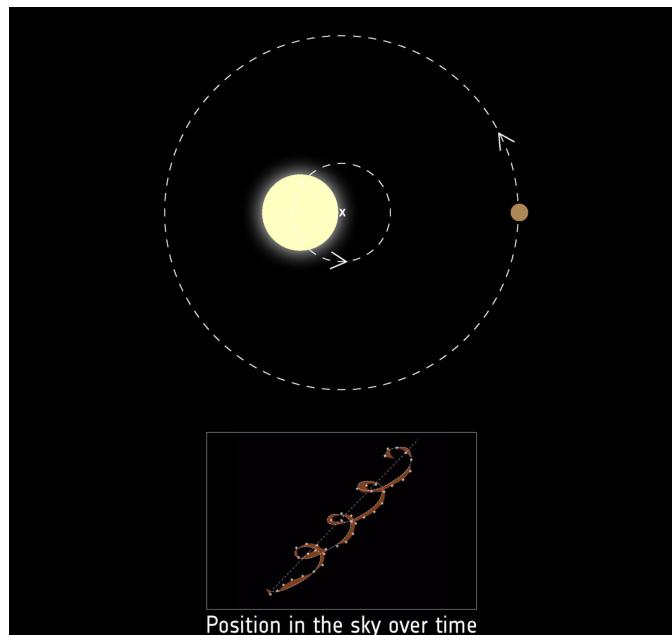


图 1-7 天体测量法示意图。图片引自欧洲空间局官网。

Figure 1-7 The schematic diagram of astrometry method. Credit: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/02/Detecting_exoplanets_with_astrometry.

Gemini 望远镜的近红外成像图像发现的多行星系统 HR 8799 (图 1-6)。

1.2.6 天体测量法

天体测量法是通过精确地测量恒星在天空上的位置而探测恒星运动的方法。这种方法可以探测到由于行星存在而导致的恒星围绕公共质心的运动，从而发现行星。因此，天体测量法对离太阳系比较近的、存在大质量、长公转周期行星的行星系统比较敏感 (原理示意图见图 1-7)。

天体测量方法是最为古老的系外行星搜索方法，它在研究天体测量双星上的成功使得人们将其作为系外行星搜寻的方法之一。对于对天体位置的测量而言，地基望远镜所受到的大气湍流和望远镜结构的影响等因素使得我们难以探测到由于行星存在而导致的恒星位置的移动。直到空间望远镜登上历史的舞台，使用天体测量方法探测系外行星才变得有可能。2002 年，哈勃空间望远镜成功使用天体测量数据对先前已经发现的系外行星系统 GJ 876 进行了研究，发现 GJ 876 b 和 c 的公转轨道共面。

2013 年 12 月，天体测量卫星 Gaia 升空。在过去的近十年里，对 Gaia 天体测量数据和视向速度、测光等数据的联合拟合帮助人们研究了数以百计的系外行星。2022 年 6 月 15 日，Gaia 天体测量卫星进行了第三次数据释放 (Gaia DR3, [Gaia Collaboration et al., 2022](#))。其发布的天体测量系外行星候选体的样本⁴为我们提供了了解冷木星的机会，从而完善系外行星演化的物理图像。

⁴<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/exoplanets>

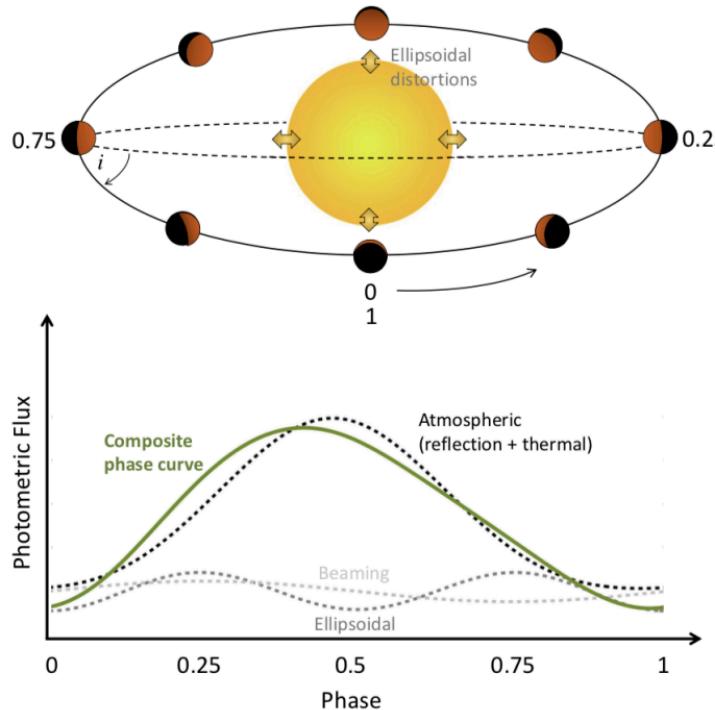


图 1-8 轨道亮度调制法示意图。行星系统整体亮度和行星位置的关系。图片引自 [Lillo-Box et al. \(2021\)](#)。

Figure 1-8 The schematic diagram of orbital brightness modulation. The brightness of the whole system as a function of the location of planet. Credit: [Lillo-Box et al. \(2021\)](#).

1.2.7 轨道亮度调制法

行星所反射的恒星的光可以使得行星在不凌星的时候影响整个行星系统的亮度。如图1-8所示，在行星公转的过程中，行星所反射的光到达我们视线方向的比例随着位置的不同而变化，而恒星的光不变。因此，对于靠着主星比较近、反射率比较高、半径比较大的行星而言，它们所反射的光有可能被高精度的测光观测所探测到。截至目前，通过此方法发现的系外行星一共有 9 个，均由 *Kepler* 空间望远镜所发现。

1.3 系外行星样本

本文根据系外行星的大小和周期将其分为热木星、长周期巨行星和自由飘荡行星以及超级地球（如图 1-9所示，自由飘荡行星不围恒星绕转，所以没有周期，故不在此图显示）。

热木星

热木星是指质量大于等于 2.5 倍木星质量（后文中记为 M_J ）、公转周期小于 10 天的行星（[Dawson et al., 2018](#)）。截至 2022 年 10 月 08 日，已经被证认的热木星数量达到 530 个，占据目前人类所发现的系外行星的十分之一。该类系外行星具有和木星相似的行星质量和半径，它所造成的主星移动和光度下降易于被视

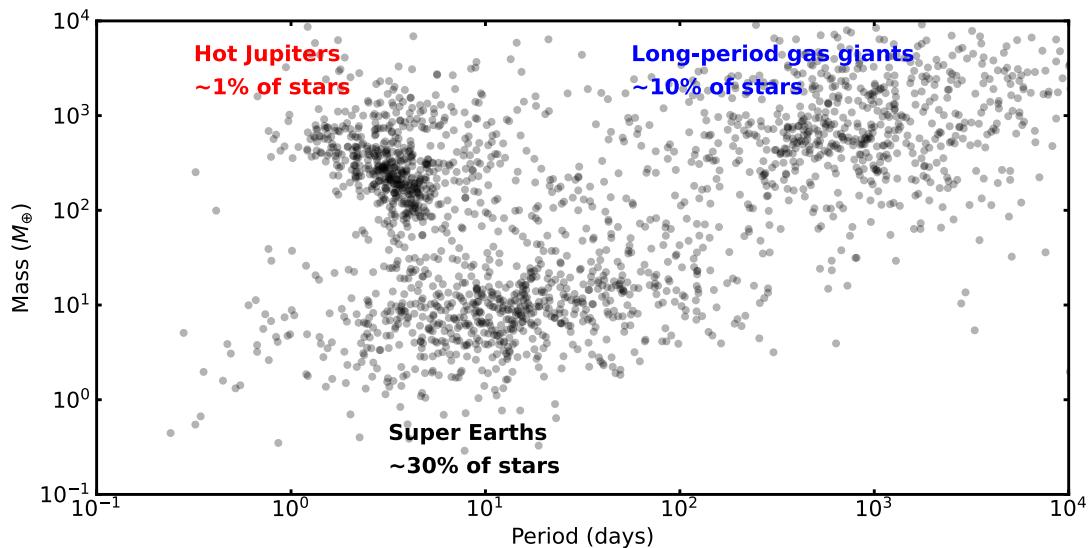


图 1-9 系外行星类型及其周期和质量的分布。

Figure 1-9 Types of exoplanets and the distribution of their period and mass.

向速度法和凌星法探测到，因而成为早期系外行星搜寻活动中发现的最多的行星类型。

尽管热木星在系外行星探索的历史中扮演着重要的角色，但是它们在银河系中比例并不高。仅有 1% 的类太阳恒星拥有热木星 (Johnson et al., 2010)，而对于银河系中数量最多 (75%) 的 M 型矮星 (质量小于 0.5 太阳质量，后文中记为 M_{\odot} ，温度在 2600-4000 开尔文，后文中记为 K) 而言，热木星的出现率 (occurrence rate) 仅为 $0.43 \pm 0.05\%$ (Fressin et al., 2013)。

热木星的存在在人类未发现它们之前是难以想象的。以太阳系为基础的行星形成理论无法解释它们的形成，因此，多种形成理论被提出来解释它们的存在。目前，主要的热木星形成和演化理论有三个，本地形成理论、盘迁移机制以及高偏心率迁移机制。

热木星研究中的一个热点是其如何出现在目前这样一个距离其主星非常近的短周期轨道上的。本地形成理论主张热木星的位置未发生过变动。尽管一些学者认为该理论是可行的 (Batygin et al., 2016)，但是该理论面临着巨大的困难。该理论对热木星的形成和演化的解释基于引力不稳定性模型和核吸积模型。然而，这两种模型在解释热木星的形成上均有困难。对于引力不稳定性模型而言，要想在距离主星 1 AU 的轨道上形成木星大小的行星，原行星盘的质量要大于 0.6 M_{\odot} ，温度要高于 10^6 K (Rafikov, 2005)。如此高的温度下，行星盘内的气体无法聚集。对于核吸积模型而言，其所面临的困难在于核的形成。巨行星的形成要求大约 10 倍地球质量 (后文中记为 M_{\oplus}) 的固态核。这样的核的形成时间需要短于行星盘消散的时间 (典型值为数百万年)，且盘内需要有足够的物质。尽管行星盘消散的时间可以长于热木星行星核形成的时间，但是由于行星与主星的距离过小，行星核无法生长到足以形成热木星的大小。因此，我们一般认为热木星

是在雪线以外形成，而后逐渐迁移到当前位置的。主张这种热木星形成和演化的机制，我们称之为迁移机制。目前，主要的迁移机制是盘迁移和高偏心率迁移机制。

盘迁移和高偏心率迁移机制可以解决本地形成理论所面临的困难。盘迁移机制表明来自气体原行星盘的力矩可以使得行星从数 AU 的地方迁移到百分之几 AU 的位置 (Baruteau et al., 2014)。行星系统形成的早期，尚未完全成型的大质量气体行星缓慢地向内旋进，最终停留在目前的位置上。该过程相当温和，以致于最终的系统构型中允许多行星系统的存在，且恒星自转轴和行星的公转轴 (以下简称为自转-公转角) 近乎平行 (此类系统称之为 aligned 系统)。与之相反的是，在高偏心率迁移的过程中，行星系统中的动力学交互作用非常强烈。在远处的类木行星受到诸如行星-行星散射 (Chatterjee et al., 2008)、Kozai-Lidov 机制 (Kozai, 1962; Lidov, 1962)、长期混沌机制 (Wu et al., 2011) 的影响从而被激发出大偏心率，然后在潮汐耗散导致的轨道圆化的过程中，将内部的行星散射出去。因此，高偏心率迁移预测热木星系统中没有临近的系外行星，且由于角动量守恒的需要，自转-公转角将会较大 (此类系统称之为 misaligned 系统)。在本文所述的研究中，我们使用 (Albrecht et al., 2022) 对于 misaligned 系统的定义：自转-公转角超过 10° ，并且在 3σ 的置信水平上不为 0° 。不满足上述定义的系统是 aligned 系统。基于此两种迁移机制的两种截然不同的预测-多行星构型和 aligned 系统 (盘迁移机制) 以及单行星构型和 misaligned 系统 (高偏心率迁移机制) - 可以通过高精度的测光和光谱观测得到验证 (如图 1-10 所示)。

长周期巨行星以及自由飘荡行星

长周期巨星主要包括周期在 10-200 天的暖木星和 200 天以上的冷木星，它们围绕在类太阳恒星的出现率约为 10%。相比于热木星而言，暖木星的周期范围介于热木星和冷木星之间，且个数少于二者，因而形成“周期谷” (Jones et al., 2003; Udry et al., 2003)。早期通过视向速度法发现的暖木星往往拥有着较大的偏心率，因而暖木星一度被认为是主要通过长期扰动和行星-行星散射形成的。但是随着 *Kepler* 数据的释放和分析，人们意识到凌星暖木星常常拥有临近的小质量行星。这些小质量行星的存在表明暖木星系统中的行星轨道是近圆且共面的。因此，暖木星也有可能通过本地形成机制产生。相对于热木星和暖木星而言，冷木星的长周期使得它的发现方法主要集中在视向速度法和天体测量法。此外，冷木星还具有着较大的偏心率。因此，高偏心率、长周期冷木星被认为是 Kozai-Lidov 效应存在的证据 (例如，HD 80606, Wu et al., 2003)。按冷木星的定义，太阳系的木星也属于此类行星，Rowan et al. (2016) 的模拟显示与之类似的系外行星的发生率在 3% 左右。

自由飘荡行星是指不围绕主星旋转的系外行星，主要通过微引力透镜方法发现。 (Mróz et al., 2017) 指出平均每个主序星对应着 0.25 颗自由飘荡行星或者半长轴大于 10 AU 的超长周期行星。行星系统经历了剧烈的动力学过程，高偏心率和大倾角的行星幸运地留在了系统中，而被抛出的行星成为了自由飘荡行星。

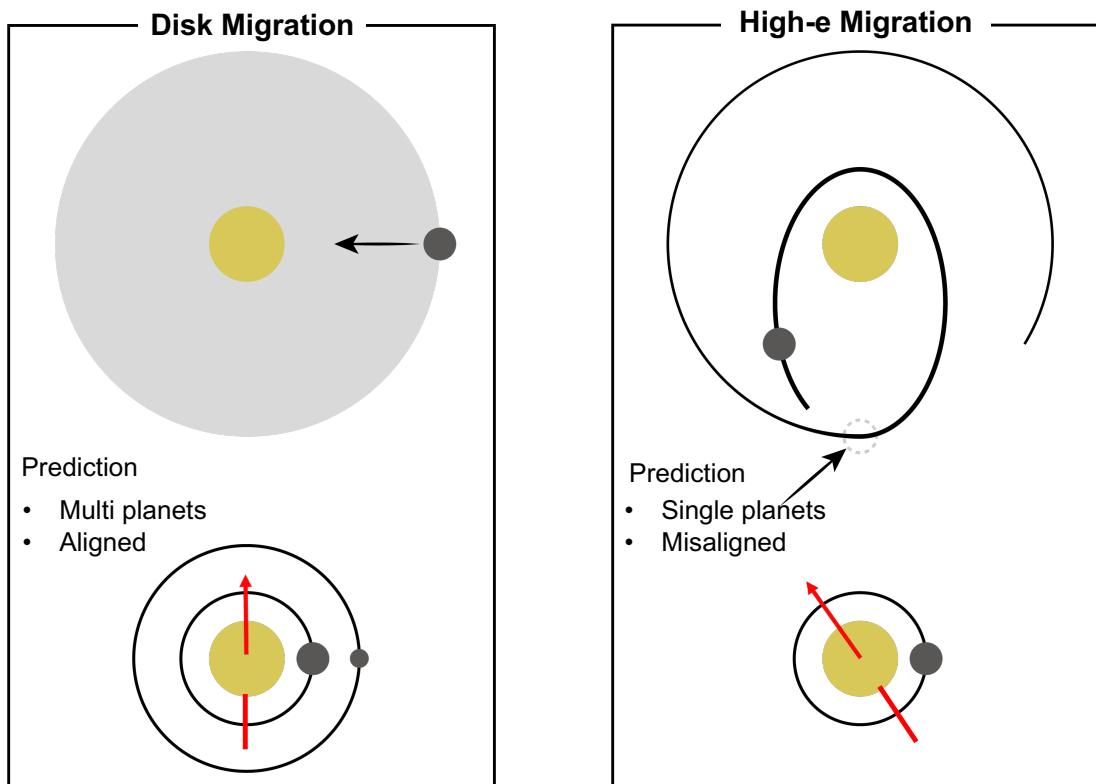


图 1-10 盘迁移机制（左图）和高偏心率迁移机制（右图）及其各自的预测

Figure 1-10 Disk migration and High-eccentricity migration with their predictions

自由飘荡行星的种群分析将加深我们对行星动力学过程的认识。

超级地球

“超级地球”在不同的研究中往往有着不同含义，本文中所指的超级地球包括类地球和类海王星的行星。超级地球在类太阳恒星系统中的出现率为 30%。接近 1/3 的短周期的超级地球的轨道外部伴有冷木星 (Zhu et al., 2018b)。

得益于 *Kepler* 任务的成功，目前有超过 4000 个超级地球被发现。但是因为 *Kepler* 所观测的行星系统较为遥远且暗弱，大多数超级地球的质量无法被准确地测量。截至目前，仅有 100 余个超级地球的质量通过视向速度法或者凌星中心时刻变化法被很好的估计。超级地球所在的系统往往以多行星系统的形式存在，因此具有着和其他巨行星不一样的特征。超级地球最著名的特征是系统内的各个行星的半径（质量）极为近似，该现象被形象地比喻为豆荚中的豌豆 (Peas in a Pod, Weiss et al., 2018)。最近，Goldberg et al. (2022) 提出多行星系统中的超级地球在早期很有可能处于共振链上，从而导致同一系统中行星大小一致。在其后续的演化中，动力学的不稳定性导致的共振消失助长了系统中行星间的差异。

1.4 本文立意

对于离我们最近的行星系统-太阳系而言，小质量的类地行星（如水星、金星、地球等）在内侧，大质量的气态行星（如木星、土星等）在外侧。基于对太阳系各个行星的位置和其运动规律的认识，天文学家建立起了经典的行星形成

理论。大质量的气态行星只能在太阳系内靠近外侧的区域形成，因为那里有足够的用于行星形成的水冰物质。只有在雪线之外才能形成质量足够大的行星核，从而诱发气体吸积过程，进而行星核吸收其周围的气体，最终气态巨行星形成。经典的行星形成理论可以很好地解释我们太阳系的行星形成过程，因此，我们希望该理论同样适用于系外行星系统。

但是我们所发现的第一颗围着类太阳恒星转的系外行星却是一颗离其主星只有 4.23 天周期 (Mayor et al., 1995) 木星大小的行星 (即典型热木星)。它距离其主星只有 0.0534 AU，是地球距离太阳的 $1/20$ 。经典行星形成理论并没有预测这种行星的存在，因此热木星为什么存在对于天文学家来说是一个谜团。

通过对热木星近 20 年的观测，人们对热木星的形成有这样一个基本认识：热木星主要起源于雪线之外。因为在距离其主星周期不到 10 天的地方，行星盘无法提供足够的原料，所以一般认为，热木星是从雪线之外迁移而来。正如前文所述，对于热木星的迁移过程，人们提出了两种主要的迁移机制，盘迁移和高偏心率迁移机制。盘迁移机制预测热木星的周围应该存在额外的系外行星，且整个行星系统是 *aligned*；高偏心率迁移预测热木星是孤独的，且主星自转轴和行星公转轴会有大的夹角，即行星系统是 *misaligned*。高精度的后随测光和光谱观测将为我们区分两种迁移机制提供有力的观测支持。

因此，本文所介绍的主要内容是通过高精度的后随测光观测项目（凌星系外行星监测计划，Transit Exoplanet Monitoring Project, TEMP）和基于高精度光谱观测的长周期系外行星系统中的恒星倾角测量项目（Stellar Obliquities in Long-period Exoplanet Systems, SOLES）来区分两种迁移理论。高精度、长周期的后随测光观测可以为我们积累大量的光变曲线，从而帮助我们更新系外行星的参数，尤其是每条光变曲线的凌星中心时刻。基于大量的、精确的凌星中心时刻，我们使用 TTV 方法探测热木星的附近可能存在的系外行星。如果我们探测到了临近的系外行星，那么意味着该系统不可能通过高偏心率迁移过程形成。高偏心率迁移过程不止预测了行星系统内行星的多寡，还预测了其行星系统是否 *aligned*。目前对于已有恒星倾角测量的热木星样本的统计 (Albrecht et al., 2022) 表明，热木星系统可以是 *misaligned*，且对于有着有效温度大于 6250 K 的主星的系外行星系统而言，热木星更容易 *misaligned*。我们尚不知道暖木星、甚至冷木星系统的恒星倾角是如何的。如果暖木星也是同样具有 *misalignment* 的特征，那么 *misalignment* 的来源极有可能和迁移过程无关。因此，恒星倾角的大小不能作为区分迁移机制的标准。如果相对于热木星系统而言，暖木星系统更加 *aligned*，那么意味着我们可以通过恒星倾角的差异来区分两种迁移机制。

此外，基于高精度测光观测和光谱观测的经验，除了先进的观测仪器和高超的观测技巧以外，我们日益意识到天文气候条件优异的天文台址的重要性。我国的天文事业正在经历着高速发展阶段，优秀的台址（如冷湖，Deng et al. 2021）将助力我国天文学科产出重大的科学成果。因此，在进行系外行星研究的同时，我们将我国风云二号系列气象的卫星数据应用于优秀站址的搜寻之中。

第2章 凌星系外行星监测计划

2.1 引言

至今，数以千计的系外行星被发现。其中，凌星热木星是最容易被观测到的一类系外行星，因为凌星热木星有着最高信噪比的数据（例如，凌星系外行星搜寻卫星（Transit Exoplanet Survey Satellite, *TESS*）的新发现：Kepler-730, Cañas et al. 2019, HD 2685 b, Jones et al. 2019, HD 202772A b, Wang et al. 2019a, TOI-257 b, Addison et al. 2021, TOI-481 b 和 TOI-892 b, Brahm et al. 2020, TOI 564 b 和 TOI 905 b, Davis et al. 2020, TOI-677 b, Jordán et al. 2020 等）。这些凌星热木星为我们提供了独一无二的、高精度的用于测试系外行星形成和演化理论的天然实验室。

凌星事件发生的频率限制着行星的轨道周期，在已知行星系统主星的半径的情况下，凌星的深度决定着行星的半径。因此，基于测光观测的行星半径测量和基于光谱的多普勒效应的行星质量测量可以用于估计行星的密度，从而帮助我们理解它们的构成、形成和演化过程。Laughlin et al. (2011) 发现，一些热木星的质量显著低于行星演化和结构模型的预测。Thorngren et al. (2018) 认为对流层冷却速度的减小是导致该现象的原因，但是其物理图像尚不清楚。

此外，对于那些拥有着围着亮星绕转的凌星热木星的系统而言，我们可以通过 Rossiter-McLaughlin 效应（以下简称 R-M 效应）研究恒星自转轴和行星公转轴之间的角度（Holt 1893; Schlafly et al. 2011; McLaughlin 1924; Rossiter 1924; Queloz et al. 2000; Hébrard et al. 2008; Albrecht et al. 2012; Winn et al. 2015; Zhou et al. 2016; Addison et al. 2018; Wang et al. 2018a），可以通过透射光谱研究行星的大气（Charbonneau et al. 2002; Kreidberg et al. 2014; Deming et al. 2017），可以通过行星被恒星遮蔽而产生的光度变化（即次食）研究行星的热辐射（Charbonneau et al. 2005; Deming et al. 2005），可以研究由于行星运动造成的亮度相位变化（Borucki et al. 2009; Knutson et al. 2012）。拥有亮的主星的凌星热木星还提供了机会使得我们可以测量行星的扁率（Carter et al., 2010），自转的速率（Seager et al., 2002），轨道的变化（例如，凌星时刻的变化，Transit Timing Variation, TTV, Holman et al. 2006; Millholland et al. 2016; Wu 2018），轨道衰变（Schlaufman et al., 2013; Penev et al., 2018），轨道进动（Bouma et al., 2019）以及行星系统的构型（Becker et al. 2015; Cañas et al. 2019; Huang et al. 2020a）。这些观测工作为我们提供了宝贵的机会去理解潮汐和摄动理论，以及行星的形成和演化理论。

尽管空间望远镜任务已经极大地增加了系外行星的数量和种类（Convection, Rotation and planetary Transits, CoRoT, Auvergne et al. 2009; Kepler, Borucki et al. 2010; K2, Howell et al. 2014; TESS, Ricker et al. 2015），但是目前大部分已知的热木星实际上是被地基凌星信号搜寻计划所发现的，例如 SuperWASP (Pollacco et al., 2006), HATNet (Bakos et al., 2004), HATSouth (Bakos et al., 2013),

the Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE, [Udalski et al. 2002](#)), the Trans-Atlantic Exoplanet Survey (TrES, [Alonso et al. 2004](#)), the Qatar Exoplanet Survey (QES, [Alsubai et al. 2013](#)), the Chinese Small Telescope Array (CSTAR, [Wang et al. 2014](#)), the Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT, [Pepper et al. 2007](#)), XO ([McCullough et al., 2005](#)), the Multi-site All-Sky Camera (MASCARA, [Irwin et al. 2009](#)), MEarth the Next Generation Transit Survey (NGTS, [Wheatley et al. 2018](#))。

截至目前,一些由地基凌星信号搜寻计划所发现的热木星只有少量的后随测光观测。因此,我们发起了凌星系外行星监测计划(Transiting Exoplanet Monitoring Project, TEMP, [Wang et al. 2018d](#))。该计划旨在通过我们可以获取的我国丰富的米级望远镜资源对已知的热木星进行长周期、高精度的后随测光观测。

通过后随测光观测,首先,我们可以根据新的数据更新系外行星系统的轨道和物理参数。其次,我们可以搜寻可能由行星-行星相互扰动 ([Wang et al., 2017a](#))、潮汐耗散、拱点进动、广义相对论以及长周期行星伴星或恒星伴星等因素引起的TTV信号 ([Pál et al., 2008](#))。

2.2 观测目标的选取

考虑到目标的可见性、望远镜的尺寸以及我们可以实现的测光精度,我们设立了以下三个用于目标选取的标准:

- 目标的赤纬大于-20°;
- 目标的V波段星等在7.5到14.5 mag之间;
- 行星凌星所产生的深度大于0.005 mag。

在过去的十年里,我们对约80个系外行星系统进行了观测,获得超过300条光变曲线。本章节所述工作使用了其中39个目标的127条光变曲线。39个目标的位置分布显示在图2-1中,它们的观测日志在表2-1给出。

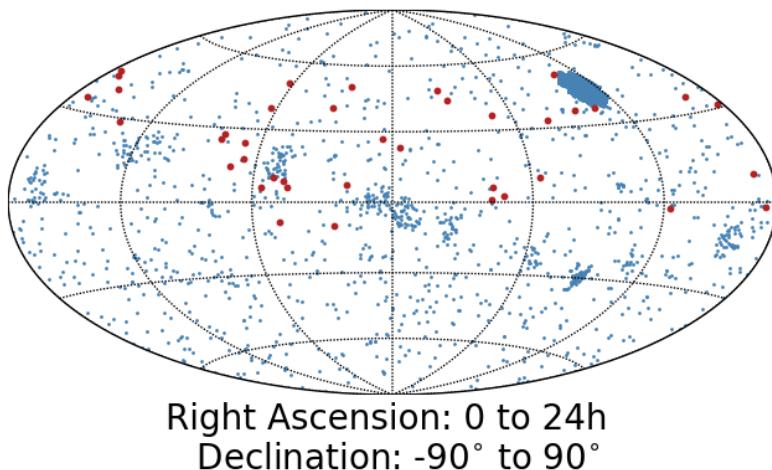


图 2-1 本文所涉及的 TEMP 39 个目标在天球上的分布 (红点)。在 2013 年 12 月 11 日到 2018 年 05 月 08 日期间, 我们对该 39 个系外行星系统进行了长时间的后随测光观测, 共收集到 127 条光变曲线。在我们的样本中, 最亮的星是 WASP-38 ($V = 9.48$ mag), 最暗的星是 HAT-P-53 ($V = 13.73$ mag)。其他的已经被证认的系外行星系在上图中以蓝点表示。

Figure 2-1 The distribution of observed TEMP targets (red dots). We collected 127 transit light curves for 39 hot Jupiter systems between Nov 11, 2013 and May 08, 2018. The brightest target in our sample is WASP-38 ($V = 9.48$ mag) and the faintest one is HAT-P-53 ($V = 13.73$ mag). All other currently known exoplanets are displayed in blue.

2.3 观测与数据的处理

我们使用中国科学院国家天文台兴隆观测基地的 60/90 cm 施密特望远镜和 60 cm 望远镜观测了 39 个热木星系统, 总共收集了 127 条光变曲线。2013 年 11 月 11 日到 2018 年 5 月 8 日期间, 我们总共进行了 454 小时的后随测光观测, 总曝光数为 23519 次。

2.3.1 兴隆 60/90 cm 施密特望远镜

我们使用兴隆 60/90 cm 望远镜观测了 24 个系外行星系统的 49 次凌星事件。观测所使用的波段为 **R** 波段。该望远镜配备了 4096×4096 像元的 CCD (Charge-Coupled Device, 电子耦合器件) 相机, 对应的视场和比例尺分别为 $94'' \times 94''$ 和 $1.''38$ / 像元。在观测过程中, 我们仅使用 CCD 上 512×512 像元 ($\sim 12'' \times 12''$) 的区域来将读出时间从 1.5 分钟降低到 4 秒。该望远镜以及仪器的细节可参考 Zhou et al. (1999, 2001)。

2.3.2 兴隆 60 cm 望远镜

我们通过兴隆 60 cm 望远镜获得了 33 个行星系统的 78 条 **R** 波段光变曲线。由于频繁的设备升级和测试, 该望远镜有着复杂的 CCD 相机使用记录。2014 年

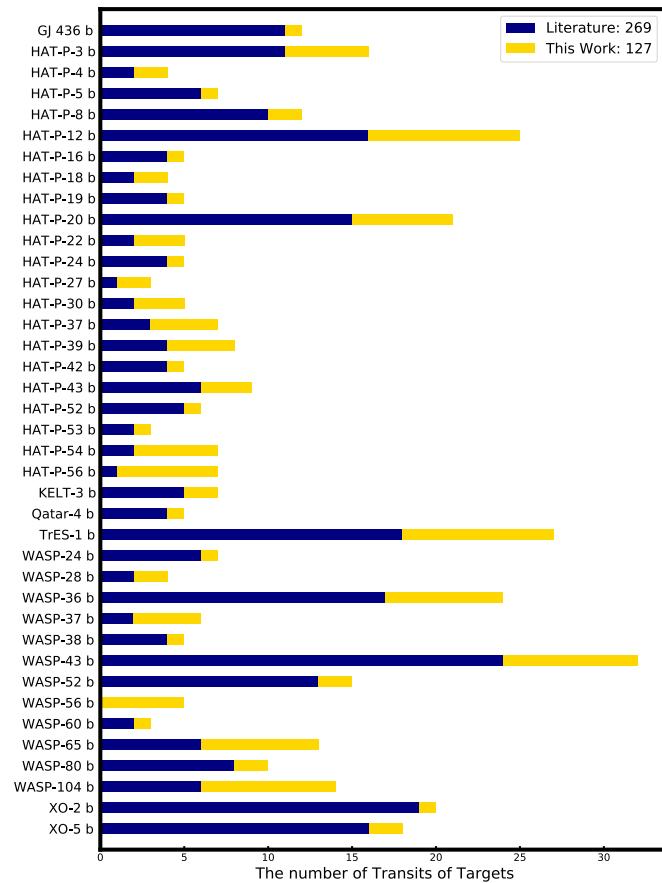


图 2-2 在本工作中所使用的 396 条光变曲线。其中蓝色的部分代表我们所收集的前人工作中
的光变曲线，黄色的部分是从我们的后随测光观测得到的光变曲线。

Figure 2-2 The number of transit light curves we used in this study (396 in total). The blue bar represents the number of archived photometric transits for each target (269 in total). The yellow bar represents the number of transits that we collected (127 in total).

1月17日到2014年10月21日的观测所使用的CCD相机是一个 512×512 像元的相机，对应的视场和比例尺分别为 $17'' \times 17''$ 和 $1.^{\circ}95$ /像元。2015年5月5日到10月22日和2016年的6月8日到2018年的2月14日所使用的CCD相机的尺寸为 1024×1024 像元，所对应的视场和比例尺分别为 $17'' \times 17''$ 和 $0.^{\circ}99$ /像元。2015年10月23日到2016年5月16日，该望远镜使用的CCD相机的尺寸为 2048×2048 像元，对应的视场和比例尺分别为 $36'' \times 36''$ 和 $1.^{\circ}06$ /像元。

每次观测的时间是通过两台望远镜自动设置的 GPS (Global Positioning System) 时间来确定的。我们将每次曝光的开始时间(时标为协调世界时, Coordinated Universal Time, UTC) 记录在 fits 文件的文件头里。在后续的数据处理中，按照系外行星研究中光变曲线时间处理的惯例，我们根据 [Eastman et al. \(2010\)](#) 中所描述的方法将此 UTC 时间转换为 BJD_{TDB} (Barycentric Julian Date in the Barycentric Dynamical Time) 时间。为了降低 CCD 相机的非线性响应对观测的影响，在实际观测中，对于较亮的目标，我们应用了虚焦的技术。相比于普通观测，该技术通过将目标的光分散到更多的像元上，从而有效的减少大气湍流带来的噪声的

影响,进而提高数据的信噪比 (Southworth et al., 2009)。测光数据的处理遵循标准的测光流程 (Wang et al., 2017a, 2018a,d,c, 2019c)。我们首先对所有的图像进行标准的本底和平场校正,然后使用 SExtractor (Bertin et al., 1996) 进行孔径测光。通过进行不同孔径和参考星的组合的测试,我们选取最优的组合使得通过较差测光得到的光变曲线的均方根 (root mean square, rms) 最小。我们对所获取的所有光变曲线进行了离群点的移除和线性趋势的去除。此外,我们根据测光噪声比例 (photometric noise rate, pnr, Fulton et al. 2011) 对每一条光变曲线的质量进行了量化。测光噪声比例公式如下:

$$pnr = \frac{rms}{\sqrt{\Gamma}} \quad (2-1)$$

上式中, rms 是对光变曲线进行拟合后的残差的 rms, Γ 是每分钟曝光数的中值。之后,我们使用 *K*-means 聚类方法将我们所获取的光变曲线的质量分成三类:高 (golden)、中 (mediocre)、低 (bad)。分类的结果显示我们的数据中有 4 条光变曲线的质量较差,分别是于 2017 年 5 月 31 日获得的 HAT-P-37 的光变曲线、于 2016 年 3 月 2 日获得的 WASP-36 的光变曲线以及于 2017 年 5 月 26 日、2018 年 4 月 20 日获得的 WASP-37 的光变曲线。我们在表 2-2 中将这些光变曲线列出,但并未采用这些光变曲线的拟合结果。因此我们的分析不受这些低质量数据的影响。此外,图 2-2 给出我们使用历史文献中的光变曲线和我们新获取的光变曲线的统计数据,我们新收集的光变曲线的拟合结果在图 2-3 中给出,图 2-4 展示了我们对从历史文献中获取的 RV 数据的拟合情况。

2.4 数据的拟合和分析

2.4.1 行星系统参数与全局拟合

为了获取我们所观测的热木星系统的系统参数,我们使用 EXOFASTv2 (Eastman et al., 2013; Eastman, 2017; Eastman et al., 2019) 同时拟合我们所收集的历史文献中的视向速度数据和光变曲线以及在本工作中新获取的光变曲线。EXOFASTv2 可以同时拟合不同波段的光变曲线以及来自不同仪器的视向速度数据。它首先通过 Nelder-Mead 优化算法 (Nelder et al., 1965a) 找到最优的一组参数,然后以这组参数为起始点进行差分进化马尔可夫链蒙特卡罗 (Differential Evolution Markov chain Monte Carlo, DEMCMC, Ter Braak, 2006) 的采样过程,从而得到参数的误差。

在拟合的过程中,对于每一个系统,我们为主星的有效温度 (T_{eff}), 金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}]$), 行星的凌星中心时刻 (T_0) 以及轨道周期 (P) 添加了高斯型先验 (Gaussian priors)。与此同时,基于 Claret (2018) 所描述的方法,我们使用主星的 T_{eff} 、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 以及观测时使用的波段给出了每一条光变曲线的二次临边昏暗系数的初始猜测值。为了更好地估计恒星参数,我们采用恒星演化模型拟合和光谱能量分布 (Spectral Energy Distribution, SED) 拟合相结合的方式,其中恒星演化模型

来源于 MESA Isochrones & Stellar Tracks (MIST)，能谱分布则来源于一系列测光数据库：Galaxy Evolution Explorer (Bianchi et al., 2011)，Tycho-2 (Høg et al., 2000)，UCAC4 (Zacharias et al., 2012)，AAVSO Photometric All Sky Survey (Henden et al., 2016)，Two Micron All Sky Survey (Cutri et al., 2003)，Wide-field Infrared Survey Explorer (Cutri et al., 2013)，Gaia (Gaia Collaboration et al., 2016)，Kepler INT Survey (Greiss et al., 2012)，UBV Photoelectric Catalog (Mermilliod, 1994)，Stroemgren–Crawford uvby photometry catalog (Paunzen, 2015)。其中恒星演化模型用于确定恒星的质量，而 SED 的拟合可以帮助我们更好地估计恒星的半径。在拟合 SED 的同时，我们需要为视差和 V 波段消光系数添加合适的先验。对于视差而言，我们使用的是校正后的 Gaia DR2 的视差。根据 Stassun et al. (2018)，为了对 Gaia DR2 的视差进行校正，我们需要在 Gaia DR2 给出的视差值上增加 $82 \mu\text{as}$ 并将额外的 $33 \mu\text{as}$ 的误差传递到其本来的误差上。

当拟合中每一个参数都通过 Gelman-Rubin 检验 (<1.01 , Gelman et al. 1992) 以及马尔可夫链长度为自相关长度的 1000 倍时，我们认为整个拟合过程已经收敛。我们分别在图 2-3 和图 2-4 中给出从我们的后随测光观测中得到的光变曲线和从历史文献中收集的视向速度曲线以及它们各自对应的最佳拟合模型。

2.4.2 凌星中心时刻的获取

EXOFASTv2 在拟合同一目标的多条光变曲线的凌星中心时刻时难以收敛。因此，为了获取凌星中心时刻，我们使用光变曲线拟合工具 JKTEBOP (Southworth et al., 2004a,b) 对每一条光变曲线进行独立的拟合。对于每一个目标，我们固定住从 EXOFASTv2 的全局拟合中得到的除了凌星中心时刻和基准流量以外的所有参数。

JKTEBOP 通过 Levenberg-Marquardt 算法 (Press et al., 1992) 获取凌星中心时刻的最佳拟合结果。为了获得可靠的凌星中心时刻误差，我们使用自举法 (Bootstrapping)，蒙特卡洛法 (MCMC) 和残差移动法 (residual shift) 对误差进行独立的估计。蒙特卡洛方法对白噪声敏感，而自举法和残差移动法对数据中存在的红噪声敏感。通过上述三种方法，对一条光变曲线，我们可以得到 3 个不同的凌星中心时刻误差，我们从中选取最大的误差作为最保守的误差。每一个目标的凌星中心时刻及其误差在表 2-3 中列出。基于提取的凌星中心时刻，我们使用加权最小二乘法对其进行拟合从而计算出每一个行星系统的线性历元公式。在计算的过程中，我们不断移动历元参考点的位置以求得最佳的参考点使得拟合得到的周期的协方差最小 (Mallonn et al., 2019)。图 2-5 展示了从实际观测数据得到的与我们给出的历元公式所预测的凌星中心时刻的差值。

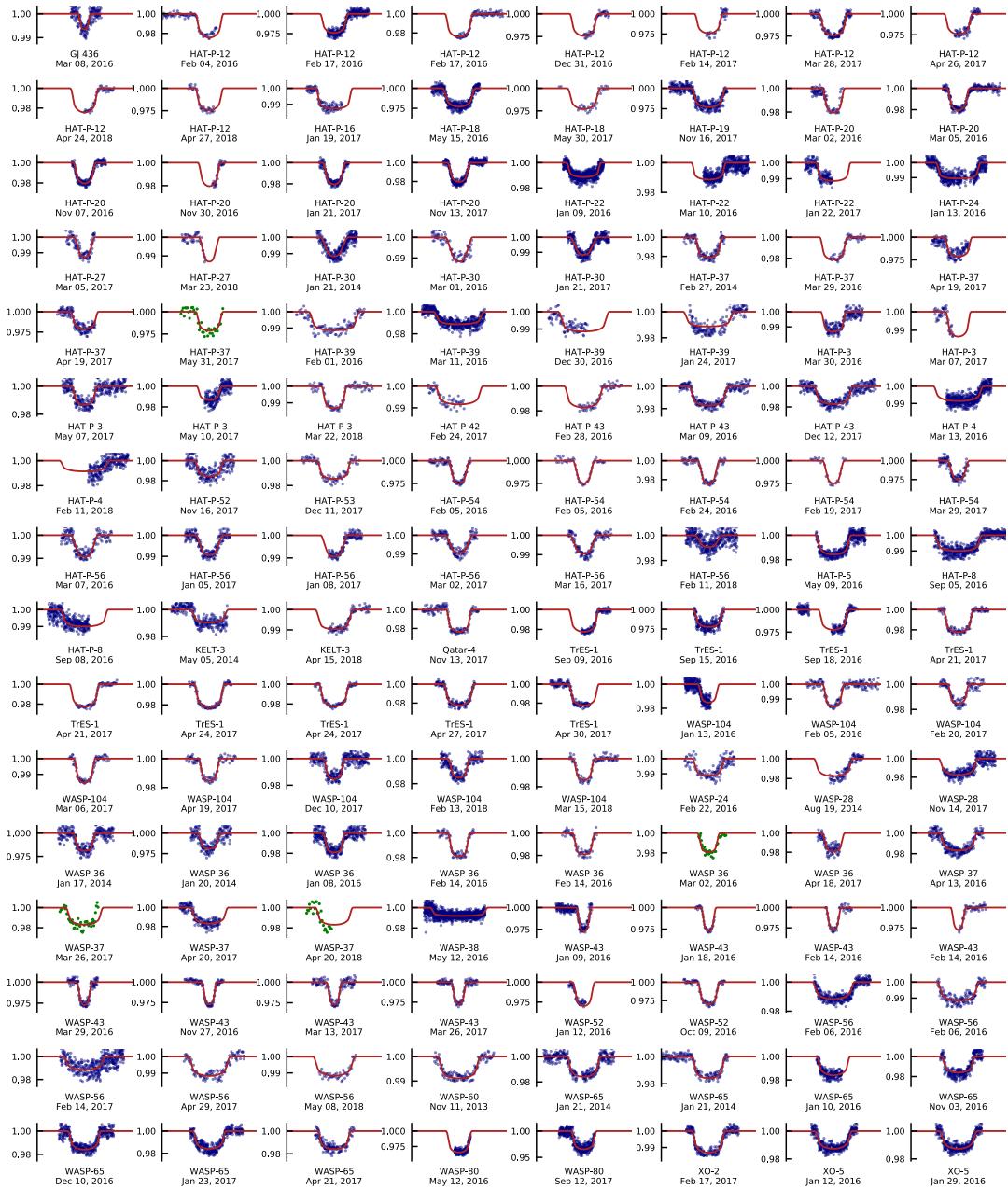


图 2-3 本工作中我们收集的 127 条光变曲线。我们同时拟合这些光变曲线以及我们从历史文献中收集到的光变曲线和视向速度数据来获取系统参数。其中有 4 条质量较差的光变曲线以绿色表示。红色的实线是最佳的拟合模型。

Figure 2-3 127 follow-up light curves that we collected for this study. These light curves were fitted simultaneously with the archived photometric, Doppler velocimetric, and spectroscopic data to estimate the system parameters. Four bad light curves are plotted in green. The solid red lines show the best-fitting models.

