

携手寻星

开启系外行星公众观测新时代

赵 刚



中国科学院国家天文台
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES, CAS

2025年7月31日



Somewhere, something incredible is waiting
to be known

——Carl Sagan 《Cosmos》

宇宙的某处，不可思议的事物正等待被发现

——卡尔·萨根 《宇宙》

星空，属于每一个人

- 系外行星的探索点燃了人类寻找“另一个家园”的希望，揭示了宇宙中存在无数新世界的可能
- 公众小型望远镜也能参与发现遥远行星的踪迹
- 每一位天文爱好者的观测数据，都可能成为解锁宇宙奥秘的关键，助力科学发现



内容提要

1

系外行星
研究简史

2

系外行星
研究现状

3

公众助力
系外行星
探索

4

公众观测
系外行星
扩展课题
简介

5

总结
与
展望

系外行星研究简史



“宇宙中有无穷无尽的世界，有些和我们类似，有些则完全不同……”

——伊壁鸠鲁 (341-270 BC)

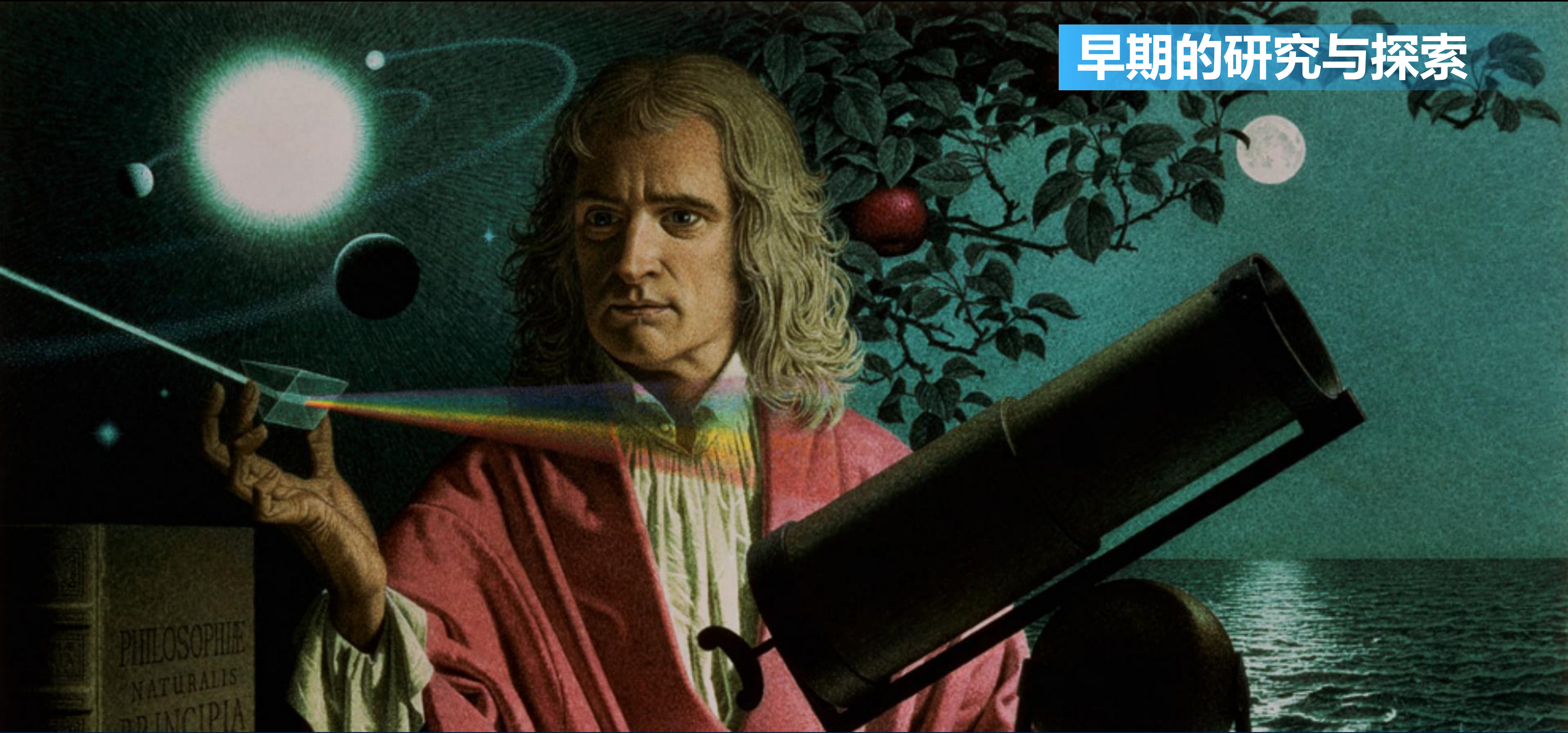




**"宇宙中有无数个太阳，也有无数个地球，
它们都围绕着自己的太阳旋转....."**

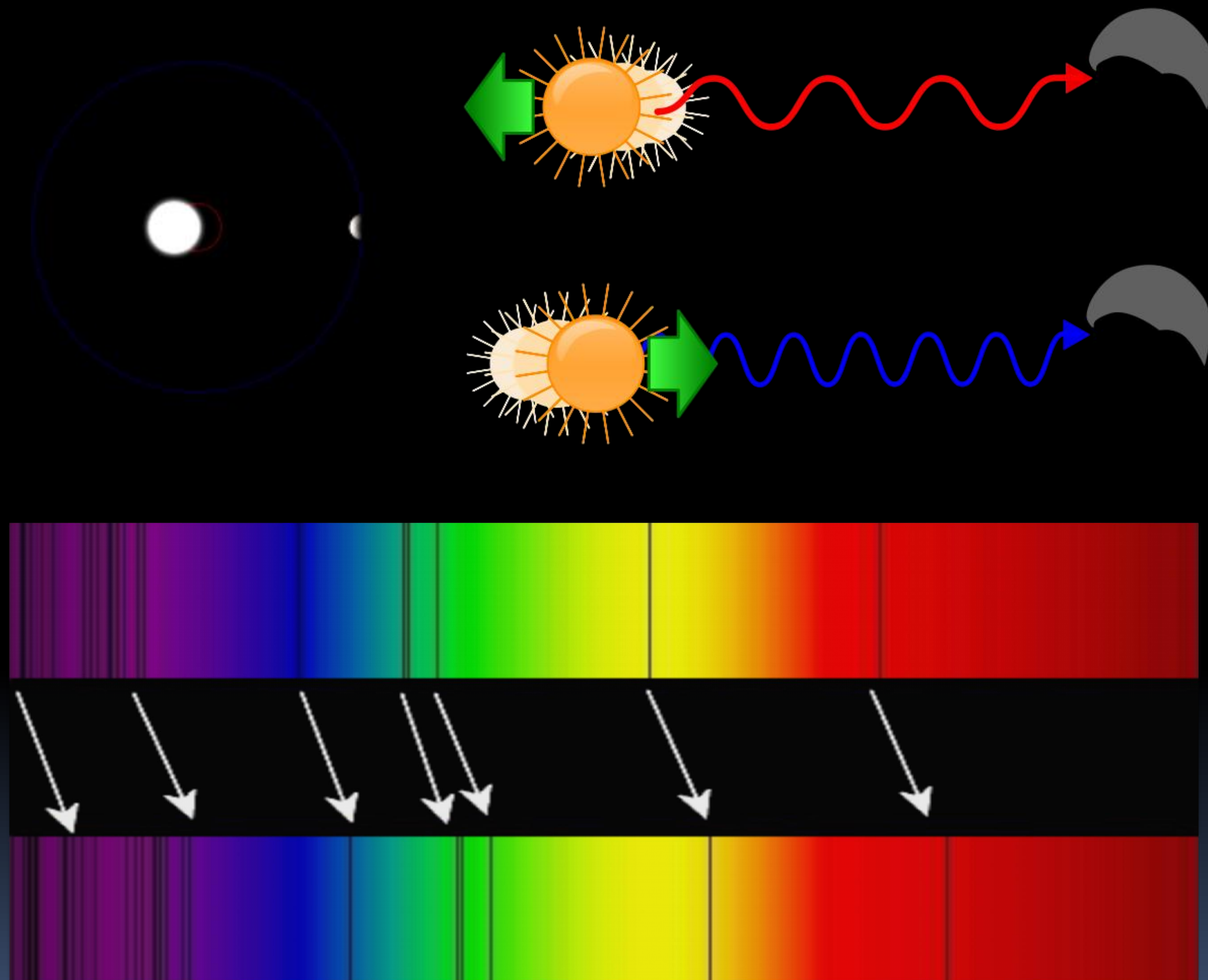
——布鲁诺 (1548-1600)

早期的研究与探索



17世纪，牛顿在《自然哲学的数学原理》中提出：恒星可能拥有类似太阳系的行星系统，奠定了系外行星的理论基础

系外行星的探测方法



恒星光谱



伊萨克·牛顿
1642-1727

早期的研究与探索

- 20世纪中期，奥托·斯特鲁维（Otto Struve）提出了系外行星探测理论，为后续发现提供了理论依据

- 他提出用视向速度法检测恒星的摆动，用凌星法捕捉亮度的下降，奠定了现代系外行星的探测基础



俄裔美国天文学家

Otto Struve

1897-1963

行星的定义

在2006年8月24日，国际天文学联合会(IAU)经过投票，通过了对行星定义的议案
太阳系内的天体要成为行星的资格，需要满足以下3个条件：

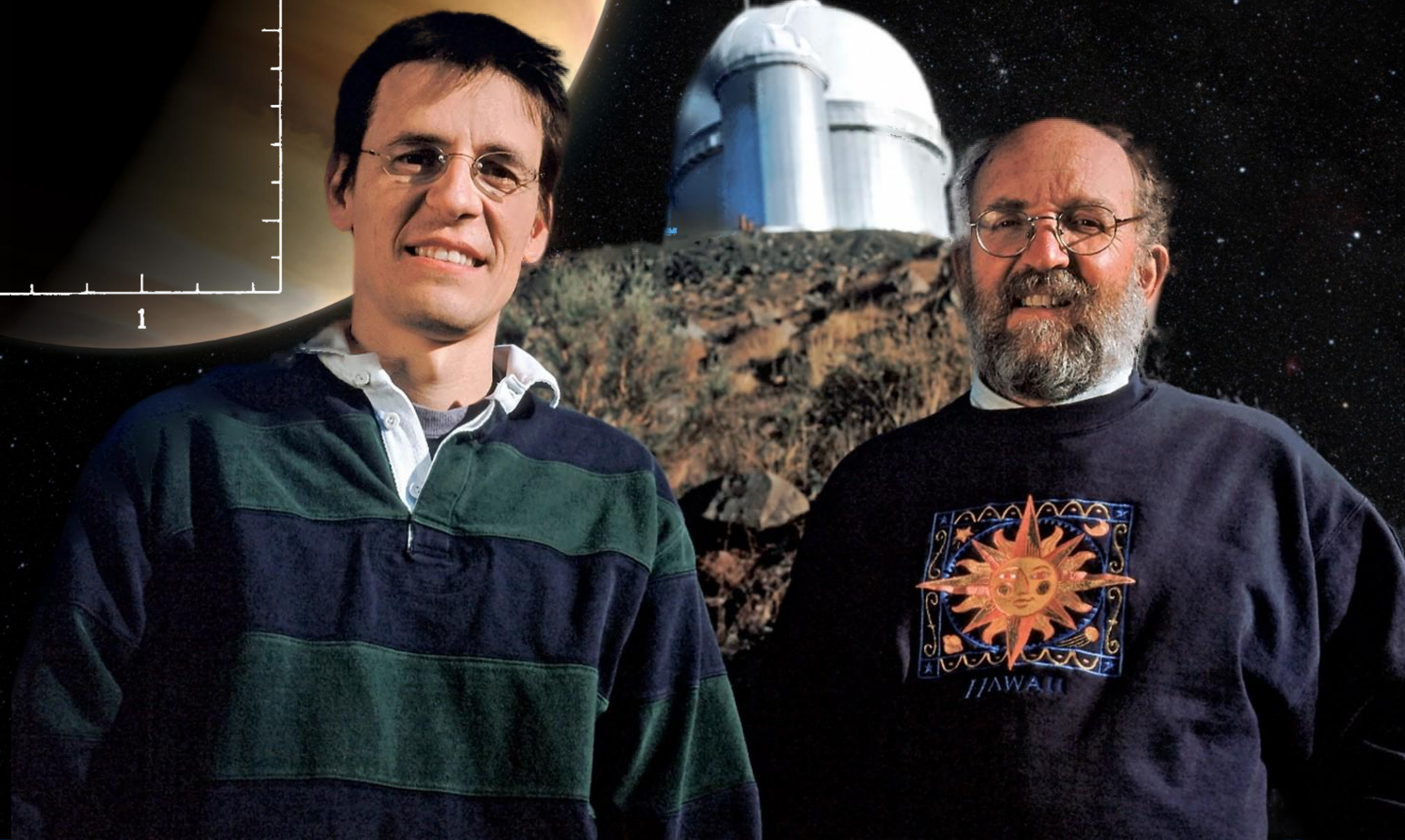
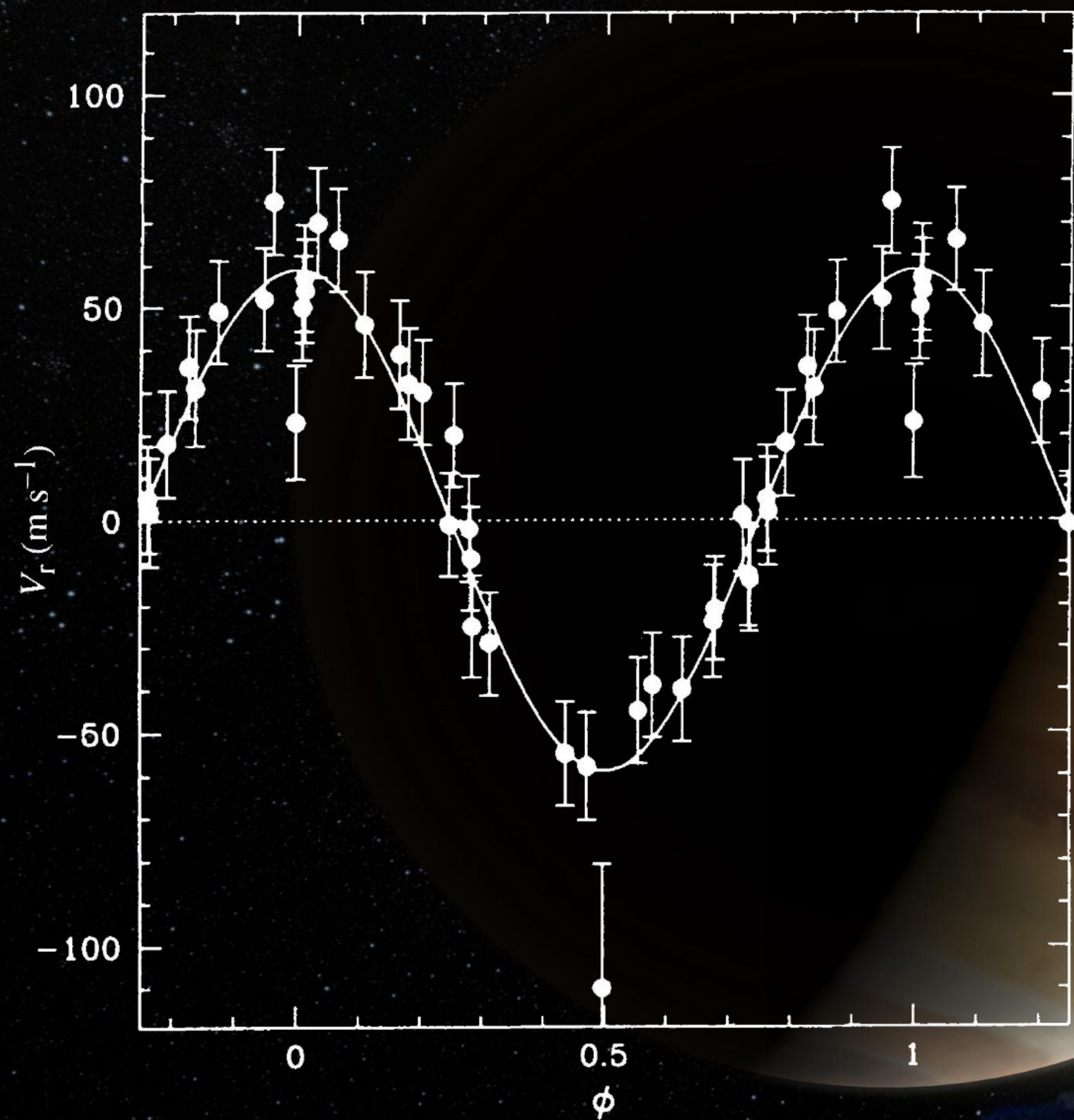
1. 轨道环绕太阳运动
2. 有足够的质量能维持流体静力平衡（接近球体的形状）
3. 能清除轨道附近的其它天体（只符合前两项的称为矮行星）