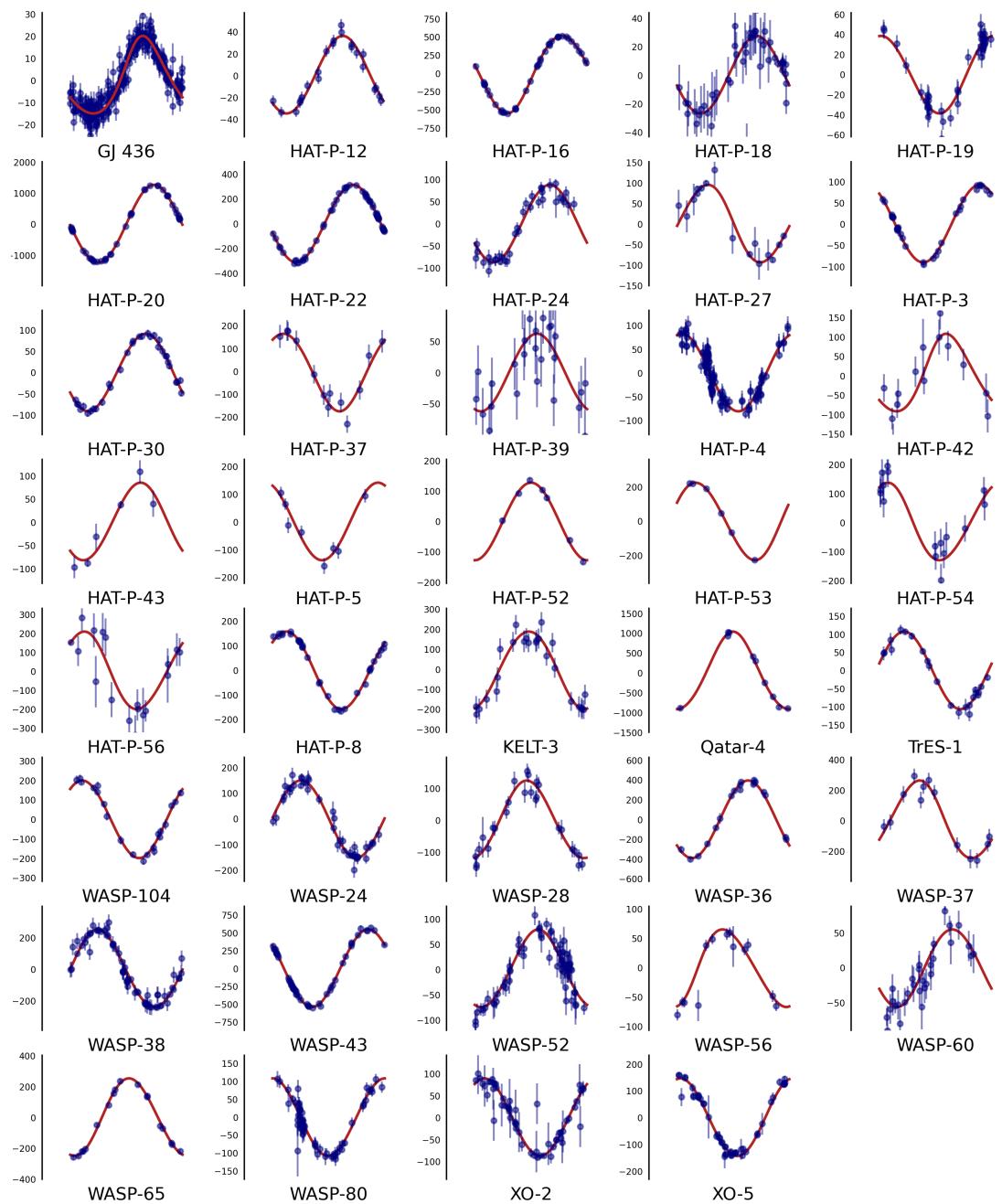


图 2-4 使用本工作所更新的周期进行相位折叠后的从历史文献中收集的视向速度数据。最佳的轨道参数来源于视向速度和光变曲线联合拟合的结果。最佳的模型在上图中以红色的实线表示。

Figure 2-4 Archived Doppler velocimetric measurements (m/s) of our TEMP targets phase-folded with the updated orbital periods determined in this study. The best-fitting Keplerian orbital solutions from the joint radial-velocity, light-curve, and spectroscopic modeling are overplotted as solid red lines.

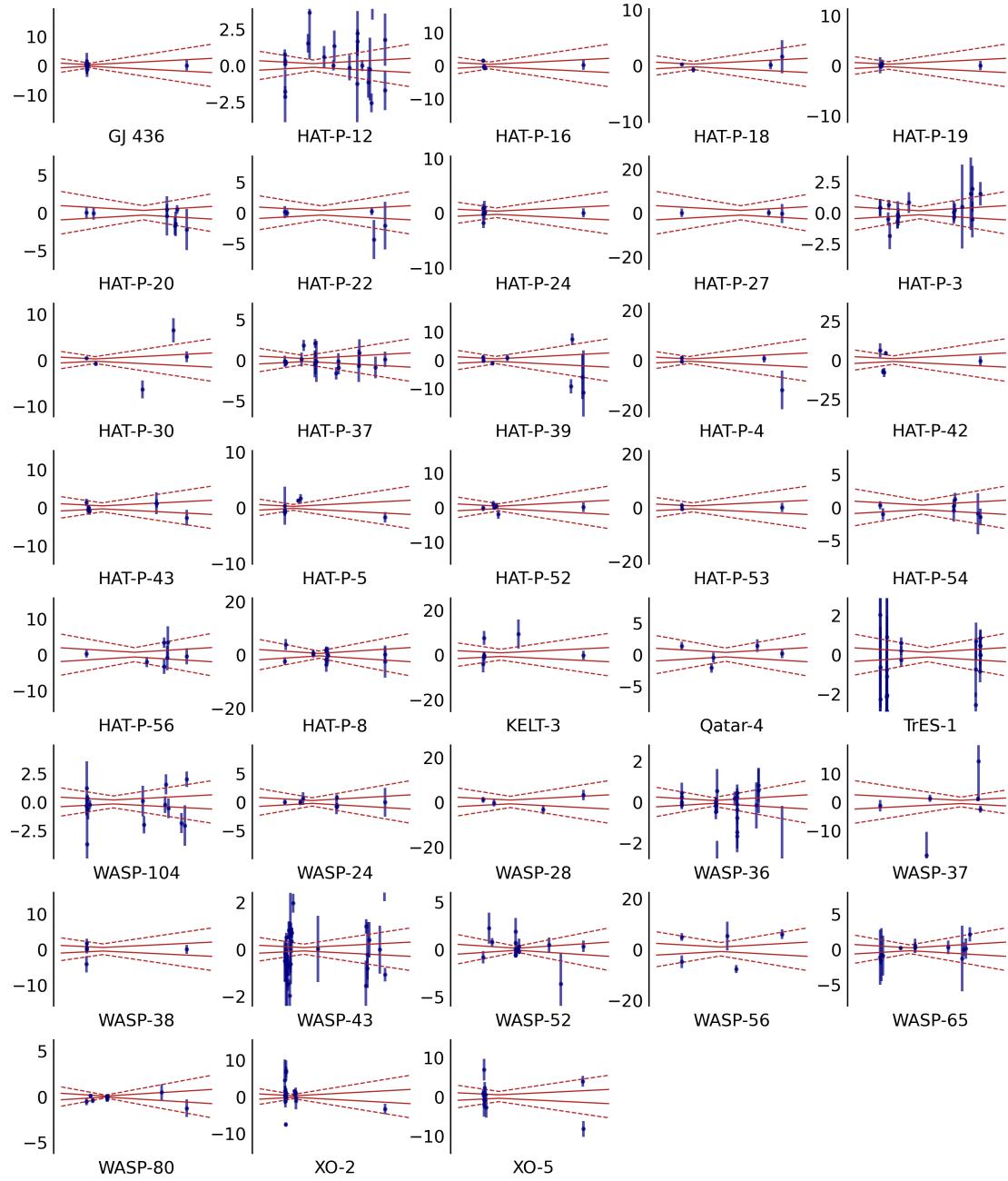


图 2-5 本工作中所研究的目标的凌星中心时刻的变化。图中的红色虚线表示线性历元的误差。随着历元的传播，内部的实线和外部的虚线分别表示 1σ 和 3σ 的差异。在 3σ 的水平上，我们没有发现显著的 TTV 信号。

Figure 2-5 Transit timing variations (mins) for our targets, as compared to the best-fitting ephemerides reported in this study, shown as a function of epoch. The solid (dashed) lines indicate the propagation of $\pm 1\sigma$ ($\pm 3\sigma$) errors in the updated linear ephemerides. No statistically significant TTVs are detected in our sample at levels of $\pm 3\sigma$.

2.5 结果与讨论

本工作的核心结果是优化了 39 个凌星热木星系统的系统参数。表 2-4 展示的是本工作所给出的系统参数和从前人工作中收集的系统参数。从本工作中得到的恒星参数和行星参数分别在表 2-5 和 2-6 中给出。与此同时，我们在图 2-6 中展示了本工作给出的系统参数和前人工作给出的系统参数的差异。我们的结果基于更多的测光数据，因此我们认为，较之前人的工作，我们的结果拥有着更高的精度。

恒星物理参数：除了 HAT-P-22 的表面重力加速度的对数 ($\log g$)，我们的拟合给出的恒星物理参数和前人给出的结果在 2σ 内一致（如图 2-6 (a) – (e) 所示）。HAT-P-22 的 $\log g$ 和前人给出的结果的一致度只有 2.6σ 。

尽管 SED 拟合和临边昏暗系数的拟合可以独立地限制 T_{eff} 和 $[\text{Fe}/\text{H}]$ ，但是相比前人给出的结果，我们的结果的精度没有显著的提升（见图 2-7 (a) – (b)）。这两个参数可以通过光谱数据被限制得很好，而我们工作的重心主要集中在增加被观测系统的后随测光数据，从而延长其测光数据的时间基线，进而提升历元公式和以及与测光数据相关的系统参数的质量。

因为通过拟合光变曲线的临边昏暗系数可以单独地对 $\log g$ 进行限制，所以和前人给出的结果相比，我们获得了更为精准的 $\log g$ 值。此外，由于在拟合 SED 的同时，我们还使用了来自 Gaia DR2 的视差和来自二维星际尘埃图的 V 波段消光系数，因此我们的拟合可以精确地得到恒星的辐射亮度和半径。对于 39 个系外行星系统的主星而言，我们得到的恒星半径的误差好于 3%。和我们的结果相比，39 个行星系统中只有 28 个系统的主星半径有着相似精度的历史结果。

基于凌星时刻的持续时间所提供的限制，光变曲线的拟合可以为恒星密度提供独立的、额外的限制 (Seager et al., 2003)。除此之外，在对恒星参数拟合的过程中，我们采取了对多个波段的测光进行 SED 拟合和对 T_{eff} , $[\text{Fe}/\text{H}]$ 和 $\log g$ 进行 MIST 拟合相结合的方式，因此我们所得到恒星质量比前人得到的结果更为精准。

视向速度参数：在本工作中，我们并未获得新的视向速度数据，因此从全局拟合中得到的视向速度参数和前人的基本一致。尽管如此，在对结果进行比较的过程中，我们发现历史文献中给出的偏心率和我们得到偏心率只在 2σ 内一致（见图 2-6 (f)）。对于这些处于近圆轨道的热木星而言，前人工作给出的偏心率的数值系统性地大于我们给出的数值。Wittenmyer et al. (2013, 2019) 指出在使用 MCMC 方法进行误差估计的过程中偏心率的范围设置为 [0,1) 会导致对偏心率的估计偏大。尽管偏心率的范围被设置为 [0,1) 并无物理上的错误，但是在最终的误差估计的过程中，这样的选择会使得偏心率的后验概率分布接近以 0 为平均数的高斯分布正值部分，从而在计算后验概率分布中值的过程中得到比实际值更大的结果，这种偏差被称之为 Lucy-Sweeney 偏差 (Lucy et al., 1971)。在我们的拟合中，我们避免了直接对偏心率采样，而是将偏心率 (e) 和近星点幅角 (ω_*) 进行重新参数化为 $e\cos\omega_*$ 和 $e\sin\omega_*$ ，从而避免了 Lucy-Sweeney 偏差对偏心

率估计的影响。

凌星参数: 我们所得获得的最终测光参数-轨道周期 (P)，行星半径和恒星半径之比 (R_p/R_*)，半长轴和恒星半径之比 (a/R_*)，凌星持续时间 (T_{14})-和前人工作一致甚至好于前人的结果。对于一些系统的凌星参数和前人的结果相比差异大于 2σ 的情况，我们认为我们的结果更为可靠，因为我们使用了更多的光变曲线数据。

行星物理参数: 对于行星的物理参数而言，我们最关心的两个参数是行星的质量和半径。和前人给出的结果相比，在我们的工作中，GJ 436 b 的半径偏大，而 HAT-P-54 b 的半径则偏小。尽管如此，我们所估计的行星的半径和质量 (R_p 和 M_p) 和前人给出的结果基本一致，而且拥有着更高的精度。在 39 个系外行星中，对其中 37 个系外行星的半径的估计好于 5%。而在前人的研究中，仅有 21 个行星的半径的估计值达到和我们相同的精度。

凌星中心时刻的变化: 我们的后随测光观测显著提升了历元公式中周期 (P) 和参考历元 (T_0) 的精度，从而为后续的凌星事件发生的时间提供了更为准确的预测。如果我们没有使用新的观测对这些系统的历元公式进行更新，那么截至詹姆斯韦布空间望远发射的日期 (2021 年 12 月 25 日)，39 个系统中有 10 个的历元公式所预测的凌星的发生时间将与实际的发生时间的偏差大于 10 分钟，其中，对于 WASP-56 b 而言，这一偏差将超过 1 小时 (见图 2-8)。

更新后的历元公式可以帮助我们搜寻 TTV 信号。除了一些离群点外，更新之后的历元公式所预测的凌星中心时刻和我们从光变曲线中得到的凌星中心时刻的差异在 3σ 以内。虽然这些离群点可能有物理意义，在检查这些离群点对应的光变曲线之后，我们认为它们更可能是测光数据质量较差的产物。可能的原因有 (1) 观测时天气状况差导致观测数据中存在有和时间相关的噪声，而在测光数据的处理中没有完全消除该因素的影响，从而影响了凌星中心时刻的确定；(2) 凌星中心时刻来源于不完整的光变曲线，从而使得凌星中心时刻的值不准确。

在本工作中，我们并没有在 39 个热木星系统中探测到显著的 TTV 信号，这一点和之前基于 *Kepler* 数据 (Steffen et al., 2012) 和一系列地基测光项目 (例如，Transit Light Curve, TLC, Holman et al. 2006, Young Exoplanet Transit Initiative, YETI, Neuhäuser et al. 2011, TAPPIST, Gillon et al. 2012, TASTE, Nascimbeni et al. 2011, TraMoS, Cortés-Zuleta et al. 2020, TEMP, Wang et al. 2018d 和 Mallonn et al. 2019) 所得到的结果是一致的。

对额外的系外行星的限制

尽管我们没有发现显著的 TTV 信号，但是我们可以对热木星系统中可能存在的第二个系外行星的参数进行限制。从观测中得到的凌星中心时刻 (记作 Observed transit mid-time, 或者 O) 和从更新后的历元公式得到的预测的凌星中心时刻 (记作 Calculated transit mid-time, 或者 C) 的差值 (记作 O-C) 的 rms 对应着可能存在的、额外的系外行星对当前已经证认的行星的轨道的扰动。因此，

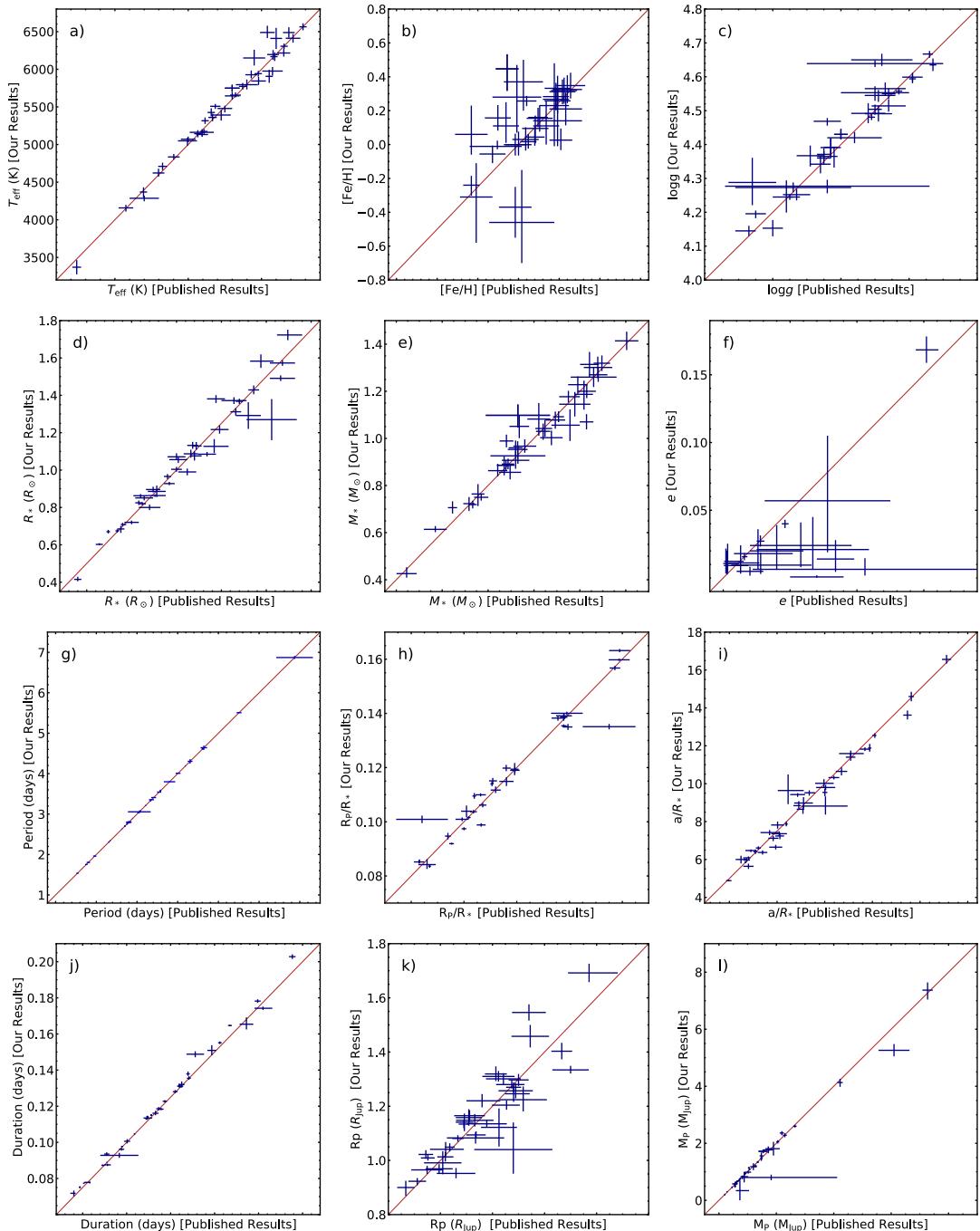


图 2-6 本工作所得的和前人给出的系统参数的比较。上图中所展示的参数有有效温度 (T_{eff} , 子图 a)、金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}]$, 子图 b)、恒星表面重力 ($\log g$, 子图 c)、恒星半径 (R_* , 子图 d)、恒星质量 (M_* , 子图 e)、轨道偏心率 (e , 子图 f)、轨道周期 (P , 子图 g)、行星和主星半径之比 (R_p/R_* , 子图 h)、轨道半长轴 (a/R_* , 子图 i)、凌星持续时间 (T_{14} , 子图 j)、行星半径 (R_p , 子图 k)、行星质量 (M_p , 子图 l>)。红色实线代表我们的和前人的结果完全一致。

Figure 2-6 Comparison of the effective temperature (T_{eff} , Panel a), metallicity ($[\text{Fe}/\text{H}]$, Panel b), surface gravity ($\log g$, Panel c), stellar radius (R_* , Panel d), stellar mass (M_* , Panel e), orbital eccentricity (e , Panel f), orbital period (P , Panel g), planet-to-star radius ratio (R_p/R_* , Panel h), scaled semi-major axis (a/R_* , Panel i), transit duration (T_{14} , Panel j), planetary radius (R_p , Panel k), and planetary mass (M_p , Panel l>) derived in this work and in the literature for our 39 target hot Jupiter systems. The solid lines represent exact agreement.

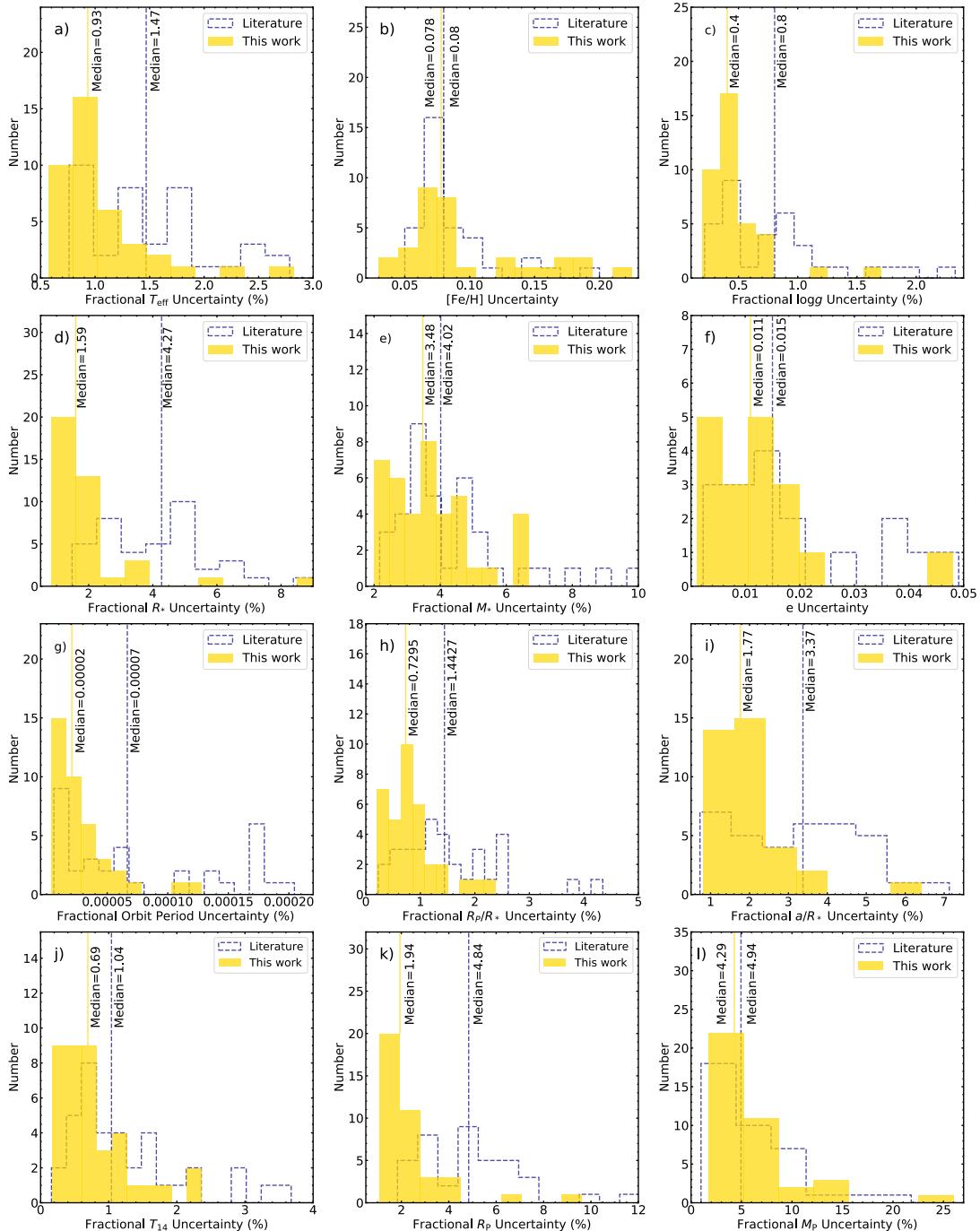


图 2-7 系统参数相对误差的分布。上图中所展示的参数有有效温度 (T_{eff} , 子图 a)、金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}]$, 子图 b)、恒星表面重力 ($\log g$, 子图 c)、恒星半径 (R_* , 子图 d)、恒星质量 (M_* , 子图 e)、轨道偏心率 (e , 子图 f)、轨道周期 (P , 子图 g)、行星和主星半径之比 (R_p/R_* , 子图 h)、轨道半长轴 (a/R_* , 子图 i)、凌星持续时间 (T_{14} , 子图 j)、行星半径 (R_p , 子图 k)、行星质量 (M_p , 子图 l)。

Figure 2-7 Distribution of uncertainties in fractional effective temperature ($\sigma_{T_{\text{eff}}}/T_{\text{eff}}$, Panel a), stellar metallicity ($\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$, Panels b), fractional surface gravity ($\sigma_{\log g}/\log g$, Panel c), fractional stellar radius (σ_{R_*}/R_* , Panel d), fractional stellar mass (σ_{M_*}/M_* , Panel e), eccentricity (σ_e , Panel f), fractional orbital period (σ_p/P , Panel g), fractional planet-to-star radius ratio ($\sigma_{R_p/R_*}/R_p/R_*$, Panel h), fractional scaled semi-major axis ($\sigma_{a/R_*}/a/R_*$, Panel i), fractional transit duration ($\sigma_{T_{14}}/T_{14}$, Panel j), fractional planetary radius (σ_{R_p}/R_p , Panel k), and fractional planetary mass (σ_{M_p}/M_p , Panel l) from this work (yellow) compared to the literature values (blue dashed line).

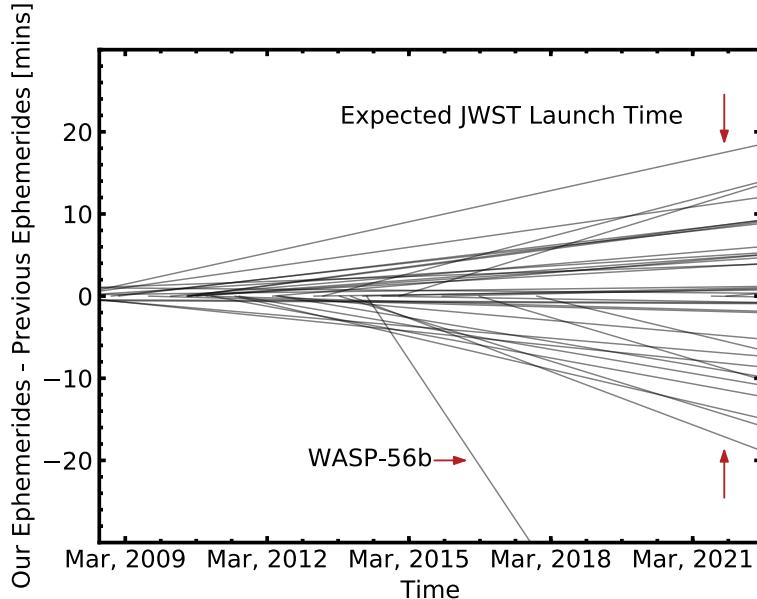


图 2-8 我们所更新的历元公式和历史的历元公式对凌星中心时刻的预测随着时间的变化。在詹姆斯. 韦布望远镜发射之前，我们的 39 个目标中有 29 个的差异小于 10 分钟。对于其他 10 个目标，中心时刻的差异都超过了 10 分钟。其中，WASP-56 b 的差异可以达到 72 分钟。

Figure 2-8 The difference between calculated (predicted) transit windows determined using our updated ephemerides and literature ephemerides. The difference for 29 out of 39 targets are within 10 min at the time of launch of JWST. For the other 10 targets, our predicted transit mid-times differ by more than 10 min from the literature ephemerides; for WASP-56b, the deviation amounts to about 72 min.

对于每一个系统，我们使用基于轨道积分器 Rebound¹ (Rein et al., 2012, 2015a) 的动力学模拟计算出了可能存在的系外行星的周期-质量曲线 (图 2-9)。如果可能存在的系外行星的质量处于该线上，那么它们是可以探测到的，相反地，如果质量小于该线，我们将无法探测到它们。

在我们的动力学模拟中，我们假设可能存在的系外行星的轨道为圆轨道，且和已知的热木星共面。相比于椭圆轨道和非共面轨道，圆的共面轨道产生的 TTV 信号更小，因此给出的对可能存在系外行星的质量上线的估计更为保守 (Agol et al., 2016)。

在模拟过程中，我们将可能存在的系外行星的周期和热木星的周期比从 1:5 到 5:1 划分为 100 步。由于处于共振位置的行星的相互作用强烈，因此在模拟逐渐靠近共振位置的过程中，TTV 信号的振幅会快速增加 (Agol et al., 2005; Holman et al., 2005)。因此，在靠近共振的位置，数据采样的分辨率提升为普通采样的三倍。对于每一步而言，我们通过线性插值和梯度下降法来获取可能存在的行星的质量。当我们模拟得到的 O-C 的 rms 和实际的 O-C 的 rms 的差值小于 1s 时，我们认为其已经收敛。

¹<https://rebound.readthedocs.io/en/latest/>

此外, 我们没有计算处于不稳定区域的可能存在的系外行星的质量上限。在我们的模拟中, 我们使用临近轨道的平均指数增长因子 (Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbits, MEGNO $\langle Y \rangle$, [Cincotta et al. 1999, 2000, 2003; Hinse et al. 2010](#))。MEGNO 可以帮助我们识别模拟过程中的准周期行为 (当轨道积分时间趋于无穷大时 $\langle Y \rangle \rightarrow 2$) 和混沌行为 (当轨道积分时间趋于无穷大时 $\langle Y \rangle > 2$)。为了计算 MEGNO 在可能存在的系外行星的周期比-质量空间的分布, 我们在周期比范围为 0.1-3.5 和质量范围为 $0.01-10000 M_{\oplus}$ 的参数空间里制作了 500×500 的等间距网格。在每一个网格上, 行星系统模拟运行的时间为 1000 年。在系统模拟运行的过程中, 程序每隔 10 年检查一次 MEGNO 值。如果 MEGNO 值大于 5 或者系统内天体发生碰撞、逃逸, 程序则会返回 MEGNO 值等于 5。

MEGNO 还可以为我们指示各个系统中的共振位置。正如图 2-9 所示, 和普通的轨道构型相比, 在平运动共振处, 尤其是低阶平运动共振处, 从我们模拟中得到的质量会受到更为严格的限制。因此, 我们可以排除处于 1:2, 2:3, 3:2, 2:1 共振处质量分别大于 $0.39-0.50 M_{\oplus}$, $1.23-14.36 M_{\oplus}$, $1.65-21.18 M_{\oplus}$ 和 $0.65-6.75 M_{\oplus}$ 的行星存在的可能。在一个热木星系统中, 在给定位置上的可能存在的系外行星的质量上限 ($m_{\text{putative planet}}$) 由热木星的周期 (P), O-C 的 rms 的大小 (Δ) 以及主星的质量所确定, 近似关系式为 $m_{\text{putative planet}} = P \cdot \Delta / M_{*}$ 。对于 39 个系外行星系统而言, 它们的恒星质量 ($0.426-1.41 M_{\odot}$) 和行星轨道周期 (0.81-6.87 days) 相近, 因此可能存在的系外行星的质量上线主要由 O-C 的 rms 所主导。

在热木星周围没有近共振行星这一现象和传统的盘迁移模型并不相符。尽管盘迁移模型没有给出一个对共振对的典型生成率的精确的预测, 但是含有热木星的系外行星系统里, 热木星普遍缺少临近的行星这一观测事实为盘迁移理论蒙上了厚厚的阴影。相反的是, 临近行星的缺失很好地符合高偏心率迁移理论的预测。尽管如此, 我们并不能排除热木星在本地形成的可能。本地形成理论认为热木星的形成的同时还会有临近的行星形成 ([Batygin et al., 2016; Boley et al., 2016](#)), 但是它们并不需要处于近共振的位置。

在 *Kepler* 的系外行星系统样本里没有探测到额外的凌星信号这一观测事实最开始是被应用于限制处于非共振位置行星的出现率 ([Steffen et al., 2012; Huang et al., 2017](#))。尽管这个发现一般被认为是热木星通过高偏心率迁移的证据, 但是由于从 *Kepler* 观测到的系外行星的样本都是基于凌星法发现的, 因此可能存在观测偏差。额外的行星可能处于离热木星很远的外部轨道, 也可能处于轨道倾角较小的轨道上, 甚至其信号可能被淹没在观测噪声里 ([Millholland et al., 2016](#))。通过达到更高的观测精度, 含有热木星的系统里额外的临近系外行星已经陆续被发现 (例如, WASP-47, [Becker et al. 2015](#); Kepler-730, [Cañas et al. 2019](#); TOI-1130, [Huang et al. 2020a](#); WASP-148, [Hébrard et al. 2020](#) 等)。这些系统的存在无法通过迁移机制所解释, 但是符合本地形成理论的预测。

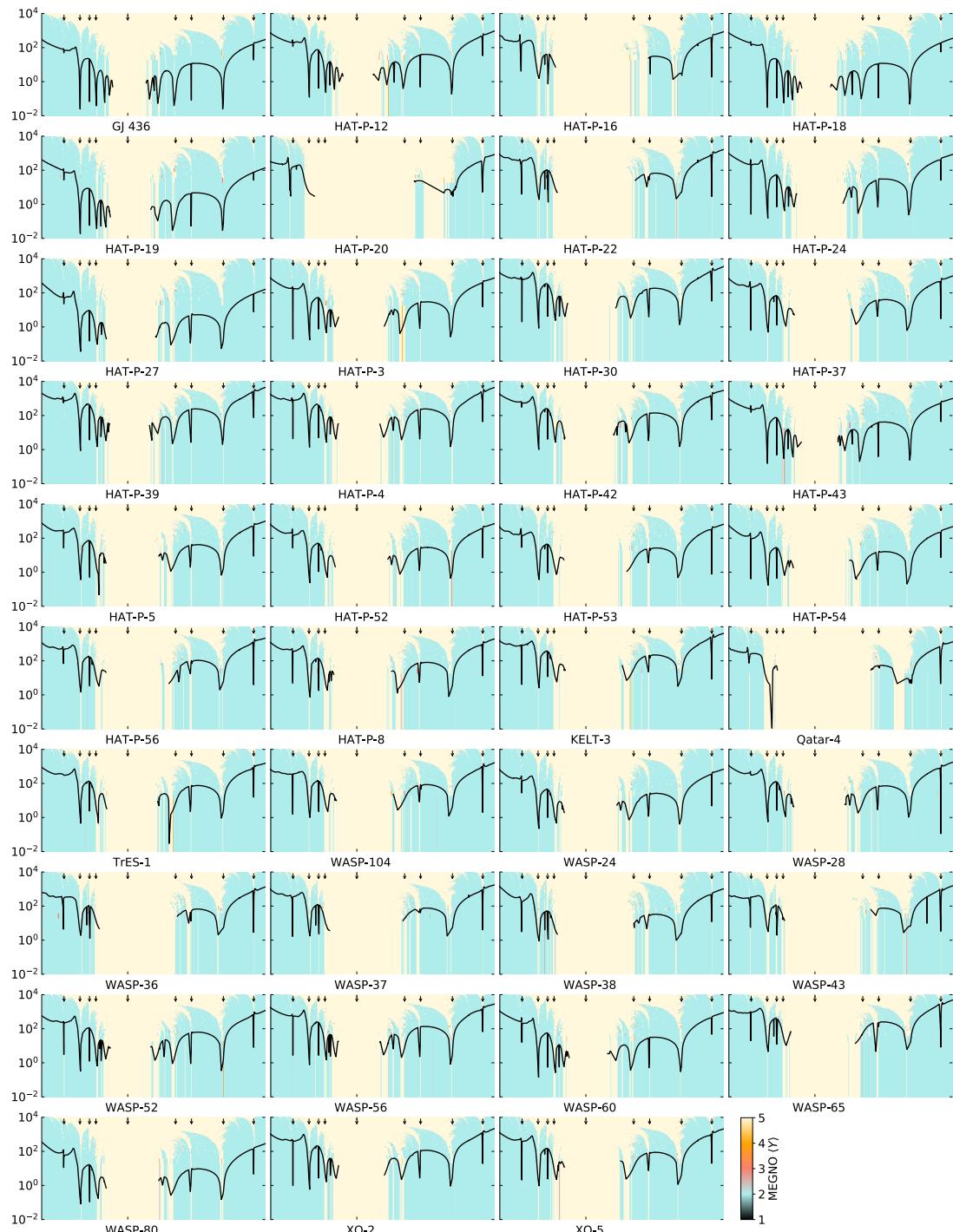


图 2-9 凌星热木星附近可能存在的额外系外行星的质量上限。黑色实线表示能够产生目前我们探测到的 O-C 的 rms 大小的可能存在的额外系外行星的质量和周期。在轨道共振处，行星质量会受到更为严格的限制。此外，我们还使用 MEGNO 指数来识别准周期（蓝色）、可能不稳定（红色）和混沌区域（黄色）。需要说明的是，随着质量的增加，稳定区域会快速地过渡到混沌区域，所以可能不稳定区域非常稀薄。

Figure 2-9 Upper mass limits (M_{\oplus}) as a function of the orbital period ratio of the putative companion planets and the transiting hot Jupiters. The black solid curves represent the mass-period region where putative companion planets would produce TTVs with RMS values matching those that we measured for our targets. The mass constraints are most restrictive near the low-order mean-motion resonances (marked by arrows). We use MEGNO Factor ($\langle Y \rangle$) to identify quasi-periodic regions ($\langle Y \rangle = 2$, color coded blue), as well as chaotic and possibly unstable regions ($\langle Y \rangle \neq 2$, color coded black, red, and yellow). Possibly unstable regions are very thin since the transition from quasi-periodic to chaotic regions is very fast.

表 2-1 39 个 TEMP 目标的观测日志

Table 2-1 Log of Observations of the TEMP Targets Presented in This Work

Planet	Date	Time (UTC)	Telescope	Exptime ² (s)	N _{data}	pn	Quality
GJ 436 b	Mar 08, 2016	13:17:15-15:50:10	Xinglong 60/90 cm Schmidt	40	174	0.12	Golden
HAT-P-12 b	Feb 04, 2016	17:46:07-22:19:55	Xinglong 60/90 cm Schmidt	200	76	0.32	Mediocre
	Feb 17, 2016	17:37:22-21:05:46	Xinglong 60 cm	30	323	0.15	Golden
	Feb 17, 2016	17:57:53-21:53:21	Xinglong 60/90 cm Schmidt	140	94	0.17	Golden
	Dec 31, 2016	20:25:13-22:31:45	Xinglong 60/90 cm Schmidt	150	48	0.21	Mediocre
	Feb 14, 2017	19:49:37-21:33:24	Xinglong 60/90 cm Schmidt	80	41	0.29	Mediocre
	Mar 28, 2017	12:31:25-15:59:05	Xinglong 60 cm	60	134	0.20	Mediocre
	Apr 26, 2017	12:11:48-14:18:28	Xinglong 60/90 cm Schmidt	80	73	0.27	Mediocre
	Apr 24, 2018	14:15:57-16:48:05	Xinglong 60 cm	180	44	0.21	Mediocre
	Apr 27, 2018	17:40:03-19:48:32	Xinglong 60 cm	180	36	0.25	Mediocre
HAT-P-16 b	Jan 19, 2017	10:16:44-13:17:18	Xinglong 60/90 cm Schmidt	80	106	0.13	Golden
HAT-P-18 b	May 15, 2016	12:30:12-16:33:04	Xinglong 60 cm	30	397	0.17	Golden
	May 30, 2017	14:01:18-18:10:23	Xinglong 60 cm	30	34	0.41	Mediocre
HAT-P-19 b	Nov 16, 2017	10:25:29-15:18:45	Xinglong 60 cm	25	363	0.22	Mediocre
HAT-P-20 b	Mar 02, 2016	14:41:46-17:19:44	Xinglong 60/90 cm Schmidt	60	90	0.26	Mediocre
	Mar 05, 2016	12:16:08-17:04:46	Xinglong 60/90 cm Schmidt	55	243	0.13	Golden
	Nov 07, 2016	19:09:22-22:00:40	Xinglong 60 cm	30	195	0.11	Golden
	Nov 30, 2016	20:33:31-21:37:17	Xinglong 60/90 cm Schmidt	90	35	0.16	Golden
	Jan 21, 2017	13:09:29-15:38:39	Xinglong 60 cm	30	165	0.13	Golden
	Nov 13, 2017	16:52:34-20:33:30	Xinglong 60 cm	18	321	0.13	Golden
HAT-P-22 b	Jan 09, 2016	15:27:06-18:51:35	Xinglong 60 cm	10	770	0.09	Golden
	Mar 10, 2016	17:32:40-21:23:25	Xinglong 60 cm	20	539	0.13	Golden
	Jan 22, 2017	15:49:49-18:07:29	Xinglong 60 cm	20	181	0.14	Golden
HAT-P-24 b	Jan 13, 2016	15:04:46-20:11:18	Xinglong 60 cm	20	570	0.11	Golden
HAT-P-27 b	Mar 05, 2017	17:32:14-19:57:17	Xinglong 60/90 cm Schmidt	70	94	0.21	Mediocre
	Mar 23, 2018	16:28:44-18:28:21	Xinglong 60 cm	130	47	0.23	Mediocre
HAT-P-3 b	Mar 30, 2016	12:50:45-16:02:01	Xinglong 60/90 cm Schmidt	60	180	0.19	Golden
	Mar 07, 2017	15:35:15-17:11:25	Xinglong 60/90 cm Schmidt	110	48	0.21	Mediocre
	May 07, 2017	13:13:30-18:36:43	Xinglong 60 cm	40	310	0.21	Mediocre
	May 10, 2017	12:18:24-14:34:42	Xinglong 60 cm	10	221	0.21	Mediocre
	Mar 22, 2018	12:19:33-17:37:22	Xinglong 60 cm	170	91	0.15	Golden
HAT-P-30 b	Jan 21, 2014	13:52:02-15:38:27	Xinglong 60 cm	30	299	0.13	Golden
	Mar 01, 2016	14:06:32-17:28:20	Xinglong 60/90 cm Schmidt	100	80	0.20	Golden
	Jan 21, 2017	15:43:00-19:14:28	Xinglong 60 cm	18	301	0.12	Golden
HAT-P-37 b	Feb 27, 2014	18:35:54-22:01:09	Xinglong 60 cm	90	120	0.25	Mediocre
	Mar 29, 2016	17:59:16-21:01:16	Xinglong 60/90 cm Schmidt	180	56	0.21	Mediocre
	Apr 19, 2017	17:11:22-20:22:21	Xinglong 60 cm	50	146	0.27	Mediocre
	May 31, 2017	16:09:27-19:41:51	Xinglong 60 cm	40	39	0.58	Bad
HAT-P-39 b	Feb 01, 2016	11:54:55-17:38:54	Xinglong 60/90 cm Schmidt	160	109	0.28	Mediocre
	Mar 11, 2016	11:34:31-16:53:11	Xinglong 60 cm	30	529	0.16	Golden
	Dec 30, 2016	15:05:30-18:22:49	Xinglong 60/90 cm Schmidt	120	89	0.28	Mediocre
	Jan 24, 2017	11:49:28-16:40:59	Xinglong 60 cm	60	170	0.32	Mediocre
HAT-P-4 b	Mar 13, 2016	17:42:52-21:29:26	Xinglong 60 cm	20	534	0.09	Golden
	Feb 11, 2018	17:39:19-21:02:29	Xinglong 60 cm	20	254	0.24	Mediocre
HAT-P-42 b	Feb 24, 2017	15:37:30-18:40:52	Xinglong 60/90 cm Schmidt	200	55	0.19	Golden

²Exposure time

HAT-P-43 b	Feb 28, 2016	13:40:38-17:22:45	Xinglong 60/90 cm Schmidt	200	61	0.23	Mediocre
	Mar 09, 2016	11:32:30-17:33:03	Xinglong 60 cm	80	233	0.19	Golden
	Dec 12, 2017	16:10:28-22:34:57	Xinglong 60 cm	50	307	0.24	Mediocre
HAT-P-5 b	May 09, 2016	16:08:34-20:18:52	Xinglong 60 cm	20	435	0.13	Golden
HAT-P-52 b	Nov 16, 2017	16:12:38-20:18:02	Xinglong 60 cm	40	222	0.34	Mediocre
HAT-P-53 b	Dec 11, 2017	10:22:06-15:16:34	Xinglong 60 cm	180	85	0.25	Mediocre
HAT-P-54 b	Feb 05, 2016	10:58:23-14:26:31	Xinglong 60 cm	120	93	0.19	Golden
	Feb 05, 2016	11:06:12-15:13:04	Xinglong 60/90 cm Schmidt	290	48	0.27	Mediocre
	Feb 24, 2016	11:11:08-14:51:16	Xinglong 60/90 cm Schmidt	160	78	0.23	Mediocre
	Feb 19, 2017	11:12:32-14:09:23	Xinglong 60 cm	60	25	0.39	Mediocre
	Mar 29, 2017	11:27:29-13:55:49	Xinglong 60 cm	50	110	0.30	Mediocre
HAT-P-56 b	Mar 07, 2016	11:18:29-15:34:21	Xinglong 60/90 cm Schmidt	60	165	0.12	Golden
	Jan 05, 2017	16:02:17-19:51:19	Xinglong 60/90 cm Schmidt	60	191	0.11	Golden
	Jan 08, 2017	12:37:08-15:25:31	Xinglong 60/90 cm Schmidt	70	121	0.09	Golden
	Mar 02, 2017	11:22:09-15:12:53	Xinglong 60/90 cm Schmidt	80	141	0.13	Golden
	Mar 16, 2017	11:16:49-14:54:48	Xinglong 60/90 cm Schmidt	80	121	0.14	Golden
	Feb 11, 2018	13:17:10-17:37:21	Xinglong 60 cm	10	423	0.23	Mediocre
HAT-P-8 b	Sep 05, 2016	11:43:00-17:56:37	Xinglong 60 cm	20	505	0.13	Golden
	Sep 08, 2016	12:28:56-16:00:13	Xinglong 60 cm	14	347	0.16	Golden
KELT-3 b	May 05, 2014	12:03:08-16:44:55	Xinglong 60 cm	60	265	0.23	Mediocre
	Apr 15, 2018	12:33:32-16:00:34	Xinglong 60 cm	100	92	0.09	Golden
Qatar-4 b	Nov 13, 2017	10:24:09-15:07:17	Xinglong 60 cm	100	130	0.24	Mediocre
TrES-1 b	Sep 09, 2016	12:01:48-14:30:25	Xinglong 60 cm	60	119	0.12	Golden
	Sep 15, 2016	12:26:32-14:58:10	Xinglong 60 cm	18	216	0.16	Golden
	Sep 18, 2016	11:22:10-16:27:05	Xinglong 60 cm	22	218	0.16	Golden
	Apr 21, 2017	15:58:58-20:11:03	Xinglong 60 cm	100	116	0.16	Golden
	Apr 21, 2017	16:55:05-20:22:28	Xinglong 60/90 cm Schmidt	160	73	0.13	Golden
	Apr 24, 2017	16:39:39-20:12:48	Xinglong 60 cm	100	93	0.12	Golden
	Apr 24, 2017	16:43:20-20:17:45	Xinglong 60/90 cm Schmidt	160	76	0.16	Golden
	Apr 27, 2017	17:06:20-20:26:14	Xinglong 60/90 cm Schmidt	80	132	0.16	Golden
	Apr 30, 2017	16:57:51-20:18:08	Xinglong 60/90 cm Schmidt	70	145	0.14	Golden
WASP-104 b	Jan 13, 2016	20:14:32-22:24:53	Xinglong 60 cm	15	367	0.12	Golden
	Feb 05, 2016	15:40:51-21:46:28	Xinglong 60/90 cm Schmidt	120	144	0.17	Golden
	Feb 20, 2017	14:33:04-18:14:48	Xinglong 60/90 cm Schmidt	110	111	0.22	Mediocre
	Mar 06, 2017	15:48:40-19:12:57	Xinglong 60/90 cm Schmidt	120	73	0.15	Golden
	Apr 19, 2017	12:26:07-16:36:06	Xinglong 60/90 cm Schmidt	160	80	0.18	Golden
	Dec 10, 2017	17:44:45-22:39:58	Xinglong 60 cm	30	325	0.17	Golden
	Feb 13, 2018	17:01:06-20:38:11	Xinglong 60 cm	25	208	0.20	Golden
	Mar 15, 2018	13:33:15-17:38:18	Xinglong 60 cm	139	83	0.17	Golden
WASP-24 b	Feb 22, 2016	17:57:38-22:08:20	Xinglong 60/90 cm Schmidt	80	124	0.26	Mediocre
WASP-28 b	Aug 19, 2014	15:16:26-18:06:52	Xinglong 60 cm	90	102	0.24	Mediocre
	Nov 14, 2017	11:05:38-15:30:57	Xinglong 60 cm	25	313	0.23	Mediocre
WASP-36 b	Jan 17, 2014	14:39:45-19:20:42	Xinglong 60 cm	60	264	0.29	Mediocre
	Jan 20, 2014	17:07:56-20:31:16	Xinglong 60 cm	60	188	0.36	Mediocre
	Jan 08, 2016	15:45:33-20:07:08	Xinglong 60 cm	40	337	0.22	Mediocre
	Feb 14, 2016	13:10:45-16:17:46	Xinglong 60 cm	150	69	0.21	Mediocre
	Feb 14, 2016	13:11:30-16:05:21	Xinglong 60/90 cm Schmidt	160	60	0.27	Mediocre
	Mar 02, 2016	12:01:44-14:19:24	Xinglong 60/90 cm Schmidt	250	33	0.47	Bad
	Apr 18, 2017	11:51:53-13:43:47	Xinglong 60 cm	50	92	0.29	Mediocre
WASP-37 b	Apr 13, 2016	15:50:06-20:26:14	Xinglong 60 cm	55	249	0.22	Mediocre

	Mar 26, 2017	16:37:22-19:50:35	Xinglong 60 cm	40	43	0.72	Bad
	Apr 20, 2017	17:13:06-20:38:04	Xinglong 60 cm	40	180	0.21	Mediocre
	Apr 20, 2018	15:02:26-17:08:44	Xinglong 60 cm	249	26	0.71	Bad
WASP-38 b	May 12, 2016	17:31:50-17:31:32	Xinglong 60 cm	12	1056	0.11	Golden
WASP-43 b	Jan 09, 2016	19:42:49-22:43:56	Xinglong 60 cm	45	219	0.2	Golden
	Jan 18, 2016	19:42:52-21:18:44	Xinglong 60 cm	150	38	0.15	Golden
	Feb 14, 2016	16:24:49-18:37:08	Xinglong 60 cm	150	51	0.27	Mediocre
	Feb 14, 2016	17:07:08-19:24:23	Xinglong 60/90 cm Schmidt	160	49	0.30	Mediocre
	Mar 29, 2016	13:55:29-16:27:52	Xinglong 60/90 cm Schmidt	60	126	0.22	Mediocre
	Nov 27, 2016	18:46:02-22:01:22	Xinglong 60/90 cm Schmidt	100	98	0.18	Golden
	Mar 13, 2017	13:01:32-16:40:18	Xinglong 60/90 cm Schmidt	90	118	0.30	Mediocre
	Mar 26, 2017	13:23:27-16:47:56	Xinglong 60/90 cm Schmidt	100	111	0.19	Golden
WASP-52 b	Jan 12, 2016	10:17:30-11:42:14	Xinglong 60 cm	100	49	0.32	Mediocre
	Oct 09, 2016	14:39:28-18:06:37	Xinglong 60/90 cm Schmidt	150	77	0.21	Mediocre
WASP-56 b	Feb 06, 2016	16:37:17-21:21:43	Xinglong 60 cm	45	333	0.13	Golden
	Feb 06, 2016	16:29:28-20:34:20	Xinglong 60/90 cm Schmidt	90	141	0.19	Golden
	Feb 14, 2017	15:44:07-21:09:08	Xinglong 60 cm	15	375	0.29	Mediocre
	Apr 29, 2017	12:31:36-17:37:16	Xinglong 60/90 cm Schmidt	140	104	0.24	Mediocre
	May 08, 2018	13:04:20-16:09:08	Xinglong 60 cm	249	45	0.23	Mediocre
WASP-60 b	Nov 11, 2013	10:38:18-15:40:59	Xinglong 60/90 cm Schmidt	100	125	0.12	Golden
WASP-65 b	Jan 21, 2014	15:45:12-21:41:30	Xinglong 60 cm	60	302	0.17	Golden
	Jan 21, 2014	14:29:34-20:47:23	Xinglong 60/90 cm Schmidt	80	180	0.17	Golden
	Jan 10, 2016	14:09:05-16:17:48	Xinglong 60 cm	30	213	0.12	Golden
	Nov 03, 2016	18:13:11-21:47:02	Xinglong 60 cm	20	271	0.21	Mediocre
	Dec 10, 2016	17:09:59-21:47:31	Xinglong 60 cm	20	373	0.16	Golden
	Jan 23, 2017	15:41:58-20:10:18	Xinglong 60 cm	22.5	323	0.16	Golden
	Apr 21, 2017	11:42:30-15:01:11	Xinglong 60 cm	40	134	0.18	Golden
WASP-80 b	May 12, 2016	18:38:09-19:57:34	Xinglong 60 cm	25	158	0.14	Golden
	Sep 12, 2017	11:49:35-14:50:21	Xinglong 60 cm	7	336	0.30	Mediocre
XO-2 b	Feb 17, 2017	12:36:48-17:02:57	Xinglong 60/90 cm Schmidt	40	217	0.12	Golden
XO-5 b	Jan 12, 2016	17:58:54-22:10:58	Xinglong 60 cm	100	132	0.24	Mediocre
	Jan 29, 2016	12:20:36-16:06:44	Xinglong 60/90 cm Schmidt	150	84	0.23	Mediocre

注: Exptime 是曝光时间, N_{data} 是曝光次数, pnr 是测光噪声比例。

Note: Exptime means exposure time, N_{data} is exposure counts, pnr is photometric noise rate.

表 2-2 TEMP 目标的测光数据

Table 2-2 Photometry of TEMP Targets

Planet	Time (BJD _{TDB})	Relative Flux	Uncertainty	Filter
GJ 436 b	2457456.053648	1.0030	0.0019	R
GJ 436 b	2457456.054238	1.0002	0.0019	R
GJ 436 b	2457456.054840	0.9999	0.0019	R
GJ 436 b	2457456.055430	0.9982	0.0019	R
GJ 436 b	2457456.056032	0.9986	0.0019	R
GJ 436 b	2457456.056622	1.0016	0.0019	R
GJ 436 b	2457456.057224	1.0004	0.0019	R
GJ 436 b	2457456.057815	1.0015	0.0019	R
GJ 436 b	2457456.058416	1.0013	0.0019	R
GJ 436 b	2457456.059018	0.9983	0.0019	R
...

注: 该表格的完整版本可以在 [Wang et al. \(2021a\)](#) 中找到。

Note: the full table is available in [Wang et al. \(2021a\)](#).

表 2-3 TEMP 目标的凌星中心时刻数据

Table 2-3 Transit mid-times of TEMP Targets

Planet	Epoch Number	T ₀	σ	O-C
		BJD _{TDB}	(s)	(s)
GJ 436 b	-42	2454222.616809	65.30	-7.04
GJ 436 b	-41	2454225.260917	71.90	11.29
GJ 436 b	-41	2454225.261190	66.25	34.86
GJ 436 b	-41	2454225.261356	68.20	49.19
GJ 436 b	-39	2454230.548755	70.76	15.32
GJ 436 b	-36	2454238.480865	202.79	51.88
GJ 436 b	-34	2454243.767054	51.72	-86.56
GJ 436 b	-33	2454246.410962	148.03	-85.43
GJ 436 b	-33	2454246.411611	152.83	-29.37
GJ 436 b	-31	2454251.700230	67.85	42.17
GJ 436 b	-20	2454280.782620	21.49	2.27
GJ 436 b	1181	2457456.101184	103.67	0.52
...

注: 该表格的完整版本可以在 [Wang et al. \(2021a\)](#) 中找到。

Note: the full table is available in [Wang et al. \(2021a\)](#).

表 2-4 本工作所得到的和前人工作给出的 TEMP 目标的系统参数

Table 2-4 System Parameters for TEMP Targets obtained in This Study are Compared with Literature Values.

Parameter	Units	Values	Previous values	Refs	Agreement (σ)
WASP-36					
Stellar Parameters:					
M_* ..	Mass (M_\odot)	$1.030^{+0.033}_{-0.036}$	1.081 ± 0.034	Mancini et al. (2016)	1.08
R_* ..	Radius (R_\odot)	$0.966^{+0.013}_{-0.014}$	0.985 ± 0.014	Mancini et al. (2016)	0.99
L_* ..	Luminosity (L_\odot)	$1.202^{+0.089}_{-0.081}$
ρ_* ..	Density (cgs)	$1.609^{+0.042}_{-0.036}$	1.595 ± 0.045	Mancini et al. (2016)	0.24
$\log g$..	Surface gravity (cgs)	$4.4807^{+0.0086}_{-0.0085}$	4.486 ± 0.009	Mancini et al. (2016)	0.43
T_{eff} ..	Effective Temperature (K)	6150^{+110}_{-100}	5959 ± 134	Mancini et al. (2016)	1.14
[Fe/H] ..	Metallicity (dex)	$-0.31^{+0.20}_{-0.27}$	-0.26 ± 0.1	Mancini et al. (2016)	0.17
[Fe/H] ₀ ..	Initial Metallicity	$-0.31^{+0.18}_{-0.23}$
Age ..	Age (Gyr)	$1.01^{+1.1}_{-0.68}$	$1.4^{+0.4}_{-0.3}$	Mancini et al. (2016)	0.34
EEP ..	Equal Evolutionary Phase	315^{+20}_{-34}
A_V ..	V-band extinction (mag)	$0.190^{+0.078}_{-0.079}$
σ_{SED} ..	SED photometry error scaling	$1.75^{+0.69}_{-0.43}$
ϖ ..	Parallax (mas)	2.640 ± 0.033	2.560 ± 0.035	Stassun et al. (2019)	1.66
d ..	Distance (pc)	$378.8^{+4.7}_{-4.6}$	$386.346^{+5.261}_{-5.123}$	Stassun et al. (2019)	1.09
Planetary Parameters:					
b					
P ..	Period (days)	$1.53736533 \pm 0.00000014$	$1.53736596 \pm 0.00000024$	Mancini et al. (2016)	2.27
R_p ..	Radius (R_J)	$1.270^{+0.018}_{-0.019}$	1.327 ± 0.021	Mancini et al. (2016)	2.06
M_p ..	Mass (M_J)	$2.281^{+0.070}_{-0.071}$	2.361 ± 0.070	Mancini et al. (2016)	0.81
T_C ..	Time of conjunction (BJD _{TDB})	$2455569.83795 \pm 0.00011$
T_0 ..	Optimal conjunction Time (BJD _{TDB}) ..	$2456678.278350^{+0.000047}_{-0.000046}$
a ..	Semi-major axis (AU)	$0.02635^{+0.00028}_{-0.00031}$	0.02677 ± 0.00028	Mancini et al. (2016)	1.06
i ..	Inclination (Degrees)	$83.42^{+0.12}_{-0.11}$	83.15 ± 0.13	Mancini et al. (2016)	1.59
e ..	Eccentricity	$0.0087^{+0.0097}_{-0.0061}$
ω_* ..	Argument of Periastron (Degrees) ..	-43 ± 89
T_{eq} ..	Equilibrium temperature (K)	1796^{+32}_{-31}	1733 ± 19	Mancini et al. (2016)	1.73
τ_{circ} ..	Tidal circularization timescale (Gyr) ..	$0.01638^{+0.00086}_{-0.00079}$
K ..	RV semi-amplitude (m/s)	$391.0^{+8.0}_{-8.1}$	391.500 ± 8.300	0.04	0.04
$\log K$..	Log of RV semi-amplitude	$2.5922^{+0.0088}_{-0.0091}$
R_p/R_* ..	Radius of planet in stellar radii	$0.13515^{+0.00027}_{-0.00028}$	0.13677 ± 0.00056	Mancini et al. (2016)	2.61
a/R_* ..	Semi-major axis in stellar radii	$5.862^{+0.050}_{-0.044}$	$5.8480^{+0.0552}_{-0.0542}$	Mancini et al. (2016)	0.2
δ ..	Transit depth (fraction)	$0.018266^{+0.000074}_{-0.000076}$
$Depth$..	Flux decrement at mid transit	$0.018266^{+0.000074}_{-0.000076}$	0.01916 ± 0.0002	Mancini et al. (2016)	4.19
τ ..	Ingress/egress transit duration (days) ..	$0.01577^{+0.00023}_{-0.00024}$
T_{14} ..	Total transit duration (days)	0.07732 ± 0.00019	0.07566 ± 0.00042	Smith et al. (2012)	3.6
T_{FWHM} ..	FWHM transit duration (days)	0.06155 ± 0.00019
b ..	Transit Impact parameter	$0.6736^{+0.0055}_{-0.0058}$	$0.657^{+0.029}_{-0.033}$	Maciejewski et al. (2016)	0.56
b_S ..	Eclipse impact parameter	$0.6699^{+0.0094}_{-0.012}$
τ_S ..	Ingress/egress eclipse duration (days) ..	$0.01561^{+0.00041}_{-0.00049}$
$T_{S,14}$..	Total eclipse duration (days)	$0.07716^{+0.00045}_{-0.00065}$
$T_{S,FWHM}$..	FWHM eclipse duration (days)	0.06150 ± 0.00023
$\delta_{S,3.6\mu m}$..	Blackbody eclipse depth at $3.6\mu m$ (ppm)	1988 ± 46
$\delta_{S,4.5\mu m}$..	Blackbody eclipse depth at $4.5\mu m$ (ppm)	2515 ± 46
ρ_p ..	Density (cgs)	$1.380^{+0.050}_{-0.047}$	1.260 ± 0.060	Mancini et al. (2016)	1.57
$\log g_p$..	Surface gravity	3.545 ± 0.012
Θ ..	Safronov Number	0.0918 ± 0.0023	0.0880 ± 0.0023	Mancini et al. (2016)	1.17
$\langle F \rangle$..	Incident Flux ($10^9 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$) ..	$2.36^{+0.17}_{-0.16}$
T_p ..	Time of Periastron (BJD _{TDB})	$2455569.28^{+0.39}_{-0.38}$
T_s ..	Time of eclipse (BJD _{TDB})	$2455570.6086^{+0.0094}_{-0.0054}$
T_A ..	Time of Ascending Node (BJD _{TDB}) ..	$2455569.4537^{+0.0049}_{-0.0047}$
T_D ..	Time of Descending Node (BJD _{TDB}) ..	$2455570.2242^{+0.0077}_{-0.0039}$
$e \cos \omega_*$	$0.0020^{+0.0095}_{-0.0055}$

$e \sin \omega_*$	$-0.0018^{+0.0056}_{-0.0097}$
$M_p \sin i$	Minimum mass (M_J)	$2.266^{+0.069}_{-0.071}$
M_p/M_*	Mass ratio	0.002116 ± 0.000050
d/R_* ...	Separation at mid transit	$5.873^{+0.10}_{-0.072}$
P_T ...	A priori non-grazing transit prob ...	$0.1473^{+0.0018}_{-0.0025}$
$P_{T,G}$...	A priori transit prob	$0.1933^{+0.0024}_{-0.0032}$
P_S ...	A priori non-grazing eclipse prob ...	$0.14798^{+0.00081}_{-0.00082}$
$P_{S,G}$...	A priori eclipse prob	0.1942 ± 0.0012
...

注：该表格的完整版本可以在 [Wang et al. \(2021a\)](#) 中找到。

Note: the full table is available in [Wang et al. \(2021a\)](#).

表 2-5 TMEP 中 39 个系外行星系统的恒星参数

Table 2-5 Stellar Parameters of 39 targets in TEMP

Star	M_*	R_*	$\log g$	T_{eff}	[Fe/H]
GJ 436	$0.426^{+0.027}_{-0.017}$	$0.415^{+0.014}_{-0.010}$	$4.833^{+0.013}_{-0.013}$	3370^{+94}_{-95}	$-0.46^{+0.31}_{-0.24}$
HAT-P-12	$0.719^{+0.016}_{-0.016}$	$0.7084^{+0.0095}_{-0.0095}$	$4.594^{+0.013}_{-0.013}$	4710^{+49}_{-49}	$-0.240^{+0.055}_{-0.062}$
HAT-P-16	$1.187^{+0.058}_{-0.065}$	$1.217^{+0.022}_{-0.022}$	$4.342^{+0.024}_{-0.027}$	6196^{+59}_{-71}	$0.11^{+0.15}_{-0.11}$
HAT-P-18	$0.750^{+0.015}_{-0.014}$	$0.7202^{+0.0095}_{-0.010}$	$4.599^{+0.013}_{-0.013}$	4835^{+39}_{-35}	$0.044^{+0.060}_{-0.051}$
HAT-P-19	$0.863^{+0.029}_{-0.025}$	$0.851^{+0.013}_{-0.013}$	$4.514^{+0.019}_{-0.017}$	5049^{+42}_{-65}	$0.283^{+0.081}_{-0.079}$
HAT-P-20	$0.764^{+0.042}_{-0.051}$	$0.685^{+0.016}_{-0.021}$	$4.650^{+0.018}_{-0.018}$	4622^{+57}_{-49}	$0.23^{+0.25}_{-0.24}$
HAT-P-22	$1.051^{+0.045}_{-0.050}$	$0.990^{+0.018}_{-0.018}$	$4.4687^{+0.0096}_{-0.013}$	5426^{+55}_{-52}	$0.325^{+0.084}_{-0.081}$
HAT-P-24	$1.228^{+0.035}_{-0.036}$	$1.372^{+0.018}_{-0.018}$	$4.252^{+0.017}_{-0.017}$	6488^{+70}_{-68}	$-0.056^{+0.050}_{-0.054}$
HAT-P-27	$0.907^{+0.040}_{-0.036}$	$0.896^{+0.015}_{-0.015}$	$4.491^{+0.024}_{-0.023}$	5162^{+41}_{-41}	$0.210^{+0.097}_{-0.097}$
HAT-P-3	$0.960^{+0.031}_{-0.034}$	$0.8627^{+0.0090}_{-0.012}$	$4.550^{+0.015}_{-0.016}$	5133^{+36}_{-31}	$0.332^{+0.074}_{-0.073}$
HAT-P-30	$1.314^{+0.053}_{-0.056}$	$1.381^{+0.020}_{-0.022}$	$4.277^{+0.019}_{-0.021}$	6216^{+56}_{-48}	$0.155^{+0.077}_{-0.079}$
HAT-P-37	$0.953^{+0.035}_{-0.040}$	$0.8635^{+0.0072}_{-0.0070}$	$4.545^{+0.016}_{-0.019}$	5479^{+37}_{-52}	$0.22^{+0.12}_{-0.12}$
HAT-P-39	$1.414^{+0.039}_{-0.039}$	$1.723^{+0.028}_{-0.028}$	$4.116^{+0.017}_{-0.016}$	6412^{+56}_{-58}	$0.118^{+0.074}_{-0.066}$
HAT-P-4	$1.260^{+0.043}_{-0.042}$	$1.573^{+0.015}_{-0.015}$	$4.145^{+0.015}_{-0.015}$	5927^{+57}_{-47}	$0.258^{+0.070}_{-0.074}$
HAT-P-42	$1.145^{+0.052}_{-0.052}$	$1.27^{+0.11}_{-0.11}$	$4.288^{+0.073}_{-0.067}$	5773^{+45}_{-40}	$0.312^{+0.072}_{-0.074}$
HAT-P-43	$1.042^{+0.036}_{-0.035}$	$1.076^{+0.025}_{-0.025}$	$4.392^{+0.026}_{-0.023}$	5656^{+37}_{-29}	$0.267^{+0.061}_{-0.064}$
HAT-P-5	$1.056^{+0.067}_{-0.067}$	$1.085^{+0.012}_{-0.012}$	$4.391^{+0.029}_{-0.031}$	5844^{+54}_{-52}	$0.14^{+0.18}_{-0.15}$
HAT-P-52	$0.891^{+0.023}_{-0.022}$	$0.886^{+0.031}_{-0.030}$	$4.492^{+0.030}_{-0.029}$	5144^{+47}_{-48}	$0.319^{+0.076}_{-0.078}$
HAT-P-53	$1.078^{+0.036}_{-0.037}$	$1.127^{+0.039}_{-0.036}$	$4.367^{+0.030}_{-0.032}$	5942^{+36}_{-40}	$-0.001^{+0.077}_{-0.064}$
HAT-P-54	$0.706^{+0.027}_{-0.025}$	$0.6703^{+0.0098}_{-0.0097}$	$4.635^{+0.019}_{-0.018}$	4369^{+62}_{-71}	$0.157^{+0.076}_{-0.075}$
HAT-P-56	$1.319^{+0.033}_{-0.033}$	$1.429^{+0.024}_{-0.023}$	$4.248^{+0.017}_{-0.018}$	6564^{+47}_{-46}	$0.11^{+0.14}_{-0.10}$
HAT-P-8	$1.270^{+0.030}_{-0.030}$	$1.491^{+0.016}_{-0.014}$	$4.1956^{+0.0095}_{-0.013}$	6410^{+140}_{-140}	$-0.018^{+0.072}_{-0.056}$
KELT-3	$1.301^{+0.046}_{-0.046}$	$1.583^{+0.036}_{-0.036}$	$4.153^{+0.024}_{-0.024}$	6306^{+36}_{-35}	$0.030^{+0.072}_{-0.066}$
Qatar-4	$0.856^{+0.029}_{-0.030}$	$0.800^{+0.015}_{-0.014}$	$4.565^{+0.018}_{-0.020}$	5174^{+33}_{-35}	$0.095^{+0.076}_{-0.088}$
TrES-1	$0.886^{+0.021}_{-0.022}$	$0.8200^{+0.0079}_{-0.0078}$	$4.5577^{+0.0096}_{-0.010}$	5316^{+43}_{-42}	$0.017^{+0.045}_{-0.041}$
WASP-104	$1.003^{+0.030}_{-0.032}$	$0.9277^{+0.0089}_{-0.0085}$	$4.504^{+0.014}_{-0.016}$	5392^{+69}_{-73}	$0.348^{+0.076}_{-0.076}$
WASP-24	$1.177^{+0.025}_{-0.025}$	$1.312^{+0.019}_{-0.020}$	$4.273^{+0.015}_{-0.014}$	6489^{+89}_{-74}	$-0.37^{+0.12}_{-0.18}$
WASP-28	$1.082^{+0.068}_{-0.071}$	$1.132^{+0.019}_{-0.018}$	$4.365^{+0.027}_{-0.033}$	5976^{+54}_{-60}	$0.06^{+0.17}_{-0.12}$
WASP-36	$1.030^{+0.033}_{-0.036}$	$0.966^{+0.013}_{-0.014}$	$4.4807^{+0.0086}_{-0.0085}$	6150^{+110}_{-100}	$-0.31^{+0.20}_{-0.27}$
WASP-37	$0.926^{+0.039}_{-0.034}$	$1.071^{+0.019}_{-0.018}$	$4.346^{+0.023}_{-0.021}$	5795^{+69}_{-64}	$-0.098^{+0.050}_{-0.060}$
WASP-38	$1.200^{+0.029}_{-0.029}$	$1.368^{+0.014}_{-0.014}$	$4.2450^{+0.0081}_{-0.0083}$	6168^{+57}_{-58}	$-0.001^{+0.065}_{-0.064}$
WASP-43	$0.723^{+0.028}_{-0.031}$	$0.6747^{+0.0086}_{-0.0097}$	$4.639^{+0.010}_{-0.010}$	4286^{+34}_{-40}	$0.28^{+0.19}_{-0.21}$
WASP-52	$0.886^{+0.039}_{-0.043}$	$0.825^{+0.012}_{-0.012}$	$4.553^{+0.019}_{-0.024}$	5070^{+35}_{-40}	$0.37^{+0.13}_{-0.17}$
WASP-56	$1.092^{+0.023}_{-0.023}$	$1.129^{+0.021}_{-0.020}$	$4.371^{+0.018}_{-0.018}$	5646^{+49}_{-48}	$0.160^{+0.057}_{-0.057}$
WASP-60	$1.082^{+0.032}_{-0.031}$	$1.384^{+0.039}_{-0.037}$	$4.190^{+0.026}_{-0.027}$	5926^{+77}_{-76}	$0.023^{+0.067}_{-0.055}$
WASP-65	$1.098^{+0.046}_{-0.052}$	$1.056^{+0.017}_{-0.018}$	$4.430^{+0.016}_{-0.015}$	5749^{+45}_{-48}	$0.447^{+0.086}_{-0.13}$
WASP-80	$0.614^{+0.014}_{-0.012}$	$0.6023^{+0.0066}_{-0.0052}$	$4.6672^{+0.0092}_{-0.011}$	4158^{+41}_{-49}	$-0.011^{+0.034}_{-0.017}$
XO-2	$0.967^{+0.029}_{-0.028}$	$1.004^{+0.013}_{-0.013}$	$4.420^{+0.017}_{-0.016}$	5360^{+50}_{-50}	$0.436^{+0.043}_{-0.046}$
XO-5	$1.053^{+0.064}_{-0.062}$	$1.065^{+0.026}_{-0.026}$	$4.406^{+0.029}_{-0.029}$	5515^{+69}_{-68}	$0.447^{+0.079}_{-0.12}$

表 2-6 TMEP 中 39 个系外行星系统的行星参数
Table 2-6 Planetary Parameters of 39 targets in TMEP

Planet	<i>P</i>	<i>T</i> ₀	<i>e</i>	<i>R</i> _p / <i>R</i> _*	<i>a</i> / <i>R</i> _*	<i>T</i> ₁₄	<i>R</i> _p	<i>M</i> _p
Gl 436 b	2.64389565 ^{+0.0000055} _{-0.0000054}	2454346.879828 ^{+0.000099} _{-0.000100}	0.1684 ^{+0.0099} _{-0.0096}	0.08536 ^{+0.00076} _{-0.00064}	14.60 ^{+0.25} _{-0.25}	0.04236 ^{+0.00040} _{-0.00038}	0.34443 ^{+0.014} _{-0.0098}	0.0659 ^{+0.029} _{-0.020}
HAT-P-12 b	3.21305856 ^{+0.0000017} _{-0.0000017}	2456003.233217 ^{+0.000059} _{-0.000059}	0.018 ^{+0.018} _{-0.012}	0.14005 ^{+0.00057} _{-0.00059}	11.59 ^{+0.16} _{-0.15}	0.09771 ^{+0.00032} _{-0.00032}	0.965 ^{+0.015} _{-0.015}	0.2070 ^{+0.077} _{-0.076}
HAT-P-16 b	2.77596752 ^{+0.0000091} _{-0.0000094}	2455238.56602 ^{+0.00026} _{-0.00027}	0.0400 ^{+0.0030} _{-0.0031}	0.10615 ^{+0.00081} _{-0.00082}	7.24 ^{+0.16} _{-0.17}	0.12804 ^{+0.00092} _{-0.00086}	1.257 ^{+0.028} _{-0.028}	4.13 ^{+0.13} _{-0.15}
HAT-P-18 b	5.50802919 ^{+0.0000068} _{-0.0000069}	2455144.64858 ^{+0.00013} _{-0.00014}	0.0064 ^{+0.0082} _{-0.0046}	0.13826 ^{+0.00092} _{-0.00096}	16.56 ^{+0.24} _{-0.22}	0.11347 ^{+0.00059} _{-0.00059}	0.969 ^{+0.017} _{-0.018}	0.196 ^{+0.012} _{-0.013}
HAT-P-19 b	4.00878735 ^{+0.0000072} _{-0.0000073}	2455528.49236 ^{+0.00019} _{-0.00019}	0.021 ^{+0.024} _{-0.015}	0.1386 ^{+0.0013} _{-0.0013}	11.88 ^{+0.22} _{-0.19}	0.11858 ^{+0.00097} _{-0.00092}	1.148 ^{+0.023} _{-0.023}	0.300 ^{+0.016} _{-0.016}
HAT-P-20 b	2.87531801 ^{+0.0000021} _{-0.0000021}	2456374.820509 ^{+0.000083} _{-0.000084}	0.0157 ^{+0.0027} _{-0.0025}	0.1351 ^{+0.0010} _{-0.0010}	11.40 ^{+0.21} _{-0.19}	0.07780 ^{+0.00052} _{-0.00054}	0.900 ^{+0.025} _{-0.031}	7.37 ^{+0.27} _{-0.33}
HAT-P-22 b	3.21223369 ^{+0.0000043} _{-0.0000043}	2455559.81843 ^{+0.00015} _{-0.00015}	0.0049 ^{+0.0034} _{-0.0032}	0.09883 ^{+0.00064} _{-0.00061}	9.426 ^{+0.075} _{-0.12}	0.11837 ^{+0.00061} _{-0.00057}	0.952 ^{+0.020} _{-0.018}	2.360 ^{+0.067} _{-0.076}
HAT-P-24 b	3.35524419 ^{+0.0000076} _{-0.0000075}	2455626.31703 ^{+0.00021} _{-0.00021}	0.00078 ^{+0.0012} _{-0.00058}	0.09743 ^{+0.00056} _{-0.00056}	7.36 ^{+0.13} _{-0.12}	0.15513 ^{+0.00072} _{-0.00070}	1.301 ^{+0.021} _{-0.021}	0.742 ^{+0.024} _{-0.025}
HAT-P-27 b	3.03957984 ^{+0.0000089} _{-0.0000090}	2455483.89831 ^{+0.00017} _{-0.00017}	0.057 ^{+0.048} _{-0.038}	0.1194 ^{+0.0023} _{-0.0022}	9.54 ^{+0.21} _{-0.20}	0.07718 ^{+0.0015} _{-0.0017}	1.041 ^{+0.027} _{-0.026}	0.645 ^{+0.036} _{-0.036}
HAT-P-3 b	2.89973755 ^{+0.0000018} _{-0.0000018}	2455874.509791 ^{+0.00082} _{-0.00082}	0.019 ^{+0.014} _{-0.010}	0.10995 ^{+0.00056} _{-0.00057}	9.80 ^{+0.14} _{-0.14}	0.08729 ^{+0.00041} _{-0.00041}	0.923 ^{+0.012} _{-0.015}	0.618 ^{+0.017} _{-0.018}
HAT-P-30 b	2.81060217 ^{+0.0000059} _{-0.0000059}	2456131.01029 ^{+0.00026} _{-0.00026}	0.020 ^{+0.019} _{-0.014}	0.1151 ^{+0.0011} _{-0.0011}	6.65 ^{+0.12} _{-0.12}	0.0935 ^{+0.0010} _{-0.0010}	1.546 ^{+0.030} _{-0.030}	0.766 ^{+0.027} _{-0.028}
HAT-P-37 b	2.79744006 ^{+0.0000062} _{-0.0000062}	2455983.43142 ^{+0.00016} _{-0.00016}	0.024 ^{+0.017} _{-0.016}	0.1350 ^{+0.0011} _{-0.0011}	9.52 ^{+0.13} _{-0.15}	0.09615 ^{+0.00073} _{-0.00071}	1.135 ^{+0.014} _{-0.014}	1.18 ^{+0.012} _{-0.012}
HAT-P-39 b	3.5438762 ^{+0.0000011} _{-0.0000011}	2455587.94585 ^{+0.00029} _{-0.00029}	0.0052 ^{+0.0091} _{-0.0040}	0.10092 ^{+0.00069} _{-0.00071}	6.37 ^{+0.11} _{-0.11}	0.1782 ^{+0.0010} _{-0.0010}	1.692 ^{+0.034} _{-0.034}	0.578 ^{+0.078} _{-0.076}
HAT-P-4 b	3.0565240 ^{+0.0000011} _{-0.0000011}	2454499.50645 ^{+0.00032} _{-0.00031}	0.0140 ^{+0.014} _{-0.0095}	0.08362 ^{+0.00061} _{-0.00059}	6.085 ^{+0.077} _{-0.078}	0.17423 ^{+0.00090} _{-0.00091}	1.280 ^{+0.016} _{-0.015}	0.676 ^{+0.025} _{-0.025}
HAT-P-42 b	4.6418374 ^{+0.0000050} _{-0.0000050}	2456110.34894 ^{+0.00056} _{-0.00057}	0.111 ^{+0.12} _{-0.078}	0.0842 ^{+0.0020} _{-0.0016}	9.64 ^{+0.85} _{-0.72}	0.1654 ^{+0.0038} _{-0.0029}	1.040 ^{+0.10} _{-0.089}	0.83 ^{+0.17} _{-0.20}
HAT-P-43 b	3.332680324 ^{+0.0000097} _{-0.0000096}	2456247.32242 ^{+0.00019} _{-0.00029}	0.082 ^{+0.19} _{-0.060}	0.11900 ^{+0.0011} _{-0.00083}	8.84 ^{+0.24} _{-0.21}	0.13551 ^{+0.0011} _{-0.00084}	1.246 ^{+0.031} _{-0.030}	0.34 ^{+0.36} _{-0.34}
HAT-P-5 b	2.78847362 ^{+0.0000037} _{-0.0000037}	2455348.80101 ^{+0.00010} _{-0.00010}	0.027 ^{+0.025} _{-0.019}	0.11399 ^{+0.00081} _{-0.00086}	7.82 ^{+0.18} _{-0.19}	0.12227 ^{+0.00065} _{-0.00066}	1.204 ^{+0.017} _{-0.017}	0.989 ^{+0.053} _{-0.053}
HAT-P-52 b	2.7535988 ^{+0.0000014} _{-0.0000014}	2455995.29102 ^{+0.00031} _{-0.00031}	0.027 ^{+0.040} _{-0.019}	0.1149 ^{+0.0016} _{-0.0017}	8.98 ^{+0.31} _{-0.29}	0.1006 ^{+0.0012} _{-0.0012}	0.991 ^{+0.043} _{-0.042}	0.812 ^{+0.057} _{-0.069}
HAT-P-53 b	1.96162393 ^{+0.0000070} _{-0.0000066}	2456270.81371 ^{+0.00032} _{-0.00032}	0.063 ^{+0.052} _{-0.039}	0.1117 ^{+0.0013} _{-0.0011}	6.00 ^{+0.20} _{-0.21}	0.11161 ^{+0.0013} _{-0.0011}	1.224 ^{+0.049} _{-0.049}	1.467 ^{+0.076} _{-0.076}
HAT-P-54 b	3.79985429 ^{+0.0000082} _{-0.0000083}	2456656.49059 ^{+0.00015} _{-0.00014}	0.078 ^{+0.027} _{-0.024}	0.15675 ^{+0.00078} _{-0.00080}	13.62 ^{+0.24} _{-0.23}	0.07493 ^{+0.00057} _{-0.00056}	1.022 ^{+0.016} _{-0.016}	0.802 ^{+0.098} _{-0.098}
HAT-P-55 b	2.79083132 ^{+0.0000010} _{-0.0000011}	2447653.65348 ^{+0.00055} _{-0.00058}	0.062 ^{+0.063} _{-0.042}	0.1009 ^{+0.0014} _{-0.0014}	6.41 ^{+0.12} _{-0.12}	0.0928 ^{+0.0014} _{-0.0014}	1.403 ^{+0.031} _{-0.031}	1.81 ^{+0.24} _{-0.24}
HAT-P-8 b	3.07634338 ^{+0.0000054} _{-0.0000054}	2455769.73201 ^{+0.00013} _{-0.00013}	0.092 ^{+0.011} _{-0.0066}	0.09192 ^{+0.00034} _{-0.00034}	6.473 ^{+0.057} _{-0.083}	0.16467 ^{+0.00044} _{-0.00044}	1.334 ^{+0.030} _{-0.032}	1.342 ^{+0.032} _{-0.032}

续表

KELT-3 b	$2.7033927^{+0.0000014}_{-0.0000013}$	$2456426.28703^{+0.000045}_{-0.000044}$	$0.041^{+0.041}_{-0.029}$	$0.0947^{+0.0012}_{-0.0012}$	$5.64^{+0.14}_{-0.14}$	$0.1320^{+0.0017}_{-0.0017}$	$1.458^{+0.042}_{-0.041}$	$1.56^{+0.12}_{-0.11}$
Qatar-4 b	$1.80536494^{+0.0000092}_{-0.0000093}$	$2457899.55166^{+0.000020}_{-0.000020}$	$0.046^{+0.064}_{-0.034}$	$0.13911^{+0.010}_{-0.0096}$	$7.42^{+0.13}_{-0.14}$	$0.08753^{+0.00069}_{-0.00064}$	$1.083^{+0.022}_{-0.021}$	$5.26^{+0.22}_{-0.21}$
TrES-1 b	$3.03006967^{+0.0000011}_{-0.0000011}$	$2455083.630963^{+0.000067}_{-0.000068}$	$0.0103^{+0.011}_{-0.0072}$	$0.13542^{+0.0052}_{-0.0049}$	$10.322^{+0.094}_{-0.095}$	$0.10466^{+0.0032}_{-0.0030}$	$1.081^{+0.012}_{-0.012}$	$0.698^{+0.026}_{-0.025}$
WASP-104 b	$1.75540646^{+0.0000028}_{-0.0000028}$	$2456788.79015^{+0.00011}_{-0.00011}$	$0.014^{+0.019}_{-0.010}$	$0.12117^{+0.0070}_{-0.0068}$	$6.607^{+0.086}_{-0.090}$	$0.07515^{+0.0054}_{-0.0049}$	$1.094^{+0.013}_{-0.013}$	$1.205^{+0.049}_{-0.049}$
WASP-24 b	$2.34122303^{+0.0000060}_{-0.0000059}$	$2455781.40485^{+0.00013}_{-0.00013}$	$0.0123^{+0.013}_{-0.0086}$	$0.10158^{+0.0042}_{-0.0044}$	$5.971^{+0.093}_{-0.088}$	$0.11418^{+0.0057}_{-0.0057}$	$1.297^{+0.022}_{-0.022}$	$1.082^{+0.027}_{-0.028}$
WASP-28 b	$3.40883577^{+0.0000043}_{-0.0000043}$	$2455754.00767^{+0.00031}_{-0.00032}$	$0.020^{+0.023}_{-0.014}$	$0.1198^{+0.012}_{-0.011}$	$8.65^{+0.21}_{-0.24}$	$0.1379^{+0.013}_{-0.011}$	$1.319^{+0.028}_{-0.026}$	$0.948^{+0.051}_{-0.051}$
WASP-36 b	$1.53736533^{+0.0000014}_{-0.0000014}$	$2456678.27835^{+0.000047}_{-0.000046}$	$0.0087^{+0.0097}_{-0.0061}$	$0.13515^{+0.0027}_{-0.0028}$	$5.862^{+0.050}_{-0.044}$	$0.07732^{+0.0019}_{-0.0019}$	$1.270^{+0.018}_{-0.019}$	$2.281^{+0.070}_{-0.071}$
WASP-37 b	$3.5774729^{+0.0000025}_{-0.0000025}$	$2458096.85691^{+0.00019}_{-0.00019}$	$0.069^{+0.025}_{-0.028}$	$0.11713^{+0.010}_{-0.0095}$	$8.97^{+0.19}_{-0.18}$	$0.13107^{+0.0010}_{-0.0010}$	$1.220^{+0.025}_{-0.024}$	$1.77^{+0.12}_{-0.12}$
WASP-38 b	$6.8718942^{+0.0000037}_{-0.0000036}$	$2456332.34464^{+0.00051}_{-0.00052}$	$0.0272^{+0.0042}_{-0.0040}$	$0.08518^{+0.0062}_{-0.0062}$	$11.824^{+0.094}_{-0.096}$	$0.2028^{+0.013}_{-0.013}$	$1.134^{+0.015}_{-0.015}$	$2.597^{+0.045}_{-0.045}$
WASP-43 b	$0.813474229^{+0.0000047}_{-0.0000047}$	$2455793.247658^{+0.000031}_{-0.000031}$	$0.0059^{+0.0053}_{-0.0039}$	$0.15978^{+0.0044}_{-0.0045}$	$4.883^{+0.041}_{-0.038}$	$0.05166^{+0.0016}_{-0.0016}$	$1.049^{+0.014}_{-0.016}$	$2.054^{+0.055}_{-0.060}$
WASP-52 b	$1.74978344^{+0.0000032}_{-0.0000032}$	$2456960.785928^{+0.000061}_{-0.000060}$	$0.040^{+0.022}_{-0.023}$	$0.16319^{+0.0059}_{-0.0061}$	$7.12^{+0.12}_{-0.15}$	$0.07783^{+0.0023}_{-0.0023}$	$1.310^{+0.020}_{-0.019}$	$0.458^{+0.027}_{-0.026}$
WASP-56 b	$4.6170605^{+0.0000028}_{-0.0000028}$	$2457148.23869^{+0.00046}_{-0.00046}$	$0.138^{+0.062}_{-0.060}$	$0.1039^{+0.021}_{-0.022}$	$10.65^{+0.21}_{-0.21}$	$0.1509^{+0.0029}_{-0.0027}$	$1.141^{+0.032}_{-0.033}$	$0.588^{+0.040}_{-0.040}$
WASP-60 b	$4.3050032^{+0.0000055}_{-0.0000055}$	$2456853.41727^{+0.00029}_{-0.00029}$	$0.038^{+0.042}_{-0.026}$	$0.08982^{+0.0081}_{-0.0093}$	$8.26^{+0.24}_{-0.24}$	$0.1497^{+0.013}_{-0.014}$	$1.209^{+0.039}_{-0.038}$	$0.506^{+0.052}_{-0.051}$
WASP-65 b	$2.311142098^{+0.0000039}_{-0.0000039}$	$2456545.23453^{+0.00011}_{-0.00011}$	$0.0126^{+0.014}_{-0.0089}$	$0.11334^{+0.0047}_{-0.0045}$	$7.174^{+0.11}_{-0.080}$	$0.11507^{+0.0038}_{-0.0037}$	$1.165^{+0.020}_{-0.020}$	$1.719^{+0.062}_{-0.064}$
WASP-80 b	$3.06785314^{+0.0000044}_{-0.0000043}$	$2456416.864196^{+0.000025}_{-0.000025}$	$0.0107^{+0.011}_{-0.0075}$	$0.17212^{+0.0042}_{-0.0043}$	$12.55^{+0.11}_{-0.13}$	$0.08901^{+0.0015}_{-0.0015}$	$1.0091^{+0.011}_{-0.0095}$	$0.571^{+0.020}_{-0.020}$
XO-2 b	$2.61585881^{+0.0000029}_{-0.0000029}$	$2454762.4765^{+0.00012}_{-0.00012}$	$0.0095^{+0.0092}_{-0.0065}$	$0.10372^{+0.0062}_{-0.0064}$	$7.87^{+0.13}_{-0.12}$	$0.11294^{+0.0048}_{-0.0047}$	$1.013^{+0.018}_{-0.017}$	$0.589^{+0.015}_{-0.014}$
XO-5 b	$4.18775571^{+0.0000049}_{-0.0000049}$	$2454510.79378^{+0.00024}_{-0.00024}$	$0.0101^{+0.012}_{-0.0072}$	$0.1022^{+0.010}_{-0.010}$	$10.45^{+0.29}_{-0.28}$	$0.12765^{+0.0083}_{-0.0073}$	$1.058^{+0.033}_{-0.032}$	$1.188^{+0.053}_{-0.052}$

第3章 系外行星系统中恒星倾角的研究

3.1 引言

尽管热木星是系外行星中最容易被观测的一类，但是截至目前，它们的起源机制仍不清晰。经过总结近 20 年来对系外行星的观测经验，人们发现了热木星的两个主要的动力学模式。第一个是大多数热木星没有临近的行星，第二个是有相当一部分的热木星系统中主星的自转轴和轨道的公转轴的夹角（自转-公转角，或者恒星倾角）显著不为 0° (Winn et al., 2015)。自转-公转角接近 0° 度，我们则称该系统为 *aligned* 的系统，相反地，如果自转-公转角比较大，则称该系统为 *misaligned*。

在热木星系统的形成过程中，热木星在进行高偏心率迁移的过程中会和临近行星发生强烈的相互作用，从而使得热木星和临近的行星碰撞或者逃逸。在迁移过程中，系统的角动量守恒要求行星轨道角动量和恒星自转角动量方向要发生变化。高偏心率迁移天然地会产生上述两种动力学模式。因此，高偏心率迁移通常被认为是热木星迁移到当前位置的首要机制 (Dawson et al., 2018)。

根据该机制的预测，热木星有临近行星的同时其系统的恒星倾角应该远远偏离 0° 。系统内同时存在热木星和临近的行星说明该系统的形成和演化过程比较平静。因此，有一个或者多个临近行星的存在的热木星系统的应该有着较小的恒星倾角。

从这个角度看，作为 4 个已知的有热木星存在的多行星系统之一（其他三个为：WASP-47, Becker et al. 2015; Kepler-730, Cañas et al. 2019; TOI-1130, Huang et al. 2020a），WASP-148 有着特殊的重要意义。WASP-148 是一颗 G 型星，有效温度 (T_{eff}) 为 5437 ± 21 K，质量 (M_*) 为 $0.97^{+0.056}_{-0.057} M_\odot$ 。两颗行星的公转周期分别为 8.803544 ± 0.000021 天和 34.527 ± 0.024 天 (Hébrard et al., 2020)。内部的行星 WASP-148 b 的质量 (M_b) 为 $0.354^{+0.055}_{-0.050} M_J$ ，可以凌星；而外部的行星 WASP-148 c 的最小质量 ($M_c \sin i$) 为 $0.408^{+0.127}_{-0.087} M_J$ ，但是不凌星。Maciejewski et al. (2020) 对视向速度和 TTV 数据的联合分析表明 WASP-148 b 和 WASP-148 c 可能共面。

作为长周期行星系统中恒星倾角测量计划 (Stellar Obliquities in Long-period Exoplanet Systems, SOLES) 的第二个科学成果，我们通过观测两次独立凌星事件的 Rossiter-McLaughlin (R-M: Rossiter 1924; McLaughlin 1924) 效应从而确定了 WASP-148 的自转-公转角在天空上的投影（记作 λ ）， $\lambda = -8.3^{+8.7}_{-9.7}^\circ$ 。本次对 WASP-148 的恒星倾角的测量是继 WASP-47 之后的第二次对于含有热木星的多行星系统的主星的倾角测量 (Sanchis-Ojeda et al., 2015)。我们所进行的两次 R-M 测量分别是使用 WIYN 天文台 3.5 m 望远镜上的 NEID 光谱仪 (Schwab et al., 2016) 和 Keck 天文台 10 m 望远镜上的 HIRES 光谱仪完成的。我们所测量的恒星倾角为研究热木星的没有临近行星这一性质和其恒星倾角之间的关系提供

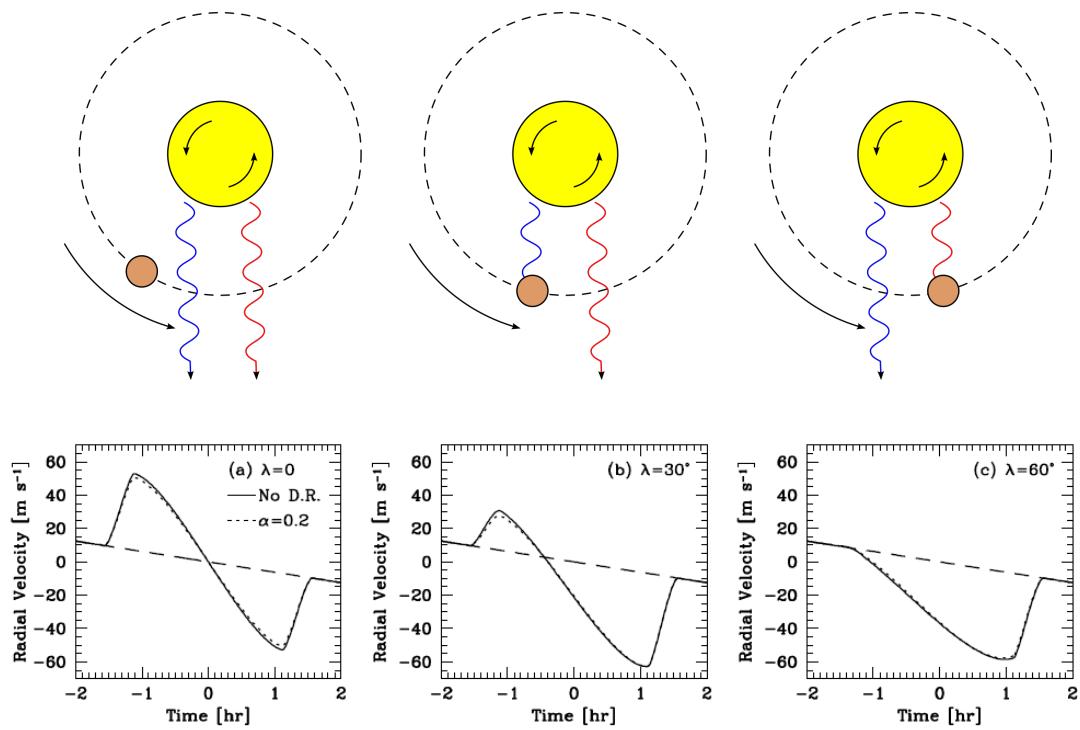


图 3-1 Rossiter-McLaughlin 效应示意图。上部分取自维基百科 Rossiter-McLaughlin 效应词条，下部分取自 [Gaudi et al. \(2007\)](#)。

Figure 3-1 Schematic diagram for Rossiter-McLaughlin effect. Credit: [Gaudi et al. \(2007\)](#) and [definition of Rossiter-McLaughlin effect in Wikipedia](#).