系外行星的定义

围绕太阳系以外的恒星或恒星级天体公转的行星

首批发现与技术突破

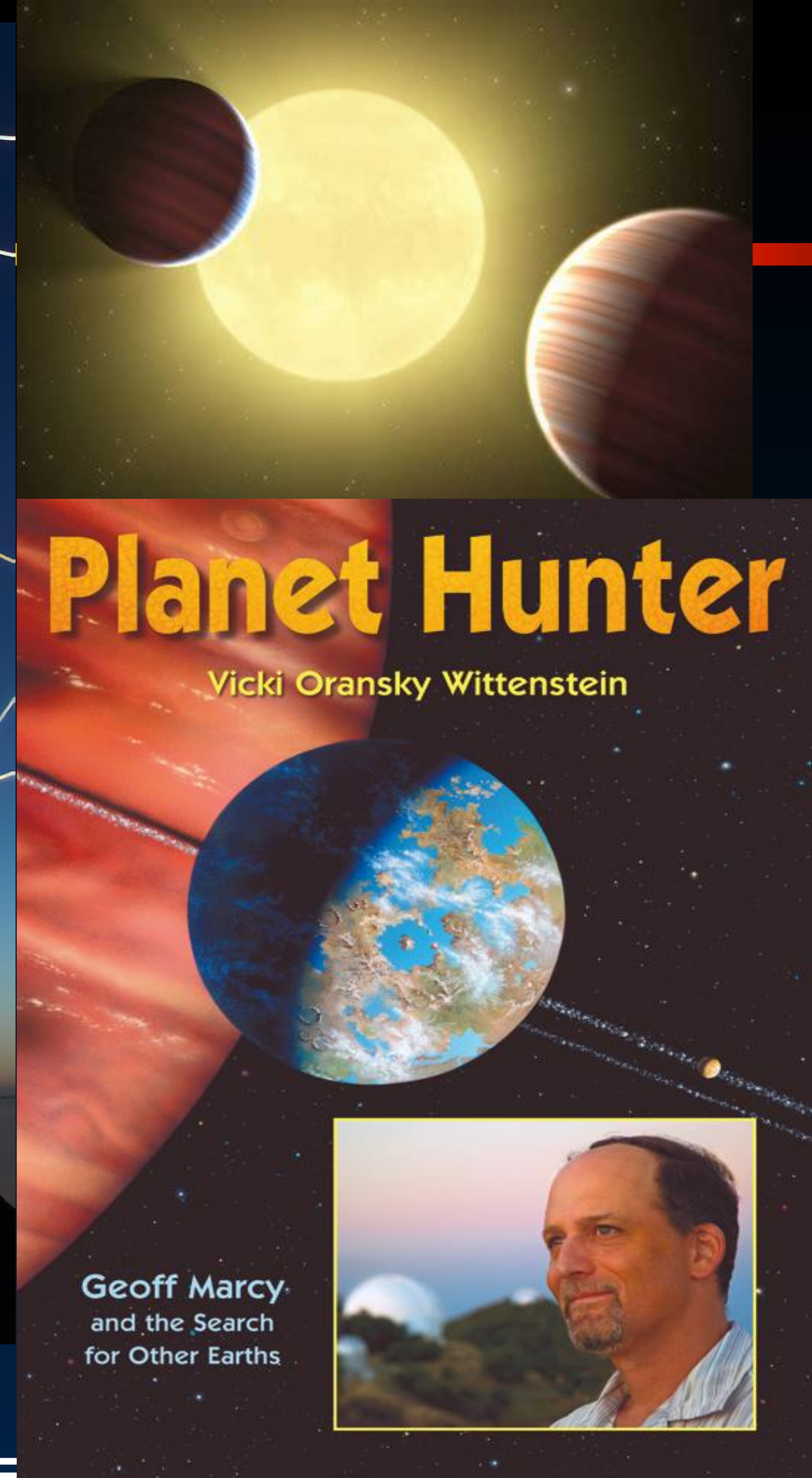
- 1995年, 51 Pegasi b (热木星) 成为首颗围绕类太阳恒星的确认系外行星, 视向速度法引领发现热潮
- 1999年, 凌星法首次用于HD 209458 b, 确认其行星性质, 开启了大规模凌星观测时代

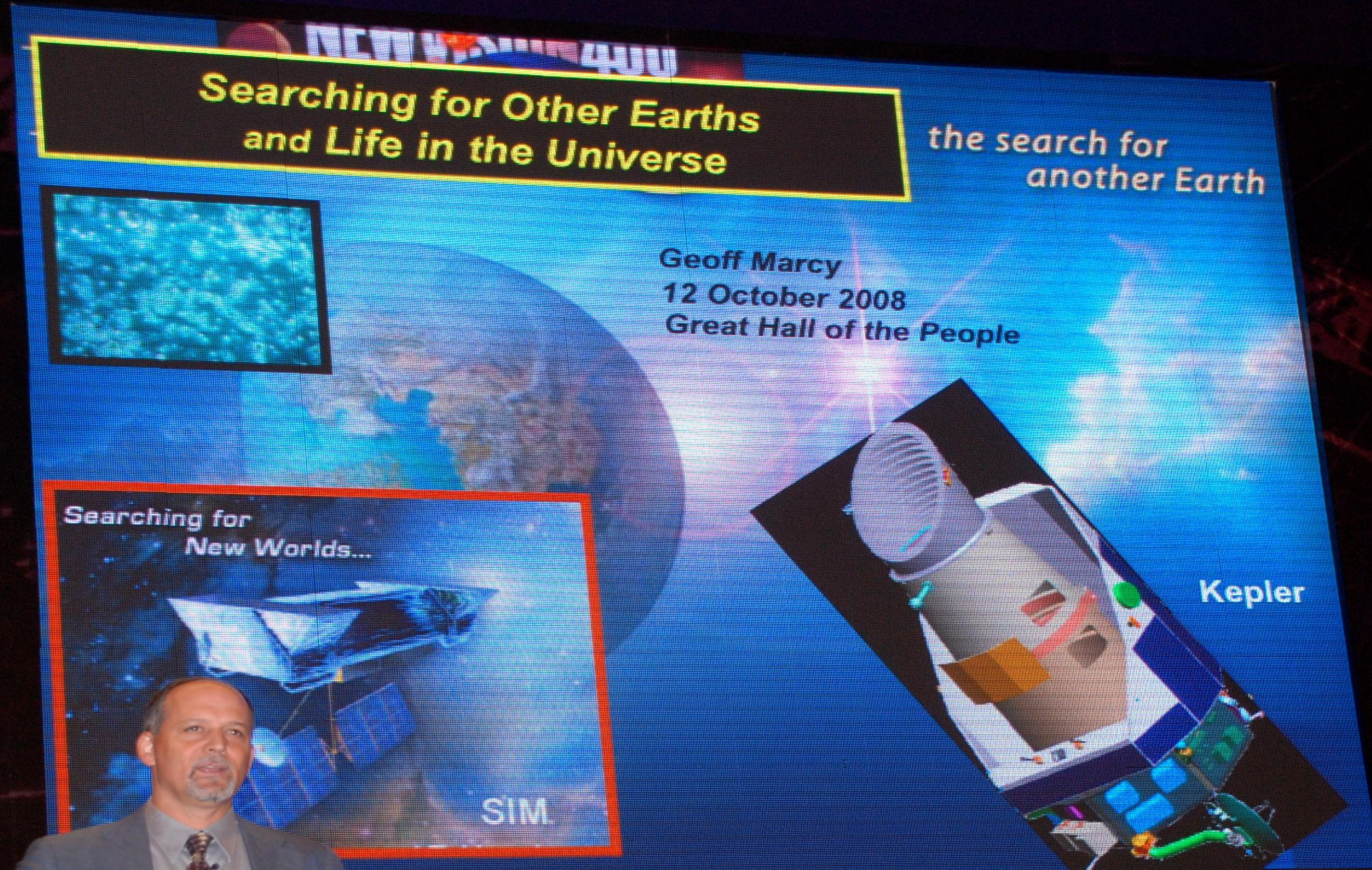


首批发现与技术突破



- 杰弗里·马西 (Geoffrey Marcy) 作为先驱者也参与证认与核实了飞马座51 b
- 他们领导团队发现了前 100 颗系外行星中的 70 颗 (如室女座 70 b 等), 被誉为行星猎手
- 2005 年, 杰弗里·马西获得有着“东方诺贝尔奖”之称的邵逸夫奖, 以表彰其开创性贡献





2008年10月12日，Geoffrey Marcy 受邀在人民大会堂
为首都6000多大学生做“新视野400”科学大师报告

■ 2010年后，Kepler 和 TESS 等空间望远镜陆续发射，开启了系外行星大规模普查的时代

■ 空间望远镜的数据揭示了系外行星的多样性和普遍性，推动了系外行星研究的飞速发展



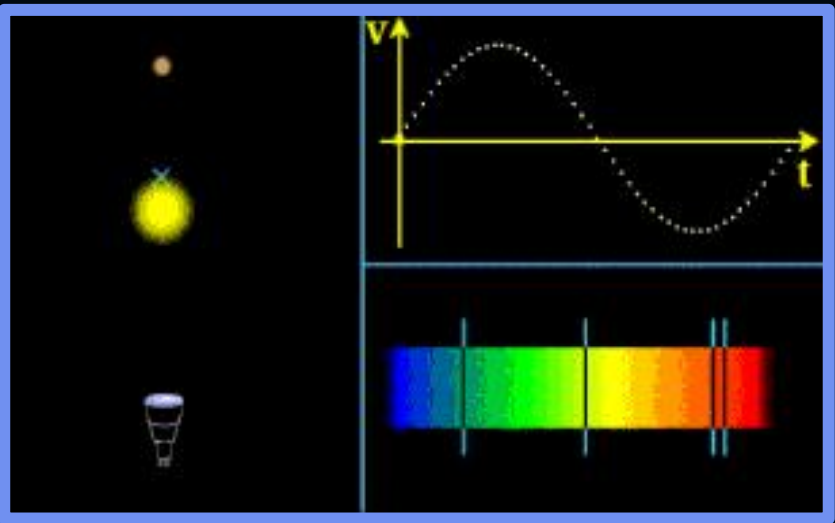
系外行星研究现状



系外行星探测方法

主要探测方法

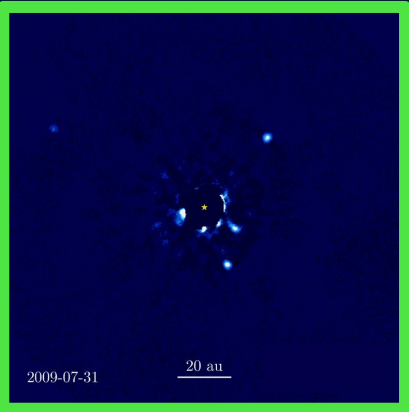
视向速度法 (1128 颗)



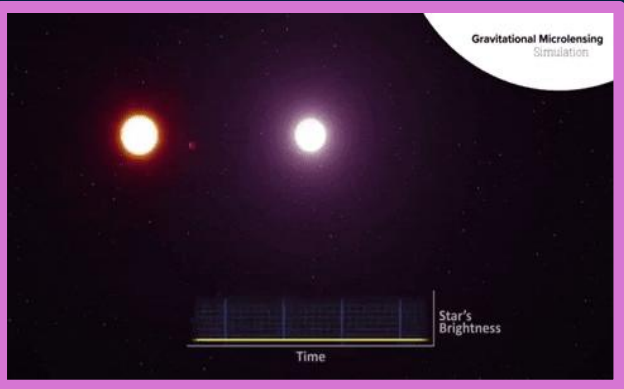
凌星法 (4395 颗)



直接成像 (83 颗)

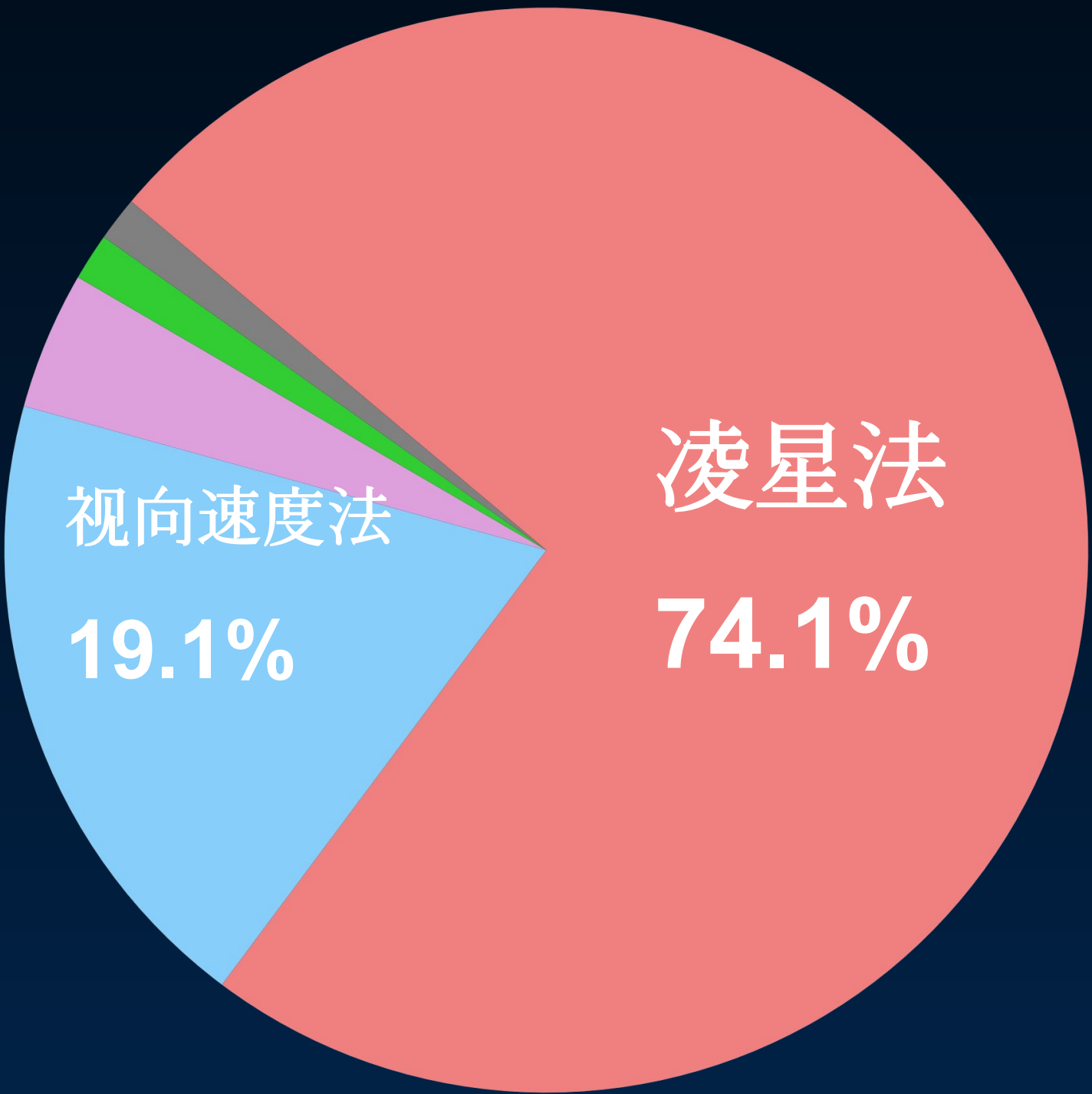


微引力透镜 (247 颗)



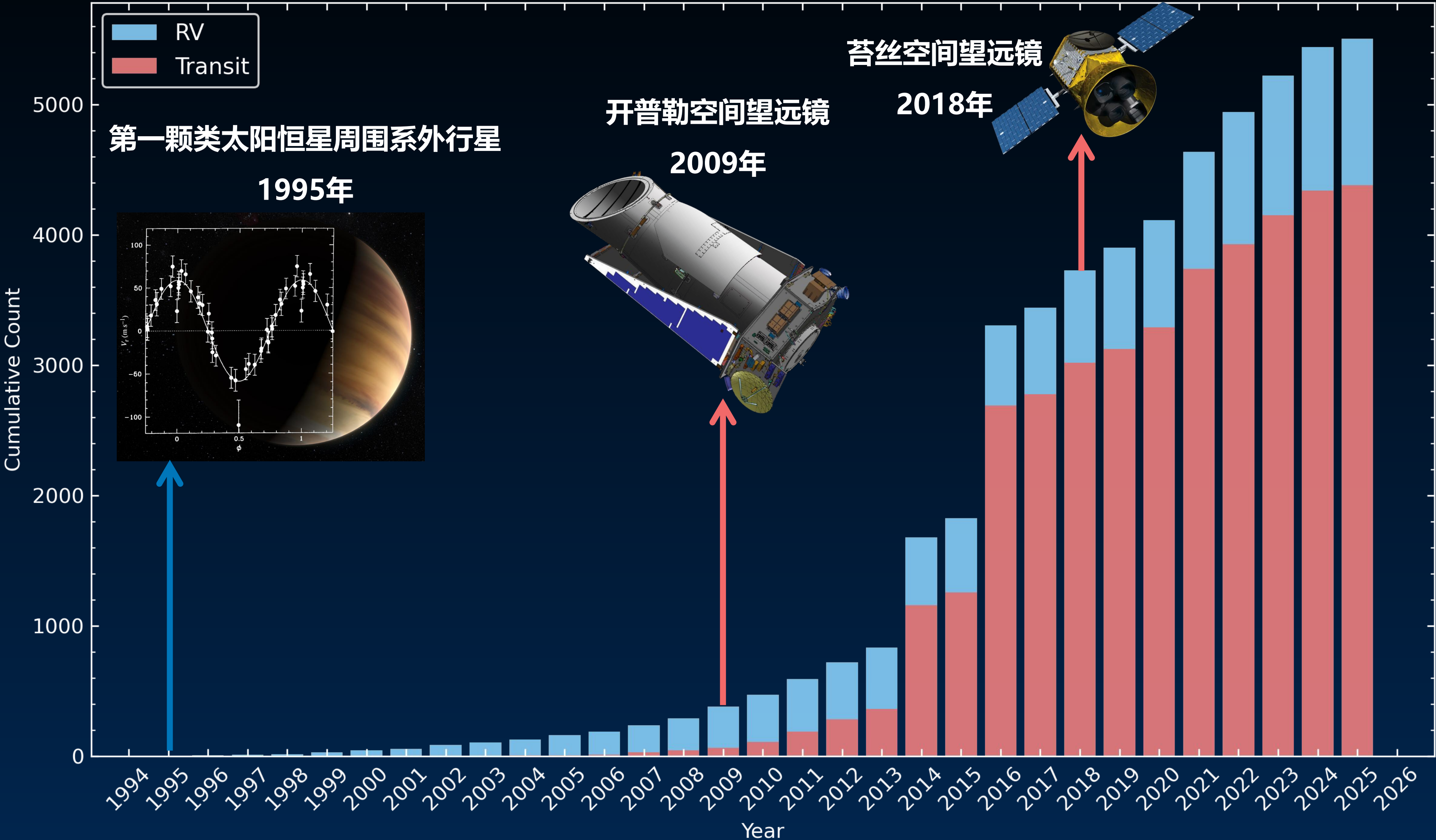
其他方法 (80颗)

总数: 5933颗



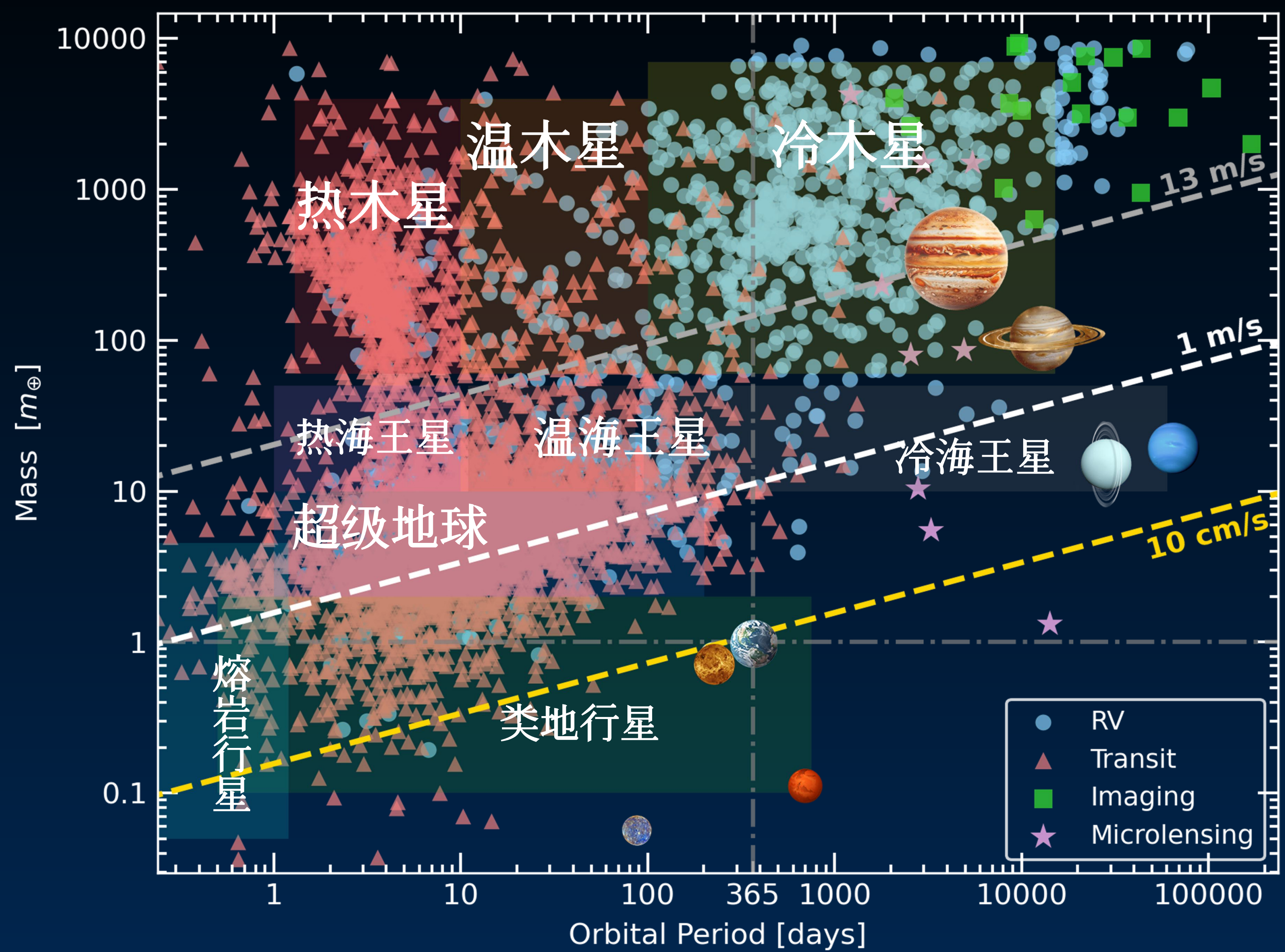
(数据统计截止至2025年7月)