了可靠的观测数据。

3.2 Rossiter-McLaughlin 效应

由于多普勒效应，旋转的恒星转向观测者的一侧显示蓝移信号，而远离观测者的一侧显示红移信号。当我们观测它的时候，由于来自两侧的光同时进入望远镜，两种信号正好相互抵消。但是，当有行星进行凌星的时候，我们会观测到由于行星的扰动产生的信号。假设恒星自转和行星公转的方向都为逆时针，如图 3-1 上部分所示。首先，当行星穿过恒星产生蓝移信号一侧的时候，行星会遮挡住部分蓝移信号，因此观测者接收到的光谱显示红移信号。之后，行星穿过恒星的对称轴，来到恒星产生红移信号的一侧，此时，光谱显示蓝移信号。在凌星过程中，光谱显示出的这种微小的异常，我们称之为 Rossiter-McLaughlin 或者 R-M 效应。

R-M 效应可以很好地反映在 RV 信号上，如图 3-1 下部分所示。R-M 效应在 RVs 上的体现为在凌星时间段内的 RVs 的反常。反常的大小，即 R-M 效应的振幅可以通过下式进行估算，

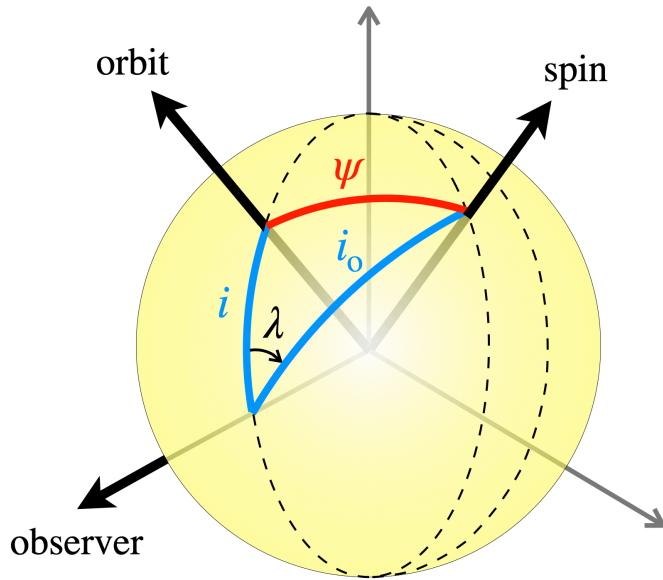


图 3-2 恒星自转转轴和行星公转轴夹角及其投影的几何关系示意图。图片取自 [Albrecht et al. \(2021\)](#)。

Figure 3-2 Schematic diagram for spin-orbit angle. Credit: [Albrecht et al. \(2021\)](#).

$$RV_{RM} \approx 0.7 \sqrt{1 - b^2} \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 v \sin i_* \quad (3-1)$$

其中 RV_{RM} 为 R-M 效应的振幅, R_p 和 R_* 分别是行星和恒星的半径, $v \sin i_*$ 是恒星自转速度在天空上的投影, 其中 b 为碰撞参数, 其表达式为,

$$b = \cos i \frac{a}{R_*} \quad (3-2)$$

其中 i 为行星的轨道倾角, a 为行星轨道的半长轴。除了振幅以外, 恒星自转轴和行星公转轴在天空上的投影的角度 (λ) 也是另一用于描述 R-M 效应的重要参数。如图 3-1 所示, λ 为 0 的时候, R-M 的形状为中心对称, 非 0 的 λ 则产生非对称的形状。根据 λ 和形状的关系, 我们可以求出 λ 的值。 λ 和恒星自转轴和行星公转轴之间的夹角 (ψ) 的关系如图 3-2 所示。 ψ 的计算公式 ([Albrecht et al., 2021](#)) 为,

$$\cos \psi = \sin i \sin i_0 \cos \lambda + \cos i \cos i_0 \quad (3-3)$$

其中 i 是行星公转轨道的倾角, i_0 是恒星自转轴和我们视线的夹角。如果我们同时知道恒星自转速度在天空上的投影 $v \sin i_*$ 、恒星的半径和自转周期, 那么我们就可以得到 ψ 。但是对于大部分恒星, 我们很难知道它们的 i_* (即图 3-2 中的 i_0), 因此 ψ 往往无法精确求得。好在 λ 可以为 ψ 提供下限的限制, 因此, 我们可以通过 λ 来研究恒星倾角的分布, 从而为行星系统的形成提供观测和统计支持。

3.3 观测和数据的处理

3.3.1 WIYN/NEID 的观测

在 2021 年 4 月 26 日 UT 05:07 到 11:40，我们使用 WIYN 天文台 3.5m 望远镜配备的 NEID 光谱仪 ($R \sim 110,000$, [Schwab et al., 2016](#)) 对 WASP-148 的 R-M 效应进行了观测。在此次观测中，单次曝光时间为 900 秒，总计获得 24 条光谱。当晚入夜时有高层卷云，实际观测开始后 30 分钟天空开始放晴。观测过程中，视宁度浮动范围为 $0.^{\circ}9-1.^{\circ}3$ ，大气质量从 1.0 逐渐变化到 2.0。对于此次观测获得的 NEID 光谱而言，在 5500 \AA 的典型信噪比为 16 / 像元。

因为相对于 NEID 的法布里-珀罗标准具校准器的观测能力而言，WASP-148 比较暗，所以我们没有进行同步校正。但是，我们在正式的 R-M 观测前后分别获取了一幅标准具图像。此外，我们还获取了标准的 NEID 的早上和下午的波长定标序列，包括钍氩灯、标准具和激光频率梳数据。在 R-M 观测的中途（凌星事件发生之前，UT 6:03-6:16），我们获取了一组即时定标数据，包括一副标准具图像和三幅激光频率梳图像。

我们使用 NEID 数据批处理程序¹来处理 NEID 数据，通过 NExSci NEID Archive 下载 NEID 的一维光谱数据。为了提取准确的 RVs 数据，我们修改了基于模版匹配算法的 SERVAL (SpEctrum Radial Velocity anaLyzer, [Zechmeister et al., 2018](#)) 程序。这个版本的程序 ([Stefansson et al., 2022](#)) 由该程序的原始版本和适用于宜居带行星搜寻者光谱仪 (Habitable-zone Planet Finder spectrograph, HPF) 的定制版本发展而来 ([Stefansson et al., 2020](#))。由于该程序使用了 NEID 全部波长范围内的数据，因此该程序可以获得与 NEID 官方数据批处理程序得到的 RV 数值相似的结果，但是所得到的误差更小。NEID 官方光谱批处理程序给出的 RV 中值误差为 5.6 m s^{-1} ，SERVAL 给出的为 5.4 m s^{-1} 。WASP-148 b 的 NEID R-M 观测结果显示在图 3-3 左侧。

对于 RV 数据的提取，我们使用了阶梯光的 85 个级次，波长覆盖范围为 398 - 895 nm，并屏蔽了大气吸收谱线 ([Stefansson et al., 2022](#))。尽管 NEID 可以探测到低于 380 nm 的信号，但是蓝段的数据的信噪比较低，计算 RV 的时候把它们包括进来并不会提升 RV 数据的精度。我们使用所有观测数据生成了一个 RV 模版。因为当晚的月亮比较亮、且位置较高，我们尝试从科学图像里扣除天光背景，这样做并不会显著提高 RV 数据的质量。我们发现，不扣除天光背景所得到的 RV 精度稍高于扣除天光背景的 RV 精度，因此我们选择前者作为最终的 RV 数据。

3.3.2 Keck/HIRES 的观测

在 2021 年 06 月 9 日的 UT 6:14 - 14:38，我们使用 Keck 天文台 10m 望远镜的 HIRES 光谱仪进行了 38 次 RV 的观测。在凌星事件发生前和发生中的视宁度的浮动范围在 $0.^{\circ}9-1.^{\circ}1$ ，凌星事件后的视宁度有所上升，到达了 $1.^{\circ}1-1.^{\circ}4$ 。

¹<https://neid.ipac.caltech.edu/docs/NEID-DRP/>

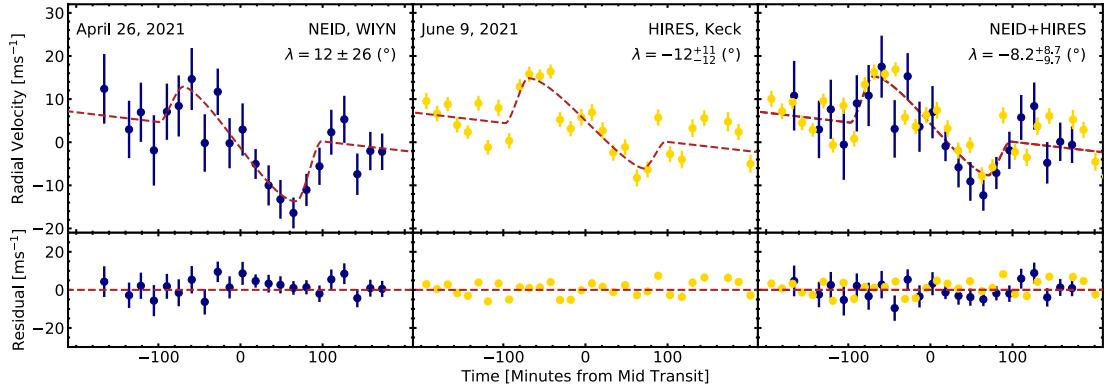


图 3-3 对 WASP-148 的视向速度测量。左图展示的是 NEID 的数据，中间的图给出的是从 Keck 得到的视向速度，最右侧是二者的叠加。在各个图中，数据点以带误差棒的点表示，最佳的模型以红色的虚线表示。在上述三个拟合中，WASP-148 b 的自转-公转轴都较小。在拟合过程中，Allesfitter 会使用 RV 的误差进行加权，并对其进行放缩。上图中的误差是数据的原始误差。

Figure 3-3 Spectroscopic radial velocities of WASP-148 measured with NEID (left), HIRES (center) and both together (right), as a function of orbital phase (minutes from mid-transit) along with the best-fitting R-M models shown as red dashed lines. We find a low obliquity for WASP-148 b in each of the three fits. Allesfitter simultaneously fits the error scaling and each dataset to weight each dataset based on its likelihood. The errors of the plotted RVs are unscaled and are drawn directly from our RV pipeline.

所有的观测通过 C2 狹縫进行 ($14'' \times 0.''861, R=60,000$)。在观测过程，光谱仪使用碘吸收盒标记分子碘特征，以实现精确的 RV 测量 (Butler et al., 1996)。曝光时间中值为 780 秒。在前半段观测中，每个光谱的曝光计计数为 $\sim 40,000$ ，而在后半段观测中，由于天空中出现高层卷云的原因，每个光谱的曝光计计数下降到 $\sim 34,000$ 。对于本次观测中获得的光谱，在 5300 \AA 处的典型分辨率为 76 / 像元。

在 06 月 11 日，我们还获得了基于 B3 狹縫 ($14'' \times 0.''574, R=72,000$) 的无碘 HIRES 模版光谱。曝光时间为 45 分钟，视宁度和大气质量分别为 $1.''0$ 和 1.1。基于加利福尼亚行星搜寻计划 (California Planet Search, CPS) 的数据批处理程序 (Howard et al., 2010)，我们使用此次观测对 RV 数据进行了定标，并获得了精确的恒星参数。在 5300 \AA 处，经过我们处理得到的光谱模版的信噪比为 167 (曝光计数值为 178,000)。使用 HIRES 对 WASP-148 b 的 R-M 观测结果显示在图 3-3 中间。

3.3.3 同步测光观测

由于 WASP-148 b 和 c 的动力学相互作用，WASP-148 b 的凌星中心时刻的变化最大可以达到 20 分钟。我们需要精确的凌星中心时刻来帮助我们限制 R-M 效应模型。但是，对于包含 WASP-148 在内的大部分的具有 TTV 信号的系统而言，精确的凌星中心时刻无法通过历史观测数据预测得到。

在 Keck 望远镜对 WASP-148 b 观测的同时, 为了直接测量凌星中心时刻, 我们使用了 Lowell 天文台 42 inch Hall 和 1 m Planewave 望远镜、Lick 天文台的 1 m Nickel 望远镜和位于加利福尼亚州和北卡罗莱纳州 7 台 4.5 inch 的 Unistellar eVscopes 对 WASP-148 b 进行测光观测。获得的光变曲线展示在图 3-4 中。

除了我们所获得的测光数据之外, 我们的分析还包括两条通过 1.5 m Ritchey-Chrétien 望远镜得到的光变曲线 (Maciejewski et al., 2020) 和基于 MIT QuickLook 批处理程序 (Huang et al., 2020b) 得到的 *TESS* 光变曲线。从 2020 年 04 月 16 日到 07 月 04 日, *TESS* 使用 30 分钟的曝光对 WASP-148 进行了 7 次有效的凌星事件观测。为了去除可能存在的长周期趋势, 我们使用 Savitzky-Golay 滤波方法对光变曲线进行滤波, 滤波窗口为 12 个小时。

3.3.3.1 Lowell 天文台 42 inch Hall 望远镜的测光观测

在 2021 年 06 月 09 日, 我们使用 Lowell 天文台 42 inch Hall 望远镜对 WASP-148 b 进行了 V 和 R 波段的测光观测。测光观测持续了 442 分钟, 曝光时间为 15 或者 20 秒, 几乎覆盖全部的凌星过程。该望远镜配备了尺寸为 $4 K \times 4 K$ 的 CCD 相机, 对应的视场和比例尺分别为 $22.^{\circ}3 \times 22.^{\circ}3$ 和 $0.^{\circ}327 / \text{像元}$ 。在观测过程中, 我们使用了像元合并模式, 因此最终的比例尺为 $1.^{\circ}05 / \text{像元}$ 。

我们通过 AstroImageJ (Collins et al., 2017) 来实现对图像的标准定标和较差孔径测光。在孔径测光中, 我们使用了半径为 8 个像元 ($8.^{\circ}4$) 的圆孔径对于 WASP-148 及其临近的 5 个比较星进行较差测光, 从而获得光变曲线。我们通过质心校正 (Eastman et al., 2010) 将每幅文件的 UTC 时标转换为 BJD_{TDB} 时标。

最终得到的光变曲线和拟合的模型展示在图 3-4 最左侧的子图中。因为在观测过程中, 天气情况始终优秀, 天空中无月也无云, 我们最终达到的测光精度为 2 mmag。

3.3.3.2 Lowell 天文台 1 m Planewave 望远镜的测光观测

在 2021 年 06 月 09 日, 我们使用在 Lowell 天文台 1 m planewave 望远镜对 WASP-148 进行了 Sloanr 波段的观测。观测总时长为 392 分钟, 曝光时间为 30 秒。最终, 我们获得了近乎完整的凌星光变曲线。该望远镜配备了尺寸为 $2K \times 2K$ 的 CCD 相机, 对应的视场和比例尺分别为 $21.^{\circ}2 \times 21.^{\circ}2$ 和 $0.^{\circ}621 / \text{像元}$ 。

从该望远镜获得的数据的处理流程和小节 3.3.3.1 中一致。处理过程中, 我们使用了 5 颗比较星以及尺寸为 10 个像元 ($6.^{\circ}21$) 的测光孔径。图 3-4 中中间左侧子图展示的是最终的光变曲线。由于当晚天气状况优秀, 我们获得的最终的测光精度是 2 mmag。

3.3.3.3 Lick 天文台 1 m Nickel 望远镜的测光观测

在 2021 年 06 月 09 日 UT 7:50-12:00 期间, 我们使用 Lick 天文台的 1m Nickel 望远镜对于 WASP-148 进行了 R 波段的观测。该望远镜配备了尺寸为 $2 K \times 2 K$ 的 CCD 相机, 对应的视场和比例尺分别为 $6.^{\circ}0 \times 6.^{\circ}0$ 和 $0.^{\circ}184 / \text{像元}$ 。

数据处理过程和小节3.3.3.1中一致。不同的是，我们使用了2颗比较星以及尺寸为20个像元($3.^{\prime\prime}68$)的测光孔径。获得光变曲线展示在图3-4中中间右侧子图。由于当晚多次下雨，因此我们所获得光变曲线并不连续。UT 04:35:00到07:37:00、UT 08:40:00到09:36:00和UT 9:58:00到10:27:00由于湿度较高，望远镜被迫关闭。虽然我们探测到了凌星事件对应的光变曲线，但是由于获得的测光精度有限，我们并未将其囊括在我们的全局拟合中。

3.3.3.4 Unistellar eVscopes 的测光观测

我们同时使用7台口径为4.5 inch的Unistellar eVscopes望远镜(Marchis et al., 2020)对WASP-148 b的凌星事件进行观测。其中4台望远镜由专业的天文学家操作，另外3台由天文爱好者操作。其中6台位于加利福尼亚的郊区和市区，还有1台位于北卡罗来纳州。所有的Unistellar eVscopes都有同样的配置：一个4.5 inch孔径的牛顿反射式望远镜和一个在主焦点索尼IMX224LQR CMOS传感器。该传感器的像素比例尺为 $1.^{\prime\prime}71$ /像元，视场为 $36.^{\prime\prime}98 \times 27.^{\prime\prime}68$ 。每幅图片的曝光时间为3.97秒，数码传感器增益为25 dB。

我们使用AstroImageJ对来自每个望远镜的数据进行减暗流和图像对齐的处理。之后，我们对这些定标好的图像进行背景扣除并以30幅图像为一组进行平均化处理，从而达到119秒的积分时间，进而增加了图像的信噪比。同样地，我们也对该数据进行了质心校正(barycentric correction)，将其时标转为 BJD_{TDB} 。在较差测光的过程中，我们使用的是多个尺寸的圆形测光孔径和一个比较星。

我们通过Unistellar eVscopes望远镜获得了7条光变曲线，并最终合并了其中最为完整的3条光变曲线(图3-4右侧)。由于指向精度不足、云量较多以及其他当晚未解决的技术问题，其他4条光变曲线相对不完整。在合并之前，3条光变曲线通过较差大气质量消光系数来去除其中的趋势。虽然当晚我们成功地探测到了光变曲线，但是由于观测期间的多次中断所造成的数据不佳，我们没有在全局拟合中使用该数据。

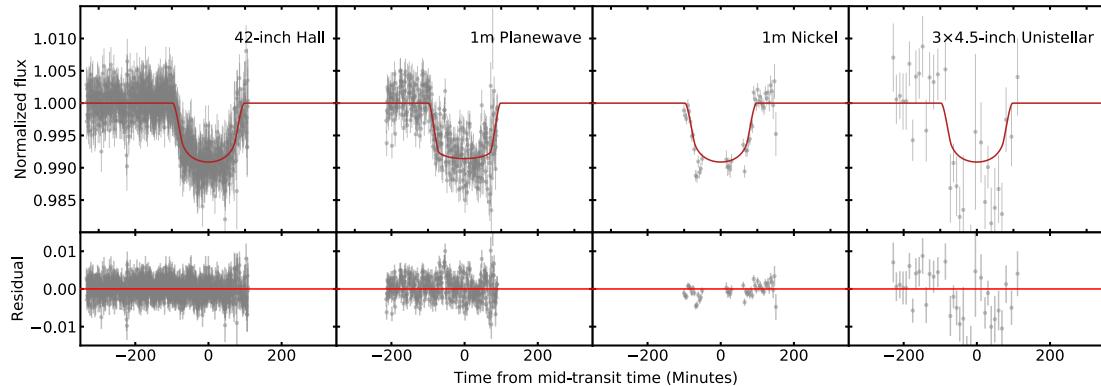


图 3-4 在使用 Keck 配备的 HIRES 光谱仪测量 R-M 效应的同时对 WASP-148 b 的凌星事件的观测。在上图中，拟合的模型以红线显示，而数据则以灰点显示。残差显示在下面的子图中。我们发现在凌星期间没有明显的恒星黑子信号，这将表明该系统的主星表面活动并不活跃。

Figure 3-4 Photometric transit observations of WASP-148 b, obtained while simultaneously measuring the R-M effect using Keck/HIRES. In the upper panels, the model is plotted in red, while data is shown as gray dots. The residuals are provided in the lower panels. We find no significant spot-crossing signal, which would be indicative of high surface activity, during the transit.

3.4 恒星参数的获取

3.4.1 从 HIRES 光谱中获取恒星参数

我们按照 [Rice et al. \(2021\)](#) 中所描述的方法使用机器学习模型 The Cannon ([Ness et al., 2015](#)) 从不使用碘吸收盒的 Keck/HIRES 光谱中获得恒星参数。我们的训练集和验证集是从冷恒星光谱目录 (Spectral Properties of Cool Stars catalog, SPOC) 中抽取的、经过 [Rice et al. \(2020\)](#) 检查过的 1202 颗 FGK 型恒星。这个目录所有包括的每一个目标都有着 18 个精确的恒星参数：3 个全局恒星参数 (T_{eff} , $\log g$, $v \sin i_*$)，和 15 个元素的丰度 (碳, 氮, 氧, 钠, 镁, 铝, 硅, 钙, 钛, 钒, 铬, 锰, 铁, 镍和钇)。

我们采用迭代多项式拟合方法确定每一条光谱的连续谱基线 ([Valenti et al., 2005](#))。然后，我们使每一条光谱除以连续谱基线从而得到归一化光谱。我们将这些光谱以及其不确定度输入 The Cannon 中进行训练和验证。我们使用验证集的弥散来确定最终训练模型内禀的不确定度。最后，我们将训练好的模型应用于 WASP-148 的光谱，从而得到 WASP-148 的主星参数。在表 3-1 中，我们只展示全局恒星参数和部分金属丰度。

3.4.2 通过 SED 拟合获取恒星参数

基于 EXOFASTv2 ([Eastman et al., 2019](#))，我们使用 MESA Isochrones & Stellar Tracks (MIST) 恒星演化模型和 Spectral Energy Distribution (SED) 拟合来提取恒星参数。

在此分析中, T_{eff} 、[Fe/H] 和恒星视差使用高斯类型的先验。 T_{eff} 、[Fe/H] 初始猜测值来源于使用 The Cannon 从 HIRES 光谱得到的结果。恒星视差的初始猜测值来源于改正后的 Gaia DR2 的视差数值 (Stassun et al., 2018)。为了进一步限制主星的半径, 我们限制了 V 波段消光系数的上限 (Schlafly et al., 2011)。

使用 MIST 模型, 我们拟合了 WASP-148 多个波段的测光结果。测光的数据来源于多个测光目录, 包括 Tycho-2, 2MASS All-Sky, AllWISE, and Gaia DR2。最终的恒星参数在表 3-1 中展示。需要注意的是, 我们所得到的包括恒星半径和质量在内的参数没有考虑系统性误差, 因此其不确定度可能被低估 (Tayar et al., 2020)。从 MIST+SED 拟合得到的恒星参数 (T_{eff} 、[Fe/H]、 $\log g$ 和 $v \sin i_*$) 和从 Keck/HIRES 中得到的一致。

3.5 数据拟合和分析

我们使用 Allesfitter (Günther et al., 2021, 2019) 程序来确定 WASP-148 b 的天空投影的自转-公转角 (λ)。Allesfitter 可以同时拟合多个波段的光变曲线, 来自不同仪器的 RV 数据和 R-M 数据, 并使用仿射不变马尔可夫链蒙特卡洛方法 (Affine-Invariant Markov Chain Monte Carlo, AIMCMC, Goodman et al. 2010; Foreman-Mackey et al. 2013a) 对参数的误差进行估计。

我们同时拟合了 11 条光变曲线 (7 条来自 TESS, 2 条来自 1.5 米 Ritchey-Chrétien 望远镜, 2 条来自 42 inch Hall 望远镜和 1 m Planewave 望远镜), 凌星期间带有 R-M 效应的 NEID 和 HIRES 的 RV 数据以及来自 SPOHIE 光谱仪的 RV 数据 (Hébrard et al., 2020)。

我们使用的光变曲线和 RV 的模型中含有的参数为行星的轨道周期 (P), 在参考历元的凌星中心时刻 (T_0), 每条光变曲线的凌星中心时刻 (T_n), 轨道倾角的余弦值 ($\cos i$), 行星半径和恒星半径之比 (R_p/R_*), 行星半径和恒星半径之和除以轨道半长轴 [$(R_p + R_*)/a$], RV 的半振幅 (K), 偏心率 e 和近星点俯角 ω 的重新参数化组合 ($\sqrt{e} \cos \omega$ 和 $\sqrt{e} \sin \omega$), 二次临边昏暗系数的变换形式² (q_1 和 q_2), 用于拟合恒星表面活动所产生的 RV 信号的 RV 抖动项 ($\ln \sigma_{\text{jitter}}$), 天空投影的自转-公转角 (λ), 天空投影的恒星自转速度 ($v \sin i_*$)。对于 WASP-148 b 而言, 我们拟合以上列出的参数, 而对于 WASP-148 c 而言, 由于它并不发生凌星事件, 我们只拟合 P , K , $\sqrt{e} \cos \omega$ 和 $\sqrt{e} \sin \omega$ 。

对于所有拟合的参数而言, 我们使用均匀分布的先验。拟合参数的初始猜测值来源于发现文献 (Hébrard et al., 2020)。对于每一个 R-M 效应的拟合, 我们添加了由二次多项式组成的额外的偏移项来补偿由仪器产生的系统偏移和恒星活动导致的偏移。表 3-1 总结了模型的先验和所得到的参数数值。

我们进行了三种联合拟合。首先, 我们分别拟合了来自 NEID 和 HIRES 的 R-M 观测数据, 从而得到各自独立的 λ 。然后, 我们同时拟合这两次 R-M 观测

²二次昏暗系数 u 和其变换形式 q 的转换公式为 $u_1 = 2q_2\sqrt{q_1}$ 和 $u_2 = \sqrt{q_1}(1 - 2q_2)$ 。

的数据，来自 SPOHIE 的 RV 数据，所有的 *TESS* 光变曲线以及从地基望远镜获得的光变曲线。

对于每一拟合，我们使用 emcee (Foreman-Mackey et al., 2013b) 内置的 AIM-CMC 对模型参数的后验概率分布进行采样。采样使用了 100 个独立的马尔可夫链，每条链 200000 步。我们使用自适应长度 (τ) 作为收敛判据，所有的马尔可夫链的长度都超过了 30 倍自适应长度。拟合的结果，包括光变曲线和 RV 的解、 λ_b 、 $v \sin i_*$ 以及它们 1σ 的误差，在表 3-1 中给出。最佳的拟合模型在图 3-3 中给出。

从我们的分析中得到的光变曲线和 RV 的参数和 Hébrard et al. (2020) 给出的一致。我们得到的最佳的 λ 和 $v \sin i_*$ 的数值分别为 $-8.2^{+8.7}_{-9.7}$ ° 和 $2.30^{+0.38}_{-0.34}$ km s⁻¹，意味着 WASP-148 b 的公转轴的方向和恒星自转轴的方向接近平行。

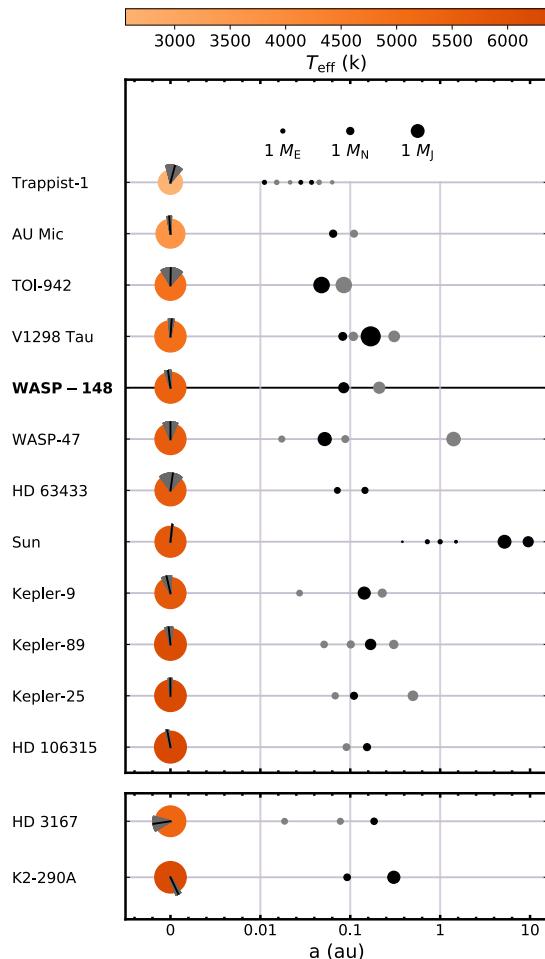


图 3-5 按照恒星温度排序的结构紧凑的多行星系统以及它们的 λ 示意图。对于每一个系统，恒星自转轴和行星公转轴在天空上的投影 λ 以及其不确定度都已标记。如果主星上的黑线竖直向上代表 $\lambda = 0^\circ$ 。用于计算 λ 的行星在图中以黑色标记，其他的行星以灰色标记。TOI-942 和 V1298 Tau 系统中的行星质量由 [Chen et al. \(2017\)](#) 给出的行星质量和半径的关系式给出。

Figure 3-5 Compact multi-planet systems with observed λ constraints, ordered by stellar temperature. For each system, λ is shown, together with uncertainties, relative to the net angular momentum plane of the orbits. This plane is determined from those planets with measured spin-orbit angles in each system. A vertical upwards spin axis indicates $\lambda = 0^\circ$. The planets with spin-orbit angle constraints are shown in black, while all other planets are shown in gray. The planetary masses in the TOI-942 and V1298 Tau systems were estimated based on their photometric radii using the [Chen et al. \(2017\)](#) mass-radius relation.

3.6 结果与讨论

WASP-148 是第 14 个拥有 R-M 观测的结构紧凑的多行星系统。这里，“结构紧凑”的多行星系统是指那些系统中存在一对行星的周期比小于 6 且彼此可以相互影响的系统。在图 3-5 中我们给出了这些系统的构型。作为参考，我们同时给出了太阳系的构型。需要说明的是，在我们的统计中，我们排除了 55 Cancri，因为该系统的 R-M 测量结果有争议 (López-Morales et al., 2014)。

除了 WASP-148 以外，图 3-5 中的所有的多行星系统中都有多于 1 个的行星可以发生凌星事件。由于最近的研究 (Maciejewski et al., 2020) 表明 WASP-148 b 和 c 的公转轴之间的夹角 (mutual inclination) 很小，因此在后续的分析中，我们将 WASP-148 c 也可看作凌星的系外行星。需要注意的是，行星系统内多个行星都可以凌星并不意味着它们一定共面。因为即便是行星之间的轨道面之间的角度比较大，但是它们各自依旧是凌星的。

正如图 3-5 所示，大部分结构紧凑的多行星系统是 aligned。这一观测事实可能暗示着这些行星在早期的迁移和吸积的过程中处于一个未受到剧烈扰动的孤立系统中。动力学剧烈相互作用的缺失与在这些系统中观测到多颗行星的轨道之间的夹角较小是一致的。

在本文中，我们将一个系统的 λ 值大于 10° 并在 3σ 的水平上不为 0° 的系统定义 “misaligned” 的系统。可以从图 3-5 中看到，HD 3167 和 K2-290 A 是我们的样本中唯二的 misaligned 的结构紧凑的多行星系统。然而，HD 3167 的 R-M 效应拟合的残差的 rms ($\sim 1 \text{ m s}^{-1}$) 的大小和其本身的 R-M 效应的信号相当。因此，在我们的分析中，我们仅包括 K2-290 A。我们注意到 K2-290 A 主星的自转轴和行星的公转轴的夹角较大有可能是由临近的恒星伴星引起的，而非行星演化过程中的剧烈的动力学相互作用。

在我们的分析中，我们只包括有通过拟合 R-M 效应和多普勒断层扫描技术 (Doppler tomography, DT) 得到的 λ 的行星系统。原因有如下两点：1) 尽量减少探测偏差的多样性，提供一个干净的样本，2) 将样本中恒星的类型限制在主序，因为我们尚不清楚在恒星演化过程中自转-公转角的变化。我们也注意到，如果在我们的分析中加入后主序星的样本，如 misaligned 的系统 Kepler-56 (Huber et al., 2013) 和 Kepler-129 (Zhang et al., 2021) 会进一步弱化结构紧凑的多行星系统中 alignment 的趋势的显著性。

3.6.1 结构紧凑的多行星系统中 alignment 趋势的统计显著性

在我们的样本中有 12 个结构紧凑的多行星系统，其中只有一个系统-K2-290 A-是毫无疑问的 misaligned 系统。在下面的分析中，我们将探究当前的样本量是否足以帮助我们确定孤立的热木星系统和结构紧凑的多行星系统的恒星倾角的分布是否一致。

孤立的热木星和结构紧凑的多行星系统 如果我们从 112 个带有 λ 测量的孤立的热木星系统里随机抽取 12 个系统，那么有 4.1% 的机会得到其中一个系

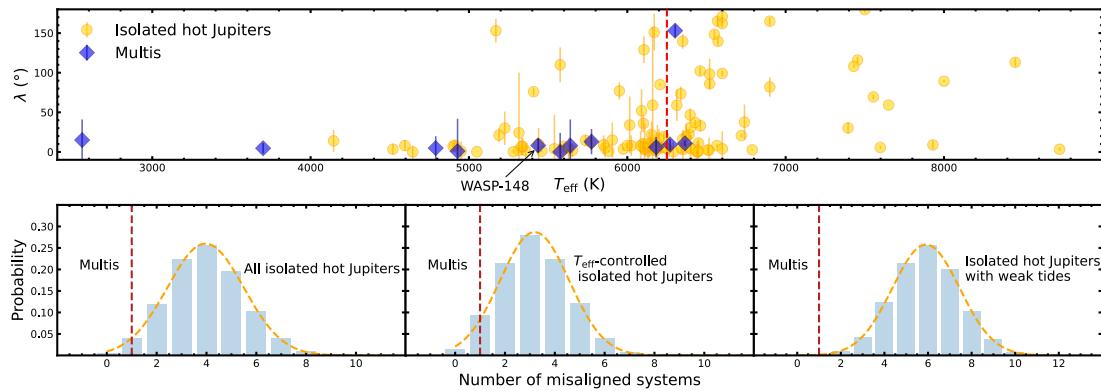


图 3-6 上图：通过 R-M 效应和多普勒层析技术得到的 112 个系外行星系统的天空投影的恒星倾角 (λ) 随着主星温度的分布。其中，热木星以黄色的圆点表示，温木星以蓝色的菱形表示。竖直的红线表示恒星温度为 6250 K。下图：misaligned 的热木星的个数在随机挑选的 12 个热木星里的比例的概率分布。在每一个子图中，竖直的线代表 12 个结构紧凑的多行星系统中唯一的 misaligned 的系统-K2-290 A。弱潮汐作用的单行星系统包括拥有小质量行星的、大的轨道半长轴的以及主星温度超过 6350 K 的系统。

Figure 3-6 Upper panel: Stellar sky-projected obliquities (λ) derived from R-M measurements or Doppler Tomography for 112 exoplanet systems, shown as a function of the host star's effective temperature (T_{eff}). The isolated-hot-Jupiter systems are shown as yellow circles, while compact multi-planet systems are represented by blue diamonds. The vertical red dashed line indicates $T_{\text{eff}} = 6,250$ K. **Lower panel:** The probability distribution for the number of the misaligned systems among 12 randomly selected isolated-hot-Jupiter systems, shown for each of our three test cases. In each panel, the dashed red line represents only one misaligned system, K2-290 A, among 12 compact multi-planet systems. Singles with weak tides include systems with low-mass planets, wide-separation systems, or systems around hot stars.

统是 misaligned (图 3-6 的下方左侧子图)。在这种情况下，结构紧凑的多行星系统在 2.5σ 的置信水平上比孤立的热木星系统更加得 aligned。

和恒星温度的相关性 先前的研究已经表明，热的 ($T_{\text{eff}} > 6250$ K) 和大质量的 ($M_* > 1.1 M_{\odot}$) 的恒星倾向于拥有更大的恒星倾角 (Schlaufman, 2010; Winn et al., 2010; Albrecht et al., 2012)。因此，我们进一步使用限制了有效温度范围的样本来计算孤立的热木星系统和结构紧凑的多行星系统的恒星倾角分布的差异。结构紧凑的多行星系统的主星的温度范围为 2557 K 到 6364 K。我们从具有相同温度范围的 83 个孤立的热木星系统随机抽取 12 个系统。我们发现 12 个随机选取的系统里有一个是 misaligned 的概率为 9.5%。通过控制样本温度的范围，孤立的热木星系统的恒星倾角分布和结构紧凑的多行星系统的恒星倾角分布的差异的显著性下降到 2.2σ (如图 3-6下方中间子图所示)。

在我们的样本中，10 个结构紧凑的多行星系统的有效温度全都低于 6250 K，而且根据它们的 λ 测量，它们全都是 aligned。因此，我们尚不清楚的是： λ 随着温度的升高而增大的这一趋势的产生是因为结构紧凑的多行星系统的恒星倾角普遍较小还是因为主星温度小于 6250 K 的系统更容易有小的恒星倾角。至今，

仅仅有 3 个主星的有效温度大于 6250 K 的结构紧凑的多行星系统的自转-公转角被测量。值得注意的是，其中质量为 $1.2 M_{\odot}$ ，有效温度为 6301 K 的 K2-290 A 的行星是逆行的（如图 3-5下方子图所示）。

基于现存的结构紧凑的多行星系统的小样本数据，我们发现适用于孤立的热木星系统样本的 $T_{\text{eff}} - \lambda$ 的关系同样适用于结构紧凑的多行星系统。对于结构紧凑的多行星系统，尤其是那些包含热木星的系统，迫切需要 λ 测量来扩大样本数量从而证实这一趋势。

潮汐的影响 孤立的热木星所显示出来的 $T_{\text{eff}} - \lambda$ 关系通常被认为是潮汐耗散的证据。潮汐耗散对恒星的内部结构十分敏感，也和行星轨道的半长轴和质量有很强的关系。在先前的观测中，质量较大的 ($M > 0.3 M_{\text{J}}$)，离着主星较近的 ($a/R_* < 12$)，主星温度较低的 ($T_{\text{eff}} < 6250 \text{ K}$) 的系统倾向于拥有 aligned 的行星轨道。这一统计结果被认为是系统通过潮汐效应重新 align 的有力证据 (Wang et al., 2021a)。在使用孤立的热木星系统和结构紧凑的多行星系统比较之前，我们将热木星中 $a/R_* < 12$, $T_{\text{eff}} < 6250 \text{ K}$ 的系统排除出去，因为它们可能通过潮汐作用被重新 aligned。而结构紧凑的多行星系统中的自转-公转角不太可能被潮汐所影响，因为它的行星的周期较长且质量较小。

我们从 55 个弱潮汐效应的孤立热木星系统中随机抽取 12 个系统。我们发现 12 个系统中有一个是 misaligned 的概率仅为 0.17%。基于这个抽取结果，在 3.7σ 的置信水平上，结构紧凑的多行星系统比孤立的热木星系统更加 misalign。

在潮汐可以使得系统重新 align 的假设下，孤立热木星的恒星倾角分布和结构紧凑的多行星系统的恒星倾角分布的差异是显著的。然而，这一假设有一个严重的理论问题。目前，该假设无法解释在总角动量没有损失且行星没有旋入主星的情况下系统是如何重新 aligned。

在我们的样本中，大多数结构紧凑的多行星系统的主星是较冷的恒星，而孤立的热木星系统的主星大多是热的恒星。因此，我们的结果体现的是恒星倾角在拥有不同有效温度恒星的系统中的差异，而非来自孤立热木星和结构紧凑的多行星系统这两个样本的系统性差异。

3.6.2 大的自转-公转角的意义

除了 R-M 测量的方法，先前的研究还基于 $v \sin i_*$ 的统计数据来研究行星系统中主星倾角。这些研究显示，有热木星的大质量恒星通常都是 misaligned。这一点和 R-M 观测的结果是一致的 (Winn et al., 2010)。然而，目前并不清楚的是，这种统计趋势的出现是因为所有的大质量主星普遍地拥有大自转-公转角 (Louden et al., 2021) 还是因为带有热木星的主星而更容易 misalign (Winn et al., 2017)。目前，一些含有小质量行星的 misaligned 的系统被发现 (Walkowicz et al., 2013; Hirano et al., 2014; Morton et al., 2014)，以及 K2-290 A b 的证认 (Hjorth et al., 2021) 暗示着前一种假设可能是真的。

长周期、大质量的行星的主星更容易是大质量恒星。这种恒星也倾向于拥

有不同类型的 misaligned 行星：不仅是孤立的热木星，而且还有拥有多个超级地球的结构紧凑的多个行星 (Hjorth et al., 2021; Louden et al., 2021)。除了潮汐耗散理论以外，大质量、远距离的扰动体也有可能激发含有大质量主星的 misaligned 系统的自转-公转角。这一现象在周期比较短的行星系统中是比较常见的 (Ngo et al., 2015; Zhu et al., 2018a; Bryan et al., 2019)。

大质量、远距离的摄动体有时可能会使得共面的行星系统整体倾斜，例如 Kepler-56 (Li et al., 2014; Gratia et al., 2017)。由于恒星摄动 (J2 项) 和内部行星的自转-公转耦合时标一般要长于伴有大质量、远距离扰动体的内部行星系统的长期时标，这导致了小自转-公转角的出现。该角度的大小与远距离扰动体轨道面和内部结构紧凑多行星系统的轨道面的夹角大小相当，为 12° (Lai et al., 2018; Masuda et al., 2020)。

这种自转-公转角和大质量、远距离的扰动体的联系将被一系列长基线视向速度后随观测项目以及即将开始的系外行星搜寻计划所检验，例如盖亚 (Gaia) 卫星和南希·格雷斯·罗曼太空望远镜 (Nancy Grace Roman Space Telescope)。它们将探测到更多长周期大质量的系外行星。RV 数据和天体测量数据的联合分析将会为我们提供远距离、大质量的扰动体的全部的轨道参数。这将对理解这些扰动体是如何激发系统内内部行星的轨道倾角起到重要作用。对有着远距离扰动体的内部行星系统的自转-公转角的测量也将帮助我们研究远距离系外木星和内部行星系统的自转-公转角的关系 (例如，HAT-P-13, Bakos et al. 2009)。如果我们能通过观测在远距离、大质量的扰动体和内部 misaligned 行星系统建立起某种经验性的关系，那么 misaligned 系外行星系统将作为尚未发现的远距离巨行星存在的依据 (例如，HAT-P-11, Yee et al. 2018)。

表 3-1 从 Allesfitter 拟合中得到的 WASP-148 的系统参数

Table 3-1 The system parameters of WASP-148 from Allesfitter fit.