系外行星的发展趋势

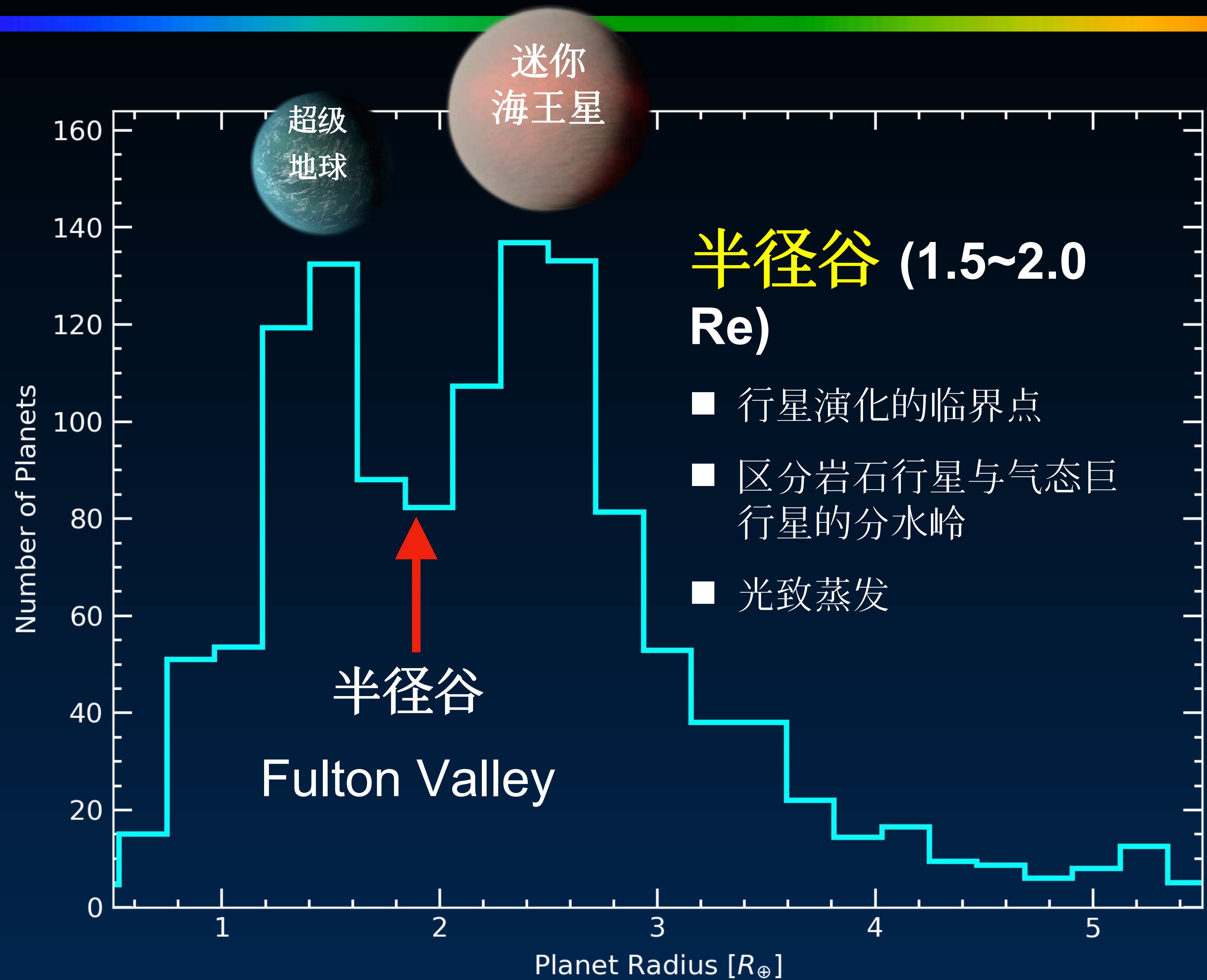


系外行星的分布与统计特征

- 银河系中的恒星平均每颗至少拥有1颗以上的行星 (约为1.6)
- 类太阳恒星中，约30%拥有超级地球或亚海王星类型种群



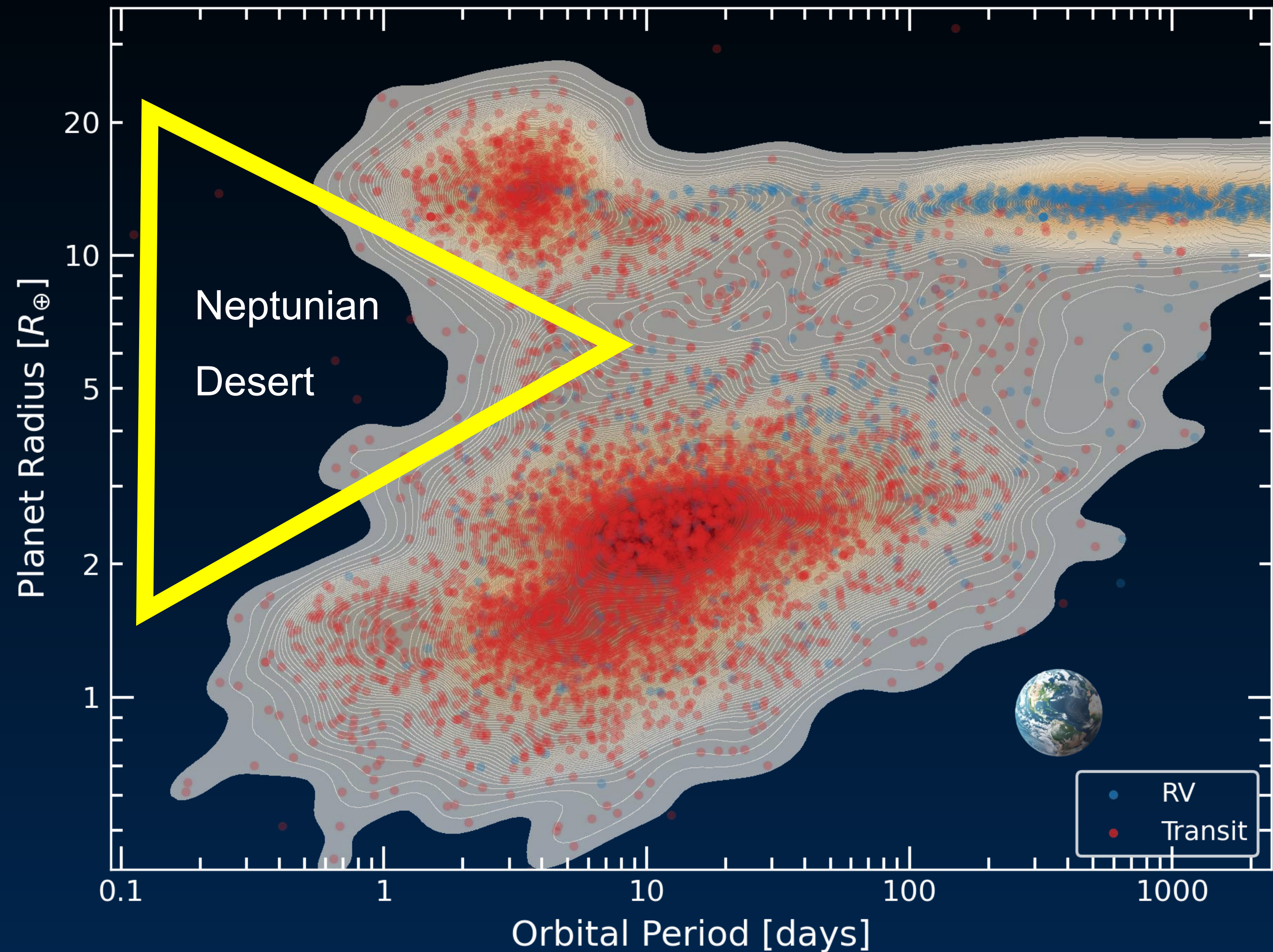
系外行星的性质与演化规律



系外行星的性质与演化规律

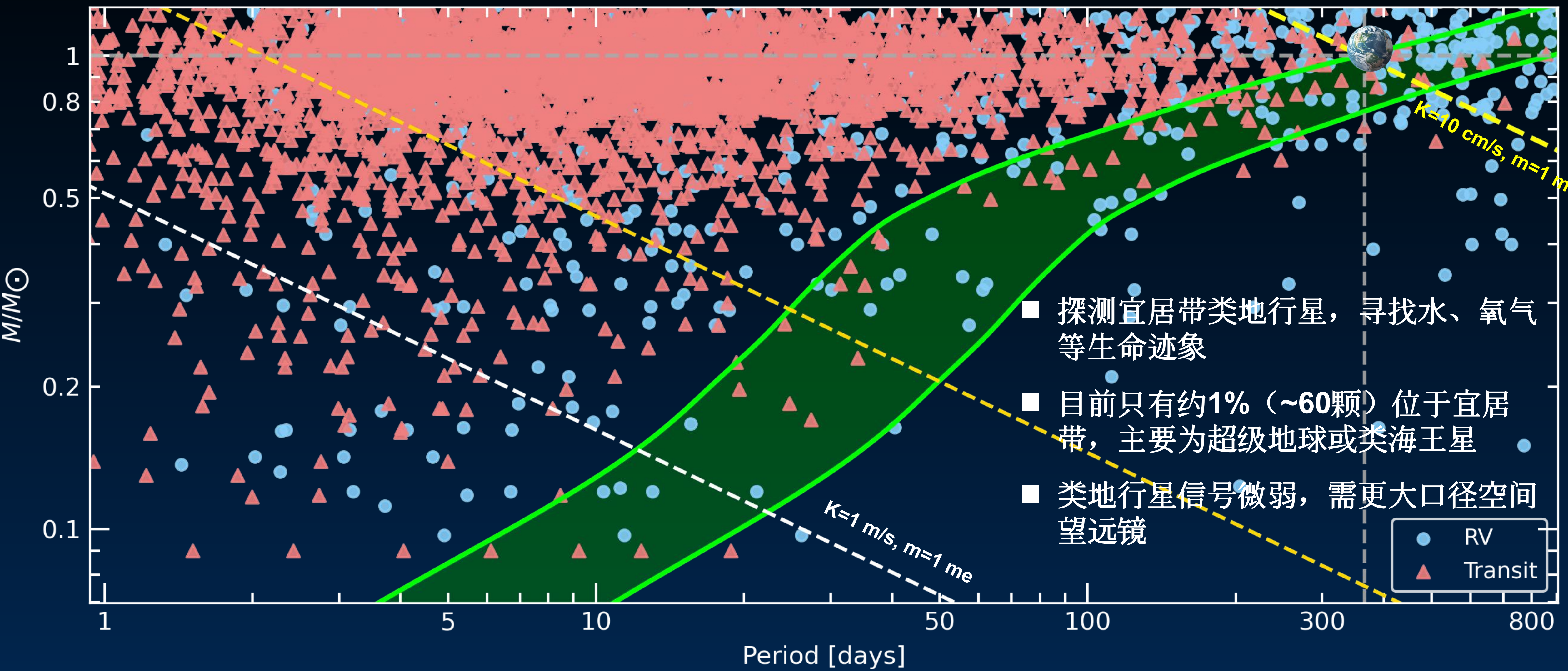
海王星沙漠

- 高偏心率迁移
- 潮汐瓦解
- “沙漠幸存者”是挑战现有理论的活化石



系外行星研究的前沿与挑战

宜居带： 恒星周围具有液态水存在条件的轨道范围



公众助力系外行星探索



公众搜寻系外行星的优势（一）

人数众多、地域覆盖广阔

- 业余天文爱好者分布在全球各地
- 处于不同的时区和天气条件下
- 能够提供多时区、长期持续的“接力”观测

公众搜寻系外行星的优势（二）

响应速度快

- 业余天文爱好者的观测无需提前申请和排期等候
- 能够实时响应突发事件（如临时发布的新凌星预报或异常光变）



公众搜寻系外行星的优势（三）

持久性与稳定性强

- 爱好者可长年持续追踪某一目标，积累光变数据
- 对研究长周期现象（如TTV、凌星时间漂移、轨道倾角变化）更为有利

公众搜寻系外行星的优势（四）

经济成本低、维护灵活

- 无需动用昂贵的大型望远镜资源，即可进行大批量筛选或验证任务
- 运行成本低、易于维护



公众搜寻系外行星的优势（五）

扬长避短：与专业研究形成互补

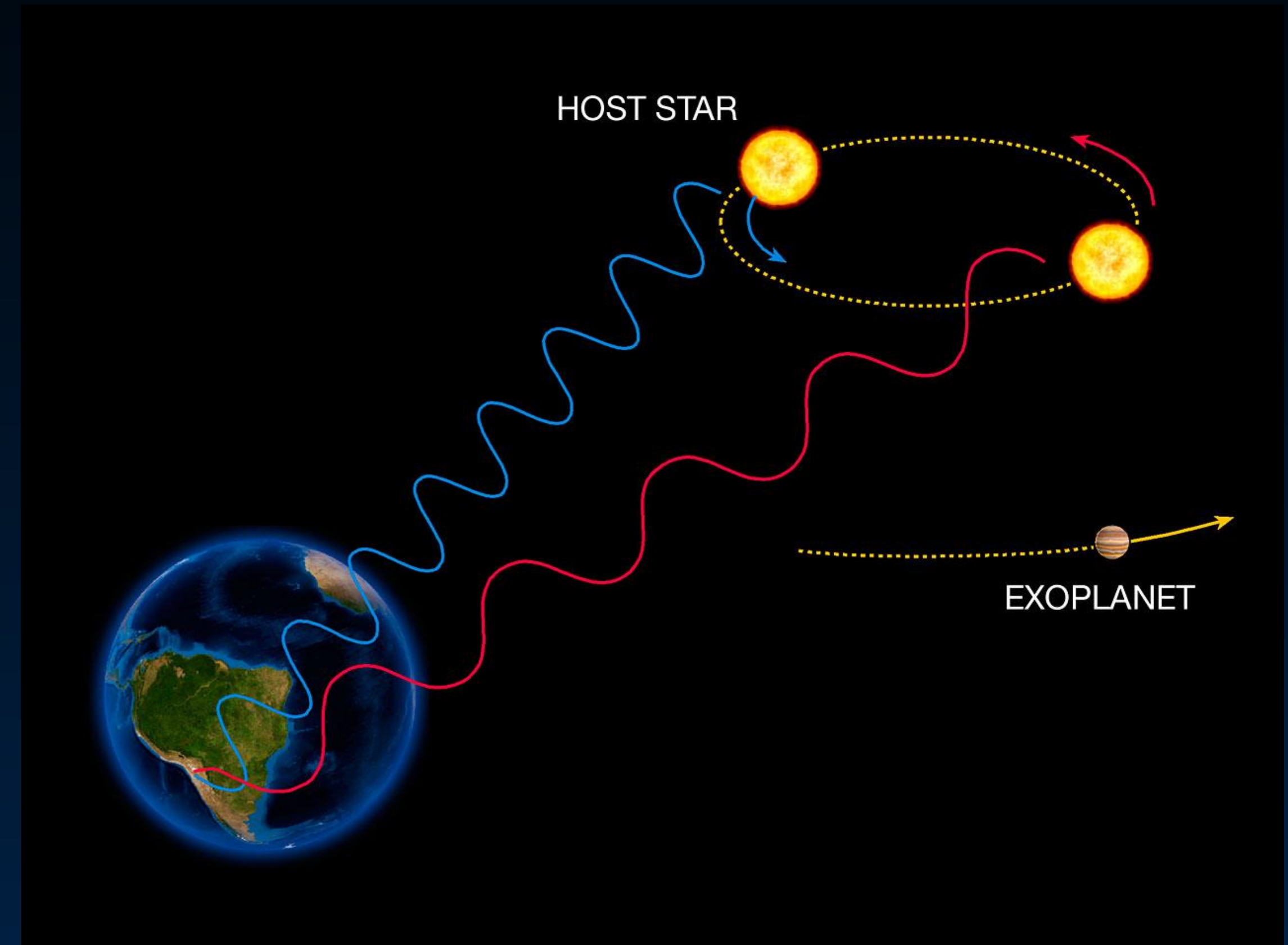
- 大型的专业望远镜观测时间稀缺，主要用于“高价值目标”
- 爱好者业余观测可以有效弥补专业望远镜的时间和覆盖天区，助力构建更完备的系外行星数据库



公众搜寻系外行星的方法（一）

视向速度法——不适合业余观测

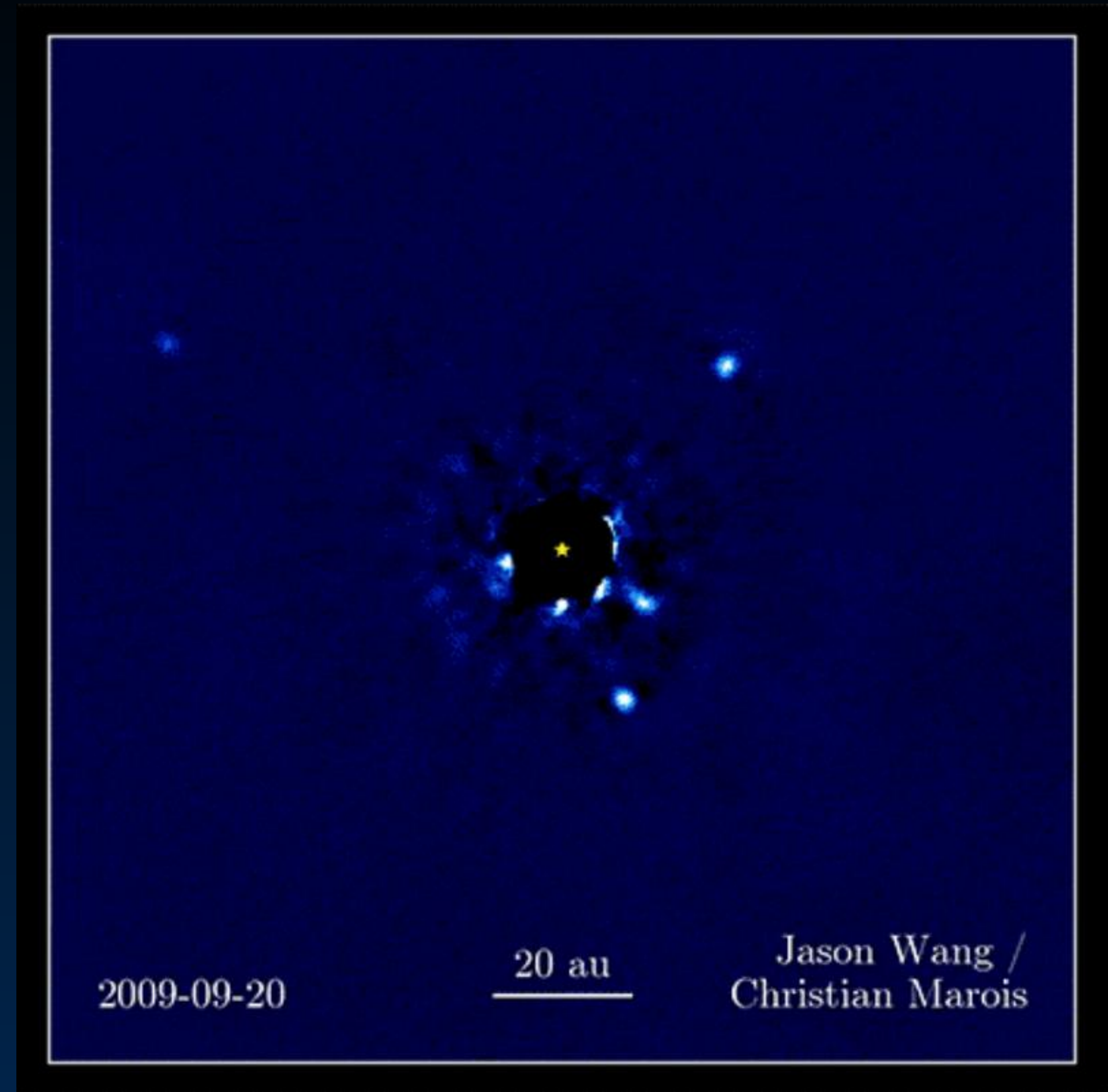
- 视向速度法（RV）通过恒星光谱的多普勒位移检测行星引发的摆动，需高精度光谱仪
- 设备门槛高、成本高：需1-2米级望远镜和分辨率 $> 50,000$ 的光谱仪
- 数据复杂：光谱分析需专业软件和专业知识储备，业余爱好者难以操作



公众搜寻系外行星的方法（二）

直接成像法——不适合业余观测

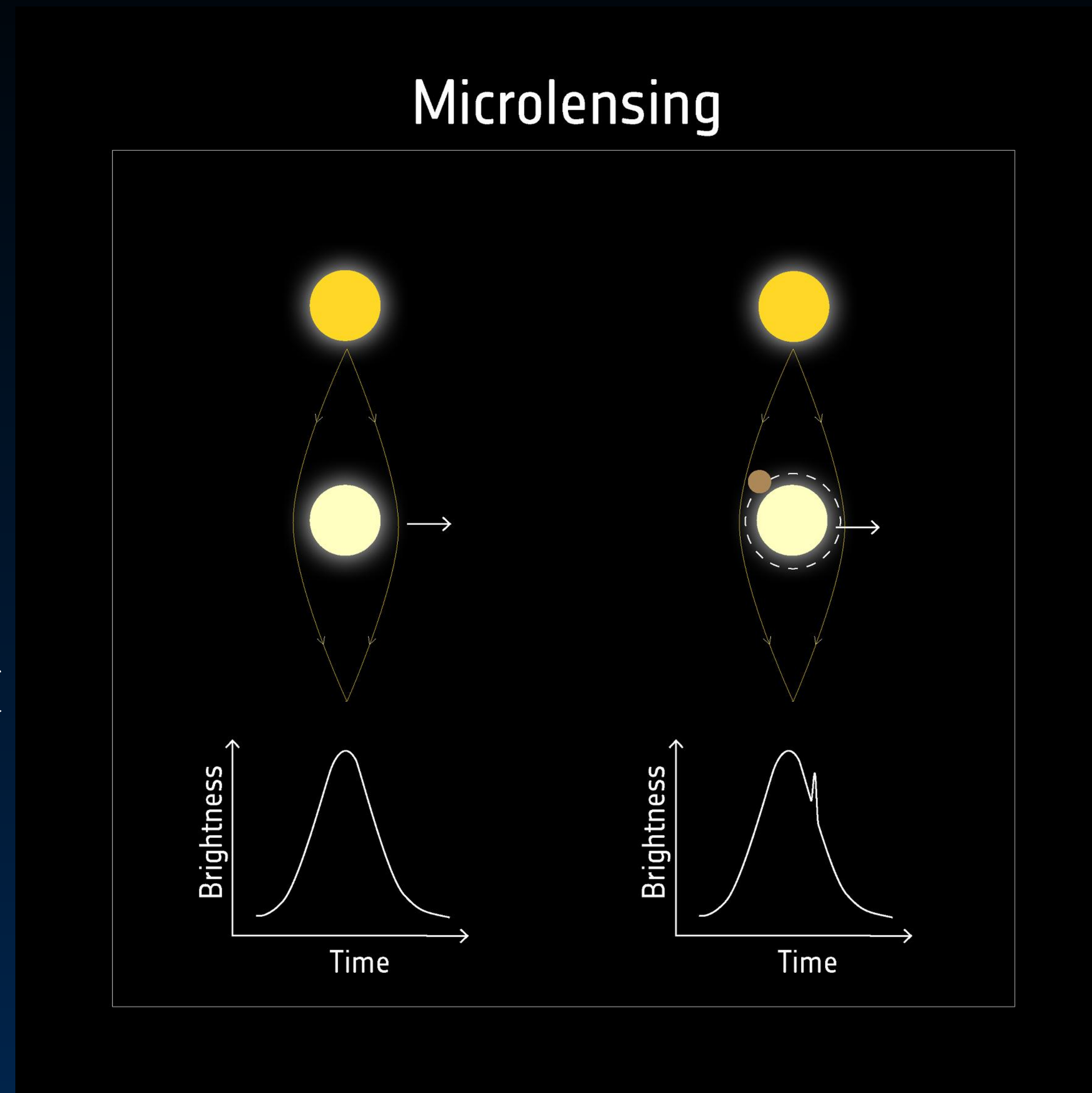
- 直接成像法通过捕捉行星反射光或热辐射成像，需要大口径（通常为8-10米）望远镜或空间望远镜 + 自适应光学
- 技术要求极高：需要复杂的大气校正技术，甚至红外探测器，设备成本极高
- 行星信号微弱：仅适用于远离恒星的大行星，成像需极高分辨率和其他条件



公众搜寻系外行星的方法 (三)

微引力透镜法——不适合业余观测

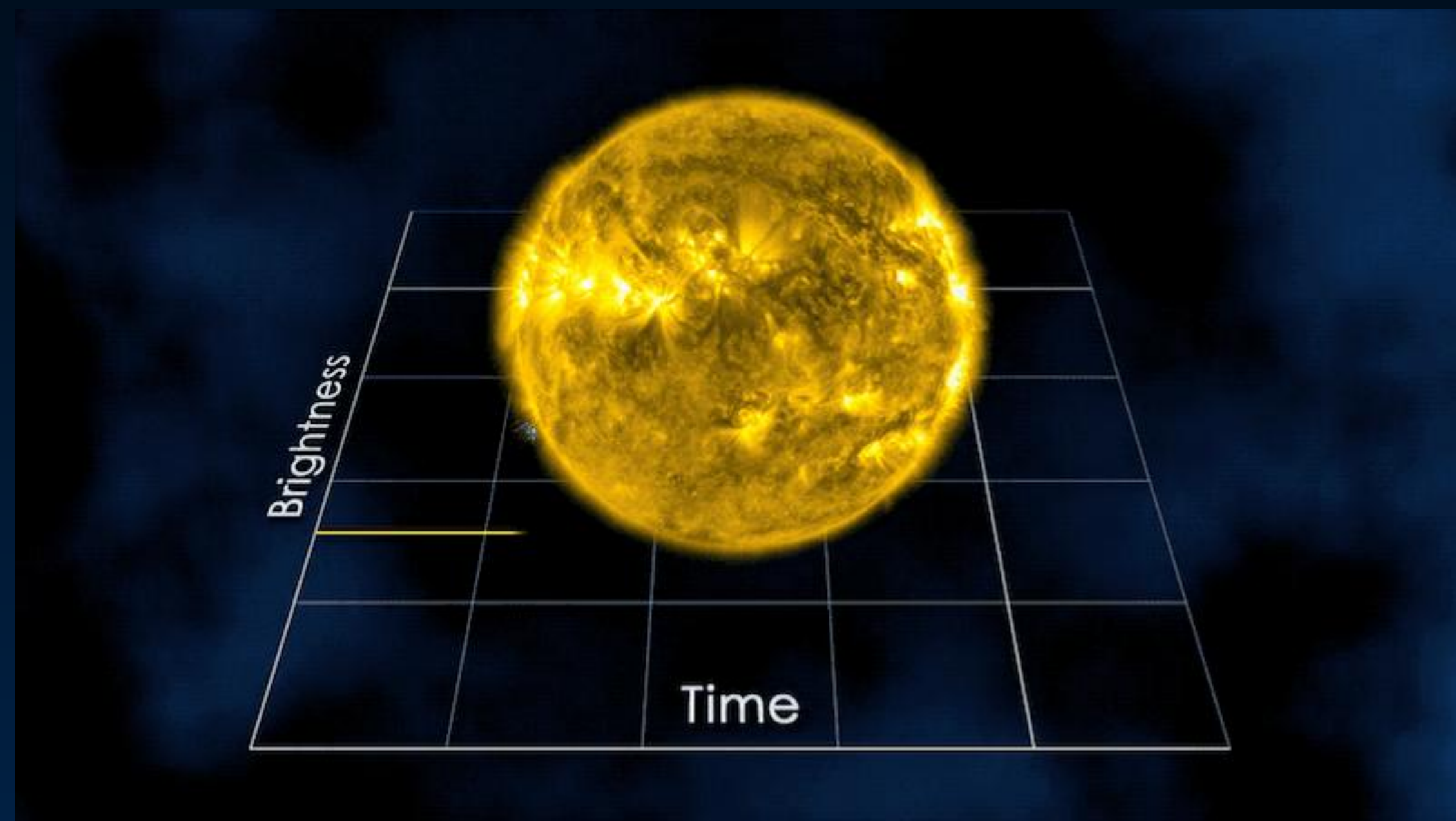
- 微引力透镜法利用行星引力弯曲背景星光，需连续监测大量恒星样本
- 设备需求高：需1-2米级望远镜和广视场相机，数据处理依赖大型计算机
- 观测窗口短暂：透镜事件仅持续数小时至数天，需全球望远镜网络同步协作



公众搜寻系外行星的方法（四）

凌星法——适合业余天文观测

- 凌星法通过捕捉恒星亮度下降（约1%）发现系外行星，适合100-200毫米小型望远镜
- 设备要求低：业余CCD相机或DSLR相机即可记录光变曲线，测光精度达1-2 mmag
- 数据直观：光变曲线周期性的“谷底”直接反映行星存在，易于分析和验证



公众搜寻系外行星的仪器需求（一）：望远镜

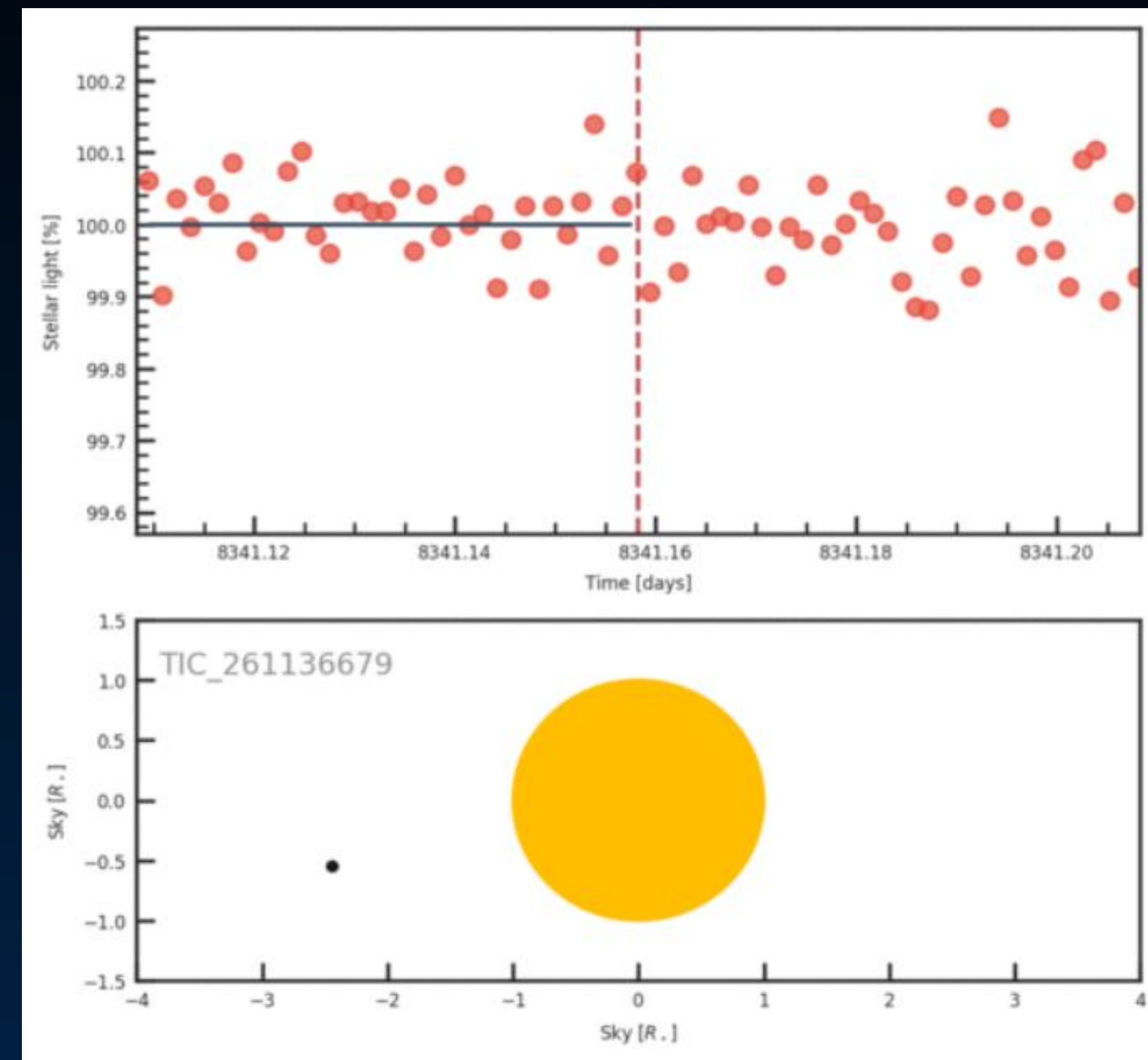
口径	适用范围	价格(元)	代表品牌型号及价格
100mm	可观测较亮的恒星， 适合初学者进行凌 星光变曲线观测	< 5000	星特朗Celestron Inspire 100AZ (~3500) 振旺Seestar S30智能天文望远镜 (~2499) Vixen A80Mf (~4800)
200mm	适合12至14等恒星， 适用于验证TESS 候选体和中级观测	5000 ~ 20000	星特朗Celestron NexStar 8SE (~11,000) Sky-Watcher 200PDS (~9,500) Vixen VMC200L (~15,000)
400mm 及以上	观测更暗的恒星， 适合高级爱好者和 准专业级凌星研究	> 20000	星特朗Celestron CGX-L 1400HD (~80,000) PlaneWave CDK17 (~160,000) 星特朗Celestron EdgeHD 11 (~30,000)