	HIRES Spectrum The Cannon	MIST+SED EXOFASTv2		
Stellar Parameters:				
M_* (M_\odot)	-	$0.970^{+0.046}_{-0.057}$		
R_* (R_\odot)	-	$0.905^{+0.013}_{-0.014}$		
$\log g$ (cgs)	4.48 ± 0.10	$4.511^{+0.023}_{-0.028}$		
[Fe/H] (dex)	0.25 ± 0.04	$0.35^{+0.14}_{-0.19}$		
T_{eff} (K)	5478 ± 59	5437 ± 21		
$v \sin i_*$ (km/s)	2.44 ± 1.07	-		
	Priors for global fit	Global fit 1: NEID	Global fit 2: HIRES	Global fit 3: NEID+HIRES (Preferred Solution)
Stellar Parameters:				
$v \sin i_*$ (km s ⁻¹)	$\mathcal{U}(2.44; 0.0; 10)$	$2.95^{+0.74}_{-0.67}$	$2.11^{+0.39}_{-0.37}$	$2.30^{+0.38}_{-0.34}$
Planetary Parameters:				
WASP-148 b:				
λ_b (deg)	$\mathcal{U}(0; -180; +180)$	12 ± 26	-12^{+11}_{-12}	$-8.2^{+8.7}_{-9.7}$
P_b (days)	$\mathcal{U}(8.8035; 8.0; 10.0)$	8.803569 ± 0.000022	8.803554 ± 0.000021	8.803544 ± 0.000021
$R_{P,b}$ (R_J)	-	$0.807^{+0.018}_{-0.020}$	$0.799^{+0.020}_{-0.022}$	$0.800^{+0.020}_{-0.023}$
$M_{P,b}$ (M_J)	-	$0.368^{+0.053}_{-0.049}$	$0.352^{+0.056}_{-0.050}$	$0.354^{+0.055}_{-0.050}$
$T_{0,b}$ (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{U}(9163.62010; 9163.0; 9164.0)$	9163.62079 ± 0.00037	9163.62042 ± 0.00036	9163.62033 ± 0.00036
i_b (deg)	-	$86.88^{+0.68}_{-0.78}$	$87.17^{+0.73}_{-0.81}$	$87.14^{+0.75}_{-0.82}$
e_b	-	0.190 ± 0.075	0.187 ± 0.077	$0.190^{+0.078}_{-0.072}$
ω_b (deg)	-	66^{+14}_{-18}	63^{+16}_{-31}	65^{+13}_{-21}
$\cos i_b$	$\mathcal{U}(0.0350; 0.0; 1.0)$	$0.054^{+0.013}_{-0.012}$	$0.049^{+0.014}_{-0.013}$	$0.050^{+0.014}_{-0.013}$
K_b (m s ⁻¹)	$\mathcal{U}(29.5; 25.0; 35.0)$	28.9 ± 2.0	28.8 ± 2.0	28.8 ± 2.0
R_p/R_*	$\mathcal{U}(0.0950; 0.0; 1.0)$	$0.0918^{+0.0015}_{-0.0018}$	$0.0909^{+0.0017}_{-0.0021}$	$0.0909^{+0.0017}_{-0.0022}$
$(R_* + R_b)/a_b$	$\mathcal{U}(0.0638; 0.0; 1.0)$	0.0732 ± 0.0079	0.0699 ± 0.0084	0.0703 ± 0.0084
$\sqrt{e_b} \cos \omega_b$	$\mathcal{U}(0.2547; -1.0; 1.0)$	$0.178^{+0.090}_{-0.096}$	$0.17^{+0.11}_{-0.12}$	$0.171^{+0.086}_{-0.093}$
$\sqrt{e_b} \sin \omega_b$	$\mathcal{U}(0.3296; -1.0; 1.0)$	$0.388^{+0.097}_{-0.13}$	$0.38^{+0.10}_{-0.14}$	$0.394^{+0.097}_{-0.13}$
WASP-148 c:				
P_c (days)	$\mathcal{U}(34.5160; 30.0; 40.0)$	34.527 ± 0.024	$34.526^{+0.023}_{-0.025}$	34.527 ± 0.024
$M_{P,c} \sin i$ (M_J)	-	$0.407^{+0.127}_{-0.088}$	$0.404^{+0.131}_{-0.090}$	$0.408^{+0.127}_{-0.087}$
e_c	-	0.350 ± 0.064	$0.349^{+0.062}_{-0.066}$	$0.351^{+0.060}_{-0.064}$
ω_c (deg)	-	12^{+14}_{-13}	13^{+15}_{-14}	12^{+14}_{-13}
$T_{0,c}$ (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{U}(8073.264; 8073.0; 8074.0)$	$8073.34^{+0.61}_{-0.68}$	$8073.34^{+0.62}_{-0.69}$	$8073.31^{+0.63}_{-0.67}$
K_c (m s ⁻¹)	$\mathcal{U}(25.9; 20.0; 30.0)$	$27.1^{+2.8}_{-2.6}$	26.9 ± 2.7	27.2 ± 2.7
$\sqrt{e_c} \cos \omega_c$	$\mathcal{U}(0.58; -1; 1.0)$	$0.568^{+0.058}_{-0.076}$	$0.564^{+0.060}_{-0.079}$	$0.568^{+0.058}_{-0.075}$
$\sqrt{e_c} \sin \omega_c$	$\mathcal{U}(0.14; -1; 1.0)$	0.12 ± 0.13	0.13 ± 0.14	0.12 ± 0.13
$\ln \sigma_{\text{jitter;NEID}}$ (ln km/s)	$\mathcal{U}(-3; -15; 0)$	-10.6 ± 3.0	-	-10.7 ± 3.0
$\ln \sigma_{\text{jitter;HIRES}}$ (ln km/s)	$\mathcal{U}(-3; -15; 0)$	-	-5.70 ± 0.16	-5.70 ± 0.16
Transit Mid-times for WASP-148 b:				
T_1 (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(8961.12366; 0.1)$	$8961.1237^{+0.0025}_{-0.0027}$	$8961.1238^{+0.0024}_{-0.0026}$	$8961.1238^{+0.0024}_{-0.0026}$
T_2 (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(8969.92904; 0.1)$	8969.9291 ± 0.0029	$8969.9291^{+0.0028}_{-0.0030}$	8969.9291 ± 0.0030
T_3 (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(8978.73498; 0.1)$	$8978.7347^{+0.0022}_{-0.0020}$	$8978.7347^{+0.0021}_{-0.0020}$	$8978.7347^{+0.0021}_{-0.0020}$
T_4 (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(8987.54213; 0.1)$	$8987.54200^{+0.00066}_{-0.00071}$	$8987.54199^{+0.00065}_{-0.00073}$	$8987.54197^{+0.00066}_{-0.00073}$
T_5 (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(9005.15336; 0.1)$	$9005.15315^{+0.0011}_{-0.0100}$	$9005.15304^{+0.0010}_{-0.00096}$	$9005.15303^{+0.0010}_{-0.00094}$
T_6 (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(9013.95526; 0.1)$	$9013.9557^{+0.0045}_{-0.0054}$	$9013.9557^{+0.0044}_{-0.0055}$	$9013.9556^{+0.0044}_{-0.0055}$
T_7 (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(9031.57093; 0.1)$	$9031.5707^{+0.0028}_{-0.0026}$	$9031.5705^{+0.0028}_{-0.0025}$	$9031.5704^{+0.0028}_{-0.0025}$
T_8 (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(9040.37324; 0.1)$	$9040.3731^{+0.0013}_{-0.0014}$	$9040.3736^{+0.0011}_{-0.0013}$	$9040.3736^{+0.0012}_{-0.0013}$
T_9 (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(9084.39824; 0.1)$	9084.39808 ± 0.00056	9084.39800 ± 0.00057	9084.39800 ± 0.00056
T_{10} (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(9330.87464; 0.1)$	$9330.8684^{+0.0065}_{-0.0061}$	-	$9330.8651^{+0.0048}_{-0.0045}$
T_{11} (BJD _{TDB} - 2450000)	$\mathcal{N}(9374.90075; 0.1)$	9374.90171 ± 0.00081	$9374.90148^{+0.00079}_{-0.00074}$	9374.90149 ± 0.00077
Transformed limb darkening coefficients:				
$q_{1:\text{NEID}}$	$\mathcal{U}(0; 0.5; 1)$	$0.47^{+0.25}_{-0.30}$	-	$0.39^{+0.30}_{-0.26}$
$q_{2:\text{NEID}}$	$\mathcal{U}(0; 0.5; 1)$	0.36 ± 0.24	-	$0.33^{+0.25}_{-0.23}$
$q_{1:\text{HIRES}}$	$\mathcal{U}(0; 0.5; 1)$	-	$0.37^{+0.30}_{-0.25}$	0.42 ± 0.27
$q_{2:\text{HIRES}}$	$\mathcal{U}(0; 0.5; 1)$	-	$0.33^{+0.25}_{-0.23}$	0.34 ± 0.24

Physical limb darkening coefficients:

$u_{1:\text{NEID}}$	-	$0.42^{+0.40}_{-0.29}$	-	$0.34^{+0.37}_{-0.24}$
$u_{2:\text{NEID}}$	-	$0.15^{+0.35}_{-0.26}$	-	$0.17^{+0.33}_{-0.24}$
$u_{1:\text{HIRES}}$	-	-	$0.33^{+0.37}_{-0.24}$	$0.37^{+0.38}_{-0.26}$
$u_{2:\text{HIRES}}$	-	-	$0.16^{+0.33}_{-0.24}$	$0.17^{+0.33}_{-0.25}$

注: 上表中的参数有行星的轨道周期 (P), 在参考历元的凌星中心时刻 (T_0), 每条光变曲线的凌星中心时刻 (T_n), 轨道倾角的 \cos 值 ($\cos i$), 行星半径和恒星半径之比 (R_p/R_\star), 行星半径和恒星半径只和除以轨道半长轴 ($(R_p + R_\star)/a$), RV 的半振幅 (K), 偏心率 e 和近星点俯角 ω 的重新参数化组合 ($\sqrt{e} \cos \omega$ 和 $\sqrt{e} \sin \omega$), 二次临边昏暗系数的变换形式 (q_1 和 q_2), 用于拟合恒星表面活动所产生的 RV 信号的 RV 抖动项 ($\ln \sigma_{\text{jitter}}$), 天空投影的自转-公转角 (λ), 天空投影的恒星自转速度 ($v \sin i_\star$)。对于 WASP-148 b 而言, 我们拟合以上列出的参数, 而对于 WASP-148 c 而言, 由于它并不发生凌星事件, 我们只拟合 P , K , $\sqrt{e} \cos \omega$ 和 $\sqrt{e} \sin \omega$ 。 i , e , 和 ω 是推导出来的参数, 没有先验信息, 其他的参数则是在有先验信息下直接拟合的。 $T_1 - T_{11}$ 是每个凌星事件的凌星中心时刻。

Note: the model parameters include the orbital period (P), transit mid-time at a reference epoch (T_0), mid-time for each transit event (T_n), cosine of the orbital inclination ($\cos i$), planet-to-star radius ratio (R_p/R_\star), sum of radii divided by the orbital semi-major axis ($(R_\star + R_p)/a$), RV semi-amplitude (K), parameterized eccentricity and argument of periastron ($\sqrt{e} \cos \omega$, $\sqrt{e} \sin \omega$), transformed quadratic limb-darkening coefficients (q_1 and q_2), jitter term ($\ln \sigma_{\text{jitter}}$), sky-projected spin-orbit angle (λ), and sky-projected stellar rotational velocity ($v \sin i_\star$). All of the listed parameters were fitted for WASP-148b, while only P , K , $\sqrt{e} \cos \omega$, and $\sqrt{e} \sin \omega$ were fitted for WASP-148c, since it does not transit.

第4章 系外行星系统中行星间夹角的研究

4.1 引言

多行星系统中的行星公转轴的夹角，即行星间夹角的分布为我们了解其形成和动力学演化提供了重要的信息。但是，目前我们所使用的探测技术在大部分情况下无法精确地估计行星间夹角，只有少数具有特殊构型的系外行星系统可以通过 TTV 拟合（例如，有 TTV 和 RV 数据的 WASP-148, [Hébrard et al., 2020](#); [Maciejewski et al., 2020](#); [Almenara et al., 2022](#)）、RV 拟合（例如，行星处于共振链上的 GJ 876, [Millholland et al., 2018](#)）以及 TTV 和凌星持续时间变化（Transit duration variations, TDV）拟合（例如，Kepler-108, [Mills et al., 2017](#)）的方法获得行星间夹角。除了上述方法，使用依巴谷（High Precision PARallax COLlecting Satellite, Hipparcos）和 Gaia 数据进行天体测量拟合的方法可以获得包括行星间夹角在内的所有的行星轨道参数（例如，pi Mensae, [De Rosa et al., 2020a](#)）。热木星的周围往往被认为没有临近的行星（[Steffen et al., 2012](#); [Ivshina et al., 2022](#)），因此探究热木星和其临近的系外行星的行星间夹角的机会少之又少。“多木星”系统 WASP-148 为我们提供了宝贵的机会去研究此类行星系统的行星间夹角。

WASP-148 于 2020 年被 [Hébrard et al. \(2020\)](#) 所发现，是唯一一个同时拥有着热木星和温木星的系外行星系统。[Hébrard et al. \(2020\)](#) 使用了两种模型去拟合 WASP-148 系统。第一种是基于基于共面的假设的光变曲线和 RV 的同时拟合；第二种是基于非共面假设的 RV 拟合。上述两种拟合结果显示，WASP-148 系统中的行星 b 存在 TTV 效应。结合 RV 的拟合情况可知，该系统中还有额外的行星 WASP-148 c，但是它不会导致凌星现象。尽管 [Hébrard et al. \(2020\)](#) 没有给出该系统全部的参数，但是其基于一系列动力学模拟对 WASP-148 b 和 c 的轨道面之间的夹角做出了限制，即行星间夹角应该小于 35° 。同年，基于地基后随观测的和 *TESS* 的光变曲线，[Maciejewski et al. \(2020\)](#) 对该系统做出了进一步的分析。在 [Hébrard et al. \(2020\)](#) 工作的基础上，[Maciejewski et al. \(2020\)](#) 将原有的 5 个 TTV 数据点扩充到 14 个，从而为全面解析该系统的轨道和物理参数提供了可能。[Maciejewski et al. \(2020\)](#) 使用基于 Runge-Kutta 89 ([Dormand et al., 1978](#)) 的 Systemic v2 ([Meschiari et al., 2009](#)) 对 RV 和 TTV 进行了拟合，并从最佳拟合中得到了 45° 的行星间夹角。但是，根据 BIC 检验 ([Claeskens et al., 2008](#))，该非共面构型并不比共面构型好。近日，[Almenara et al. \(2022\)](#) 基于所有的 SPOHIE RV 数据和光变曲线数据，对该系统进行了光动力学拟合（Photodynamic fit），给出了该系统全部的参数，其中行星间夹角为 $41.0_{-7.6}^{+6.2}{}^\circ$ 。然而，该工作得到的行星间夹角不满足小于 35° 的稳定性条件。

TESS 对 WASP-148 的再次观测和我们使用 NEID 光谱仪对其进行的持续 RV 测量使得我们有机会使用更为全面、准确的数据解析该系统的构型。

表 4-1 WASP-148 的 NEID 视向速度测量数据
Table 4-1 The NEID RV measurements of WASP-148

Time (BJD _{TDB})	RV (m s ⁻¹)	RV error (m s ⁻¹)	Time (JD)	RV (m s ⁻¹)	RV error (m s ⁻¹)
2459732.7399452	-5535.1	2.6	2459486.6820092	-5504.1	5.4
2459678.9263820	-5596.4	2.5	2459481.6571452	-5578.1	4.8
2459677.9461454	-5607.3	3.8	2459479.6452503	-5534.6	3.1
2459675.9672269	-5631.5	2.6	2459478.6413461	-5531.6	2.9
2459664.9400963	-5548.8	4.2	2459477.6670187	-5557.3	4.0
2459663.9166907	-5533.2	2.2	2459422.8597083	-5577.6	4.4
2459504.6100257	-5562.6	2.9	2459413.7101199	-5560.9	3.4
2459502.6302023	-5591.7	3.7	2459411.8671399	-5579.5	4.9
2459498.6120065	-5585.6	3.0	2459391.8112512	-5566.4	5.6
2459497.6257856	-5554.8	3.7	2459385.7243054	-5576.6	5.1
2459493.6257318	-5578.1	4.6	-	-	-

4.2 光变曲线

4.2.1 TESS 光变曲线

TESS 在 Sector 24、25 和 26 (2020 年 04 月 16 日- 06 月 22 日) 以及 51 和 52 (2022 年 04 月 23 日- 05 月 19 日) 对该目标进行了观测。对于 Sector 24、25 和 26, TESS 每个任务分区持续两个轨道周期, 而对于 Sector 51 和 52, 每个任务分区仅仅持续一个轨道周期。在 TESS 的首个 4 年任务周期内的 Sector 24、25 和 26 中, TESS 只给出了基于全画幅图像 (Full-frame image, FFI) 的曝光时间为 30 分钟的数据。此三个 Sector 的光变曲线通过 TESS SPOC 数据处理管道处理 FFI 图像得到。对于处于扩展任务期的 Sector 51 和 52, TESS 可以给出曝光时间为 2 分钟的光变曲线。

TESS 科学处理业务中心 (TESS Science Processing Operations Center, SPOC) 目前给出两种光变曲线: 简单孔径测光光变曲线 (Simple Aperture Photometry, SAP) 和预处理简单孔径测光光变曲线 (Presearch Data Conditioning SAP, PDC-SAP)。和 SAP 光变曲线不同的是, 工作人员使用奇异值分解的方法对 PDCSAP 光变曲线中存在的疑似由于 TESS 卫星运动导致的趋势处理掉, 并且将被标记为坏点的数据删除。但是, 在某些情况下, 被标记为坏点的数据经过仔细的处理后仍旧可以使用。因此, 我们采用对 SAP 光变曲线直接进行处理的方式获得凌星数据。

我们使用 wotan¹ (Hippke et al., 2019) 对 SAP 光变曲线进行处理。wotan 是一款集成了例如二分加权、样条、多项式拟合等多种算法的对时间序列进行去趋

¹<https://github.com/hippke/wotan>

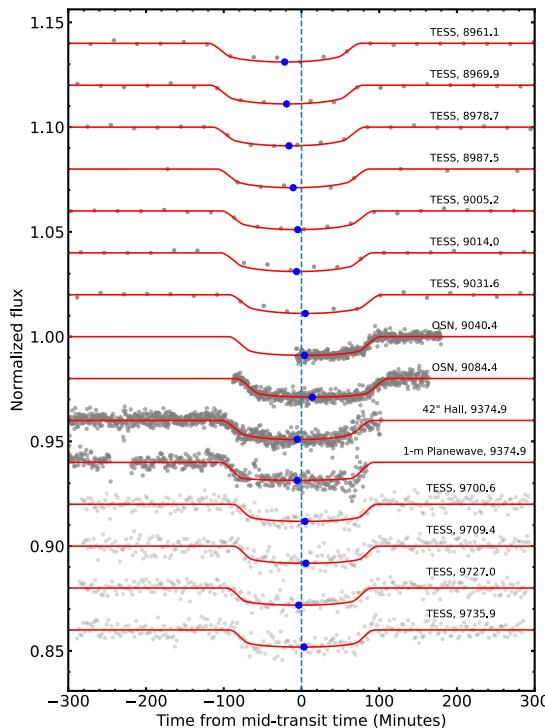


图 4-1 我们目前收集到的 WASP-148 b 的光变曲线。中间的蓝色虚线是使用线性历元公式预测的中心时刻。光变曲线的数据点以灰色表示，最佳的拟合模型以红色实线表示。

Figure 4-1 All transits of WASP-148 we collected. The transit mid times predicted by linear ephemeris are shown as blue dashed line. The transit data point is in gray. Solid red lines represent best-fit model of each transit.

势化的开源软件。我们首先使用 `lightkurve` (Lightkurve Collaboration et al., 2018) 下载 WASP-148 的 SAP 光变数据。然后，我们将周期 8.803810 天和历元参考点 2457957.4877 作为输入，从而计算出每个凌星发生的时间。基于它们，我们在 SAP 光变数据中掩盖掉凌星事件所对应的凌星部分数据，从而减少凌星事件的光变对趋势去除的影响。之后，我们使用一系列 \cos 和 \sin 曲线的集合来拟合光变曲线中的趋势。处理好的 *TESS* 光变曲线和其他可用的地基光变曲线见图 4-1。

4.2.2 地基光变曲线

Maciejewski et al. (2020) 公开了从塞拉内华达 (Sierra Nevada) 天文台的 1.5 m Ritchey-Chrétien 望远镜获得的两条光变曲线，其曝光时间为 20 秒。需要注意的是其中一条光变曲线并不完整。

此外，我们还使用来自 Lowell 天文台 42 inch Hall 望远镜的一条光变曲线 (见图 3-4)。光变曲线的获取和处理在本文的 3.3.3.1 小节中详细介绍，不再赘述。

4.3 视向速度数据

继对 WASP-148 b 的 Rossiter-McLaughlin 效应进行观测之后，我们使用 WIYN 天文台 3.5m 望远镜所配备的 NEID 光谱仪对该目标进行持续的后随测光观测。

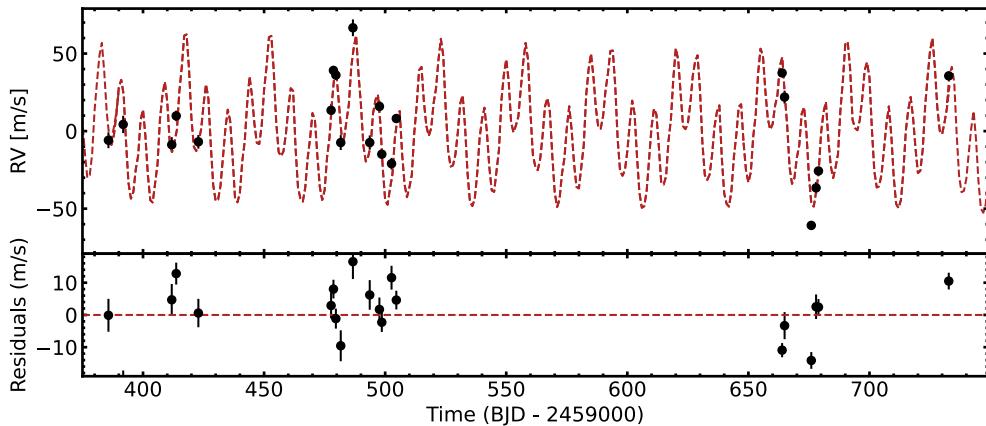


图 4-2 在 2021 年 06 月 20 日到 2022 年 06 月 02 日期间, NEID 光谱仪对 WASP-148 所进行的 21 次 RV 测量。其中, 红色虚线是最佳的拟合模型。

Figure 4-2 21 RV measurements of WASP-148 using NEID from June 20, 2021 to June 02, 2022. Red dashed line represent the best-fit model.

在 2021 年 06 月 20 日到 2022 年 06 月 02 日期间, 我们对 WASP-148 进行了 22 次 RV 测量, 其中 2021 年 06 月 28 日的 RV 测量值远远偏离其他测量值的平均值, 因此, 我们舍去该数据点。最终的用于分析的 NEID RV 数据共计 21 个。NEID RV 数据在表 4-1 中给出, 图 4-2 展示的是 NEID RV 数据和最佳拟合模型。

4.4 数据拟合

4.4.1 TTV 和 RV 数据生成器

为了生成模拟的 TTV 和 RV 数据, 研究人员开发了各式各样的软件。研究人员最初从常规的轨道积分器如 Runge-Kutta (Butcher, 1987)、Bulirsch-Stoer (Wisdom et al., 1991; McLachlan, 1995) 以及 MERCURY (Chambers, 1999) 等出发通过计算恒星的速度和其与行星的相对位置得到 TTV 和 RV 数据。后来, 随着通过 TTV 信号求解多行星系统的参数这一研究方向的不断升温, 一系列封装好的 TTV 和 RV 数据生成器接连出现。基于 Bulirsch-Stoer 算法的 TTVFast (Deck et al., 2014) 可以实现直接将行星系统参数“翻译”成 TTV 和 RV 信号, 使用者无需进行额外的编程工作。对于结构紧凑的、具有超过 3 个行星以上的、近似圆轨道的多行星系统, TTVFaster (Agol et al., 2016) 的模拟可以更加快速。TTVFaster 在近似圆轨道的假设下使用了 TTV 的解析公式, 避免了使用轨道积分器所需的繁重的数值积分, 从而大大提升了模拟速度。此外, 由于该生成器基于解析公式, 因此其可以被自动微分工具 ForwardDiff.jl (Revels et al., 2016) 自动微分。Tuchow et al. (2019) 使用该方法并结合哈密顿蒙特卡洛马尔可夫链 (Hamiltonian MCMC, Neal, 2011) 实现了高效率的 TTV 信号生成框架。此外, 其他可以自动微分的生成器还有 NbodyGradient (Agol et al., 2021)。为了实现生成器的高速化, 除了使用高效的代码以及编程语言以外, 更换数据处理单元也是一个选择。相比中央处理单元 (Central Processing Units, CPU), 图形处理单元 (Graphics Processing Units,

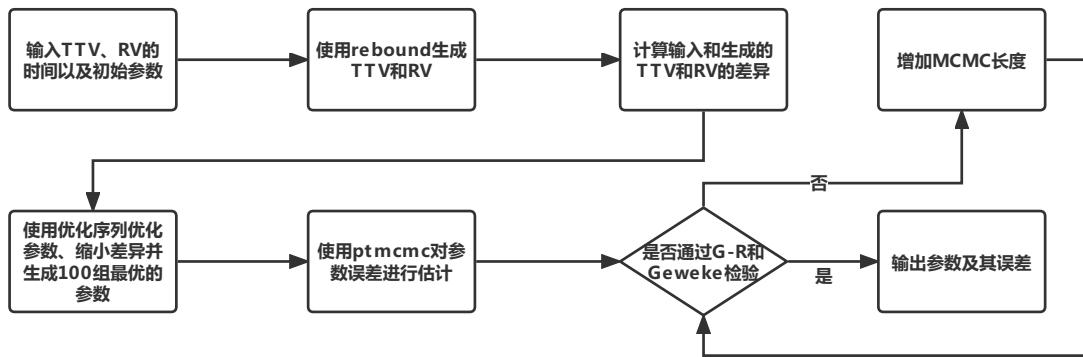


图 4-3 TTV × RV 拟合算法流程图

Figure 4-3 Flow chart for TTV × RV fit algorithm

GPU) 拥有更为纯粹的计算环境和更多的处理单元, 因此深受机器学习领域的青睐。使用 GPU 的 Swarm-NG (Dindar et al., 2013) 和 GENGA (Grimm et al., 2022) 可以同时模拟数千个具有多至 10 个行星的系外行星系统的 TTV 信号, 从而能够在更短的时间内探索更多的构型。著名的 7 行星系统 TRAPPIST-1 的 TTV 信号拟合工作便是基于 GENGA 完成 (Grimm et al., 2018)。

在本工作中, 我们采用了 Rebound 积分器来计算 TTV 和 RV 信号, 所使用的积分算法为 Gragg-Bulirsch-Stoer。Rebound 提供了一系列积分算法, 如 IAS15 (Rein et al., 2015a)、WHFast (Rein et al., 2015b)、Gragg-Bulirsch-Stoer、Mecurius (Rein et al., 2019a)、SABA (Rein et al., 2019b)、JANUS (Rein et al., 2018) 等。其中被广泛使用的主要有前三个积分算法。IAS15 意为自适应步长的 15 阶积分器 (Integrator with Adaptive Step-size control, 15th order), 一个非常高精度的非辛算法积分器。它可以处理任意积分过程中产生的力和场景, 如太阳对小天体的辐射压力以及天体碰撞等 (Everhart, 1985; Rein et al., 2015a)。WHFast 是一款适用系统内各天体受到简单摄动力且稳定运行的较为简单场景的基于辛算法的轨道积分方法, 因此相较 IAS15, 该方法速度极快, 适用于行星系统的长时间跨度模拟。基于辛算法的轨道积分器要求在积分过程中保持步长一致, 因此在使用该方法的过程中需要注意由于步长限制带来的模拟数据的误差 (Millholland et al., 2018)。和 IAS15 类似, Gragg-Bulirsch-Stoer 算法也有着自适应步长的特点。它基于理查德外推 (Richardson extrapolation, Richardson, 1911) 和修正后的中点法对积分过程中的常微分方程求解。Gragg-Bulirsch-Stoer 适用于短时间的中等精度的模拟, 而对于长周期的轨道积分, WHFast 是更好的选择, 如果需要处理天体碰撞与合并等极端场景, IAS15 的高精度积分是必不可少的。Mecurius 是 WHFast 和 IAS15 的有机结合, 在系统平稳的状态下, Mecurius 将使用 WHFast 以保证模拟速度, 而遇到天体近距离交汇的时候, IAS15 则提供模拟精度的保证。在 8 年的 TTV 和 RV 数据的时间尺度上, Gragg-Bulirsch-Stoer 算法和 IAS15 算法所生成的数据一致: TTV 信号最大差异为 0.2 s, RV 信号的差异在 0.0001 m s^{-1} 水平

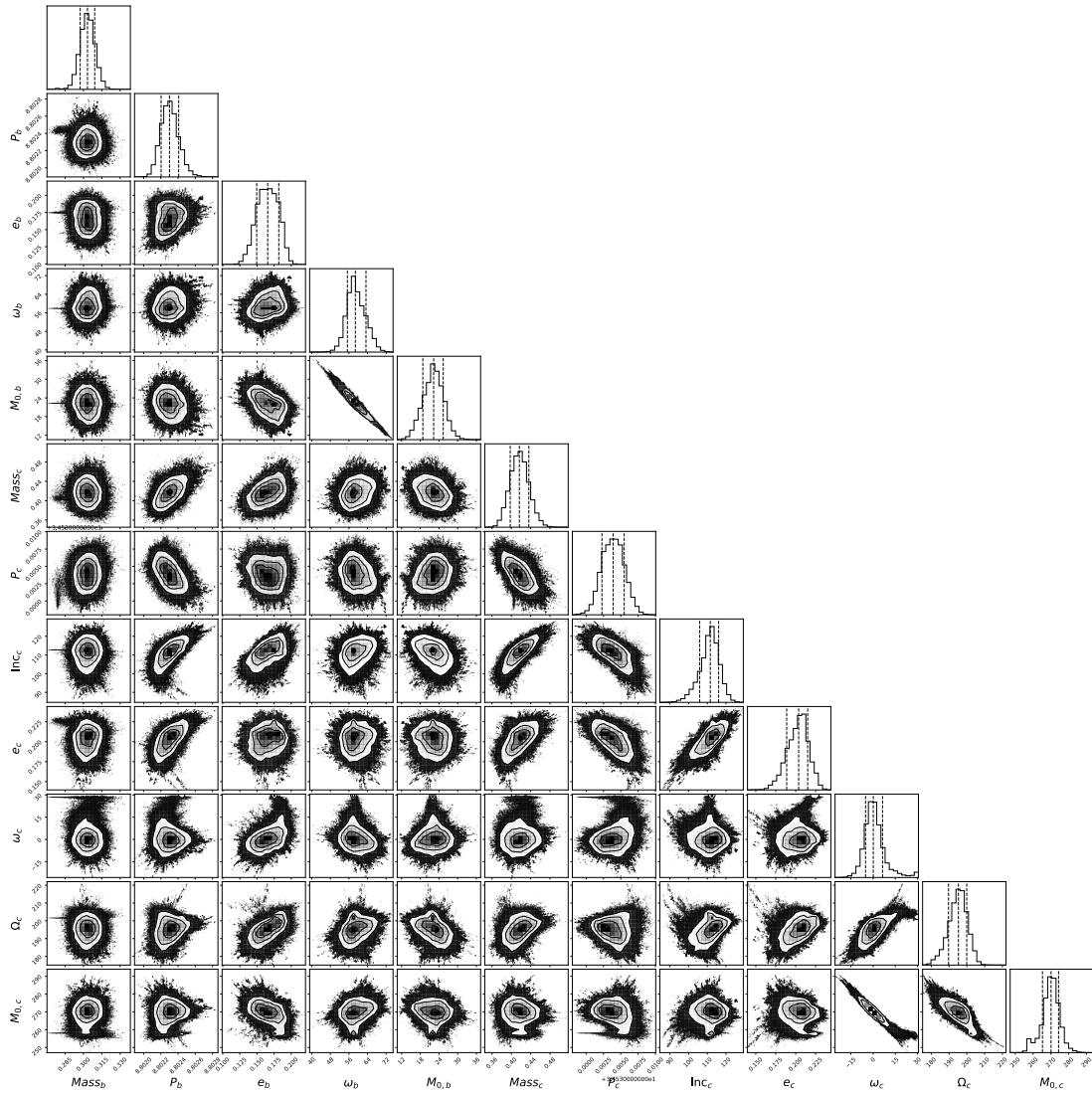


图 4-4 通过 WASP-148 的 TTV \times RV 的全局拟合得到的系统参数的后验概率分布

Figure 4-4 The posterior distribution of all system parameter from TTV \times RV fit

上。因此, Gragg-Bulirsch-Stoer 算法满足本工作对数据模拟精度和速度的要求。

为了能够对 Almenara et al. (2022) 中给出的最大后验估计 (Maximum A Posteriori, MAP) 参数验证, 我们采用了和其一样的模拟策略。我们设置 Z 轴为视线轴, 观测者在 Z 轴的正方向上, 行星按顺时针旋转 (如图 4-7 所示)。经过验证, 根据 Almenara et al. (2022) 的 MAP 所预测的和观测的 TTV 和 RV 信号一致, 残差的 rms 分别在 1.1 分钟和 10 m s^{-1} 。

4.4.2 参数优化

受到 Canul et al. (2021) 的启发, 为了寻找最佳的初始参数组合, 我们使用 lmfit (Newville et al., 2014) 构建了一套包含全局和局部优化算法的优化序列。我们首先使用差分进化算法 (Differential evolution, DE, Storn et al. 1997) 寻找较好的参数组合。DE 算法可以在无需初始猜测值的情况下在参数空间内进行大范

围的搜索，是一种高效的全局优化算法。作为启发式算法，DE 算法不要求目标函数连续、可微分，且不需要参数的迭代更新无需概率分布引导。但是，对于多参数目标函数，该算法存在着收敛速度慢、易陷入局部最小值的缺点。因此它适合于搜索初步解。我们将该算法并行化，同时在参数空间内均匀的生成多个（默认为 100 个）初始参数组合。该搜索过程持续 10000 步，之后，我们选取其中最优的一批（默认为 100 个）初解作为下一个优化过程的初始值。然后，我们使用 POWELL (Powell, 1964) 算法在初解的基础上进行局部最小值的搜索。最后，我们再使用单纯形算法 (Nelder–Mead, Nelder et al. 1965b) 对从 POWELL 算法中得到的最佳的 100 组参数进行更进一步的优化，从而找到最佳的参数组合。

4.4.3 MCMC 采样

基于优化序列获得的前 100 组最佳的起始参数，我们使用 MCMC 方法对各个参数的误差进行估计。在本工作中，我们使用并行退火蒙特卡洛马尔科夫链 (Parallel-Tempering Markov chain Monte Carlo, ptmcmc) 策略。基于该策略的 ptemcee (Foreman-Mackey et al., 2013c; Vousden et al., 2016) 适合于多峰目标函数和高维参数空间的探索。对于 TTV 和 RV 的联合拟合问题，每增加一个行星，参数便增加 7 个，包括行星质量和 6 个轨道根数。并行退火策略和其他 MCMC 方法不同的是，它会产生具有不同温度的 walker，具有较高温度的 walker 拥有更多的能量，可以在不同的近似局部最优解之间跳转，而温度比较低的 walker 则可以在局部最小附近不断逼近局部最小值。此外，该方法允许不同温度的 walker 以一定的概率交换位置，从而提高对参数空间搜索的效率。

对于 WASP-148 的 TTV 和 RV 的联合拟合中的每个参数，我们基于 100 组起始参数和 3 个递增的温度 (1、3、10) 生成了 3×100 的初始参数矩阵。以这个参数矩阵为起点，ptmcmc 对参数空间进行搜索和对参数的误差进行采样。在 MCMC 过程中，我们还加入了基于角动量损失 (Angular Momentum Deficit, AMD, Petit et al. 2017) 的行星系统稳定性快速检查机制。如果某一组参数所定义的系统不稳定，那么 mcmc 将不接受该组参数。此外，为了可以方便地重复以及延长 MCMC 过程，我们将 MCMC 过程所产生的马尔科夫链以数组的形式储存在 HFD5 文件中。

因为 ptmcmc 的各个链之间是彼此独立的，所以我们使用 Gelman–Rubin 检验法 (Gelman et al., 1992) 和 Geweke 检验法 (Geweke et al., 1991) 对 MCMC 的收敛性进行检验。Gelman–Rubin 检验法通过单条链内的中值和多个链之间的中值之比来判断马尔科夫链是否收敛。对于多条链而言，每条链的中值都非常接近（即 1），那么可以说其已经收敛。我们要求收敛的马尔可夫链满足 Gelman–Rubin 检验量 \hat{R} 小于 1.01。Geweke 检验法的出发点是认为收敛的马尔科夫链的前半段和后半段应该具有相似或者一致的分布。Geweke 对每一条马尔可夫链计算 Geweke 统计量，当最大的 Geweke 统计量小于 1 的时候，我们认为所有的链已经收敛。算法流程图显示在图 4-3 中。

4.4.4 TTV \times RV 联合拟合

基于前几小节讲到的优化和采样过程，我们对所收集到的 RV 和 TTV 数据进行拟合。为了验证我们代码的可靠性，我们使用和 [Almenara et al. \(2022\)](#) 一样的数据进行了拟合。我们最后得到的行星间夹角的收敛结果 ($38.5^{+4.5}_{-5.0}$ °) 和 [Almenara et al. \(2022\)](#) 给出的 ($41.0^{+6.2}_{-7.6}$ °) 一致，从而说明了我们的代码的可靠性。

我们将 [Almenara et al. \(2022\)](#) 中所使用的 TTV 和 SOPHIE RV 以及新的 TTV 和 NEID RV 数据进行分组拟合从而分析新得到的数据对系统参数限制的贡献。拟合的分组为：a) [Almenara et al. \(2022\)](#) 中的 TTV 和 SOPHIE RV，记作“O.R+O.T”；b) [Almenara et al. \(2022\)](#) 的数据加上我们新得到的 TTV，记作“O.R+O.T+N.T”；c) [Almenara et al. \(2022\)](#) 的数据加上我们新得到的 NEID RV，记作“O.R+O.T+N.R”；d) 全部 TTV 和新得到的 NEID RV，记作“N.R+All TTVs”；e) [Almenara et al. \(2022\)](#) 的数据加上我们新得到的 TTV 以及 NEID 的 RV，记作“All data”。

拟合的结果显示，随着新数据的加入，行星间夹角不断变小。全部数据的拟合 (e) 显示两行星的行星间夹角为 $26.5^{+5.3}_{-6.6}$ °，拟合的后验概率分布图在 4-4 中显示，各组的结果在表格 4-2 中给出。

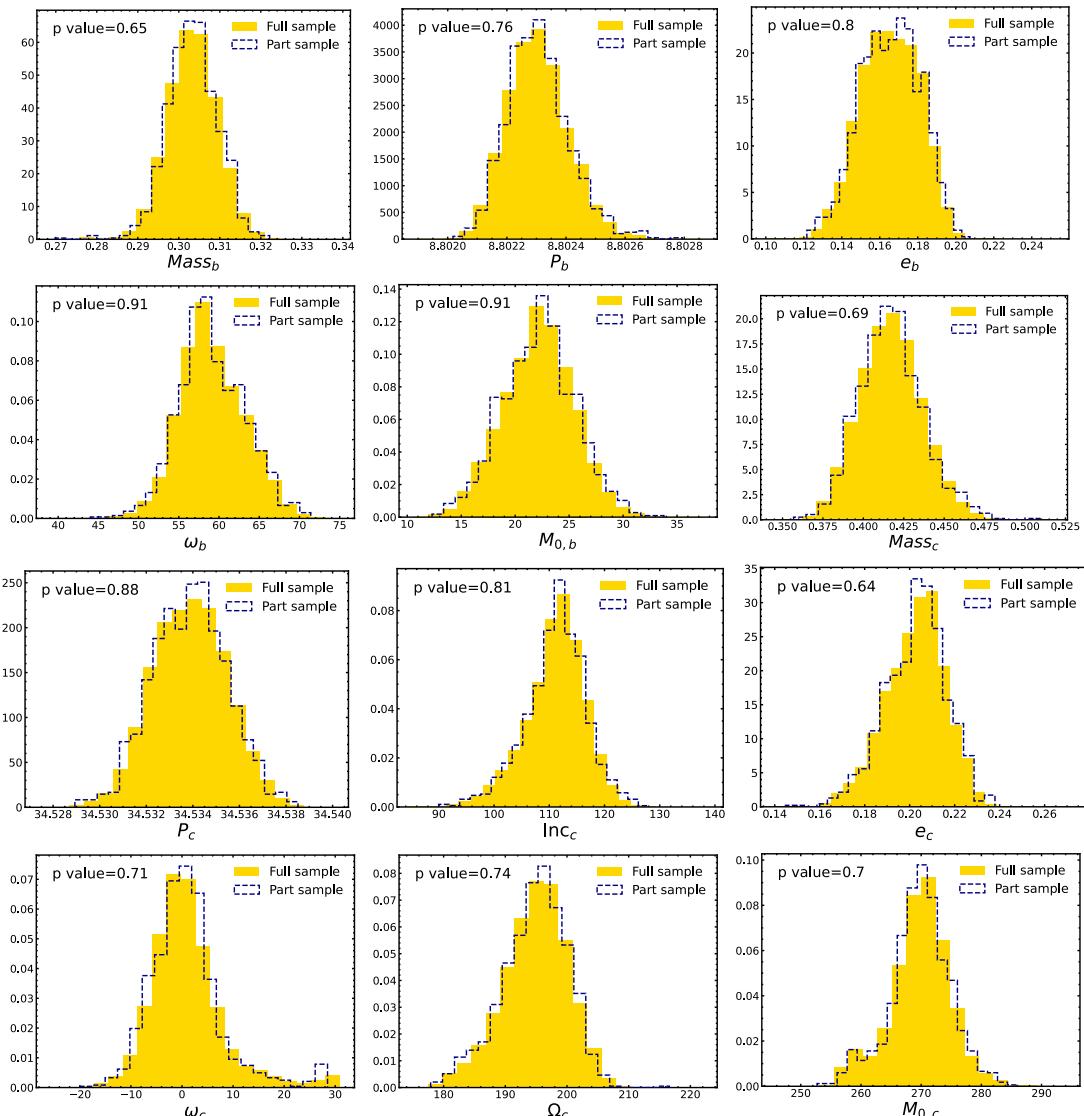


图 4-5 TTV \times RV 拟合的全部和部分 (1000 组) 样本分布。黄色的部分是总体样本，蓝色虚线部分代表的是抽取的样本。由 K-S 检验计算出的 p 值代表这个两个样本的一致性。

Figure 4-5 The full and partial (1000) sample distribution of all system parameter from TTV \times RV fit. Full sample shows in yellow and partial sample represented by blue dash line. P value from K-S test represents the agreement between these two samples.

4.5 结果分析与讨论

4.5.1 系统稳定性分析

尽管我们在对系统的拟合过程中进行了基于 AMD 的系统稳定性的快速判断，但是基于得到的参数进行轨道积分仍旧是最为可靠的方法。因此，在本工作中，我们使用 **Rebound** (Rein et al., 2012, 2015b) 对收敛的 MCMC 样本进行轨道稳定性的检验。对于单个参数，我们仅考虑温度最低的链。拟合中，我们使用了 100 个 **walker**，总步数为 20000 步，因此最终收敛的样本的大小为 200 万。我们无法对全部 200 万组参数进行稳定性检验，因此我们从其中抽取具有代表性的 1000 组进行检验。我们从总体的样本中随机抽取 1000 组参数，并通过科尔莫戈罗夫-斯米尔诺夫检验 (Kolmogorov-Smirnov test, K-S test, Chakravarti et al., 1967, page 392-394) 比较 1000 组子样本和总体样本的分布的差异。K-S 检验的 p 值越大，所比较的两个样本越一致。在本工作中，我们选取的 1000 组样本参数和总体样本的参数的 K-S 检验的 p 值都大于 0.6 (如图 4-5 所示)。我们使用 **Rebound** 内置的最快的 WHFast 积分器对每一组参数积分 10 万年。在轨道积分的过程中，每 100 年，我们记录一次数据，如果系统内行星彼此碰撞或者逃逸到距离主星 10 AU 以外的区域，程序将提前终止并给出系统不稳定的判断 (MENGO>4)。经过模拟，我们发现只有 9 组参数对应的构型不稳定，即 99% 以上的系统是稳定的。所用的全部数据和从后验概率分布中抽取的 20 组参数对应的模型在图 4-6 给出。系统构型在图 4-7 中给出。

4.5.2 处于稳定边界的行星系统存在的物理意义

系外行星系统 WASP-148 拥有着一颗 G5V 型主星以及一对处于近 1:4 平运动共振的热木星 ($P_b = 8.802$ days, $\text{Mass}_b = 0.303 \pm 0.006 M_J$) 和暖木星 ($P_b = 34.534$ days, $\text{Mass}_b = 0.417^{+0.020}_{-0.019} M_J$)。此外，两颗行星的偏心率分别为, $e_b = 0.166 \pm 0.016$, $e_c = 0.204^{+0.011}_{-0.015}$ 。我们的模拟显示行星公转轴之间的夹角为 $26.468^{+5.317}_{-6.591}$ 。

基于历史的 SOPHIE RV 和 TTV，在不考虑系统稳定性的情况下，前人的工作 (Hébrard et al., 2020; Maciejewski et al., 2020; Almenara et al., 2022) 对行星间夹角的估计依次为, <35 °、 ~ 46 ° 以及 $41.0^{+6.2}_{-7.6}$ °。Almenara et al. (2022) 从 MCMC 方法得到的后验概率分布中抽取来 5 万组参数，并对它们分别进行了时间长度为 5 万年的稳定性分析，最后得到了 1239 组 (总数的 2.5%) 稳定的参数组合。稳定参数组合对应的行星间夹角为 20.8 ± 4.6 °，该结果和我们基于历史数据和 NEID RV 和新的 TTV 数据的得到的行星间夹角 $26.5^{+5.3}_{-6.6}$ °一致。同样地，在本文所述的工作中，我们也进行了稳定性检验。我们对从收敛的后验概率分布抽取的 1000 组参数进行了 10 万年的轨道积分。根据从中计算出来的每组的稳定性指数 MEGNO 的统计，我们发现 99% 的参数组合是稳定的。这意味着相比 Almenara et al. (2022)，我们的结果具有更高的可靠性。

截至目前，除了 WASP-148 以外，还有一些系统拥有着行星间夹角的测量结

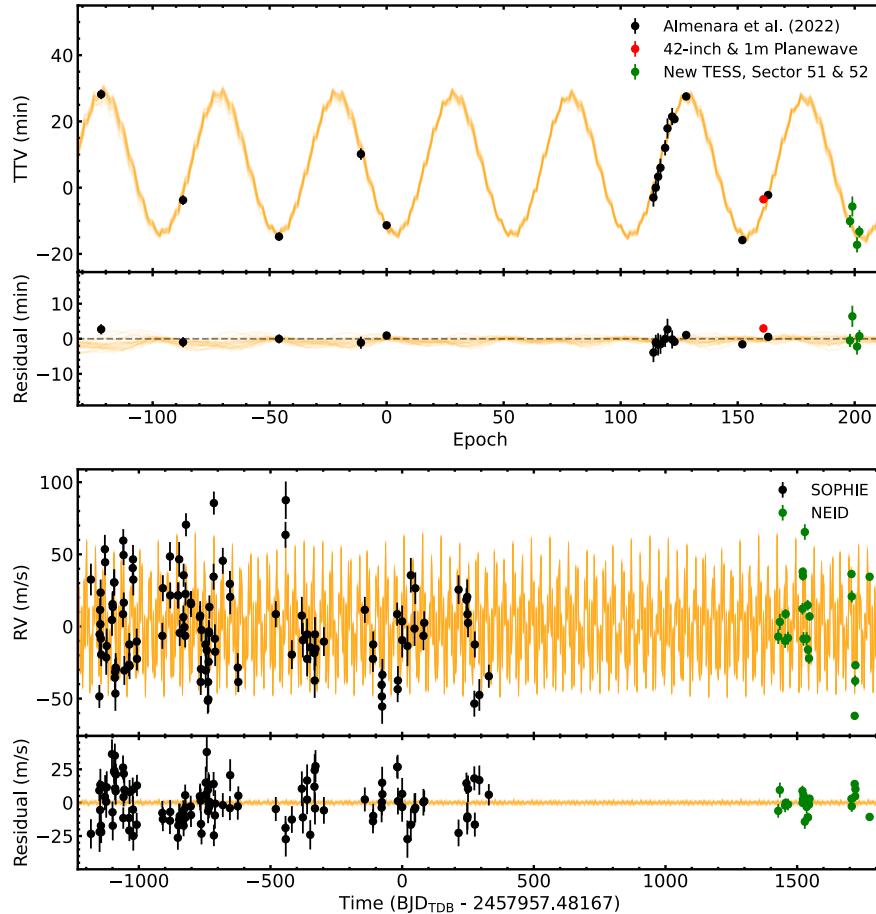


图 4-6 TTV 和 RV 数据以及我们拟合给出的模型

Figure 4-6 TTV and RV and their models from our fit

果: HD 3167 的行星间夹角为 $102.3^{+7.4}_{-8.0} \text{ }^\circ$ (Dalal et al., 2019), ν Andromedae 的行星间夹角为 $30 \pm 1 \text{ }^\circ$ (McArthur et al., 2010), Kepler-108 的行星间夹角为 $24^{+11}_{-8} \text{ }^\circ$ (Mills et al., 2017), π Mensae 的行星间夹角的范围为 $[34.5, 140.6] \text{ }^\circ$ (De Rosa et al., 2020b)。这些拥有大行星间夹角的系统往往处于稳定性边界, 即行星间夹角的微小变化即可导致系统的不稳定。因此, 它们可以被看作一种稳定-不稳定的中间态。此观测事实支持一种近期被提出的可能的热木星形成模式 (Radzom et al., 2023; Wu et al., 2023)。

首先, 在原行星盘阶段, 盘内生成多个行星核, 甚至可以是处于共振链上的行星核 (Goldberg et al., 2022)。此后的演化有两种情况。一种是, 轨道较短的超级地球大小的行星核在本地进行气体吸积, 从而生长为热木星, 而其他的行星核成为长周期的超级地球。长周期的超级地球产生的 TTV 不足以被探测到, 因此我们的 TEMP 及其他研究 (比如, Steffen et al., 2012; Ivshina et al., 2022) 没有探测到热木星的 TTV 信号。另一种情况是, 两个以及以上长周期的行星核经历气体吸积然后发生行星-行星散射, 从而激发木星的偏心率。之后经过剧烈的动力学相互作用 (例如行星碰撞), 其轨道逐渐圆化, 行星向内迁移, 从而导致孤独的热木星系统。在第二种演化路径中, 行星-行星散射并不一定发生, 因为一

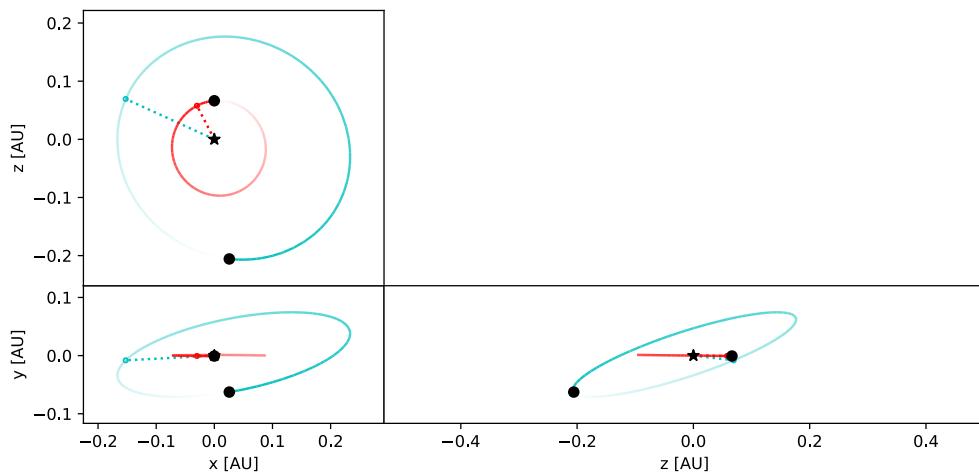


图 4-7 系外行星系统 WASP-148 的轨道在 X-Y-Z 平面的投影。左上、坐下、和右下依次是该系统位于 X-Z、X-Y 和 Z-Y 平面的投影。红色的线表示内部行星的轨迹，外部行星的轨迹用蓝色表示。图中的虚线表示的是近星点的位置。

Figure 4-7 The orbital projections of Explanatory WASP-148. The plots of upper left, lower left and lower right represent the orbital projections in X-Z, X-Y and Z-Y plane. Trajectories of inner and outer planets are shown in red and blue. The points of intersection between dashed line and orbital trajectories are periastron.

些系统会停留在过渡态，即类似 WASP-148 这类处于稳定-非稳定边界的系统。

表 4-2 WASP-148 的 $RV \times TTV$ 拟合的先验和系统参数
Table 4-2 Priors and result system parameters for $RV \times TTV$ fit of WASP-148

Parameters	Priors	O.R+O.T	O.R+O.T+N.T	O.R+O.T+N.R	N.R+All TTVs	All data
Star						
Stellar mass, M_{\star} (M_{\odot})						
WASP-148 b:						
Planet mass, $M_{P,b}$ (M_{\oplus})	0.308	0.281 \pm 0.008	0.281 \pm 0.008	0.303 \pm 0.006	0.317 $^{+0.008}_{-0.009}$	0.303 \pm 0.006
Orbital period, P_b (days)	8.8037	8.8025 \pm 0.0001	8.8025 \pm 0.0001	8.8025 \pm 0.0002	8.80205 \pm 0.0001	8.8023 \pm 0.0001
Eccentricity, e_b	0.208	0.186 $^{+0.015}_{-0.016}$	0.178 $^{+0.016}_{-0.015}$	0.135 \pm 0.012	0.143 $^{+0.020}_{-0.015}$	0.166 \pm 0.016
Inclination, i (deg)				89.32 (fixed)		
Argument of pericentre, ω_b (deg)	62.6	63.4 $^{+4.6}_{-4.6}$	61.5 $^{+4.7}_{-4.5}$	54.2 $^{+4.6}_{-4.8}$	58.0 $^{+6.6}_{-5.4}$	58.8 $^{+4.6}_{-3.4}$
Longitude of the ascending node, Ω_b (deg)			180 (fixed)			
Mean anomaly, $M_{0,b}$ (deg)	17.8	18.1 $^{+3.5}_{-3.3}$	19.8 \pm 3.5	27.5 $^{+4.3}_{-3.9}$	23.9 $^{+4.2}_{-5.1}$	22.3 $^{+3.1}_{-3.5}$
WASP-148 c:						
Planet mass, $M_{P,c}$ (M_{\oplus})	0.406	0.432 $^{+0.026}_{-0.024}$	0.419 $^{+0.023}_{-0.022}$	0.431 $^{+0.023}_{-0.020}$	0.482 $^{+0.021}_{-0.024}$	0.417 $^{+0.020}_{-0.019}$
Orbital period, P_c (days)	34.546	34.526 \pm 0.002	34.529 \pm 0.002	34.536 \pm 0.001	34.529 \pm 0.002	34.534 \pm 0.002
Inclination, i_c	106.7	119.3 $^{+4.5}_{-4.8}$	115.4 $^{+4.2}_{-4.5}$	118.0 $^{+4.7}_{-5.2}$	115.8 $^{+3.0}_{-4.2}$	111.6 $^{+4.5}_{-5.6}$
Eccentricity, e_c	0.1791	0.238 $^{+0.008}_{-0.010}$	0.233 $^{+0.008}_{-0.009}$	0.160 \pm 0.011	0.211 $^{+0.010}_{-0.011}$	0.204 $^{+0.011}_{-0.015}$
Argument of pericentre, ω_c (deg)	25.7	24.6 $^{+3.2}_{-3.3}$	26.2 $^{+3.4}_{-3.3}$	-16.6 $^{+5.0}_{-5.4}$	-20.9 $^{+8.4}_{-7.0}$	0.12 $^{+0.26}_{-0.21}$
Longitude of the ascending node, Ω_c (deg)	191.6	206.1 $^{+3.1}_{-3.5}$	204.5 $^{+3.2}_{-3.7}$	164.7 $^{+3.5}_{-3.6}$	190.9 $^{+3.4}_{-3.5}$	195.3 $^{+4.7}_{-5.6}$
Mean anomaly, $M_{0,cM}$ (deg)	260.4	261.2 \pm 1.9	259.7 $^{+2.0}_{-2.1}$	287.0 $^{+5.2}_{-4.7}$	278.9 $^{+6.0}_{-6.3}$	270.1 $^{+4.2}_{-4.8}$
RV offset (SOPHIE, m/s)	-	-5617.8 \pm 0.6	-5617.9 $^{+0.6}_{-0.7}$	-5618.1 \pm 0.6	-5570.5 \pm 0.6	-5618.3 \pm 0.6
RV offset (NEID, m/s)	-	-	-	-5570.5 \pm 0.5	-	-5570.2 \pm 0.6
Mutual inclination, I (deg)	20.7	38.5 $^{+4.5}_{-5.0}$	34.9 $^{+4.3}_{-5.0}$	31.8 $^{+4.9}_{-5.3}$	28.0 $^{+3.9}_{-5.0}$	26.5 $^{+5.3}_{-6.6}$

注: O.R+O.T: Almenara et al. (2022) 中的 TTVs 和 SOPHIE RV, O.R+O.T+N.T: Almenara et al. (2022) 的数据加上我们新得到的 TTVs, O.R+O.T+N.R: Almenara et al. (2022) 的数据加上我们新得到的 NEID RVs, All data: 全部 TTV 和新得到的 NEID RV, All data: Almenara et al. (2022) 的数据加上我们新得到的 TTV 以及 NEID 的 RV。

Note: O.R+O.T: TTVs and RVs from Almenara et al. (2022), O.R+O.T+N.T: TTVs and RVs from Almenara et al. (2022) and New TTVs, O.R+O.T+N.R: TTVs and RVs from Almenara et al. (2022) and NEID RVs, N.R+All TTVs: All TTVs and NEID RVs, All data: All TTVs and all RVs.

第5章 基于风云二号卫星数据的天文站点的可观测夜数分析

5.1 引言

在寻找优秀天文台址的过程中（例如，Erasmus et al. 2001; Sarazin et al. 2006; Ma et al. 2020），科研人员对于天文气候条件的考察是不可或缺的。主要的天文气候条件包括：云覆盖率、大气湿度、大气透明度和代表大气湍流强弱的视宁度。在这些条件中，最为主要的是云覆盖率，因为它直接影响着可观测夜的多少 (Graham et al., 2005; Sarazin et al., 2006; Varela et al., 2008; Aksaker et al., 2015)。

可观测夜数是用于评价天文台和潜在天文台址的天文观测条件的基本标准 (Cavazzani et al., 2011; Hidayat et al., 2012; Hotan et al., 2013; Hellemeier et al., 2018)。可观测夜数的统计情况可以帮助研究人员制定以及调整观测策略，并可以为天文台所配备的观测设备的更新和维护提供参考。对潜在优秀台址的位置进行长时间周期的可观测夜的监测和统计可以为新的天文台的建设提供重要参考。

目前主要有三类数据可以用于量化可观测夜数：地面气象站数据、天文台观测日志以及气象卫星数据。地面气象站数据包括当地的温度、相对湿度、风速、风向和大气压强。这些数据可以用于评估气象站所在位置的天文观测条件 (Lombardi et al., 2006, 2007, 2008)。地面气象站数据有着覆盖的地理方位广和所积累的数据时间长的优点。然而，地面气象台站的地理分布具有不均匀性，人口较少的区域的气象台站的分布相比人口密集地区的分布要更为稀疏，这将影响对天文观测条件的估计。相比于气象台站，天文台观测日志数据是另一种更为可靠的可以用于天文观测条件评估的数据。因为观测人员会在每个观测的夜晚记录当晚的天气情况，所以天文台日志对于天气的描述是详尽而准确的。但是，对于天气的晴阴和云量的多少等天气状况的描述，观测人员往往根据自己的经验通过对天空的目视观察得到。此外，天文台观测日志仅能反映天文台所在位置的天文气象条件，因此它们无法用于新的台址的搜寻。近些年，由于气象卫星数据质量的提高，它们正在逐渐被用于天文台和潜在天文台台址的天文气象条件的评估上 (Erasmus et al., 2001; Sarazin et al., 2006; Cavazzani et al., 2011; Aksaker et al., 2015, 2020)。和地面气象台站相似，气象卫星数据也有着覆盖的地理范围广和数据覆盖时间长的优势。除此之外，气象卫星的数据还可以借助其覆盖范围广的优势在全球搜寻优秀的天文台址。但是，和地面气象站数据和天文台观测日志相比，气象卫星数据的时间和空间分辨率较低，可能会导致对天文气象条件的不准确估计。

自从 Erasmus et al. (2001, 2002, 2006) 证明了使用气象卫星数据量化天文台和潜在天文台址的天文气象条件的可行性之后，研究人员便开始基于从气象卫星数据中得到的可观测夜数来进行辅助台址的选择工作。Yao (2005) 总结了我国天文学家使用日本同步卫星 (Japanese Geostationary Meteorological Satellite, GMS) 和美国地球静止轨道环境监测卫星 (Geostationary Operational Environmental Satel-

lite, GOES) 对我国西部地区进行天文台址选择的工作。对于欧洲极大望远镜的选址工作, [Sarazin et al. \(2006\)](#) 使用了由欧洲中尺度天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF¹) 和地理信息系统 (Geographical Information System, GIS) 提供的长周期的再分析气候数据开发了一款名为 FriOWL 的台址选址工具。基于 GOES 12 卫星的红外图像数据, [Cavazzani et al. \(2011\)](#) 提出了基于多个红外波段阈值的夜晚分类方法, 并将该方法运用到 Paranal、La Silla、La Palma、Mt Graham 以及 Tolonchar 地区。[Hidayat et al. \(2012\)](#) 使用 GOES 9 的 6.7 和 10.7 μm 的红外波段数据计算了印度尼西亚的可观测夜数分布。在最近台址选择工作中 (例如, [Aksaker et al. 2015, 2020; Daniyal et al. 2019](#)) 基于 GIS 的多准则决策模型 (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) 被广泛应用。至今, 世界上最好的天文台址几乎都在西半球 ([Vernin et al., 2008; Schöck et al., 2009](#))。作为东半球地理范围最为广袤的国家之一, 我国拥有着为世界提供优秀天文台址的巨大潜力。

对于天文台址的选择而言, 可观测夜数是重要的参考因素。但是对于可观测夜的定义, 前人的相关工作有着不同的定义。[Hidayat et al. \(2012\)](#) 和 [Erasmus et al. \(2002\)](#) 选取了气象卫星图像上以感兴趣的地点为中心的 5×5 个像元大小的区域代表在此地点可见的天空范围, 他们定义当 25 个像元中超过 20 个像元没有云的夜晚为可观测夜。[Cavazzani et al. \(2011\)](#) 定义气象卫星图像上以待监测点为中心的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的像元组的亮温 (T_B) 满足 $2\sigma < (T_B^{\text{Max}} - T_B) < 3\sigma$ 的夜晚为可观测夜, 其中 1σ 是该月的亮温变化范围, T_B^{Max} 是当月的亮温最大值。在本工作中, 为了定义可观测夜, 我们同时考虑了天文可观测天空和夜晚的可观测时长。我们定义天文可观测天空为天顶距 60° 以内的天空。我们使用天文可观测天空在气象卫星图像数据的投影来表示感兴趣区域的天气情况。此外, 我们还要求只有当有不少于 3 个小时可用于观测的夜晚才能被称为可观测夜。

我们的工作介绍了一种使用气象卫星数据和地面数据相结合来估计感兴趣的地点的可观测夜数的方法。在本工作中, 我们使用了中国风云二号系列气象卫星的总云量数据 (Cloud Total Amount, CTA) 和对流层上层相对湿度数据 (Upper Troposphere Humidity, UTH)。本工作首次将我国风云气象卫星数据应用于可观测夜数的估计。地面观测数据包括兴隆观测站 60/90cm 施密特望远镜的观测日志、兴隆观测站的天文气象条件统计 ([Zhang et al., 2015](#))、德令哈观测站 2011-2014 年 ([Tian et al., 2016](#)) 和丽江观测站 2019 年 ([Xin et al., 2020](#)) 的可观测夜记录。气象卫星数据的相对较低的空间分辨率会影响可观测夜的判定, 进而影响天文可观测夜数的统计。因此, 作为重要参考资料的地面数据可以帮助我们减小此因素的影响。

¹<https://www.ecmwf.int/>

表 5-1 VISSR-2 辐射计的主要技术参数

Table 5-1 Main technical properties of the VISSR-2 radiometer

Channel	Range (μm)	Ground Resolution at Nadir (km)
Infrared 1	10.3 ~ 11.3	5
Infrared 2	11.5 ~ 12.5	5
Infrared 3	6.3 ~ 7.6	5
Infrared 4	3.5 ~ 4.0	5
Visible	0.55 ~ 0.99	1.25

5.2 气象卫星数据

气象卫星数据为评估天文台址的天文气象情况提供了宝贵的数据 (Erasmus et al., 2002; Sarazin et al., 2006; Cavazzani et al., 2011)。根据轨道类型分类, 气象卫星可以分为极轨卫星和地球同步轨道卫星。相比于前者, 后者在搜索潜在优秀台址方面更具有优势。极轨气象卫星的轨道高度为约 1000 km, 每隔 12 小时产生一幅图像。而地球同步轨道气象卫星在更高的轨道 (约 36000 km) 上, 因此可以覆盖更大的范围。而且, 其观测频率最高可以达到 15 分钟一幅图像 (例如, 风云四号系列气象卫星 A 星)。

目前, 在众多的地球同步轨道气象卫星中, 只有日本 GMS 气象卫星和中国的风云二号系列气象卫星有对我国大部分区域有长时间气象监测数据。在日本 GMS 气象卫星数据中, 中国处于图像的边缘, 因此可能会影响到中国地区的数据质量。而在风云二号系列卫星的数据上, 中国处于图像的中心偏上的区域, 因此可以获得较高的数据质量。所以, 风云二号系列卫星的数据是我们用于在中国区域上搜索潜在优秀台址的首选数据。

自从风云二号系列气象卫星的第一颗卫星的成功发射, 该系列卫星已经发展为拥有八颗气象卫星的大家族, 包括风云 2A 到风云 2E。在这些卫星中, 风云 2A 和风云 2B 是实验卫星, 它们不产出有效的科学数据。而同步轨道业务气象卫星, 风云 2C 到风云 2H, 产出多种科学数据, 例如大气运动矢量 (Atmospheric Motion Vectors, AMV)、云检测 (Cloud Detection, CLD)、云顶温度 (Cloud Top Temperature, CTT)、总云量和对流层上层相对湿度。这些数据来源于对风云二号系列卫星 (除了风云 2A) 所配备的 VISSR-2 扫描辐射计 (Stretched Visible and Infrared Spin Scan Radiometer 2, VISSR-2) 拍摄的图像的分析。VISSR-2 有 5 个通道, 包括 1 个可见波段和 4 个红外波段。VISSR-2 的主要技术细节在表 5-1 中给出。目前, 风云二号系列气象卫星已经积累了超过 15 年的数据, 它已经具备了通过估计可观测夜数来助力天文选址工作的巨大潜力。

在本工作中, 我们主要使用了来自风云 2D、风云 2E 和风云 2G 的卫星气象数据, 因为和其他风云系列气象卫星产出的数据相比, 它们的数据可以覆盖更多的中国领土。在风云二号众多的产品中, 总云量和对流层上层相对湿度于

夜晚的可观测与否有着紧密的联系 (Erasmus et al., 2002; Aksaker et al., 2015)。因此, 我们选用 2008 - 2019 年期间的这两种数据计算可观测夜数 (数据使用情况见表 5-2)。需要说明的是, 我们没有使用 2013 年的数据, 因为 2013 的数据存在严重的缺失。风云二号系列气象卫星的数据可以在中国气象局国家卫星气象中心的网站²上下载。

5.2.1 总云量

根据 Glickman et al. (2000), 云覆盖率或者云量, 即本文中的总云量, 指的是所感兴趣的地理位置处云覆盖的天空占总的可见天空的比例。天文观测对天气情况有着严格的要求, 对于天文台站的选择和评估而言, 总云量是基础的参考标准 (Graham et al., 2005; Sarazin et al., 2006; Varela et al., 2008; Aksaker et al., 2015, 2020)。作为风云二号系列气象卫星最重要的科学产品, 总云量的计算是基于 VISSR-2 的可见光波段和红外光波段的图像数据。根据 Xu et al. (2008), 我们将基础的 CTA 的计算过程展示如下。由辐射计所接收到的所有辐射可以表示为:

$$I = (1 - A_c) I_{\text{clr}} + A_c I_{\text{cld}} \quad (5-1)$$

其中 A_c 为总云量, $A_c I_{\text{cld}}$ 为有云的像素的辐射值, $A_c I_{\text{clr}}$ 为无云的辐射值。因而, 总云量的表达式可以改写为

$$A_c = (I_{\text{clr}} - I) / (I_{\text{clr}} - I_{\text{cld}}) \quad (5-2)$$

在本工作中, 对于地球中心与卫星的连线在地球表面上的交点 (即星下点) 的位置上总云量的空间分辨率为 5 km。

5.2.2 对流层上层相对湿度

Erasmus et al. (2002) 首次报告了对流层上层相对湿度和天气情况之间的关系。自此, 对流层上层相对湿度便成为了用于评估天文站点天气情况的重要标准。

对于风云二号系列气象卫星, 对流层上层相对湿度是 3000-7000 米大气的平均相对湿度 (Xu et al., 2008)。对流层上层相对湿度数据的空间分辨率和时间分辨率分别为星下点 5 km 和 3 小时。此外, 为了保证数据的精度, 只有那些与卫星的连线和地球中心与卫星的连线的夹角小于 75° 位置的数据被认为是有效的数据。

²<http://www.nsmc.org.cn/nsmc/en/home/index.html>

表 5-2 本工作中使用的卫星数据
Table 5-2 Satellite data used in this work

Satellite	Central Longitude	Time Range
FY-2D	86° .5 E	Jan 01, 2008 – Dec 31, 2010
FY-2E	105° E	Jan 01, 2011 – Jun 02, 2015
FY-2G	105° E	Jun 03, 2015 – Apr 12, 2018
FY-2G	99° .5 E	Apr 13, 2018 – Dec 31, 2019

5.3 地面数据

在本节，我们将介绍本工作中使用的地面数据：兴隆观测站 60/90cm 施密特望远镜的观测日志、兴隆观测站的天文气象条件统计 (Zhang et al., 2015)、德令哈观测站 2011-2014 年 (Tian et al., 2016) 和丽江观测站 2019 年 (Xin et al., 2020) 的可观测夜记录。基于以上数据，我们统计了这三个地点的逐月可观测夜占中每个月的总夜数的比例 (见表 5-3)。

5.3.1 兴隆观测站数据

兴隆观测站隶属于中国科学院国家天文台，是中国主要的光学天文观测基地之一。它坐落于河北省兴隆县境内的燕山主峰南麓，海拔约为 960 m。本工作中使用了两种兴隆观测站的可观测夜数数据。第一种是由 Zhang et al. (2015) 给出的基于 2.16 m 望远镜、80 cm 望远镜和 85 cm 望远镜的观测日志得到 2007-2017 年的可观测夜数统计报告；第二种是 2015-2018 年 60/90 cm 施密特望远镜的观测日志。基于 Zhang et al. (2015) 的工作和观测日志对每晚的天气情况记录的详尽程度，对于兴隆观测站，可观测夜被定义为夜晚天空完全无云或者部分无云的允许进行天文观测的夜晚。因为 Zhang et al. (2015) 只提供了 2007-2014 年的数据，所以我们使用了 2015-2018 年的 60/90 cm 施密特望远镜的观测日志作为 Zhang et al. (2015) 数据的补充，从而延长数据的时间覆盖范围。对于 60/90 cm 施密特望远镜，我们定义可观测夜为至少有 3 个小时可以用于观测的夜晚。此外，为了准确地获取每个月的可观测夜比例，如果该月内有超过或等于 2 天的数据是缺失的，我们将不采用该月的数据。

5.3.2 德令哈观测站数据

德令哈观测站坐落于我国青藏高原青海省海西蒙古族藏族自治州州府德令哈东部 40 km 处。Tian et al. (2016) 给出了该台站 2011-2014 年的可观测夜的统计结果。Tian et al. (2016) 对德令哈观测站的夜晚进行了分类，包括晴朗、有云和无法使用。晴朗的夜晚是指在昏影终和晨光始之间有 6 个小时的时间是晴朗的夜晚，而有云的夜晚是指云覆盖率在 65% 及其以上的夜晚。对于德令哈观测站，我们将晴朗和有云的夜晚统计为可观测夜，并计算了其数量。

表 5-3 从地基数据得出的兴隆、德令哈和丽江观测站的逐月可观测夜比例

Table 5-3 Monthly statistics of the observable nights (given as a percentage) for Xinglong Station, Delingha Station and Lijiang Station derived from ground data

The FONs at Xinglong Station derived from Zhang et al. (2015)												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2008	87.10	96.55	45.16	50.00	35.48	33.33	29.03	32.26	50.00	83.87	93.33	90.32
2009	80.65	64.29	51.61	56.67	64.52	66.67	35.48	35.48	50.00	74.19	70.00	70.97
2010	77.42	53.57	41.94	40.00	54.84	36.67	25.81	29.03	63.33	67.74	100.00	93.55
2011	100.00	67.86	64.52	66.67	58.06	50.00	35.48	35.48	60.00	74.19	60.00	83.87
2012	80.65	100.00	70.97	53.33	64.52	46.67	22.58	38.71	73.33	87.10	80.00	67.74
2014	93.55	53.57	87.10	73.33	58.06	53.33	22.58	51.61	50.00	58.06	90.00	90.32
The FONs at Xinglong Station derived from the observation logs of the 60/90-cm Schmidt Telescope												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2015	83.87	-	77.42	33.33	54.84	-	35.48	25.81	-	-	-	-
2016	-	-	-	33.33	38.71	-	19.35	6.45	33.33	-	46.67	80.65
2017	-	-	64.52	-	64.52	43.33	6.45	0.00	-	45.16	93.33	90.32
2018	87.10	-	51.61	53.33	45.16	-	3.23	6.45	-	-	-	51.61
The FONs at Delingha Station derived from Tian et al. (2016)												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2011	61.29	75.00	58.06	83.33	58.06	53.33	54.84	58.06	73.33	87.10	73.33	93.55
2012	77.42	72.41	74.19	66.67	41.94	40.00	29.03	41.94	83.33	90.32	60.00	64.52
2014	80.65	64.29	74.19	60.00	77.42	60.00	64.52	61.29	63.33	74.19	80.00	87.10
The FONs at Lijiang Station derived from Xin et al. (2020)												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2019	96.77	75.00	77.42	66.67	61.29	26.67	3.23	35.48	13.33	54.84	86.67	96.77

注意: ‘-’ 表示该月中有大于两天的时间没有数据。

Note: ‘-’ means a record in which more than two days are missing for the month.

5.3.3 丽江观测站数据

丽江观测站距离丽江 40 km, 是我国南方最大的光学天文观测站。[Xin et al. \(2020\)](#) 介绍了安装在丽江观测站的天文台址监测系统 (Astronomical Site Monitoring System, ASMS) 并给出了 2019 年的天文气象情况记录。[Xin et al. \(2020\)](#) 定义了测光时间单元 (Photometric Time Block, PTB) 和光谱时间单元 (Spectroscopic Time Block, PTB) 作为可以进行测光和光谱观测的最短时间单元。其定义测光时间单元为一小时内云覆盖始终低于 30%, 允许的最长中断时间为 10 分钟。光谱时间单元有着相似的定义, 只是允许的最大的云覆盖率为 50%。此外, [Xin et al. \(2020\)](#) 还定义了测光和光谱夜: 测光夜为拥有大于等于 3 个测光时间单元的夜晚, 光谱夜为拥有大于等于 3 个测光或者光谱时间单元的夜晚。对于丽江观测站, 我们将光谱夜和测光夜都统计为可观测夜。

5.4 方法

在本工作中，我们使用阈值法来检测可观测夜。前人的工作对使用阈值法来检测可观测夜做出了很多尝试（例如，[Cavazzani et al., 2011](#); [Hidayat et al., 2012](#)）。但是对于如何选择阈值，先前的研究并没有给出标准的方法。基于从卫星数据中得到的感兴趣地点的每个月的亮温的分布，[Cavazzani et al. \(2011\)](#)提出了基于亮温的最大值和浮动范围的阈值选择方法。[Hidayat et al. \(2012\)](#)计算了来自气象卫星不同波段的数据，并为每个波段的数据给出阈值。通过计算三组不同阈值下的可观测夜和真实的地面数据的 χ^2 ，从而得到最佳的阈值组合。我们通过减小地面数据的和基于气象卫星数据给出的计算结果的差异来寻找最佳的阈值组合。我们创建了一个总云量和对流层上层相对湿度的阈值的网格，然后根据每一个格点上对应的上述二者的阈值计算了每个地点每个月的可观测夜占当月天数的比例，即月可观测夜比例。计算的和实际数据给出的月可观测夜比例的差异最小的那一组的阈值被选作最佳的阈值组合。

地球同步轨道气象卫星在任何时刻都处于赤道上同一地点的上方约 35786 km 处，因此每个地点的望远镜可观测的天空范围在卫星图像上的投影为一组临近的像元，图像中心对应的位置，即在接近星下点的地方该投影接近正方形，而处于图像边缘的位置，该投影则接近矩形。因此，对于每一个地点，可观测天空范围在图像上的投影的计算是必要的。[Erasmus et al. \(2002\)](#)选取了以待评估点为中心的 9 个像素组成的正方形像素组来表示可观测天空。[Cavazzani et al. \(2011\)](#)使用平均化的像素矩阵来降低卫星图像的噪声来识别可观测夜。在我们的工作中，我们同样使用对应着可观测天空在卫星图像上的投影的像素矩阵来识别可观测夜，而非单个像素。我们还要求望远镜指向的天顶距小于等于 60° 。考虑到大部分云产生于对流层顶以下，我们将对流层顶的高度 12 km，当做云层的最大高度。之后，我们使用半正矢公式（Haversine formula，[Sinnott 1984](#)）计算了天文可观测天空在对流层顶投影的半径。当卫星图像上像素点对应的地理位置和待测站点的位置之间的距离小于天文可观测天空在对流层顶投影的半径的时候，我们将该像素点纳入代表待测地点的可观测天空像素组。原理图和兴隆观测站的应用实例展示在图 5-1。

地面数据可以反应天文站点当地的天气情况，因此它可以帮助我们选择最佳的气象卫星数据阈值。总云量和对流层上层相对湿度的时间分辨率分别是 1 小时和 3 小时。在三个小时内，气象卫星可以产生 4 个总云量数据点（例如，在 21:00、22:00、23:00 以及 24:00）和两个对流层上层相对湿度数据点（例如，在 21:00 和 24:00）。我们可以使用这些数据来表示在 21:00-24:00 的天气情况。我们定义，对于一个可观测夜而言，总云量和对流层上层相对湿度的数值需要低于某个阈值 3 个小时及其以上。

为了寻找最佳的阈值，我们使用了直接而暴力的网格搜索方法。我们生成了一个二维的总云量和对流层上层相对湿度阈值的网格，每一个格点对应一对阈值，阈值的范围为 0%-100%，步长为 1%。对于每一个格点，我们使用地面数据

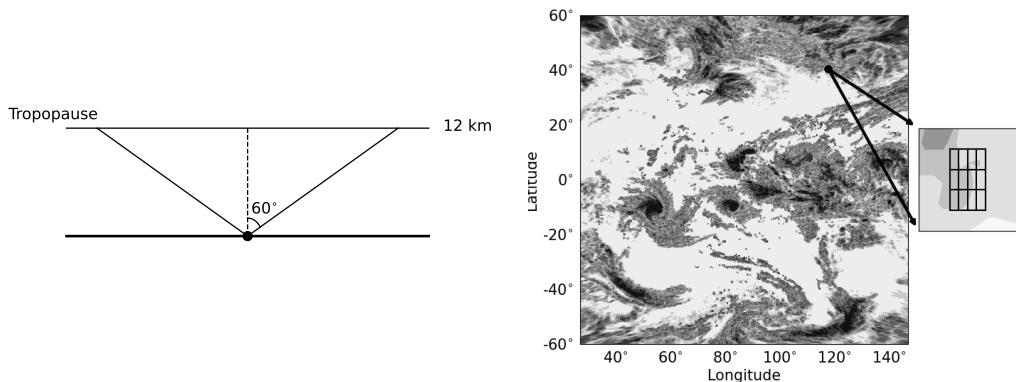


图 5-1 左图展示的是可观测天空的示意图。黑点表示当前天文地点的位置。可观测天空在气象卫星上的投影是指在天顶距 60° 以内的区域。右图是兴隆观测站的可观测天空在卫星图像上的投影的实例。对于该点，可观测天空的投影由 12 个像素点组成。

Figure 5-1 Left picture shows a schematic diagram of observable sky area. The black dot represents the locations of current astronomical sites. The observable sky area includes the pixels corresponding the area within a 60° zenith. Right picture is an application example for Xinglong Station ($117^\circ 34' 38'' .78E$, $40^\circ 23' 43'' .98N$). For this site, the observable sky can be represented by 12 pixels, as shown in the local, enlarged drawing.

给出的月可观测夜比例和根据格点阈值得到的可观测夜比例的 rms 来代表我们所建立的模型和真实数据的差异。为了得到最佳的总云量和对流层上层相对湿度的阈值，我们计算出了我们的模型与真实数据的差异在网格上的分布。最佳的阈值应该适用于拥有着不用气候属性的地点。因此，在计算的过程中，三个地面数据的权重是一致的。根据模型和真实数据差异的分布图（见图 5-2），我们得到的最佳的总云量和对流层上层相对湿度的最佳阈值分别是 35% 和 50%。

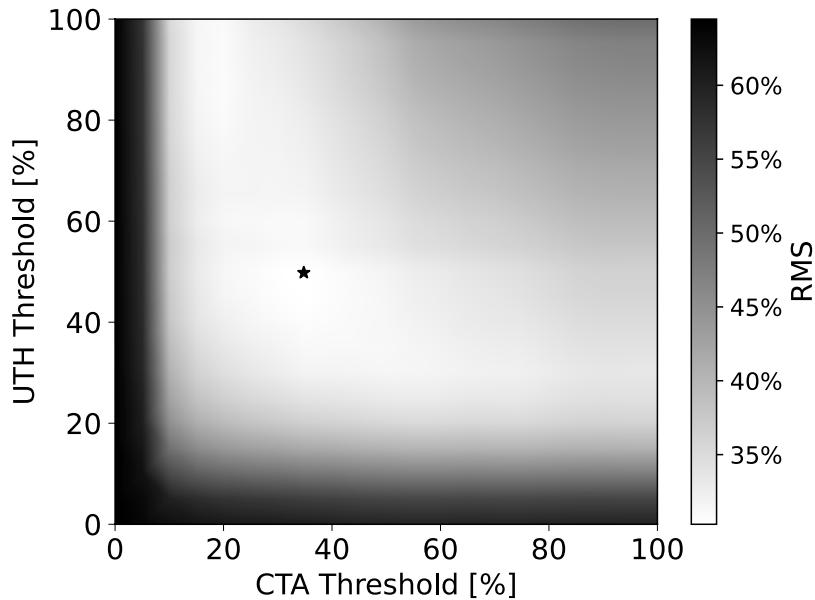


图 5-2 根据不同的 CTA 和 UTH 阈值计算出的晴夜数比例和我们从地基数据得到的结果的差异的 rms 的分布。其中，黑色的星点代表具有最低的 rms 的 CTA 和 UTH 阈值。

Figure 5-2 Weighted average RMS distribution of the FONs. The black star represents the CTA and UTH thresholds with the lowest RMS.

5.5 对比分析和讨论

基于最优的总云量和对流层上层相对湿度阈值，我们计算出了兴隆观测站、德令哈观测站和丽江观测站 2008 - 2019 年（除了 2013 年）的逐月可观测夜比例。基于气象卫星数据，它们各自的平均可观测夜比例分别为 62.84%、64.21% 和 71.27%；基于地基数据，它们的平均可观测夜比例为 62.97%、67.92% 和 57.81%。这里有一点需要说明的是，在基于地面数据计算兴隆观测站的平均可观测夜比例的时候，由于 60/90 cm 望远镜的观测日志的不完整，我们只使用了 [Zhang et al. \(2015\)](#) 的统计数据。

对于兴隆观测站和德令哈观测站，基于卫星气象数据的模型给出的结果和基于地面数据给出的结果的差异小于 5%，但是丽江观测站的差异很大（13.46%）。对于可观测夜的定义，云南天文台选址工作组在选址工作 ([Site Testing Group of Yunnan Astronomical Observatory, 1999](#)) 中使用了比我们的更为宽松的标准：云覆盖率小于 30% 的情况持续连续 2 个小时及其以上的夜晚。基于云南天文台选址工作组所收集 1994 年 7 月到 1997 年 7 月的观测日志和 1959 - 1994 年的气象站数据，[Site Testing Group of Yunnan Astronomical Observatory \(1999\)](#) 给出了丽江高美古地区，即丽江观测站所在区域，长期年晴夜数比例，为 68.55%。这一估计值和本工作基于气象卫星数据得到的结果一致。此外，[Xin et al. \(2020\)](#) 也指出了，2019 年的可观测夜数比往年更少。因此，对于丽江观测站，长期的地基数据给出的可观测夜数据和我们根据卫星数据得到数据的差异应该小于 13.46%。

此外，为了测试我们基于气象卫星数据的晴夜数估计模型，我们还对印度尼

表 5-4 从 2008 到 2010 年的印度尼西亚 27 个地点的年可观测夜比例

Table 5-4 Yearly FONs from 2008 to 2010 for 27 sites in Indonesia

Site	Hidayat et al. (2012)			This Work			Hidayat et al. (2012) - This work			
	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	Average
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Alor	65.10	65.30	57.60	52.02	65.23	48.73	13.08	0.07	8.87	7.34
Binohoe	42.80	51.00	50.50	17.73	46.89	20.40	25.07	4.11	30.10	19.76
E. Sumbawa	67.00	66.80	59.00	57.70	72.48	49.90	9.30	-5.68	9.10	4.24
Erekebo	9.60	14.00	16.90	6.37	19.23	9.45	3.23	-5.23	7.45	1.82
Kerinci	32.30	32.80	32.00	22.11	35.11	8.35	10.19	-2.31	23.65	10.51
Kupang	67.90	69.80	64.50	58.80	70.43	55.85	9.10	-0.63	8.65	5.71
Lembang	44.10	45.70	24.70	44.90	53.18	23.00	-0.80	-7.48	1.70	-2.19
Lembata	63.90	64.50	59.50	54.00	67.97	48.60	9.90	-3.47	10.90	5.78
Lombosang	43.70	51.70	36.10	34.50	52.09	18.07	9.20	-0.39	18.03	8.95
Mutis	63.80	65.70	58.90	56.54	70.36	54.35	7.26	-4.66	4.55	2.38
P. Jaya 1	4.60	6.60	9.70	7.12	22.66	10.54	-2.52	-16.06	-0.84	-6.47
P. Jaya 2	11.00	13.90	19.70	6.09	19.99	13.35	4.91	-6.09	6.35	1.72
Rantemario	25.10	35.40	20.00	21.70	42.71	11.36	3.40	-7.31	8.64	1.58
Rinjani 1	63.20	65.10	56.60	57.43	68.38	49.28	5.77	-3.28	7.32	3.27
Rinjani 2	64.10	65.90	57.20	56.88	69.40	49.90	7.22	-3.50	7.30	3.67
Ruteng	65.20	64.40	58.10	59.41	70.77	50.72	5.79	-6.37	7.38	2.27
S. Waingapu	68.20	69.50	66.90	58.80	72.01	50.10	9.40	-2.51	16.80	7.90
Sangihe-Siau	46.70	53.70	55.50	24.57	46.00	46.54	22.13	7.70	8.96	12.93
Sawu	72.20	71.40	71.80	61.67	71.39	59.89	10.53	0.01	11.91	7.48
Sibayak	15.00	15.30	15.70	10.47	19.64	7.80	4.53	-4.34	7.90	2.70
Silimapuluh	15.50	16.50	16.20	11.50	20.81	5.54	4.00	-4.31	10.66	3.45
Sinabung	16.20	15.20	16.70	10.13	19.85	7.73	6.07	-4.65	8.97	3.46
Sirung	63.10	65.40	59.70	53.32	67.08	48.73	9.78	-1.68	10.97	6.36
Tibo	23.10	32.30	20.30	20.05	41.75	10.54	3.05	-9.45	9.76	1.12
Timau	65.20	66.30	59.80	56.40	70.09	55.03	8.80	-3.79	4.77	3.26
West Ijen	58.70	60.60	48.70	53.59	64.89	43.12	5.11	-4.29	5.58	2.13
Wetar	64.30	63.20	56.90	50.99	62.97	48.19	13.31	0.23	8.71	7.42

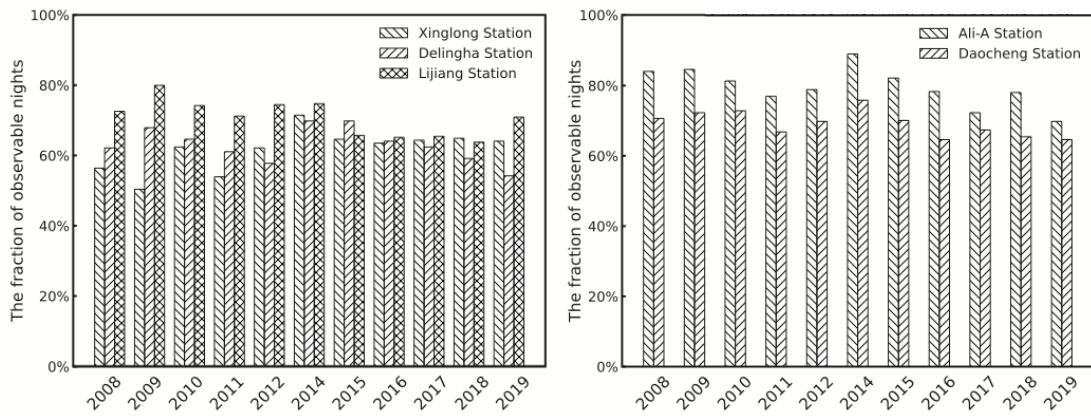


图 5-3 左图：兴隆、德令哈和丽江观测站的年可观测夜比例；右图：阿里 A 点和稻城观测站的年可观测夜比例。

Figure 5-3 Left panel: Yearly average FONs at Xinglong Station, Delingha Station and Lijiang Station; Right panel: Same as upper panel but for Ali-A Station and Daocheng Station.