公众搜寻系外行星的仪器需求（二）：其他设备

设备类型	功能描述	技术规格	型号示例	价格（元）
CCD相机	捕捉高精度光度数据，记录恒星亮度变化	像素尺寸：2-5μm 量子效率：>80% @ 400-700nm 制冷至-20℃以下 降低暗噪声	振旺ZWO ASI294MC Pro	6000~8000
			Atik 414EX	8000~10000
			QHYCCD QHY268M	15000~18000
滤光片	400-700纳米宽带滤光片，优化可见光范围测光，减少背景噪声	波长范围：400-700nm 透射率：>90% 带宽：300nm 标准接口	Baader Planetary UHC-S	600~1200
			Astronomik L-2	700~1300
			Optolong L-Pro	800~1500
精确计时软件	确保时间戳准确，同步观测数据至毫秒级，支持凌星时间分析	时间同步精度：<1ms 支持NTP协议 兼容Windows/Linux	Dimension 4: <10ms精度 Chrony: <1ms精度，Linux优化 NTPA: <5ms精度，跨平台	免费

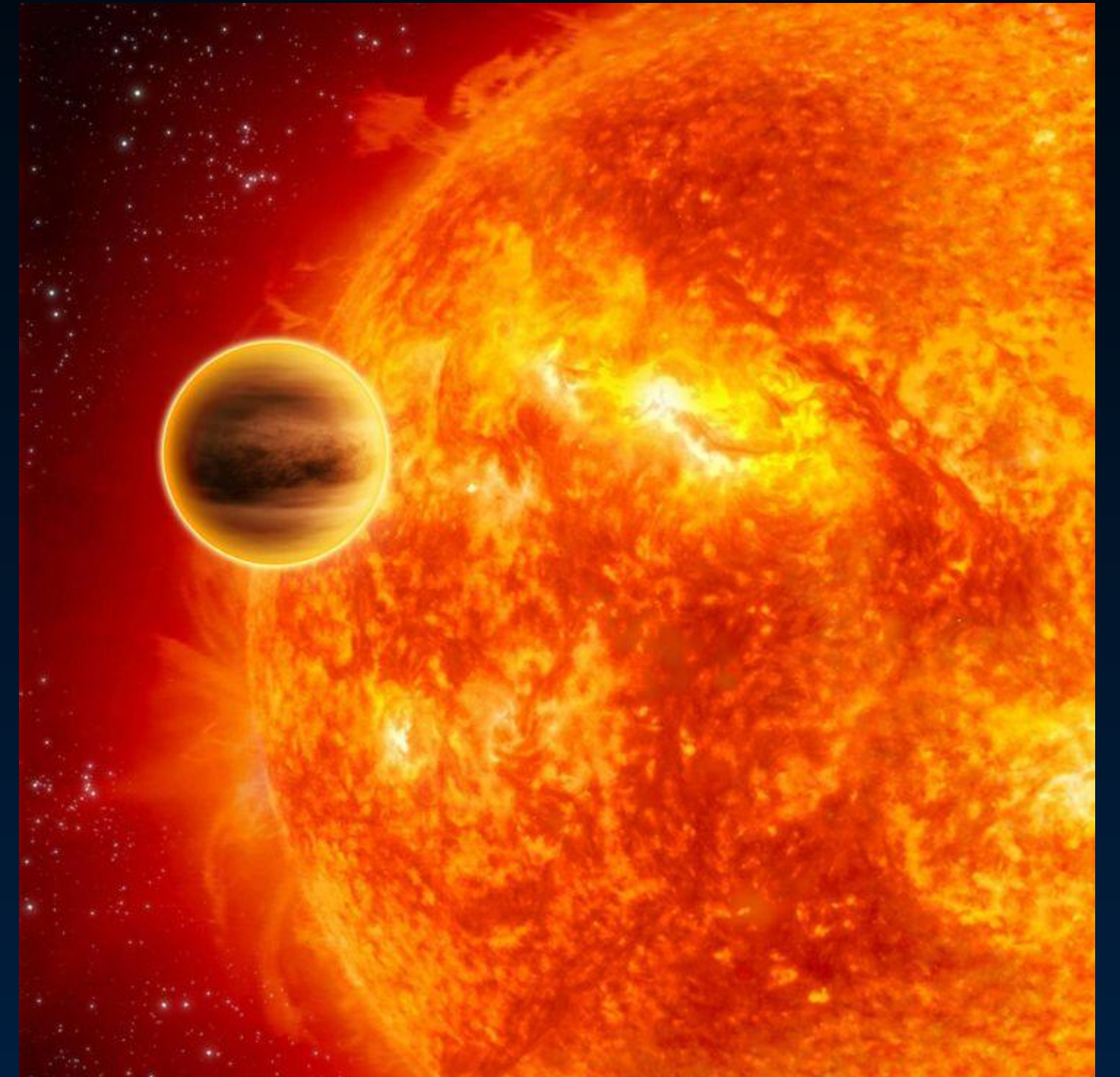
公众搜寻系外行星的发现效率（一）

- 热木星：出现率约1%，凌星概率约10%，综合概率约：0.1%
- 类地行星：出现率约37-60%，凌星概率约0.5%，综合概率约：0.19-0.3%
- 平均观测约**1000**颗恒星可发现一颗热木星凌星
(平均单幅曝光时长：30-120秒每幅，可多幅叠加获得更高信噪比)

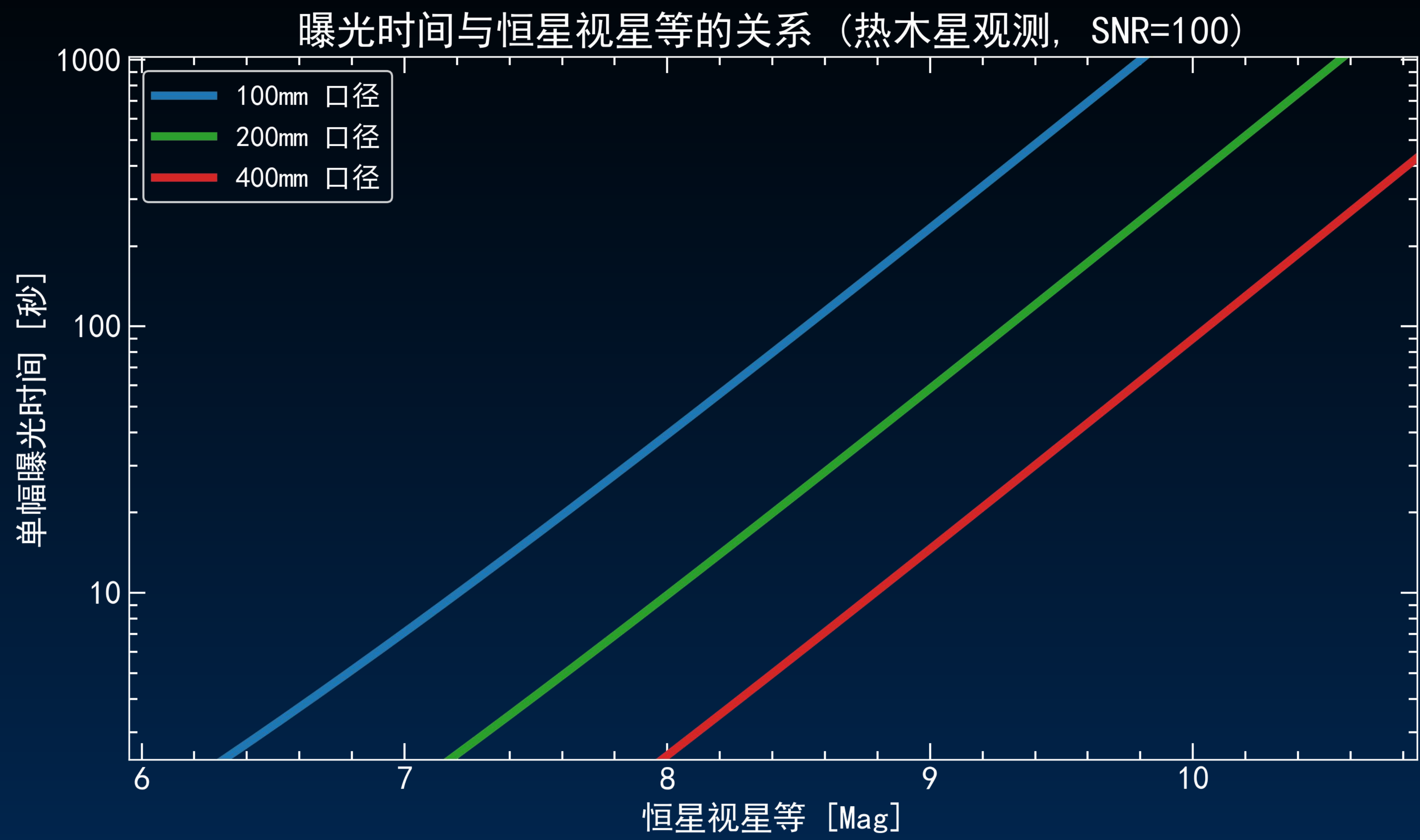


公众搜寻系外行星的发现效率 (二)

- 热木星掩食深度较大，对测光精度要求低，对设备要求低，业余爱好者用中小型望远镜即可探测
- 热木星周期较短，便于快速验证和多次重复监测
- 类地行星掩食深度小，对测光精度要求高，业余爱好者级别的设备几乎无法探测



公众搜寻系外行星的发现效率 (三)



公众搜寻系外行星的软件需求与数据处理（一）

相关软件介绍

EXOTIC

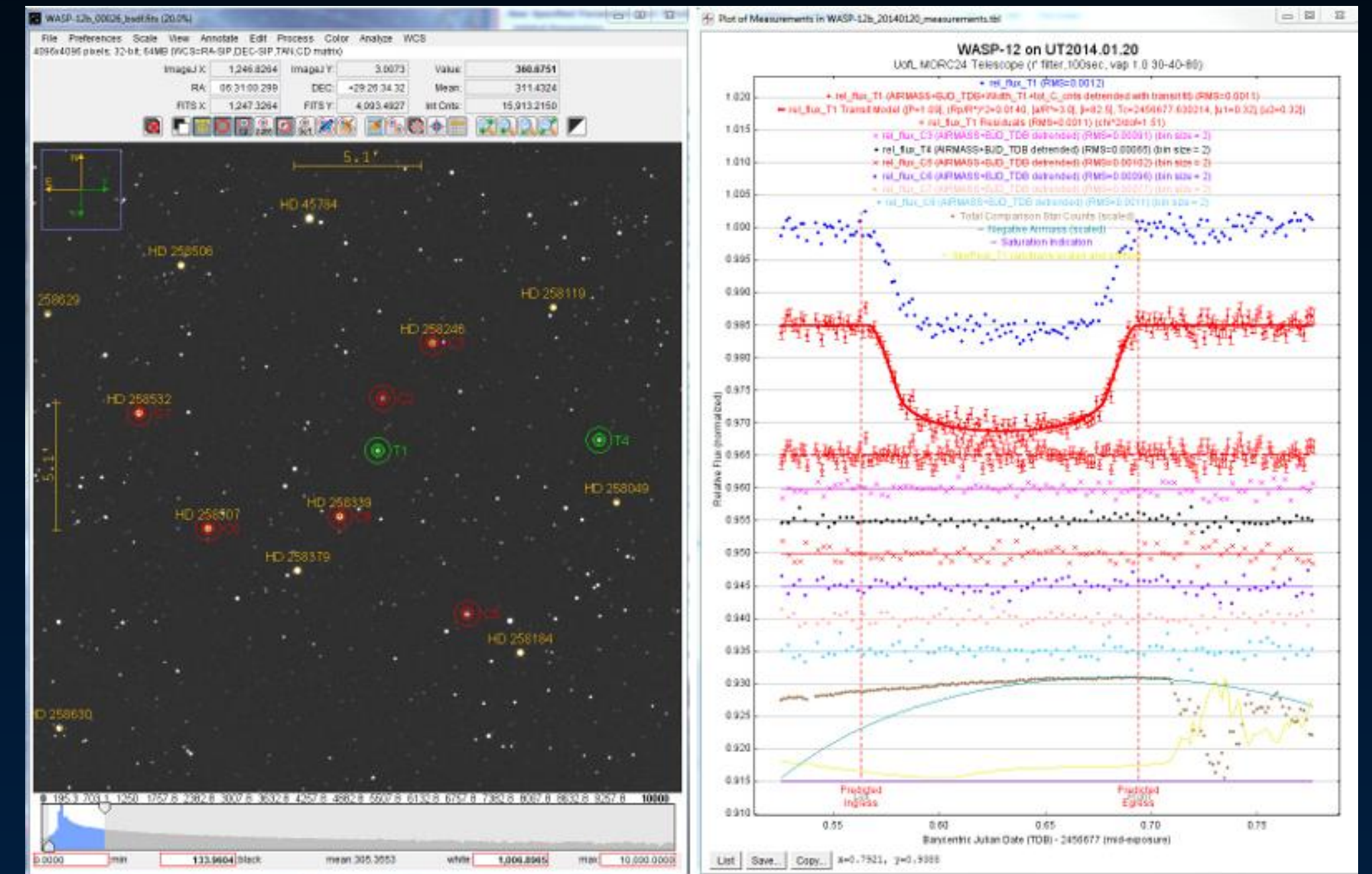
- NASA Exoplanet Watch的官方工具，适合初学者
- 功能：处理原始FITS图像，生成光变曲线，测量凌星深度和时间
- 优点：免费，易于使用，适合业余爱好者



公众搜寻系外行星的软件需求与数据处理 (二)

AstrolmageJ

- 高级工具，支持精确时间校正和去趋势
- 功能：支持时间序列光度测量，支持拟合与建模
- 优点：适合精确分析，广泛应用于公众科学



公众搜寻系外行星的软件需求与数据处理（三）

相关软件简介与对比

软件名称	主要功能	适用人群
EXOTIC	数据校准（去噪、平场），提取光变曲线，适合100mm口径望远镜	业余天文爱好者
AstroImageJ	时间序列测光，绘制光变曲线，适合分析热木星，支持 FITS 格式	业余天文爱好者
lightcurve	可用于处理 Kepler/TESS 数据，绘制光变曲线，分析 TTV，开源	业余与专业用户
ExoCTK	观测规划，凌星光变曲线拟合，优化 JWST/TESS 候选体	业余与专业用户
PandExo	模拟 JWST凌星观测，分析大气光谱（H2O, CO2），支持 TESS 数据	业余与专业用户
batman	快速计算凌星光变曲线，模拟行星参数，高精度建模	专业天文学家
PyTransit	高性能凌星建模，分析复杂系统（如TTV, RM效应），需编程基础	专业天文学家



从
业
余
到
专
业

公众助力系外行星的工作模式（一）

模式一：学习与交流，上传原始数据

- 业余天文学爱好者仅持有望远镜，对观测与数据处理都不熟悉的情况
- 专业天文学家提供指导与交流，帮助掌握基本的观测和数据处理技能
- 经过培训和学习后，业余天文学家可逐步开展观测并上传原始数据

■ 优点：

门槛低，适合初学者或设备有限的业余天文爱好者

激发兴趣，促进大众参与

■ 缺点：

原始数据质量可能参差不齐，需专业团队筛选和处理

公众助力系外行星的工作模式（二）

模式二：无需望远镜，在线参与数据分析

- 业余天文爱好者没有望远镜，但具备基础天文知识并掌握编程技能
- 可参与数据库网站释放的数据在线分析活动
- 利用浏览器即可分析光变曲线，参与科研过程
- 优点：
 - 没有硬件门槛，参与便捷，反馈迅速
 - 有效扩充了数据量并弥补了专业处理流程遗漏的信号
- 缺点：
 - 有门槛：需要爱好者具备一定的编程技能

公众助力系外行星的工作模式（三）

模式三：独立观测，联合分析

- 已具备独立观测能力的爱好者，可开展自主观测与数据上传工作
- 业余天文爱好者可与专业天文学家合作，共同制定观测计划、收集数据并分析结果
- 如果数据对相关研究结果有贡献，业余爱好者可被列为论文共同作者
- 优点：
爱好者逐步参与科学研究，增加署名机会
- 缺点：
需要较多的协调时间和沟通成本

公众助力系外行星的工作模式（四）

模式四：自主观测与独立数据处理

- 具备较好基础的业余天文学爱好者开展自主观测，独立运用EXOTIC或AstroImageJ等软件进行数据处理，生成光变曲线，并把处理好的结果上传到专业数据库，为天文界所使用

- 优点：

灵活性高，业余天文爱好者可根据兴趣选择观测目标

提升技能，熟悉科研过程

- 缺点：

数据处理具有一定的门槛，可能对初学者入门构成挑战

公众助力系外行星的署名原则

署名原则

- 实质性贡献：业余天文学家需在研究的关键阶段（如数据收集、分析或发现）有实质性贡献
- 集体署名：在大型项目中，可采用“集体署名”形式，将所有贡献者列为一个组（大名单）
- 透明性：明确贡献标准，如数据是否直接促成新发现或关键结果
- 公平性：确保业余天文学家的贡献得到认可，避免因严格的期刊特殊标准而被排除

公众助力系外行星的激励机制

激励措施

- 共同作者身份：业余天文学家因发现新行星系统被列为共同作者，促进参与者的积极性（例如美国的**Exoplanet Explorers**项目）
- 致谢与认证：在论文中致谢贡献者，或在数据库中记录贡献者信息
- 奖励机制：由国家天文台或国家天文科学数据中心颁发证书、荣誉或适当纪念品
- 参与学术活动：邀请参加科学会议或研讨会，增强归属感和成就感

我国公众天文数据平台的建设计划（一）

- 国家天文科学数据中心系外行星凌星公众数据库网站，旨在为业余天文爱好者提供一个简单、便捷的平
- 平台由国家天文台管理和维护，数据可用于科研论文的数据来源，贡献者有机会获得相关论文的合作者署名或致谢
- 网站定期发布星表，并提供详细指南和学习资源，确保初学者也能轻松参与
- 正在筹备阶段，预计2025年底投入使用



我国公众天文数据平台的建设计划（二）

联络人：赵斐 博士

邮箱：fzhao@nao.cas.cn

用户免费注册登录后可上传数据

数据类型包括原始数据（FITS文件）、处理过的数据（光变曲线）等

用户可管理自己的数据库

随时关注数据的审核状态与使用情况等

用户可下载相关资源

包括下载星表，获取教程、相关软件和最新咨询等

平台功能简介



公众助力搜寻系外行星的案例（一）

行星猎人（Planet Hunters）



- 项目背景：2010年启动，让公众参与协助从 Kepler 和TESS的光变曲线数据中识别系外行星凌星信号，弥补计算机算法的不足，特别适合发现复杂或非典型的行星系统
- 耶鲁大学天文系发起，合作单位包括牛津大学等
- 公众贡献：共有超过30万志愿者参与，分析了约1200 万条光变曲线
- 参与方式：无需望远镜，通过个人电脑和浏览器即可分析光变曲线，10分钟入门，无需专业背景，助力搜寻系外行星
- 初期的Planet Hunters(Kepler)和2.0版(K2)已于2018年结束
- Planet Hunters TESS和NGTS活动仍在进行中

公众助力搜寻系外行星的案例（二）

NASA Exoplanet Watch项目

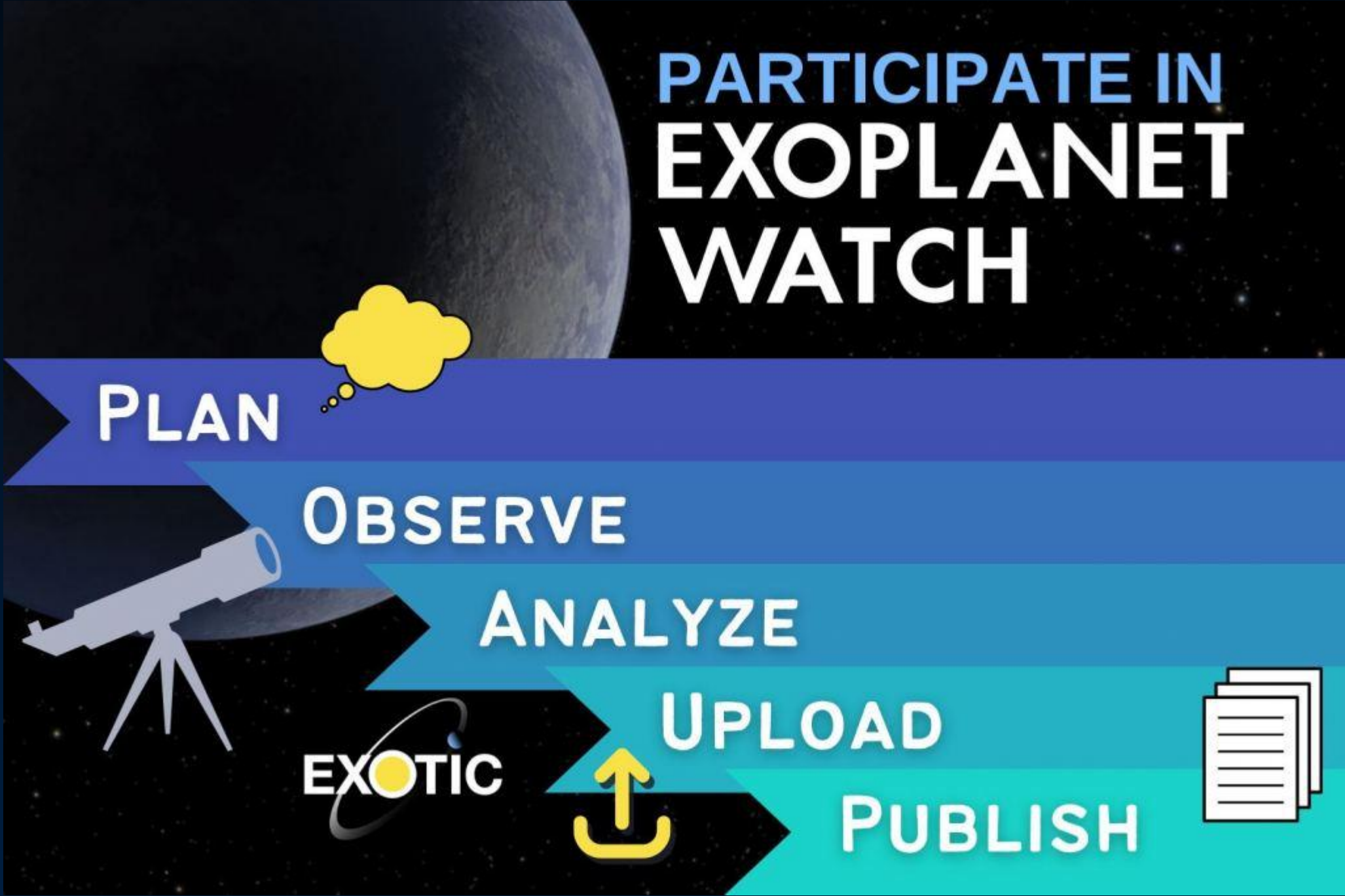
- 背景：2023年1月9日起向公众开放，目前在持续进行中
- 目的：旨在让全球范围内的业余天文爱好者参与到系外行星的观测和数据分析中，协助更精确地预测系外行星凌星的时间，从而优化大型专业望远镜的观测效率
- 参与方法：参与者使用小型望远镜观测并使用EXOTIC等软件处理数据，生成光变曲线，上传到官方指定数据库
- 已有超过2000名参与者，采集了超过6000条光变曲线，分析了400颗以上的系外行星



公众助力搜寻系外行星的案例（三）

两者对比

	Planet Hunters	Exoplanet Watch
目标	分析 Kepler/TESS 数据，寻找新行星候选体（含复杂系统、特殊系统）	聚焦已知行星，精确化轨道参数，辅助专业观测
方式	仅需个人电脑，无需观测，下载数据即可分析光变曲线	支持公众小型望远镜观测（100mm及以上口径，适合 8-10 等星），进行数据分析，门槛稍高但可直接参与观测
数据	用 Kepler/TESS 释放的数据	结合地面望远镜和 TESS 数据



公众观测系外行星扩展课题简介

公众观测系外行星扩展课题简介

基于天文爱好者的设备获取的凌星数据，
还有更多科学课题适合爱好者参与探索：

- **凌星时刻变化 (TTV)**

检测多行星系统引力扰动，推断隐藏行星

- **辅助RM效应观测**

测量行星轨道与恒星自转方向的夹角，揭示行星形成规律

- **开发以 AI 为驱动的公众数据筛选服务**

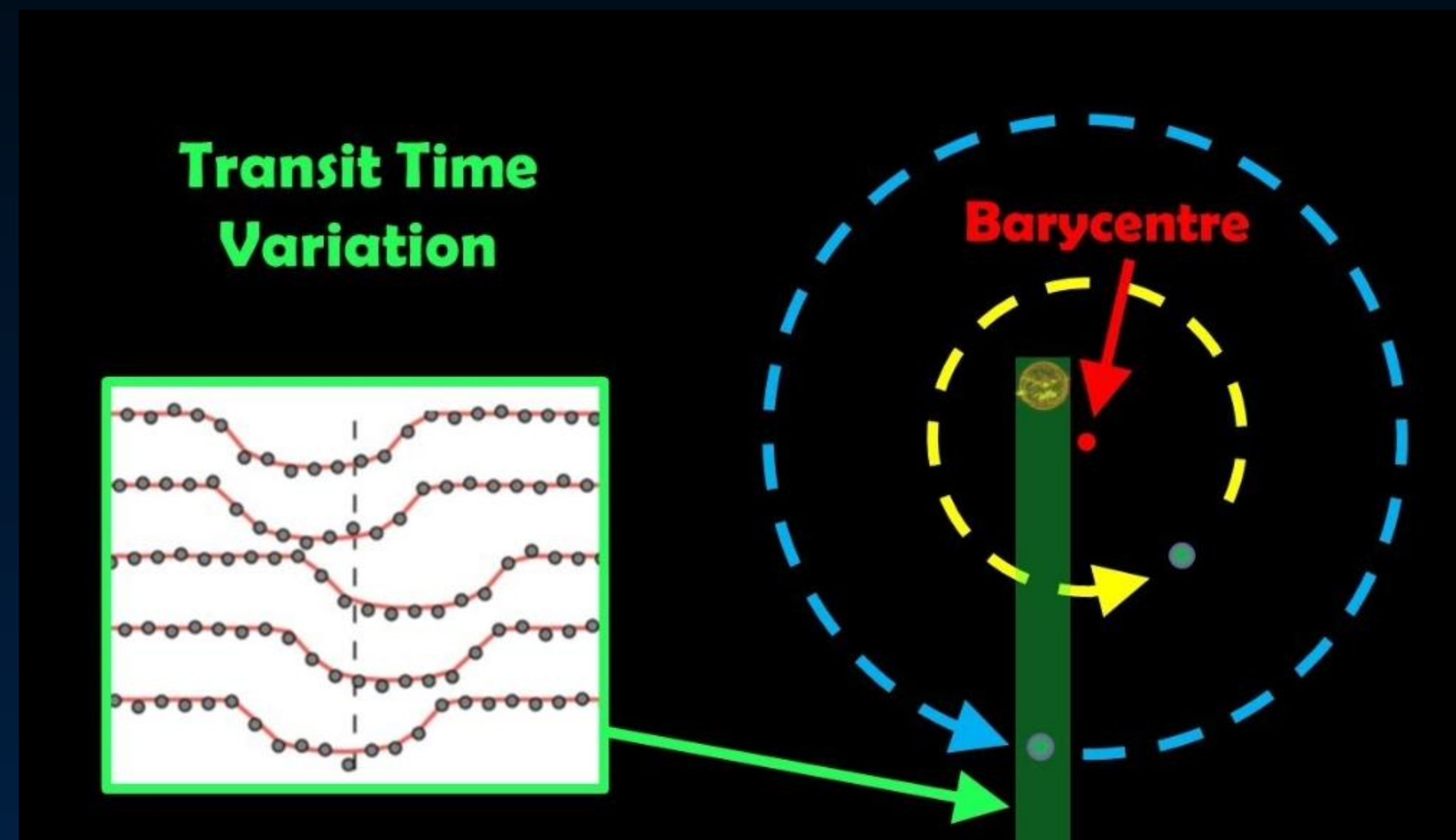
借助AI工具，或训练AI大模型，自动识别凌星信号，提高发现效率

公众观测系外行星扩展课题简介（一）

1. 凌星时刻变化 (TTV, Transit Timing Variations)