西亚的 27 个地点的可观测夜进行了计算，并比较了我们的和 [Hidayat et al. \(2012\)](#) 给出的结果的差异。[Hidayat et al. \(2012\)](#) 基于日本 GMS 5 气象卫星、美国 GOES 9 气象卫星和日本多功能运输卫星 (Multi-functional Transport Satellite-1R, MTSAT-1R) 的数据计算了印度尼西亚全境的测光和光谱夜的分布。[Hidayat et al. \(2012\)](#) 将以待测点为中心的 5×5 像元组作为可观测天空在卫星图像上的投影，并定义低于某阈值的像元为晴朗像元。[Hidayat et al. \(2012\)](#) 沿用了 [Erasmus et al. \(2002\)](#) 中对可观测夜的定义： 5×5 像元组中有超过 20 个晴朗像元的夜晚。此外，基于 15 年的气象卫星数据，[Hidayat et al. \(2012\)](#) 给出了 27 个地点的年可观测夜数比例。应用我们的方法在相同的地点上，我们得到了它们的 2008 年-2010 年的可观测夜比例（见表 5-4）。根据我们的模型，对于 2008 年和 2010 年的 27 个地点的共计 54 个月可观测夜比例而言，我们的模型对其中 51 个可观测夜比例的估计小于 [Hidayat et al. \(2012\)](#)。对于 2009 年的 27 个地点的共计 27 个月可观测夜比例而言，我们的模型仅对其中 5 个可观测夜比例的估计小于 [Hidayat et al. \(2012\)](#)。尽管如此，在对印度尼西亚 27 个地点为期三年的可观测夜比例的估计中，81% 的我们的模型给出的结果和 [Hidayat et al. \(2012\)](#) 的结果的差异小于 10%。如果将 3 年的可观测夜比例平均，这一数值将上升为 89%。我们对印度尼西亚 27 个地点的可观测夜比例的估计和 [Hidayat et al. \(2012\)](#) 给出的估计的差异在 5%。根据上述分析，我们对印度尼西亚 27 个地点的可观测夜比例的估计和 [Hidayat et al. \(2012\)](#) 给出的估计一致。

此外，我们还将我们的方法应用于两个优秀的天文台台址-我国的阿里 A 点和稻城观测站。一些先前的工作曾计算出了它们的月可观测夜的比例。[Cao et al. \(2020\)](#) 使用了来自国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 和日本 GMS 的气象卫星数据来分析云覆盖率，并使用了 EOS/TERRA 和 EOS/AQUA 配备的中分辨率成像光谱仪 (Modrate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 来分析年可观测夜比例。基于安装在阿里 A

点和稻城观测站的全天相机所记录到的云量情况, [Feng et al. \(2020\)](#) 给出了这两个地点基于 2017 年 3 月 10 日-2018 年 3 月 10 日的数据得到的年可观测夜比例。根据我们的模型得到的、[Cao et al. \(2020\)](#) 给出的以及[Feng et al. \(2020\)](#) 给出的年可观测夜比例展示在表 5-5 中。对于阿里 A 点和稻城观测站, 我们的模型给出的和 [Cao et al. \(2020\)](#) 以及 [Feng et al. \(2020\)](#) 给出的结果一致, 差值在 10% 以内的占总数据的 89%。这两个地点的年可观测夜比例在图 5-3 中给出。同时, 阿里 A 点和稻城观测站的年可观测夜比例与前人结果的比较也在表 5-5 中给出。

为了检查我们的模型预测结果是否存在统计趋势, 我们将我们的结果和地面数据以及其他卫星数据的结果进行比较 (如图 5-4 所示)。我们的模型给出的可观测夜比例的结果和地面数据给出的结果的差异小于 10%, 中值为 1.92%, 且无显著趋势。我们的模型所给出的估计稍微小于其他基于气象卫星模型所给出的估计。二者差异的中值为 4.78%, 但是如果我们删除 2009 年的数据, 差异的中值将上升为 7.42%。尽管如此, 94% 的差异是正的, 且其中 78% 在 10% 以内。因此, 这两个比较意味着, 我们的结果和地面数据以及其他卫星数据的结果的差异在 10% 一致, 且我们的估计相比其他卫星数据结果稍小。

根据我们的估算, 我国西部的站点, 如阿里 A 点和稻城观测站, 比我国东部的站点拥有更高的可观测夜比例。在阿里 A 点、稻城、德令哈、丽江、兴隆观测站 5 个站点中, 阿里 A 点拥有最多的可观测夜数, 因此被认为是最佳的台址。根据我们的计算, 我国南部地区的可观测夜比例显著小于我国北方地区。因此, 我国北方有着一系列优良台址, 例如新疆南山观测站以及兴隆观测站。此外, 由于青藏高原的海拔较高, 稻城观测站拥有着非常好的观测条件, 且年可观测夜比例在 70% 以上。

我们注意到我们的结果和前人的无论是地基数据的结果还是基于气象卫星数据的结果都有一定的差异, 因此我们将可能的误差来源列举如下。风云二号系列卫星的数据具有固有的误差。[Xi et al. \(2013\)](#) 对 2005 - 2010 年 FY-2 的 CTA 产品进行了验证和评估, 发现总云量的准确率、漏检率和误检率分别为 82.10%、6.85% 和 11.05%。对于总云量, 温度较低的晴空或地面上的雪会被误认为是云。根据 [Xu et al. \(2008\)](#) 的研究, 对流层上层相对湿度的最大误差可以达到 20%。此外, 风云二号系列卫星不能探测雾霾, 这对会影响可观测夜数的准确估计。

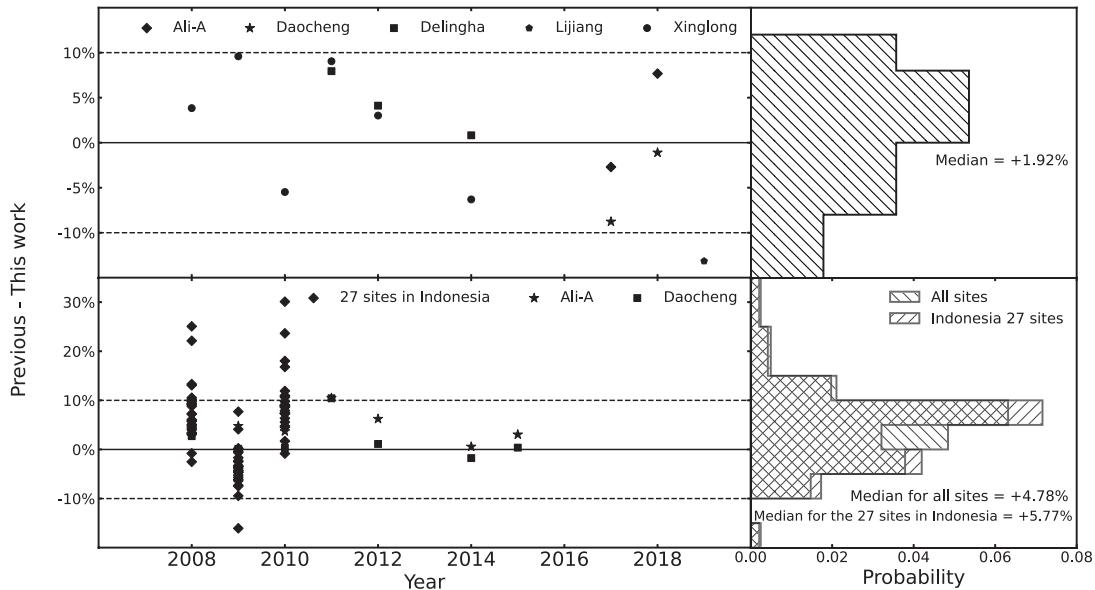


图 5-4 本工作得到的年可观测夜比例和前人工作的比较。上图所展示的是从地基数据得到的可观测夜比例减去我们从气象卫星数据得到的可观测夜比例，涉及的 5 个天文站点包括阿里 A 点、稻城、德令哈、丽江和兴隆观测站；下图是前人通过不同的气象卫星的数据减去我们的结果（包括印度尼西亚的 27 个地点，[Hidayat et al. 2012](#)，阿里 A 点和稻城观测站，[Cao et al. 2020](#)）。对于所有地点而言，二者差异的中值为 +4.78%，仅对与印度尼西亚的 27 个地点，该值为 +5.77%。

Figure 5-4 The differences between previous works and this work. *Upper panel:* FONs derived from the ground data for five sites minus our FONs estimate based on satellite data, along with its probability distribution. The median of them is +1.92%. *Lower panel:* FONs derived from other satellite data (27 sites in Indonesia: [Hidayat et al. 2012](#); Ali-A and Daocheng: [Cao et al. 2020](#)) minus our results. The median of differences for all sites is +4.78%, for 27 sites in Indonesia, it is +5.77%.

5.6 结论

在本工作中，我们提出了基于我国自主的风云二号气象卫星数据和地面气象数据的用于计算可观测夜数的方法。该方法基于我国风云二号系列卫星的总云量和对流层上层相对湿度数据、兴隆观测站 60/90 cm 施密特望远镜的观测日志以及兴隆观测站、德令哈观测站、丽江观测站的可观测夜的统计结果 (Zhang et al., 2015; Tian et al., 2016; Xin et al., 2020)。为了准确识别可观测夜，我们根据地面和卫星数据，得出了最佳的总云量和对流层上层相对湿度阈值，分别为 35% 和 50%。

为了验证我们的方法，我们为印度尼西亚的 27 个地点计算了可观测夜比例，并将结果与 Hidayat et al. (2012) 的结果进行了比较，二者显示出良好的一致性。我们还将我们的方法应用于中国的两个天文台址，即阿里 A 点和稻城观测站。通过我们的方法得出的阿里 A 点和稻城观测站的可观测夜的年平均比例和 Cao et al. (2020) 以及 Feng et al. (2020) 的结果一致。此外，根据我们的计算结果，青藏高原南部 40°N 附近的地区和云贵高原比中国其他地区有更多的可观测到的夜晚。其中，阿里 A 点的可观测夜比例最多，为 77.75%。

表 5-5 阿里 A 点和稻城观测站的年可观测夜比例

Table 5-5 Yearly FONs of Ali-A and Daocheng.

Ali-A			Daocheng			
Longitude	80°01'36.16"		100°06'32.04"			
Latitude	32°19'32.63"		29°06'25.02"			
Altitude	5040 m		4739 m			
Year	C20	This work	Diff	C20	This work	Diff
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2008	87.95	84.05	3.90	73.42	70.64	2.78
2009	89.32	84.60	4.72	72.33	72.28	0.05
2010	84.93	81.31	3.62	73.15	72.83	0.32
2011	87.40	76.93	10.47	77.26	66.80	10.46
2012	85.21	78.85	6.36	70.96	69.82	1.14
2014	89.59	88.98	0.61	73.97	75.84	-1.87
2015	85.21	82.14	3.07	70.41	70.09	0.32
Average	87.43	82.41	5.02	73.18	71.19	1.89
Year	F20	This work	Diff	F20	This work	Diff
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2017 ^a	57.81	60.27	-2.47	37.81	46.58	-8.77
2018 ^b	85.75	78.08	7.67	53.97	55.07	-1.10
Average	71.78	69.18	2.6	45.89	50.83	-4.94

注: C20 和 F20 分别意味着来自 [Cao et al. \(2020\)](#) 和 [Feng et al. \(2020\)](#) 的数据。Diff 是指上述二者的工作中的结果和我们所给出的结果的差异。需要说明有两点: 1) 对于 [Feng et al. \(2020\)](#) 的数据, 由于数据缺失, 我们没有包括 2017 年前 3 个月的数据, 2) 由于全天相机未正常工作, 稻城观测站 2018 年 5 月到 7 月的数据缺失。

Note: ‘C20’ and ‘F20’ mean [Cao et al. \(2020\)](#) and [Feng et al. \(2020\)](#) respectively. ‘Diff’ is the difference between the results from previous works ([Cao et al., 2020](#); [Feng et al., 2020](#)) and this work. It is also worth noting that a) the FONs of 2017 does not include the first three months, because [Feng et al. \(2020\)](#) did not present complete data of them, b) the FONs of 2018 for Daocheng excludes the period of May-July due to the non-operation of the all-sky camera.

第6章 总结与展望

6.1 总结

在过去的二十年里，随着地基和空间望远镜技术的不断革新以及新兴的系外行星探测方法的不断涌现，超过 5000 颗系外行星展现在世人的面前。大小不一、形色各异的系外行星冲击着早期以太阳系为参考而形成的传统行星演化理论。在系外行星的样本中，由于体积大、周期短而率先被发现的热木星因为容易被观测，因而积累了大量的观测数据，从而得以被很好得研究。尽管如此，热木星的形成和演化理论仍旧不完备，尤其是迁移理论。在本人攻读博士期间，主要的工作便是通过高精度测光和光谱观测来区分盘迁移和高偏心率迁移理论。

凌星系外行星监测计划 (TEMP) 为高偏心率迁移所预测的热木星附近没有临近的行星这一现象提供了有力的观测支持。作为一个持续了近 10 年的测光观测项目，TEMP 几乎观测了 2012 年北半球 1m 级望远镜能够观测的所有热木星，共收集了超过 300 条光变曲线。基于这些光变曲线，我们在 TEMP 系列文章 (Wang et al., 2018b, 2017b, 2018d,e, 2019b, 2021b) 对 43 个系外行星系统的轨道参数和历元公式做出了更新，对研究系外行星的性质和未来的凌星观测提供了有力的帮助。更为重要的是，我们分析了 TEMP 样本中的热木星数据，没有发现任何显著的 TTV 信号，意味着热木星附近没有临近的行星。这一点加强了 Steffen et al. (2012) 通过 *Kepler* 数据得到的相似结论，也被近期的基于 *TESS* 光变曲线的对 382 个系外行星系统的类似研究 (Ivshina et al., 2022) 所验证。

行星系统中恒星自转轴和行星公转轴的夹角（恒星倾角）可以揭示系外行星形成和演化的过程。在本文中，我们通过 WASP-148 这一目前唯一同时具有热木星和暖木星的系外行星系统来研究恒星倾角。在 2021 年，我们先后使用 WYIN 天文台 3.5 m 望远镜上的 NEID 光谱仪和 Keck 天文台 10 m 望远镜上的 HIRES 光谱仪对其进行凌星期间的光谱观测，得到了高信噪比的 Rossiter-McLaughlin 效应信号。通过联合测光数据和视向速度数据，我们测量出该系统的天空投影的恒星倾角只有 $-8.2_{-9.7}^{+8.7} \text{ }^\circ$ ，说明该系统是 aligned (假设 WASP-148 c 的轨道面和 b 的轨道面的夹角较小)。我们将该系统作为 12 个拥有恒星倾角测量的多行星系统之一进行统计分析。根据目前的拥有恒星倾角测量的多行星系统和单行星系统的样本，我们发现它们二者的恒星倾角分布没有显著的差异。因此，我们无法说此两种类型的行星的形成和演化过程的差异可以通恒星倾角进行区分。同时也说明，我们需要对更多的多行星系统的恒星倾角进行测量。

对于行星间夹角不为 0° 的多系外行星系统而言，其系统的恒星倾角无法通过一个行星的公转轨道轴和恒星自转轴的夹角来确定，例如 WASP-148 系统。因此，借助 *TESS* 空间望远镜和 NEID 光谱仪对该目标的持续观测，我们通过 TTV \times RV 拟合解析出该系统的所有物理和轨道参数，从而确定 WASP-148 b 和 c 的轨道夹角。我们深入调研了 TTV \times RV 拟合的方法，并通过构建视向速度、N 体

和凌星光度模型，参数优化序列以及 **ptmcmc** 的数据拟合流程得到了该系统的全部参数。结果显示，该系统内两个行星的轨道面夹角只有 $26.5^{+5.3}_{-6.6}$ °，意味着该系统是一个 **aligned** 的系统。

可观测夜数是影响光学天文观测台站的观测效率的重要因素。对于已有台站观测效率的评估以及未来天文站点的选择而言，可观测夜数是重要的衡量指标。可观测夜数以及其长、短期变化趋势对观测计划的制定和仪器设备的发展都有重要的影响。我们基于我国风云二号系列气象卫星发布的气象数据，通过建立可观测夜模型，并使用兴隆观测站，丽江观测站和德令哈观测站的可观测夜记录对该模型进行训练，得到了我国的几个重要站点的可观测夜比例分布情况。本研究提出了一种基于多种气象卫星数据的可观测夜的分析和统计方法。本研究使用风云二号气象卫星所发布的总云量和对流层中上部水汽含量数据构建了一个混合阈值模型，通过该模型我们给出了我国的几个重要站点可观测夜比例分布情况。

6.2 展望

随着系外行星的数量不断积累，形形色色的系外行星不断挑战着已有的理论。本文根据攻读博士学位期间所学，对未来的工作涉及的相关问题进行一一展望。

- **热木星如何迁移到当前的位置** 本文的第二、三、四章通过高精度测光和分光系统研究了热木星的迁移过程。我们发现，尽管 TTV 数据显示热木星没有临近的行星伴星，但是主星自转轴和行星公转轴的夹角并不能为区分两种主流的迁移模型-盘迁移和高偏心率迁移模型-作出贡献，因为由于目前拥有恒星倾角测量多行星系统的样本较少，无法比较其与单行星系统的差异。因此，我们需要更多的观测来研究热木星系统。

- **多行星系统内的热木星和超级地球** 热木星并非一直孤独。除了在远距离的行星伴星（例如，HAT-P-13, [Bakos et al. 2009](#)）以外，超级地球也有可能出现在热木星的附近（大多数是内轨道，例如 WASP-47, [Becker et al. 2015](#), TOI-1130, [Huang et al. 2020a](#), Kepler-730, [Cañas et al. 2019](#)）。但是出于非共振位置的超级地球很难产生足够强的 TTV 信号，使得我们在后随测光频率不高情况下无法探测到该信号。因此，我们将希望寄托于目前最为高产的 **TESS** 卫星和更为灵敏的光谱仪来探测超级地球的存在，从而完善含有热木星的多行星系统的轨道构型。

- **多行星系统内的热木星和冷木星或者褐矮星** 行星散射被认为是热木星在向内迁移过程中移除其他行星的高效途径。过去由于观测手段的限制，长周期的冷木星往往由长周期的视向速度信号所发现，或者少量的由天体测量方法发现。近期，[Feng et al. \(2022\)](#) 通过 **Hipparcos** 和 **Gaia EDR3** 的天体测量数据释放了 167 个冷木星或者褐矮星。这些样本以及未来 **Gaia** 天体测量卫星将释放的冷木星样本的数据将可能为热木星的 **misalignment** 的起源提供重要信息。

参考文献

- Addison B C, Wang S, Johnson M C, et al. Stellar Obliquities and Planetary Alignments (SOPA). I. Spin-Orbit Measurements of Three Transiting Hot Jupiters: WASP-72b, WASP-100b, and WASP-109b [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 156(5): 197. DOI: [10.3847/1538-3881/aade91](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aade91).
- Addison B C, Wright D J, Nicholson B A, et al. TOI-257b (HD 19916b): a warm sub-saturn orbiting an evolved F-type star [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 502 (3): 3704-3722. DOI: [10.1093/mnras/staa3960](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3960).
- Agol E, Deck K. Transit Timing to First Order in Eccentricity [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 818(2): 177. DOI: [10.3847/0004-637X/818/2/177](https://doi.org/10.3847/0004-637X/818/2/177).
- Agol E, Steffen J, Sari R, et al. On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, 359(2): 567-579. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.08922.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.08922.x).
- Agol E, Hernandez D M, Langford Z. A differentiable N-body code for transit timing and dynamical modelling - I. Algorithm and derivatives [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 507(2): 1582-1605. DOI: [10.1093/mnras/stab2044](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2044).
- Aksaker N, Yerli S K, Erdogan M A, et al. Astronomical site selection for Turkey using GIS techniques [J/OL]. *Experimental Astronomy*, 2015, 39(3): 547-566. DOI: [10.1007/s10686-015-9458-x](https://doi.org/10.1007/s10686-015-9458-x).
- Aksaker N, Yerli S K, Erdogan M A, et al. Global Site Selection for Astronomy [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 493(1): 1204-1216. DOI: [10.1093/mnras/staa201](https://doi.org/10.1093/mnras/staa201).
- Albrecht S, Winn J N, Johnson J A, et al. Obliquities of Hot Jupiter Host Stars: Evidence for Tidal Interactions and Primordial Misalignments [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 757(1): 18. DOI: [10.1088/0004-637X/757/1/18](https://doi.org/10.1088/0004-637X/757/1/18).
- Albrecht S H, Marcussen M L, Winn J N, et al. A Preponderance of Perpendicular Planets [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, 916(1): L1. DOI: [10.3847/2041-8213/ac0f03](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac0f03).
- Albrecht S H, Dawson R I, Winn J N. Stellar Obliquities in Exoplanetary Systems [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2022, 134(1038): 082001. DOI: [10.1088/1538-3873/ac6c09](https://doi.org/10.1088/1538-3873/ac6c09).
- Almenara J M, Hébrard G, Díaz R F, et al. Photodynamical analysis of the nearly resonant planetary system WASP-148. Accurate transit-timing variations and mutual orbital inclination [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2022, 663: A134. DOI: [10.1051/0004-6361/202142964](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142964).
- Alonso R, Brown T M, Torres G, et al. TrES-1: The Transiting Planet of a Bright K0 V Star [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2004, 613(2): L153-L156. DOI: [10.1086/425256](https://doi.org/10.1086/425256).
- Alsubai K A, Parley N R, Bramich D M, et al. The Qatar Exoplanet Survey [J]. *Acta Astronautica*, 2013, 63(4): 465-480.
- Anglada-Escudé G, Amado P J, Barnes J, et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri [J/OL]. *Nature*, 2016, 536(7617): 437-440. DOI: [10.1038/nature19106](https://doi.org/10.1038/nature19106).
- Auvergne M, Bodin P, Boisnard L, et al. The CoRoT satellite in flight: description and performance [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2009, 506(1): 411-424. DOI: [10.1051/0004-6361/200810860](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810860).

- Bakos G, Noyes R W, Kovács G, et al. Wide-Field Millimagnitude Photometry with the HAT: A Tool for Extrasolar Planet Detection [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2004, 116(817): 266-277. DOI: [10.1086/382735](https://doi.org/10.1086/382735).
- Bakos G Á, Howard A W, Noyes R W, et al. HAT-P-13b,c: A Transiting Hot Jupiter with a Massive Outer Companion on an Eccentric Orbit [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 707(1): 446-456. DOI: [10.1088/0004-637X/707/1/446](https://doi.org/10.1088/0004-637X/707/1/446).
- Bakos G Á, Csubry Z, Penev K, et al. HATSouth: A Global Network of Fully Automated Identical Wide-Field Telescopes [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2013, 125(924): 154. DOI: [10.1086/669529](https://doi.org/10.1086/669529).
- Baruteau C, Crida A, Paardekooper S J, et al. Planet-Disk Interactions and Early Evolution of Planetary Systems [C/OL]//Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al. *Protostars and Planets VI*. 2014: 667. DOI: [10.2458/azu_uapress_9780816531240-ch029](https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816531240-ch029).
- Batalha N M, Borucki W J, Bryson S T, et al. Kepler's First Rocky Planet: Kepler-10b [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 729(1): 27. DOI: [10.1088/0004-637X/729/1/27](https://doi.org/10.1088/0004-637X/729/1/27).
- Batygin K, Bodenheimer P H, Laughlin G P. In Situ Formation and Dynamical Evolution of Hot Jupiter Systems [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 829: 114. DOI: [10.3847/0004-637X/829/2/114](https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/2/114).
- Becker J C, Vanderburg A, Adams F C, et al. WASP-47: A Hot Jupiter System with Two Additional Planets Discovered by K2 [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2015, 812(2): L18. DOI: [10.1088/2041-8205/812/2/L18](https://doi.org/10.1088/2041-8205/812/2/L18).
- Bennett D P, Akeson R, Anderson J, et al. The WFIRST Exoplanet Microlensing Survey [J]. *arXiv e-prints*, 2018: arXiv:1803.08564.
- Bertin E, Arnouts S. SExtractor: Software for source extraction. [J/OL]. *A&AS*, 1996, 117: 393-404. DOI: [10.1051/aas:1996164](https://doi.org/10.1051/aas:1996164).
- Bianchi L, Herald J, Efremova B, et al. GALEX catalogs of UV sources: statistical properties and sample science applications: hot white dwarfs in the Milky Way [J/OL]. *Ap&SS*, 2011, 335(1): 161-169. DOI: [10.1007/s10509-010-0581-x](https://doi.org/10.1007/s10509-010-0581-x).
- Boley A C, Granados Contreras A P, Gladman B. The In Situ Formation of Giant Planets at Short Orbital Periods [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, 817(2): L17. DOI: [10.3847/2041-8205/817/2/L17](https://doi.org/10.3847/2041-8205/817/2/L17).
- Bolmont E, Raymond S N, von Paris P, et al. Formation, Tidal Evolution, and Habitability of the Kepler-186 System [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 793(1): 3. DOI: [10.1088/0004-637X/793/1/3](https://doi.org/10.1088/0004-637X/793/1/3).
- Bond I A, Udalski A, Jaroszyński M, et al. OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53: A Planetary Microlensing Event [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2004, 606(2): L155-L158. DOI: [10.1086/420928](https://doi.org/10.1086/420928).
- Borucki W J, Koch D, Jenkins J, et al. Kepler's Optical Phase Curve of the Exoplanet HAT-P-7b [J/OL]. *Science*, 2009, 325(5941): 709. DOI: [10.1126/science.1178312](https://doi.org/10.1126/science.1178312).
- Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Kepler Planet Detection Mission: Introduction and First Results [C]//American Astronomical Society Meeting Abstracts: volume 215 American Astronomical Society Meeting Abstracts #215. 2010: 101.01.
- Bouma L G, Winn J N, Baxter C, et al. WASP-4b Arrived Early for the TESS Mission [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2019, 157(6): 217. DOI: [10.3847/1538-3881/ab189f](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab189f).

- Brahm R, Nielsen L D, Wittenmyer R A, et al. TOI-481 b and TOI-892 b: Two Long-period Hot Jupiters from the Transiting Exoplanet Survey Satellite [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2020, 160(5): 235. DOI: [10.3847/1538-3881/abba3b](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abba3b).
- Bryan M L, Knutson H A, Lee E J, et al. An Excess of Jupiter Analogs in Super-Earth Systems [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2019, 157(2): 52. DOI: [10.3847/1538-3881/aaf57f](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaf57f).
- Butcher J C. The numerical analysis of ordinary differential equations: Runge-kutta and general linear methods [M]. Wiley-Interscience, 1987.
- Butler R P, Marcy G W, Williams E, et al. Attaining Doppler Precision of 3 M s-1 [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1996, 108: 500. DOI: [10.1086/133755](https://doi.org/10.1086/133755).
- Butler R P, Marcy G W, Fischer D A, et al. Evidence for Multiple Companions to α Andromedae [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 1999, 526: 916-927. DOI: [10.1086/308035](https://doi.org/10.1086/308035).
- Cañas C I, Wang S, Mahadevan S, et al. Kepler-730: A Hot Jupiter System with a Close-in, Transiting, Earth-sized Planet [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 870(2): L17. DOI: [10.3847/2041-8213/aafa1e](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aafa1e).
- Canul E F, Velázquez H, Gómez Maqueo Chew Y. Nauyaca: a New Tool to Determine Planetary Masses and Orbital Elements through Transit Timing Analysis [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2021, 162(6): 262. DOI: [10.3847/1538-3881/ac2744](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac2744).
- Cao Z H, Liu L Y, Zhao Y H, et al. Long-term analysis of clear nights using satellite data considering astronomical sites in western China [J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(6): 081. DOI: [10.1088/1674-4527/20/6/81](https://doi.org/10.1088/1674-4527/20/6/81).
- Carter J A, Winn J N. Empirical Constraints on the Oblateness of an Exoplanet [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 709(2): 1219-1229. DOI: [10.1088/0004-637X/709/2/1219](https://doi.org/10.1088/0004-637X/709/2/1219).
- Cavazzani S, Ortolani S, Zitelli V, et al. Fraction of clear skies above astronomical sites: a new analysis from the GOES12 satellite [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 411(2): 1271-1283. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.17766.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17766.x).
- Chakravarti I M, Laha R G, Roy J. Handbook of methods of applied statistics [J]. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics (USA) eng, 1967.
- Chambers J E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1999, 304(4): 793-799. DOI: [10.1046/j.1365-8711.1999.02379.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02379.x).
- Charbonneau D, Brown T M, Latham D W, et al. Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2000, 529(1): L45-L48. DOI: [10.1086/312457](https://doi.org/10.1086/312457).
- Charbonneau D, Brown T M, Noyes R W, et al. Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2002, 568(1): 377-384. DOI: [10.1086/338770](https://doi.org/10.1086/338770).
- Charbonneau D, Allen L E, Megeath S T, et al. Detection of Thermal Emission from an Extrasolar Planet [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2005, 626(1): 523-529. DOI: [10.1086/429991](https://doi.org/10.1086/429991).
- Chatterjee S, Ford E B, Matsumura S, et al. Dynamical Outcomes of Planet-Planet Scattering [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 686(1): 580-602. DOI: [10.1086/590227](https://doi.org/10.1086/590227).
- Chen J, Kipping D. Probabilistic Forecasting of the Masses and Radii of Other Worlds [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 834: 17. DOI: [10.3847/1538-4357/834/1/17](https://doi.org/10.3847/1538-4357/834/1/17).
- Cincotta P, Simó C. Conditional Entropy [J/OL]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 1999, 73: 195-209. DOI: [10.1023/A:1008355215603](https://doi.org/10.1023/A:1008355215603).
- Cincotta P M, Simó C. Simple tools to study global dynamics in non-axisymmetric galactic potentials - I [J/OL]. *A&AS*, 2000, 147: 205-228. DOI: [10.1051/aas:2000108](https://doi.org/10.1051/aas:2000108).

- Cincotta P M, Giordano C M, Simó C. Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits [J/OL]. *Physica D Nonlinear Phenomena*, 2003, 182: 151-178. DOI: [10.1016/S0167-2789\(03\)00103-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(03)00103-9).
- Claeskens G, Hjort N L, et al. Model selection and model averaging [J]. Cambridge Books, 2008.
- Claret A. A new method to compute limb-darkening coefficients for stellar atmosphere models with spherical symmetry: the space missions TESS, Kepler, CoRoT, and MOST [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2018, 618: A20. DOI: [10.1051/0004-6361/201833060](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833060).
- Collins K A, Kielkopf J F, Stassun K G, et al. AstroImageJ: Image Processing and Photometric Extraction for Ultra-precise Astronomical Light Curves [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2017, 153(2): 77. DOI: [10.3847/1538-3881/153/2/77](https://doi.org/10.3847/1538-3881/153/2/77).
- Cortés-Zuleta P, Rojo P, Wang S, et al. TraMoS. V. Updated ephemeris and multi-epoch monitoring of the hot Jupiters WASP-18Ab, WASP-19b, and WASP-77Ab [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2020, 636: A98. DOI: [10.1051/0004-6361/201936279](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936279).
- Cumming A, Marcy G W, Butler R P. The Lick Planet Search: Detectability and Mass Thresholds [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 1999, 526(2): 890-915. DOI: [10.1086/308020](https://doi.org/10.1086/308020).
- Cutri R M, et al. VizieR Online Data Catalog: AllWISE Data Release (Cutri+ 2013) [J]. *VizieR Online Data Catalog*, 2013: II/328.
- Cutri R M, Skrutskie M F, van Dyk S, et al. VizieR Online Data Catalog: 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (Cutri+ 2003) [J]. *VizieR Online Data Catalog*, 2003: II/246.
- Dalal S, Hébrard G, Lecavelier des Étangs A, et al. Nearly polar orbit of the sub-Neptune HD 3167 c. Constraints on the dynamical history of a multi-planet system [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2019, 631: A28. DOI: [10.1051/0004-6361/201935944](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935944).
- Daniyal, Hassan Kazmi S J. Optimal site selection for an optical-astronomical observatory in Pakistan using Multicriteria Decision Analysis [J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(9): 129. DOI: [10.1088/1674-4527/19/9/129](https://doi.org/10.1088/1674-4527/19/9/129).
- Davis A B, Wang S, Jones M, et al. TOI 564 b and TOI 905 b: Grazing and Fully Transiting Hot Jupiters Discovered by TESS [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2020, 160(5): 229. DOI: [10.3847/1538-3881/aba49d](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aba49d).
- Dawson R I, Johnson J A. Origins of Hot Jupiters [J/OL]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2018, 56: 175-221. DOI: [10.1146/annurev-astro-081817-051853](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-051853).
- De Rosa R J, Dawson R, Nielsen E L. A significant mutual inclination between the planets within the π Mensae system [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2020, 640: A73. DOI: [10.1051/0004-6361/202038496](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038496).
- De Rosa R J, Dawson R, Nielsen E L. A significant mutual inclination between the planets within the π Mensae system [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2020, 640: A73. DOI: [10.1051/0004-6361/202038496](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038496).
- Deck K M, Agol E, Holman M J, et al. TTVFast: An Efficient and Accurate Code for Transit Timing Inversion Problems [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 787(2): 132. DOI: [10.1088/0004-637X/787/2/132](https://doi.org/10.1088/0004-637X/787/2/132).
- Deming D, Seager S, Richardson L J, et al. Infrared radiation from an extrasolar planet [J/OL]. *Nature*, 2005, 434(7034): 740-743. DOI: [10.1038/nature03507](https://doi.org/10.1038/nature03507).
- Deming L D, Seager S. Illusion and reality in the atmospheres of exoplanets [J/OL]. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 2017, 122(1): 53-75. DOI: [10.1002/2016JE005155](https://doi.org/10.1002/2016JE005155).
- Deng L, Yang F, Chen X, et al. Lenghu on the tibetan plateau as an astronomical observing site [J]. *Nature*, 2021, 596: 353 - 356.

- Dindar S, Ford E B, Juric M, et al. Swarm-NG: A CUDA library for Parallel n-body Integrations with focus on simulations of planetary systems [J/OL]. *New Astronomy*, 2013, 23: 6-18. DOI: [10.1016/j.newast.2013.01.002](https://doi.org/10.1016/j.newast.2013.01.002).
- Dormand J R, Prince P J. New Runge-Kutta Algorithms for Numerical Simulation in Dynamical Astronomy [J/OL]. *Celestial Mechanics*, 1978, 18(3): 223-232. DOI: [10.1007/BF01230162](https://doi.org/10.1007/BF01230162).
- Dragomir D, Teske J, Günther M N, et al. TESS Delivers Its First Earth-sized Planet and a Warm Sub-Neptune [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 875(2): L7. DOI: [10.3847/2041-8213/ab12ed](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab12ed).
- Eastman J, Siverd R, Gaudi B S. Achieving Better Than 1 Minute Accuracy in the Heliocentric and Barycentric Julian Dates [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2010, 122: 935. DOI: [10.1086/655938](https://doi.org/10.1086/655938).
- Eastman J. EXOFASTv2: Generalized publication-quality exoplanet modeling code [Z]. 2017: ascl:1710.003.
- Eastman J, Gaudi B S, Agol E. EXOFAST: A Fast Exoplanetary Fitting Suite in IDL [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2013, 125(923): 83. DOI: [10.1086/669497](https://doi.org/10.1086/669497).
- Eastman J D, Rodriguez J E, Agol E, et al. EXOFASTv2: A public, generalized, publication-quality exoplanet modeling code [J]. *arXiv e-prints*, 2019: arXiv:1907.09480.
- Einstein A. Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field [J/OL]. *Science*, 1936, 84(2188): 506-507. DOI: [10.1126/science.84.2188.506](https://doi.org/10.1126/science.84.2188.506).
- Erasmus D, Sarazin M. Utilizing satellite data for evaluation and forecasting applications at astronomical sites [C]//Vernin J, Benkhaldoun Z, Muñoz-Tuñón C. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: volume 266 Astronomical Site Evaluation in the Visible and Radio Range*. 2002: 310.
- Erasmus D A, Sarazin M S. Forecasting precipitable water vapor and cirrus cloud cover for astronomical observatories: satellite image processing guided by synoptic model dissemination data [C/OL]//Russell J E, Schaefer K, Lado-Bordowsky O. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: volume 4168 Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere V*. 2001: 317-328. DOI: [10.1117/12.413848](https://doi.org/10.1117/12.413848).
- Erasmus D A, van Rooyen R. *Society of photo-optical instrumentation engineers (spie) conference series: volume 6267 A satellite survey of cloud cover and water vapor in northwest Africa and southern Spain* [M/OL]. 2006: 62671O. DOI: [10.1117/12.669490](https://doi.org/10.1117/12.669490).
- Everhart E. An efficient integrator that uses Gauss-Radau spacings [C/OL]//Carusi A, Valsecchi G B. *Astrophysics and Space Science Library: volume 115 IAU Colloq. 83: Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution*. 1985: 185. DOI: [10.1007/978-94-009-5400-7_17](https://doi.org/10.1007/978-94-009-5400-7_17).
- Feng F, Butler R P, Vogt S S, et al. 3D Selection of 167 Substellar Companions to Nearby Stars [J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2022, 262(1): 21. DOI: [10.3847/1538-4365/ac7e57](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac7e57).
- Feng L, Hao J X, Cao Z H, et al. Site testing campaign for the Large Optical/infrared Telescope of China: overview [J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(6): 080. DOI: [10.1088/1674-4527/20/6/80](https://doi.org/10.1088/1674-4527/20/6/80).
- Foreman-Mackey D, Hogg D W, Lang D, et al. emcee: The MCMC Hammer [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2013, 125: 306-312. DOI: [10.1086/670067](https://doi.org/10.1086/670067).
- Foreman-Mackey D, Hogg D W, Lang D, et al. emcee: The MCMC Hammer [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2013, 125(925): 306. DOI: [10.1086/670067](https://doi.org/10.1086/670067).

- Foreman-Mackey D, Hogg D W, Lang D, et al. emcee: The MCMC Hammer [J/OL]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2013, 125(925): 306. DOI: [10.1086/670067](https://doi.org/10.1086/670067).
- Fressin F, Torres G, Charbonneau D, et al. The False Positive Rate of Kepler and the Occurrence of Planets [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2013, 766(2): 81. DOI: [10.1088/0004-637X/766/2/81](https://doi.org/10.1088/0004-637X/766/2/81).
- Fulton B J, Shporer A, Winn J N, et al. Long-term Transit Timing Monitoring and Refined Light Curve Parameters of HAT-P-13b [J/OL]. The Astronomical Journal, 2011, 142(3): 84. DOI: [10.1088/0004-6256/142/3/84](https://doi.org/10.1088/0004-6256/142/3/84).
- Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties [J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 2016, 595: A2. DOI: [10.1051/0004-6361/201629512](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629512).
- Gaia Collaboration, Vallenari A, Brown A G A, et al. Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties [J]. arXiv e-prints, 2022: arXiv:2208.00211.
- Gaudi B S, Winn J N. Prospects for the Characterization and Confirmation of Transiting Exoplanets via the Rossiter-McLaughlin Effect [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2007, 655(1): 550-563. DOI: [10.1086/509910](https://doi.org/10.1086/509910).
- Gelman A, Rubin D B. Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences [J/OL]. Statistical Science, 1992, 7: 457-472. DOI: [10.1214/ss/1177011136](https://doi.org/10.1214/ss/1177011136).
- Gelman A, Rubin D B. A single series from the gibbs sampler provides a false sense of security [J]. Bayesian statistics, 1992, 4(1): 625-631.
- Geweke J F, et al. Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments [R]. Federal Reserve Bank of Minneapolis, 1991.
- Gillon M, Triaud A H M J, Fortney J J, et al. The TRAPPIST survey of southern transiting planets. I. Thirty eclipses of the ultra-short period planet WASP-43 b [J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 2012, 542: A4. DOI: [10.1051/0004-6361/201218817](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201218817).
- Gillon M, Triaud A H M J, Demory B O, et al. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1 [J/OL]. Nature, 2017, 542(7642): 456-460. DOI: [10.1038/nature21360](https://doi.org/10.1038/nature21360).
- Glickman T S, Zenk W. Glossary of meteorology [M]. American Meteorological Society, 2000.
- Goldberg M, Batygin K. Architectures of Compact Super-Earth Systems Shaped by Instabilities [J/OL]. The Astronomical Journal, 2022, 163(5): 201. DOI: [10.3847/1538-3881/ac5961](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac5961).
- Goodman J, Weare J. Ensemble samplers with affine invariance [J/OL]. Communications in Applied Mathematics and Computational Science, 2010, 5(1): 65-80. DOI: [10.2140/camcos.2010.5.65](https://doi.org/10.2140/camcos.2010.5.65).
- Gould A, Loeb A. Discovering Planetary Systems through Gravitational Microlenses [J/OL]. The Astrophysical Journal, 1992, 396: 104. DOI: [10.1086/171700](https://doi.org/10.1086/171700).
- Graham E, Sarazin M, Beniston M, et al. Climate-based site selection for a Very Large Telescope using GIS techniques [J/OL]. Meteorological Applications, 2005, 12(1): 77-81. DOI: [10.1017/S1350482705001520](https://doi.org/10.1017/S1350482705001520).
- Gratia P, Fabrycky D. Outer-planet scattering can gently tilt an inner planetary system [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 464(2): 1709-1717. DOI: [10.1093/mnras/stw2180](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2180).
- Greiss S, Steeghs D, Gänsicke B T, et al. Initial Data Release of the Kepler-INT Survey [J/OL]. The Astronomical Journal, 2012, 144(1): 24. DOI: [10.1088/0004-6256/144/1/24](https://doi.org/10.1088/0004-6256/144/1/24).
- Grillmair C J, Charbonneau D, Burrows A, et al. A Spitzer Spectrum of the Exoplanet HD 189733b [J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 2007, 658(2): L115-L118. DOI: [10.1086/513741](https://doi.org/10.1086/513741).

- Grimm S L, Demory B O, Gillon M, et al. The nature of the TRAPPIST-1 exoplanets [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2018, 613: A68. DOI: [10.1051/0004-6361/201732233](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732233).
- Grimm S L, Stadel J G, Brasser R, et al. GENGA. II. GPU Planetary N-body Simulations with Non-Newtonian Forces and High Number of Particles [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2022, 932(2): 124. DOI: [10.3847/1538-4357/ac6dd2](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac6dd2).
- Günther M N, Daylan T. Allesfitter: Flexible Star and Exoplanet Inference From Photometry and Radial Velocity [Z]. 2019.
- Günther M N, Daylan T. Allesfitter: Flexible Star and Exoplanet Inference from Photometry and Radial Velocity [J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, 254(1): 13. DOI: [10.3847/1538-4365/abe70e](https://doi.org/10.3847/1538-4365/abe70e).
- Hébrard G, Bouchy F, Pont F, et al. Misaligned spin-orbit in the XO-3 planetary system? [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, 488(2): 763-770. DOI: [10.1051/0004-6361:200810056](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810056).
- Hébrard G, Díaz R F, Correia A C M, et al. Discovery and characterization of the exoplanets WASP-148b and c. A transiting system with two interacting giant planets [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2020, 640: A32. DOI: [10.1051/0004-6361/202038296](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038296).
- Hellemeier J A, Yang R, Sarazin M, et al. Weather at selected astronomical sites –an overview of five atmospheric parameters [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 482(4): 4941-4950. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2982>.
- Henden A A, Templeton M, Terrell D, et al. VizieR Online Data Catalog: AAVSO Photometric All Sky Survey (APASS) DR9 (Henden+, 2016) [J]. *VizieR Online Data Catalog*, 2016: II/336.
- Hidayat T, Mahasena P, Dermawan B, et al. Clear sky fraction above Indonesia: an analysis for astronomical site selection [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 427(3): 1903-1917. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.22000.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.22000.x).
- Hinse T C, Christou A A, Alvarellos J L A, et al. Application of the MEGNO technique to the dynamics of Jovian irregular satellites [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, 404: 837-857. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.16307.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16307.x).
- Hippke M, David T J, Mulders G D, et al. Wōtan: Comprehensive Time-series Detrending in Python [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2019, 158(4): 143. DOI: [10.3847/1538-3881/ab3984](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab3984).
- Hirano T, Sanchis-Ojeda R, Takeda Y, et al. Measurements of Stellar Inclinations for Kepler Planet Candidates. II. Candidate Spin-Orbit Misalignments in Single- and Multiple-transiting Systems [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 783(1): 9. DOI: [10.1088/0004-637X/783/1/9](https://doi.org/10.1088/0004-637X/783/1/9).
- Hjorth M, Albrecht S, Hirano T, et al. A backward-spinning star with two coplanar planets [J/OL]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2021, 118(8): 2017418118. DOI: [10.1073/pnas.2017418118](https://doi.org/10.1073/pnas.2017418118).
- Høg E, Fabricius C, Makarov V V, et al. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2000, 355: L27-L30.
- Holman M J, Murray N W. The Use of Transit Timing to Detect Terrestrial-Mass Extrasolar Planets [J/OL]. *Science*, 2005, 307(5713): 1288-1291. DOI: [10.1126/science.1107822](https://doi.org/10.1126/science.1107822).
- Holman M J, Winn J N, Latham D W, et al. The Transit Light Curve Project. I. Four Consecutive Transits of the Exoplanet XO-1b [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 652(2): 1715-1723. DOI: [10.1086/508155](https://doi.org/10.1086/508155).
- Holt J R. Spectroscopic Determination of Stellar Rotation [J]. *Astronomy and Astro-Physics (formerly The Sidereal Messenger)*, 1893, 12: 646.
- Hord B J, Colón K D, Berger T A, et al. The Discovery of a Planetary Companion Interior to

- Hot Jupiter WASP-132 b [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2022, 164(1): 13. DOI: [10.3847/1538-3881/ac6f57](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac6f57).
- Hotan C E, Tingay S J, Glazebrook K. Testing Potential New Sites for Optical Telescopes in Australia [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2013, 30: e002. DOI: [10.1017/pasa.2012.002](https://doi.org/10.1017/pasa.2012.002).
- Howard A W, Johnson J A, Marcy G W, et al. The California Planet Survey. I. Four New Giant Exoplanets [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 721(2): 1467-1481. DOI: [10.1088/0004-637X/721/2/1467](https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/2/1467).
- Howell S B, Sobeck C, Haas M, et al. The K2 Mission: Characterization and Early Results [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2014, 126(938): 398. DOI: [10.1086/676406](https://doi.org/10.1086/676406).
- Huang C X, Petrovich C, Deibert E. Dynamically Hot Super-Earths from Outer Giant Planet Scattering [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2017, 153(5): 210. DOI: [10.3847/1538-3881/aa67fb](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa67fb).
- Huang C X, Burt J, Vanderburg A, et al. TESS Discovery of a Transiting Super-Earth in the pi Mensae System [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2018, 868(2): L39. DOI: [10.3847/2041-8213/aaef91](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaef91).
- Huang C X, Quinn S N, Vanderburg A, et al. TESS Spots a Hot Jupiter with an Inner Transiting Neptune [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, 892(1): L7. DOI: [10.3847/2041-8213/ab7302](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab7302).
- Huang C X, Vanderburg A, Pál A, et al. Photometry of 10 Million Stars from the First Two Years of TESS Full Frame Images: Part I [J/OL]. *Research Notes of the American Astronomical Society*, 2020, 4(11): 204. DOI: [10.3847/2515-5172/abca2e](https://doi.org/10.3847/2515-5172/abca2e).
- Huber D, Carter J A, Barbieri M, et al. Stellar Spin-Orbit Misalignment in a Multiplanet System [J/OL]. *Science*, 2013, 342(6156): 331-334. DOI: [10.1126/science.1242066](https://doi.org/10.1126/science.1242066).
- Irwin J, Charbonneau D, Nutzman P, et al. The MEarth project: searching for transiting habitable super-Earths around nearby M dwarfs [C/OL]//Pont F, Sasselov D, Holman M J. IAU Symposium: volume 253 Transiting Planets. 2009: 37-43. DOI: [10.1017/S1743921308026215](https://doi.org/10.1017/S1743921308026215).
- Ivshina E S, Winn J N. TESS Transit Timing of Hundreds of Hot Jupiters [J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2022, 259(2): 62. DOI: [10.3847/1538-4365/ac545b](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac545b).
- Jeffers S V, Barnes J R, Schöfer P, et al. The CARMENES search for exoplanets around M dwarfs. Benchmarking the impact of activity in high-precision radial velocity measurements [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2022, 663: A27. DOI: [10.1051/0004-6361/202141880](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141880).
- Johnson J A, Aller K M, Howard A W, et al. Giant Planet Occurrence in the Stellar Mass-Metallicity Plane [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2010, 122(894): 905. DOI: [10.1086/655775](https://doi.org/10.1086/655775).
- Jones H R A, Butler R P, Tinney C G, et al. An exoplanet in orbit around τ^1 Gruis [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2003, 341(3): 948-952. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06481.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06481.x).
- Jones M I, Brahm R, Espinoza N, et al. HD 2685 b: a hot Jupiter orbiting an early F-type star detected by TESS [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2019, 625: A16. DOI: [10.1051/0004-6361/201834640](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834640).
- Jordán A, Brahm R, Espinoza N, et al. TOI-677b: A Warm Jupiter ($P = 11.2$ days) on an Eccentric Orbit Transiting a Late F-type Star [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159(4): 145. DOI: [10.3847/1538-3881/ab6f67](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab6f67).

- Knutson H A, Lewis N, Fortney J J, et al. 3.6 and 4.5 μm phase curves and evidence for non-equilibrium chemistry in the atmosphere of extrasolar planet hd 189733b [J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 754(1): 22.
- Konacki M, Torres G, Jha S, et al. An extrasolar planet that transits the disk of its parent star [J/OL]. *Nature*, 2003, 421(6922): 507-509. DOI: [10.1038/nature01379](https://doi.org/10.1038/nature01379).
- Kozai Y. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 1962, 67: 591-598. DOI: [10.1086/108790](https://doi.org/10.1086/108790).
- Kreidberg L, Bean J L, Désert J M, et al. Clouds in the atmosphere of the super-earth exoplanet gj 1214b [J]. *Nature*, 2014, 505(7481): 69.
- Lai D, Anderson K R, Pu B. How do external companions affect spin-orbit misalignment of hot Jupiters? [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 475(4): 5231-5236. DOI: [10.1093/mnras/sty133](https://doi.org/10.1093/mnras/sty133).
- Laughlin G, Crismani M, Adams F C. On the Anomalous Radii of the Transiting Extrasolar Planets [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, 729(1): L7. DOI: [10.1088/2041-8205/729/1/L7](https://doi.org/10.1088/2041-8205/729/1/L7).
- Li G, Naoz S, Valsecchi F, et al. The Dynamics of the Multi-planet System Orbiting Kepler-56 [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 794(2): 131. DOI: [10.1088/0004-637X/794/2/131](https://doi.org/10.1088/0004-637X/794/2/131).
- Lidov M L. The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies [J/OL]. *Planet. Space Sci.*, 1962, 9(10): 719-759. DOI: [10.1016/0032-0633\(62\)90129-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(62)90129-0).
- Lightkurve Collaboration, Cardoso J V d M, Hedges C, et al. Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python [Z]. 2018: ascl:1812.013.
- Lillo-Box J, Millholland S, Laughlin G. Follow-up of non-transiting planets detected by Kepler. Confirmation of three hot-Jupiters and validation of three other planets [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2021, 654: A9. DOI: [10.1051/0004-6361/202140746](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140746).
- Lombardi G, Zitelli V, Ortolani S, et al. El Roque de Los Muchachos Site Characteristics. I. Temperature Analysis [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2006, 118(846): 1198-1204. DOI: [10.1086/507344](https://doi.org/10.1086/507344).
- Lombardi G, Zitelli V, Ortolani S, et al. El Roque de Los Muchachos Site Characteristics. II. Analysis of Wind, Relative Humidity, and Air Pressure [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2007, 119(853): 292-302. DOI: [10.1086/513079](https://doi.org/10.1086/513079).
- Lombardi G, Zitelli V, Ortolani S, et al. El Roque de Los Muchachos site characteristics. III. Analysis of atmospheric dust and aerosol extinction [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, 483(2): 651-659. DOI: [10.1051/0004-6361:20078372](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20078372).
- López-Morales M, Triaud A H, Rodler F, et al. Rossiter-mclaughlin observations of 55 cnc e [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2014, 792(2): L31.
- Louden E M, Winn J N, Petigura E A, et al. Hot Stars with Kepler Planets Have High Obliquities [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2021, 161(2): 68. DOI: [10.3847/1538-3881/abcebd](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abcebd).
- Lucy L B, Sweeney M A. Spectroscopic binaries with circular orbits. [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 1971, 76: 544-556. DOI: [10.1086/111159](https://doi.org/10.1086/111159).
- Ma B, Shang Z, Hu Y, et al. Night-time measurements of astronomical seeing at Dome A in Antarctica [J/OL]. *Nature*, 2020, 583(7818): 771-774. DOI: [10.1038/s41586-020-2489-0](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2489-0).
- Maciejewski G, Dimitrov D, Fernández M, et al. Departure from the constant-period ephemeris for the transiting exoplanet WASP-12 [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2016, 588: L6. DOI: [10.1051/0004-6361/201628312](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628312).

- Maciejewski G, Fernández M, Sota A, et al. A Newtonian Model for the WASP-148 Exoplanetary System Enhanced with TESS and Ground-based Photometric Observations [J/OL]. *Acta Astronautica*, 2020, 70(3): 203-217. DOI: [10.32023/0001-5237/70.3.3](https://doi.org/10.32023/0001-5237/70.3.3).
- Mallonn M, von Essen C, Herrero E, et al. Ephemeris refinement of 21 hot Jupiter exoplanets with high timing uncertainties [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2019, 622: A81. DOI: [10.1051/0004-6361/201834194](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834194).
- Mancini L, Kemmer J, Southworth J, et al. An optical transmission spectrum of the giant planet WASP-36 b [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 459(2): 1393-1402. DOI: [10.1093/mnras/stw659](https://doi.org/10.1093/mnras/stw659).
- Mandel K, Agol E. Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2002, 580(2): L171-L175. DOI: [10.1086/345520](https://doi.org/10.1086/345520).
- Mao S, Paczynski B. Gravitational Microlensing by Double Stars and Planetary Systems [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1991, 374: L37. DOI: [10.1086/186066](https://doi.org/10.1086/186066).
- Marchis F, Malvache A, Marfisi L, et al. Unistellar eVscopes: Smart, portable, and easy-to-use telescopes for exploration, interactive learning, and citizen astronomy [J/OL]. *Acta Astronautica*, 2020, 166: 23-28. DOI: [10.1016/j.actaastro.2019.09.028](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.09.028).
- Masuda K, Winn J N, Kawahara H. Mutual Orbital Inclinations between Cold Jupiters and Inner Super-Earths [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159(2): 38. DOI: [10.3847/1538-3881/ab5c1d](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab5c1d).
- Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star [J/OL]. *Nature*, 1995, 378 (6555): 355-359. DOI: [10.1038/378355a0](https://doi.org/10.1038/378355a0).
- McArthur B E, Benedict G F, Barnes R, et al. New Observational Constraints on the ν Andromedae System with Data from the Hubble Space Telescope and Hobby-Eberly Telescope [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 715(2): 1203-1220. DOI: [10.1088/0004-637X/715/2/1203](https://doi.org/10.1088/0004-637X/715/2/1203).
- McCullough P R, Stys J E, Valenti J A, et al. The XO project: Searching for transiting extrasolar planet candidates [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2005, 117 (834): 783-795. <https://doi.org/10.1086%2F432024>. DOI: [10.1086/432024](https://doi.org/10.1086/432024).
- McLachlan R I. On the numerical integration of ordinary differential equations by symmetric composition methods [J/OL]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1995, 16(1): 151-168. <https://doi.org/10.1137/0916010>.
- McLaughlin D B. Some results of a spectrographic study of the Algol system. [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 1924, 60: 22-31. DOI: [10.1086/142826](https://doi.org/10.1086/142826).
- Mermilliod J C. VizieR Online Data Catalog: UVB Photoelectric Cat: Data 1986-1992 (Mermilliod 1994) [J]. *VizieR Online Data Catalog*, 1994: II/193.
- Meschiari S, Wolf A S, Rivera E, et al. Systemic: A Testbed for Characterizing the Detection of Extrasolar Planets. I. The Systemic Console Package [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2009, 121(883): 1016. DOI: [10.1086/605730](https://doi.org/10.1086/605730).
- Millholland S, Wang S, Laughlin G. On the Detection of Non-transiting Hot Jupiters in Multiple-planet Systems [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, 823(1): L7. DOI: [10.3847/2041-8205/823/1/L7](https://doi.org/10.3847/2041-8205/823/1/L7).
- Millholland S, Laughlin G, Teske J, et al. New Constraints on Gliese 876—Exemplar of Mean-motion Resonance [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(3): 106. DOI: [10.3847/1538-3881/aaa894](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaa894).
- Mills S M, Fabrycky D C. Kepler-108: A Mutually Inclined Giant Planet System [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2017, 153(1): 45. DOI: [10.3847/1538-3881/153/1/45](https://doi.org/10.3847/1538-3881/153/1/45).

- Morton T D, Winn J N. Obliquities of Kepler Stars: Comparison of Single- and Multiple-transit Systems [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 796(1): 47. DOI: [10.1088/0004-637X/796/1/47](https://doi.org/10.1088/0004-637X/796/1/47).
- Mróz P, Udalski A, Skowron J, et al. No large population of unbound or wide-orbit Jupiter-mass planets [J/OL]. *Nature*, 2017, 548(7666): 183-186. DOI: [10.1038/nature23276](https://doi.org/10.1038/nature23276).
- Naef D, Mayor M, Pepe F, et al. The CORALIE survey for southern extrasolar planets. V. 3 new extrasolar planets [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2001, 375: 205-218. DOI: [10.1051/0004-6361:20010841](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010841).
- Nascimbeni V, Piotto G, Bedin L R, et al. TASTE II. A new observational study of transit time variations in HAT-P-13b [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2011, 532: A24. DOI: [10.1051/0004-6361/201116830](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116830).
- Neal R. MCMC Using Hamiltonian Dynamics [M/OL]//Handbook of Markov Chain Monte Carlo. 2011: 113-162. DOI: [10.1201/b10905](https://doi.org/10.1201/b10905).
- Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization [J]. *Comput. J.*, 1965, 7: 308-313.
- Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization [J]. *The computer journal*, 1965, 7(4): 308-313.
- Ness M, Hogg D W, Rix H W, et al. The Cannon: A data-driven approach to Stellar Label Determination [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 808(1): 16. DOI: [10.1088/0004-637X/808/1/16](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/16).
- Neuhäuser R, Errmann R, Berndt A, et al. The Young Exoplanet Transit Initiative (YETI) [J/OL]. *Astronomische Nachrichten*, 2011, 332(6): 547. DOI: [10.1002/asna.201111573](https://doi.org/10.1002/asna.201111573).
- Newville M, Stensitzki T, Allen D B, et al. LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python [CP/OL]. Zenodo, 2014. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11813>.
- Ngo H, Knutson H A, Hinkley S, et al. Friends of Hot Jupiters. II. No Correspondence between Hot-jupiter Spin-Orbit Misalignment and the Incidence of Directly Imaged Stellar Companions [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 800(2): 138. DOI: [10.1088/0004-637X/800/2/138](https://doi.org/10.1088/0004-637X/800/2/138).
- Pál A, Kocsis B. Periastron precession measurements in transiting extrasolar planetary systems at the level of general relativity [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008, 389(1): 191-198. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13512.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13512.x).
- Panahi A, Zucker S, Clementini G, et al. The detection of transiting exoplanets by Gaia [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2022, 663: A101. DOI: [10.1051/0004-6361/202243497](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243497).
- Paunzen E. A new catalogue of Strömgren-Crawford uvby β photometry [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2015, 580: A23. DOI: [10.1051/0004-6361/201526413](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526413).
- Penev K, Bouma L G, Winn J N, et al. Empirical Tidal Dissipation in Exoplanet Hosts From Tidal Spin-up [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155: 165. DOI: [10.3847/1538-3881/aaaf71](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaaf71).
- Pepe F, Cristiani S, Rebolo R, et al. ESPRESSO at VLT. On-sky performance and first results [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2021, 645: A96. DOI: [10.1051/0004-6361/202038306](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038306).
- Pepper J, Pogge R, Depoy D L, et al. Astronomical society of the pacific conference series: volume 366 Early Results from the KELT Transit Survey [M]. 2007: 27.
- Perryman M. The Exoplanet Handbook [M]. 2018.
- Petit A C, Laskar J, Boué G. AMD-stability in the presence of first-order mean motion resonances [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2017, 607: A35. DOI: [10.1051/0004-6361/201731196](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731196).
- Pollacco D L, Skillen I, Collier Cameron A, et al. The WASP Project and the SuperWASP Cameras [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2006, 118(848): 1407-1418. DOI: [10.1086/508556](https://doi.org/10.1086/508556).

- Powell M J. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives [J]. *The computer journal*, 1964, 7(2): 155-162.
- Press W H, Flannery B P, Teukolsky S A, et al. Numerical recipes in fortran 77: The art of scientific computing [M/OL]. 2nd ed. Cambridge University Press, 1992. <http://www.worldcat.org/isbn/052143064X>.
- Queloz D, Eggenberger A, Mayor M, et al. Detection of a spectroscopic transit by the planet orbiting the star HD209458 [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2000, 359: L13-L17.
- Quirrenbach A, Amado P J, Ribas I, et al. CARMENES: high-resolution spectra and precise radial velocities in the red and infrared [C/OL]//Evans C J, Simard L, Takami H. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: volume 10702 Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII. 2018: 107020W. DOI: [10.1117/12.2313689](https://doi.org/10.1117/12.2313689).
- Radzom B, Wang S. In-situ Formation Can Naturally Explain Why Hot Jupiters are Observationally Isolated [J]. *The Astronomical Journal*, 2023: under review.
- Rafikov R R. Can Giant Planets Form by Direct Gravitational Instability? [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2005, 621(1): L69-L72. DOI: [10.1086/428899](https://doi.org/10.1086/428899).
- Rein H, Liu S F. REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2012, 537: A128. DOI: [10.1051/0004-6361/201118085](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118085).
- Rein H, Spiegel D S. IAS15: a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 446(2): 1424-1437. DOI: [10.1093/mnras/stu2164](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2164).
- Rein H, Tamayo D. WHFAST: a fast and unbiased implementation of a symplectic Wisdom-Holman integrator for long-term gravitational simulations [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 452(1): 376-388. DOI: [10.1093/mnras/stv1257](https://doi.org/10.1093/mnras/stv1257).
- Rein H, Tamayo D. JANUS: a bit-wise reversible integrator for N-body dynamics [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 473(3): 3351-3357. DOI: [10.1093/mnras/stx2479](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2479).
- Rein H, Hernandez D M, Tamayo D, et al. Hybrid symplectic integrators for planetary dynamics [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 485(4): 5490-5497. DOI: [10.1093/mnras/stz769](https://doi.org/10.1093/mnras/stz769).
- Rein H, Tamayo D, Brown G. High-order symplectic integrators for planetary dynamics and their implementation in REBOUND [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 489(4): 4632-4640. DOI: [10.1093/mnras/stz2503](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2503).
- Revels J, Lubin M, Papamarkou T. Forward-Mode Automatic Differentiation in Julia [J]. *arXiv e-prints*, 2016: arXiv:1607.07892.
- Rice M, Brewer J M. Stellar Characterization of Keck HIRES Spectra with The Cannon [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 898(2): 119. DOI: [10.3847/1538-4357/ab9f96](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9f96).
- Rice M, Wang S, Howard A W, et al. SOLES I: The Spin-Orbit Alignment of K2-140 b [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2021, 162(5): 182. DOI: [10.3847/1538-3881/ac1f8f](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac1f8f).
- Richardson L F. The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses in a Masonry Dam [J/OL]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 1911, 210: 307-357. DOI: [10.1098/rsta.1911.0009](https://doi.org/10.1098/rsta.1911.0009).
- Richardson L J, Deming D, Horning K, et al. A spectrum of an extrasolar planet [J/OL]. *Nature*, 2007, 445(7130): 892-895. DOI: [10.1038/nature05636](https://doi.org/10.1038/nature05636).

- Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) [J/OL]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2015, 1: 014003. DOI: [10.1117/1.JATIS.1.1.014003](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.1.1.014003).
- Rossiter R A. On the detection of an effect of rotation during eclipse in the velocity of the brighter component of beta Lyrae, and on the constancy of velocity of this system. [J/OL]. The Astrophysical Journal, 1924, 60: 15-21. DOI: [10.1086/142825](https://doi.org/10.1086/142825).
- Rowan D, Meschiari S, Laughlin G, et al. The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: HD 32963—A New Jupiter Analog Orbiting a Sun-like Star [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2016, 817(2): 104. DOI: [10.3847/0004-637X/817/2/104](https://doi.org/10.3847/0004-637X/817/2/104).
- Sanchis-Ojeda R, Winn J N, Dai F, et al. A Low Stellar Obliquity for WASP-47, a Compact Multiplanet System with a Hot Jupiter and an Ultra-short Period Planet [J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 2015, 812(1): L11. DOI: [10.1088/2041-8205/812/1/L11](https://doi.org/10.1088/2041-8205/812/1/L11).
- Santerne A, Díaz R F, Moutou C, et al. SOPHIE velocimetry of Kepler transit candidates. VII. A false-positive rate of 35% for Kepler close-in giant candidates [J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 2012, 545: A76. DOI: [10.1051/0004-6361/201219608](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219608).
- Sarazin M, Graham E, Kurlandczyk H. FriOWL: A Site Selection Tool for the European Extremely Large Telescope (E-ELT) Project [J]. The Messenger, 2006, 125: 44.
- Schlafly E F, Finkbeiner D P. Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2011, 737(2): 103. DOI: [10.1088/0004-637X/737/2/103](https://doi.org/10.1088/0004-637X/737/2/103).
- Schlaufman K C. Evidence of Possible Spin-orbit Misalignment Along the Line of Sight in Transiting Exoplanet Systems [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2010, 719(1): 602-611. DOI: [10.1088/0004-637X/719/1/602](https://doi.org/10.1088/0004-637X/719/1/602).
- Schlaufman K C, Winn J N. Evidence for the Tidal Destruction of Hot Jupiters by Subgiant Stars [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2013, 772(2): 143. DOI: [10.1088/0004-637X/772/2/143](https://doi.org/10.1088/0004-637X/772/2/143).
- Schöck M, Els S, Riddle R, et al. Thirty Meter Telescope Site Testing I: Overview [J/OL]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2009, 121(878): 384. DOI: [10.1086/599287](https://doi.org/10.1086/599287).
- Schwab C, Rakich A, Gong Q, et al. Design of neid, an extreme precision doppler spectrograph for wiyn [C]//Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI: volume 9908. International Society for Optics and Photonics, 2016: 99087H.
- Seager S, Hui L. Constraining the Rotation Rate of Transiting Extrasolar Planets by Oblateness Measurements [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2002, 574(2): 1004-1010. DOI: [10.1086/340994](https://doi.org/10.1086/340994).
- Seager S, Mallén-Ornelas G. A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2003, 585(2): 1038-1055. DOI: [10.1086/346105](https://doi.org/10.1086/346105).
- Shallue C J, Vanderburg A. Identifying Exoplanets with Deep Learning: A Five-planet Resonant Chain around Kepler-80 and an Eighth Planet around Kepler-90 [J/OL]. The Astronomical Journal, 2018, 155(2): 94. DOI: [10.3847/1538-3881/aa9e09](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa9e09).
- Sinnott R W. Virtues of the Haversine [J]. S&T, 1984, 68(2): 158.
- Site Testing Group of Yunnan Astronomical Observatory. The astro-climatic conditions at Gaomeigu of Lijiang county [J]. Acta Astronomica Sinica, 1999, 3(2): 326-334.
- Smith A M S, Anderson D R, Collier Cameron A, et al. WASP-36b: A New Transiting Planet around a Metal-poor G-dwarf, and an Investigation into Analyses Based on a Single Transit Light Curve [J/OL]. The Astronomical Journal, 2012, 143(4): 81. DOI: [10.1088/0004-6256/143/4/81](https://doi.org/10.1088/0004-6256/143/4/81).

- Smith B A, Terrile R J. A Circumstellar Disk around β Pictoris [J/OL]. *Science*, 1984, 226(4681): 1421-1424. DOI: [10.1126/science.226.4681.1421](https://doi.org/10.1126/science.226.4681.1421).
- Southworth J, Maxted P F L, Smalley B. Eclipsing binaries in open clusters - I. V615 Per and V618 Per in h Persei [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, 349(2): 547-559. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07520.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07520.x).
- Southworth J, Maxted P F L, Smalley B. Eclipsing binaries in open clusters - II. V453 Cyg in NGC 6871 [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, 351(4): 1277-1289. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07871.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07871.x).
- Southworth J, Hinse T C, Jørgensen U G, et al. High-precision photometry by telescope defocusing - I. The transiting planetary system WASP-5 [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, 396(2): 1023-1031. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.14767.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14767.x).
- Stassun K G, Torres G. Evidence for a Systematic Offset of $-80 \mu\text{as}$ in the Gaia DR2 Parallaxes [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 862(1): 61. DOI: [10.3847/1538-4357/aacafc](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacafc).
- Stassun K G, Oelkers R J, Paegert M, et al. The Revised TESS Input Catalog and Candidate Target List [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2019, 158(4): 138. DOI: [10.3847/1538-3881/ab3467](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab3467).
- Stefansson G, Cañas C, Wisniewski J, et al. A Sub-Neptune-sized Planet Transiting the M2.5 Dwarf G 9-40: Validation with the Habitable-zone Planet Finder [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159(3): 100. DOI: [10.3847/1538-3881/ab5f15](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab5f15).
- Stefansson G, Mahadevan S, Petrovich C, et al. The Warm Neptune GJ 3470b Has a Polar Orbit [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, 931(2): L15. DOI: [10.3847/2041-8213/ac6e3c](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6e3c).
- Steffen J H, Ragozzine D, Fabrycky D C, et al. Kepler constraints on planets near hot Jupiters [J/OL]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2012, 109(21): 7982-7987. DOI: [10.1073/pnas.1120970109](https://doi.org/10.1073/pnas.1120970109).
- Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. *Journal of global optimization*, 1997, 11(4): 341-359.
- Struve O. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work [J]. *The Observatory*, 1952, 72: 199-200.
- Tayar J, Claytor Z R, Huber D, et al. A Guide to Realistic Uncertainties on Fundamental Properties of Solar-Type Exoplanet Host Stars [J]. *arXiv e-prints*, 2020: arXiv:2012.07957.
- Ter Braak C J F. A Markov Chain Monte Carlo version of the genetic algorithm Differential Evolution: easy Bayesian computing for real parameter spaces [J/OL]. *Statistics and Computing*, 2006, 16(3): 239-249. DOI: [10.1007/s11222-006-8769-1](https://doi.org/10.1007/s11222-006-8769-1).
- Thorngren D P, Fortney J J. Bayesian Analysis of Hot-Jupiter Radius Anomalies: Evidence for Ohmic Dissipation? [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(5): 214. DOI: [10.3847/1538-3881/aaba13](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaba13).
- Tian J F, Deng L C, Zhang X B, et al. Optical Observing Conditions at Delingha Station [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2016, 128(968): 105003. DOI: [10.1088/1538-3873/128/968/105003](https://doi.org/10.1088/1538-3873/128/968/105003).
- Tuchow N W, Ford E B, Papamarkou T, et al. The efficiency of geometric samplers for exoplanet transit timing variation models [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 484(3): 3772-3784. DOI: [10.1093/mnras/stz247](https://doi.org/10.1093/mnras/stz247).
- Udalski A, Paczynski B, Zebrun K, et al. The Optical Gravitational Lensing Experiment. Search for Planetary and Low-Luminosity Object Transits in the Galactic Disk. Results of 2001 Campaign [J]. *Acta Astronautica*, 2002, 52: 1-37.

- Udry S, Mayor M, Santos N C. Statistical properties of exoplanets. I. The period distribution: Constraints for the migration scenario [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2003, 407: 369-376. DOI: [10.1051/0004-6361:20030843](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030843).
- Valenti J A, Fischer D A. Spectroscopic Properties of Cool Stars (SPOCS). I. 1040 F, G, and K Dwarfs from Keck, Lick, and AAT Planet Search Programs [J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2005, 159(1): 141-166. DOI: [10.1086/430500](https://doi.org/10.1086/430500).
- Vanderspek R, Huang C X, Vanderburg A, et al. TESS Discovery of an Ultra-short-period Planet around the Nearby M Dwarf LHS 3844 [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 871(2): L24. DOI: [10.3847/2041-8213/aafb7a](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aafb7a).
- Varela A M, Bertolin C, Muñoz-Tuñón C, et al. Astronomical site selection: on the use of satellite data for aerosol content monitoring [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008, 391(2): 507-520. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13803.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13803.x).
- Vernin J, Muñoz-Tuñón C, Sarazin M. E-ELT site characterization status [C/OL]//Stepp L M, Gilmozzi R. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: volume 7012 Ground-based and Airborne Telescopes II. 2008: 70121T. DOI: [10.1117/12.788731](https://doi.org/10.1117/12.788731).
- Vousden W D, Farr W M, Mandel I. Dynamic temperature selection for parallel tempering in Markov chain Monte Carlo simulations [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 455(2): 1919-1937. DOI: [10.1093/mnras/stv2422](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2422).
- Walkowicz L M, Basri G S. Rotation periods, variability properties and ages for Kepler exoplanet candidate host stars [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 436(2): 1883-1895. DOI: [10.1093/mnras/stt1700](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1700).
- Wang S, Zhang H, Zhou J L, et al. Planetary Transit Candidates in the CSTAR Field: Analysis of the 2008 Data [J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2014, 211(2): 26. DOI: [10.1088/0067-0049/211/2/26](https://doi.org/10.1088/0067-0049/211/2/26).
- Wang S, Wu D H, Barclay T, et al. Updated Masses for the TRAPPIST-1 Planets [J]. arXiv e-prints, 2017: arXiv:1704.04290.
- Wang S, Addison B, Fischer D A, et al. Stellar Spin-Orbit Alignment for Kepler-9, a Multi-transiting Planetary System with Two Outer Planets Near 2:1 Resonance [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(2): 70. DOI: [10.3847/1538-3881/aaa2fb](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaa2fb).
- Wang S, Wang X Y, Wang Y H, et al. Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). I. Refined System Parameters and Transit Timing Variations of HAT-P-29b [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 156(4): 181. DOI: [10.3847/1538-3881/aadcfc](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aadcfc).
- Wang S, Wang X Y, Wang Y H, et al. Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). I. Refined System Parameters and Transit Timing Variations of HAT-P-29b [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 156(4): 181. DOI: [10.3847/1538-3881/aadcfc](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aadcfc).
- Wang S, Wu D H, Addison B C, et al. Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). III. On the Relocation of the Kepler-9 b Transit [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(2): 73. DOI: [10.3847/1538-3881/aaa253](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaa253).
- Wang S, Jones M, Shporer A, et al. HD 202772A b: A Transiting Hot Jupiter around a Bright, Mildly Evolved Star in a Visual Binary Discovered by TESS [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2019, 157(2): 51. DOI: [10.3847/1538-3881/aaf1b7](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaf1b7).
- Wang S, Winn J N, Addison B C, et al. The Aligned Orbit of the Eccentric Warm Jupiter K2-232b [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2021, 162(2): 50. DOI: [10.3847/1538-3881/ac0626](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac0626).
- Wang X Y, Wang S, Hinse T C, et al. Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). IV. Refined System Parameters, Transit Timing Variations, and Orbital Stability of the Transiting Planetary

- System HAT-P-25 [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2018, 130 (988): 064401. DOI: [10.1088/1538-3873/aab93e](https://doi.org/10.1088/1538-3873/aab93e).
- Wang X Y, Wang Y H, Wang S, et al. Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). VI. The Homogeneous Refinement of System Parameters for 39 Transiting Hot Jupiters with 127 New Light Curves [J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, 255(1): 15. DOI: [10.3847/1538-4365/ac0835](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac0835).
- Wang Y H, Wang S, Liu H G, et al. Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). II. Refined System Parameters and Transit Timing Analysis of HAT-P-33b [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2017, 154: 49. DOI: [10.3847/1538-3881/aa7519](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa7519).
- Wang Y H, Wang S, Hinse T C, et al. Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). V. Transit Follow Up for HAT-P-9b, HAT-P-32b, and HAT-P-36b [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2019, 157(2): 82. DOI: [10.3847/1538-3881/aaf6b6](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaf6b6).
- Wang Y H, Wang S, Hinse T C, et al. Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). V. Transit Follow Up for HAT-P-9b, HAT-P-32b, and HAT-P-36b [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2019, 157(2): 82. DOI: [10.3847/1538-3881/aaf6b6](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaf6b6).
- Weiss L M, Marcy G W, Petigura E A, et al. The California-Kepler Survey. V. Peas in a Pod: Planets in a Kepler Multi-planet System Are Similar in Size and Regularly Spaced [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(1): 48. DOI: [10.3847/1538-3881/aa9ff6](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa9ff6).
- Wheatley P J, West R G, Goad M R, et al. The Next Generation Transit Survey (NGTS) [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 475(4): 4476-4493. DOI: [10.1093/mnras/stx2836](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2836).
- Winn J N, Fabrycky D C. The Occurrence and Architecture of Exoplanetary Systems [J/OL]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2015, 53: 409-447. DOI: [10.1146/annurev-astro-082214-122246](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082214-122246).
- Winn J N, Fabrycky D, Albrecht S, et al. Hot Stars with Hot Jupiters Have High Obliquities [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, 718(2): L145-L149. DOI: [10.1088/2041-8205/718/2/L145](https://doi.org/10.1088/2041-8205/718/2/L145).
- Winn J N, Petigura E A, Morton T D, et al. Constraints on the Obliquities of Kepler Planet-hosting Stars [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2017, 154(6): 270. DOI: [10.3847/1538-3881/aa93e3](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa93e3).
- Wisdom J, Holman M. Symplectic maps for the N-body problem. [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 1991, 102: 1528-1538. DOI: [10.1086/115978](https://doi.org/10.1086/115978).
- Wittenmyer R A, Wang S, Horner J, et al. Forever Alone? Testing Single Eccentric Planetary Systems for Multiple Companions [J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2013, 208(1): 2. DOI: [10.1088/0067-0049/208/1/2](https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/1/2).
- Wittenmyer R A, Clark J T, Zhao J, et al. Truly eccentric - I. Revisiting eight single-eccentric planetary systems [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 484(4): 5859-5867. DOI: [10.1093/mnras/stz290](https://doi.org/10.1093/mnras/stz290).
- Wolszczan A, Frail D A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12 [J/OL]. *Nature*, 1992, 355(6356): 145-147. DOI: [10.1038/355145a0](https://doi.org/10.1038/355145a0).
- Wright J T, Howard A W. Efficient Fitting of Multiplanet Keplerian Models to Radial Velocity and Astrometry Data [J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2009, 182(1): 205-215. DOI: [10.1088/0067-0049/182/1/205](https://doi.org/10.1088/0067-0049/182/1/205).
- Wu D, Rice M, Wang S. Evidence for Hidden Nearby Companions to Hot Jupiters [J]. *The Astronomical Journal*, 2023: under review.
- Wu Y. Mass and Mass Scalings of Super-Earths [J]. *ArXiv e-prints*, 2018.

- Wu Y, Murray N. Planet Migration and Binary Companions: The Case of HD 80606b [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2003, 589(1): 605-614. DOI: [10.1086/374598](https://doi.org/10.1086/374598).
- Wu Y, Lithwick Y. Secular Chaos and the Production of Hot Jupiters [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 735(2): 109. DOI: [10.1088/0004-637X/735/2/109](https://doi.org/10.1088/0004-637X/735/2/109).
- Xi L, Shi C X, Zhao B F, et al. Validation and Evaluation of Cloud Amount by Geostationary Satellite Data from 1995 - 2010 [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2013, 41(8): 8-14.
- Xin Y X, Bai J M, Lun B L, et al. Astronomical Site Monitoring System at Lijiang Observatory [J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(9): 149. DOI: [10.1088/1674-4527/20/9/149](https://doi.org/10.1088/1674-4527/20/9/149).
- Xu J, Zhang W, Yang J, et al. A practical manual on operational products and satellite data formats for fengyun-2 satellites [M]. Beijing, China: China Meteorological Press, 2008.
- Yao Y Q. The astronomical site survey in west china [J]. *Journal of The Korean Astronomical Society*, 2005, 38(2): 113-116.
- Yee S W, Petigura E A, Fulton B J, et al. HAT-P-11: Discovery of a Second Planet and a Clue to Understanding Exoplanet Obliquities [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(6): 255. DOI: [10.3847/1538-3881/aabfec](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aabfec).
- Zacharias N, Finch C T, Girard T M, et al. VizieR Online Data Catalog: UCAC4 Catalogue (Zacharias+, 2012) [J]. *VizieR Online Data Catalog*, 2012: I/322A.
- Zechmeister M, Reiners A, Amado P J, et al. Spectrum radial velocity analyser (SERVAL). High-precision radial velocities and two alternative spectral indicators [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 2018, 609: A12. DOI: [10.1051/0004-6361/201731483](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731483).
- Zhang J C, Ge L, Lu X M, et al. Astronomical Observing Conditions at Xinglong Observatory from 2007 to 2014 [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, 127(958): 1292. DOI: [10.1086/684369](https://doi.org/10.1086/684369).
- Zhang J, Weiss L M, Huber D, et al. Long-period Jovian Tilts the Orbits of Two sub-Neptunes Relative to Stellar Spin Axis in Kepler-129 [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2021, 162(3): 89. DOI: [10.3847/1538-3881/ac0634](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac0634).
- Zhou G, Rodriguez J E, Collins K A, et al. KELT-17b: A Hot-Jupiter Transiting an A-star in a Misaligned Orbit Detected with Doppler Tomography [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2016, 152(5): 136. DOI: [10.3847/0004-6256/152/5/136](https://doi.org/10.3847/0004-6256/152/5/136).
- Zhou X, Chen J, Xu W, et al. A Calibration Method for Wide-Field Multicolor Photometric Systems [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1999, 111(761): 909-914. DOI: [10.1086/316400](https://doi.org/10.1086/316400).
- Zhou X, Jiang Z J, Xue S J, et al. Flux Calibration of the BATC Survey and Its Application for checking the Consistency of the Oke-Gunn Standards [J/OL]. *The Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2001, 1: 372-382. DOI: [10.1088/1009-9271/1/4/372](https://doi.org/10.1088/1009-9271/1/4/372).
- Zhu W, Petrovich C, Wu Y, et al. About 30% of Sun-like Stars Have Kepler-like Planetary Systems: A Study of their Intrinsic Architecture [J]. *ArXiv e-prints*, 2018.
- Zhu W, Wu Y. The Super Earth-Cold Jupiter Relations [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 156(3): 92. DOI: [10.3847/1538-3881/aad22a](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad22a).

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简历：

2014年09月——2018年06月，在山东大学（威海）空间科学与物理学院获得理学学士学位。

2018年09月——2023年01月，在中国科学院国家天文台攻读博士学位。

2022年04月——2022年01月，在印第安纳大学伯明顿分校交流访问。

已发表（或正式接受）的学术论文：

- (1) New analysis of the fraction of observable nights at astronomical sites based on FengYun-2 satellite data
Xian-Yu Wang, Zhen-Yu Wu, Jing Liu, et al. 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 511, 5363
- (2) The Aligned Orbit of WASP-148b, the Only Known Hot Jupiter with a Nearby Warm Jupiter Companion, from NEID and HIRES
Xian-Yu Wang, Malena Rice, Songhu Wang, et al. 2022, The Astrophysical Journal Letters, 926, L8
- (3) Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). VI. The Homogeneous Refinement of System Parameters for 39 Transiting Hot Jupiters with 127 New Light Curves
Xian-Yu Wang, Yong-Hao Wang, Songhu Wang, et al. 2021, The Astrophysical Journal Supplement Series, 255, 15
- (4) Photometric follow-up observations and transit timing analysis of HAT-P-37b
Jia-Mei Yang, **Xian-Yu Wang**, Kai Li et al. 2021, Publications of the Astronomical Society of Japan, 73, 1010
- (5) Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). I. Refined System Parameters and Transit variations of HAT-P-29
Songhu Wang, **Xian-Yu Wang**, Yong-Hao Wang et al. 2018, The Astronomical Journal, 156, 181
- (6) A Tendency Toward Alignment in Single-star Warm-Jupiter Systems
Malena Rice, Songhu Wang, Xian-Yu Wang et al. 2022, The Astronomical Journal, 164, 104
- (7) Revisiting the Full Sets of Orbital Parameters for the XO-3 System: No evidence for Temporal Variation of the Spin-Orbit Angle
Keduse Worku, Songhu Wang, Jennifer Burt, and 14 coauthors including **Xian-Yu Wang**, 2022, The Astronomical Journal, 163, 158
- (8) SOLES I: The Spin-Orbit Alignment of K2-140 b

- Malena Rice, Songhu Wang, Andrew W. Howard, and 8 coauthors including **Xian-Yu Wang**, 2021, *The Astronomical Journal*, 162, 182
- (9) The Aligned Orbit of the Eccentric Warm Jupiter K2-232b
Songhu Wang, Joshua N. Winn, Brett C. Addison, and 8 coauthors including **Xian-Yu Wang**, 2021, *The Astronomical Journal*, 162, 50
- (10) The Youngest Planet to Have a Spin-Orbit Alignment Measurement AU Mic b
Brett C. Addison, Jonathan Horner, Brett C. Addison, and 8 coauthors including **Xian-Yu Wang**, 2021, *The Astronomical Journal*, 162, 50
- (11) TOI 564 b and TOI 905 b: Grazing and Fully Transiting Hot Jupiters Discovered by TESS
Allen B. Davis, Songhu Wang, Matias Jones, and 54 coauthors including **Xian-Yu Wang**, 2020, *The Astronomical Journal*, 160, 229
- (12) HD 202772A b: A Transiting Hot Jupiter Around a Bright, Mildly Evolved Star in Discovered by *TESS*
Songhu Wang, Matias Jones, Avi Shporer, and 57 coauthors including **Xian-Yu Wang**, 2018, *The Astronomical Journal*, 157, 51

所作的学术报告：

- (1) 2021 年 12 月, 中国天文学会 2021 年学术年会, 会议报告, “凌星系外行星监测计划”
- (2) 2021 年 12 月, 中国天文学会 2021 年学术年会, 会议报告, “唯一已知的热木星和暖木星共存的系外行星系统 WASP-148 的 Rossiter-McLaughlin 效应”
- (3) 2022 年 2 月, 云南大学中国西南天文研究所, 午餐报告, “The Aligned Orbit of WASP-148 b”
- (4) 2022 年 8 月, Emerging Researchers in Exoplanet Science VII, 会议报告, “The Aligned Orbit of WASP-148b and the statistic implications from the distribution of stellar sky-projected obliquities”
- (5) 2022 年 9 月, 印第安纳大学伯明顿分校天文学院, 午餐报告, “Exoplanet characterization by photometry and spectroscopy”

- (6) 2022 年 9 月, 印第安纳大学伯明顿分校天文学院, 特殊讨论会, “Global fit of non-coplanar and strong-TTV multi-planet systems”

所主持的观测项目：

- (1) LCOGT-1m, Photometric Follow-Up of Apparent Decaying Orbital WASP-12 b, 2020A, 30 hours, PI
- (2) LCOGT-1m, Understanding the shortening period of WASP-12 system, 2021A, 30 hours, PI

参加的研究项目及获奖情况：

- (1) 2018-2019 学年 中国科学院大学 “三好学生”
- (2) 2018-2019 学年 中国科学院大学优秀共青团员
- (3) 2019-2020 学年 中国科学院大学优秀学生干部
- (4) 2020-2021 学年 中国科学院大学优秀学生标兵
- (5) 2021 年度 中国科学院大学博士研究生国际合作培养计划, 编号 2021-68
- (6) 2022-2023 学年 中国科学院国家奖学金