概念：

- 如果一颗行星独自在轨道上绕恒星运行，它的凌星时间将非常稳定
- 如果该系统中还有“隐藏的行星”（如体积较小的类地行星），它们之间的引力扰动会导致主行星的轨道发生微小变化
- 表现为每次凌星时刻相对于预测时间出现提前或延迟

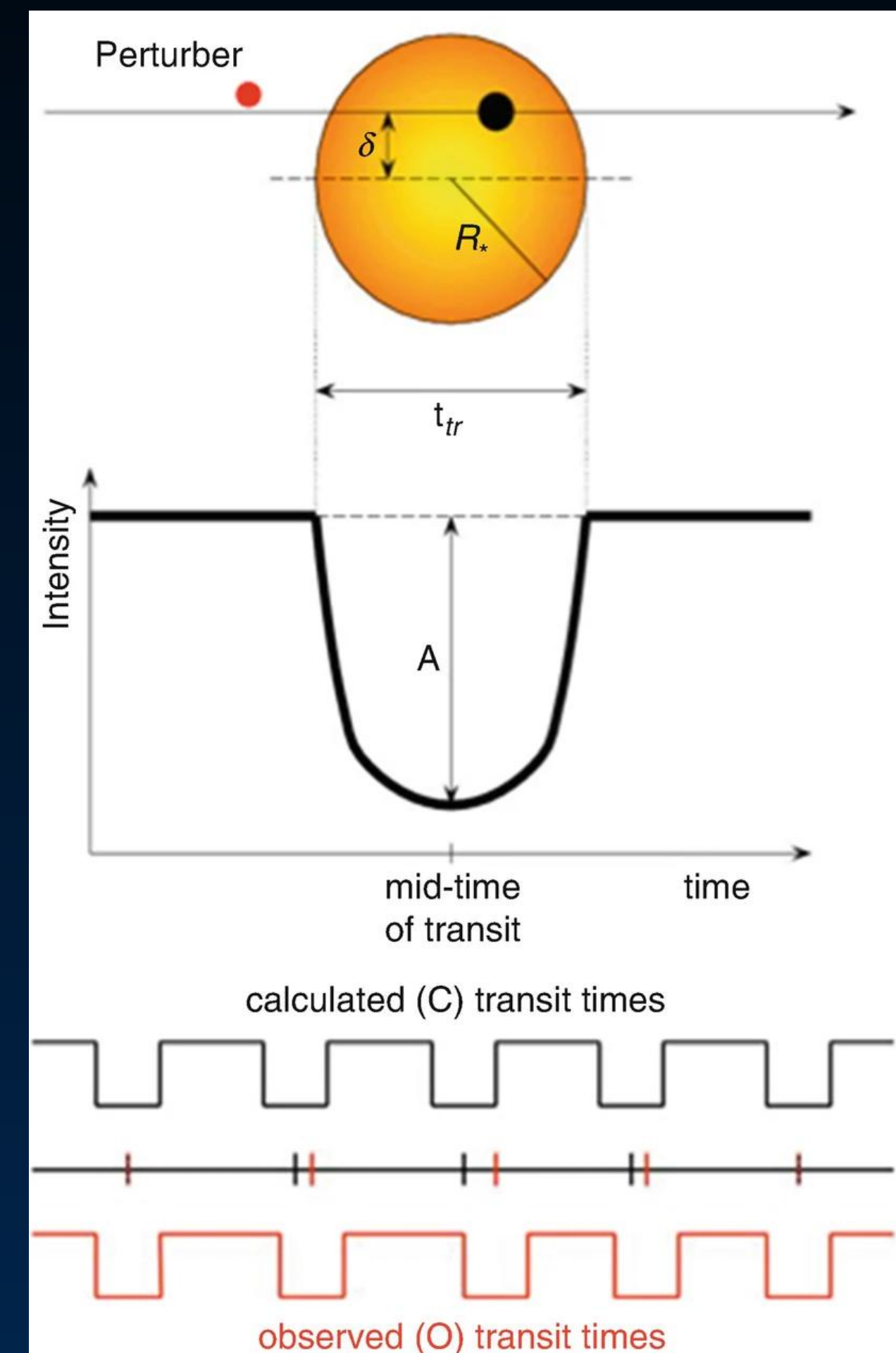


公众观测系外行星扩展课题简介 (一)

1. 凌星时刻变化 (TTV, Transit Timing Variations)

观测原理:

- 持续监测同一颗行星的凌星时间，检测其是否出现提前或延迟
- 若引力扰动存在，每次凌星中心时间 T_c 会偏离预测的发生时间
- 分析 OC 的残差 (Observed – Calculated) 得到O-C图
- 残差曲线的形状可揭示干扰天体的质量与轨道周期，可能是系统中存在其它未被直接探测到的行星

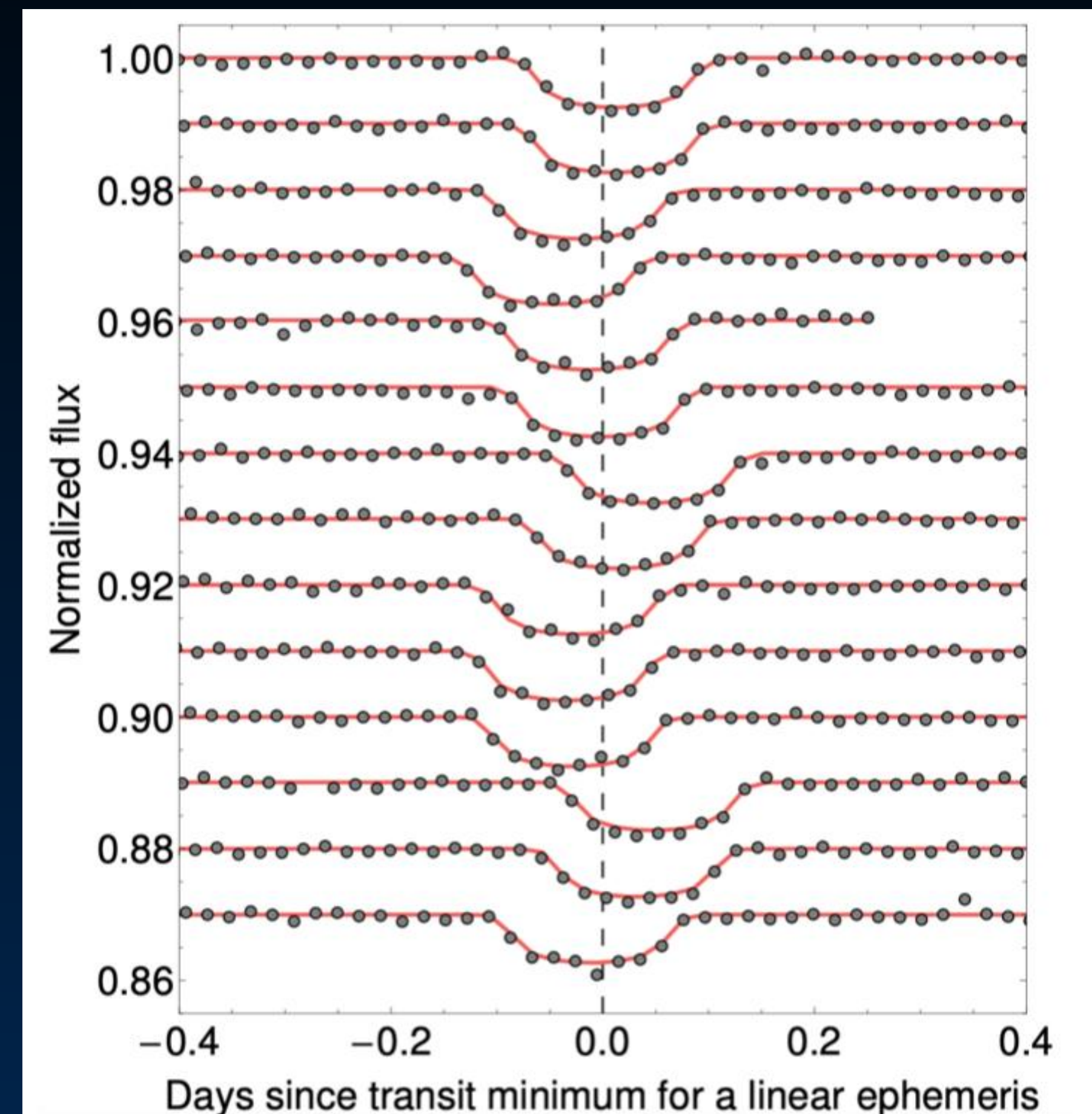


公众观测系外行星扩展课题简介 (一)

1. 凌星时刻变化 (TTV, Transit Timing Variations)

预期的科学成果:

- 协助确认未知的伴随行星 (例如Kepler-19c的发现即来自TTV)
- 间接测定多行星系统的轨道共振结构
- 长期监测候选体, 积累系统凌星时间序列, 有助于筛选异常事件
- 通过爱好者与天文台之间的协同观测, 积累数据, 准确计时, 可协助研究潜在的多行星系统动力学



公众观测系外行星扩展课题简介 (二)

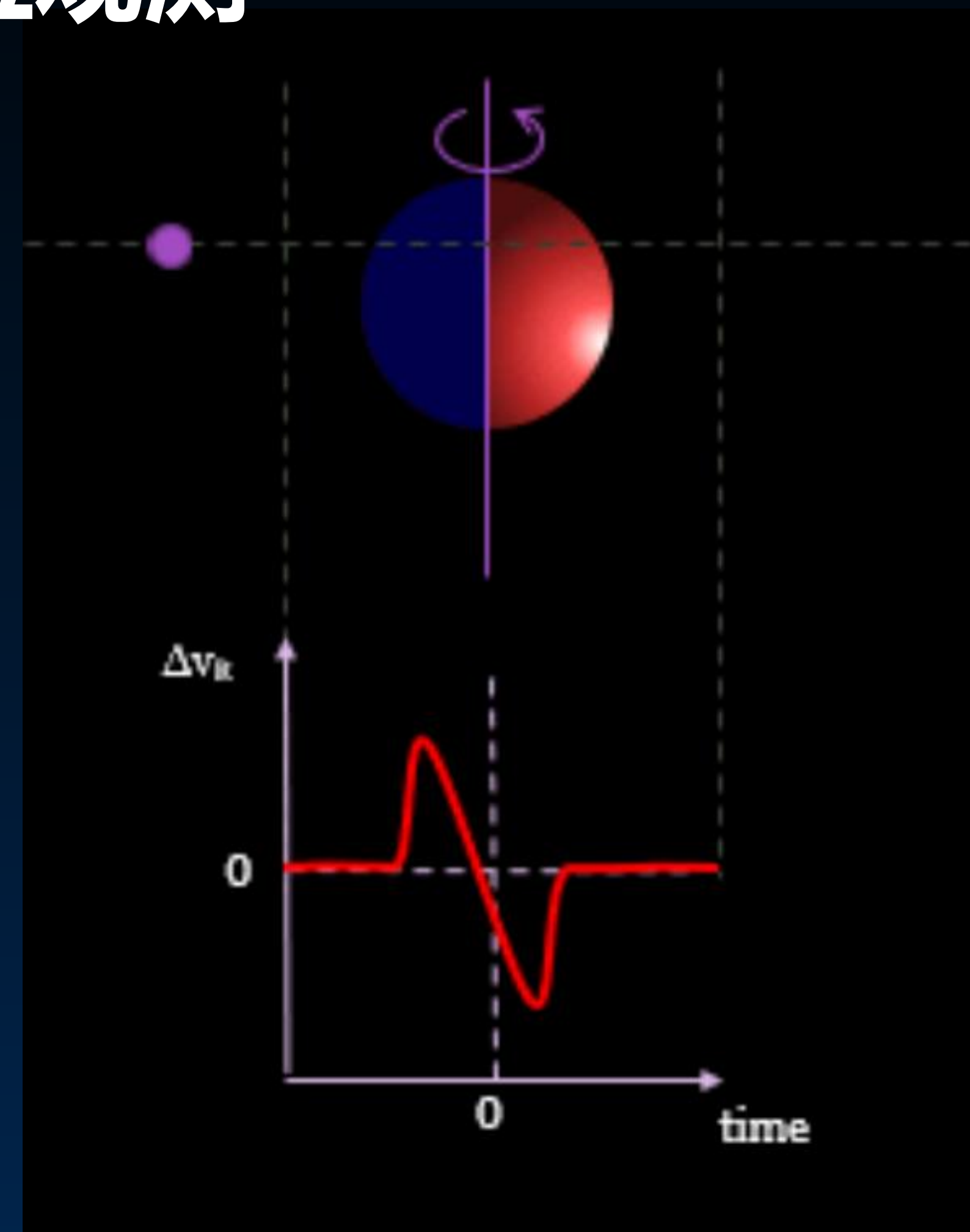
2. 辅助RM(Rossiter–McLaughlin) 效应观测

概念:

- 当一颗行星凌星时，它遮住恒星自转方向上不同速度区域，会让恒星的光谱发生细微的多普勒偏移
- 看起来好像转动减慢或加速了一下，本质上是一个微小的视向速度变化现象

意义:

- RM效应可以揭示行星轨道与恒星自转轴之间的夹角（轨道倾斜角）
- RM现象可以反映出行星系统是否形成于同一盘面，是否有后期动力学扰动

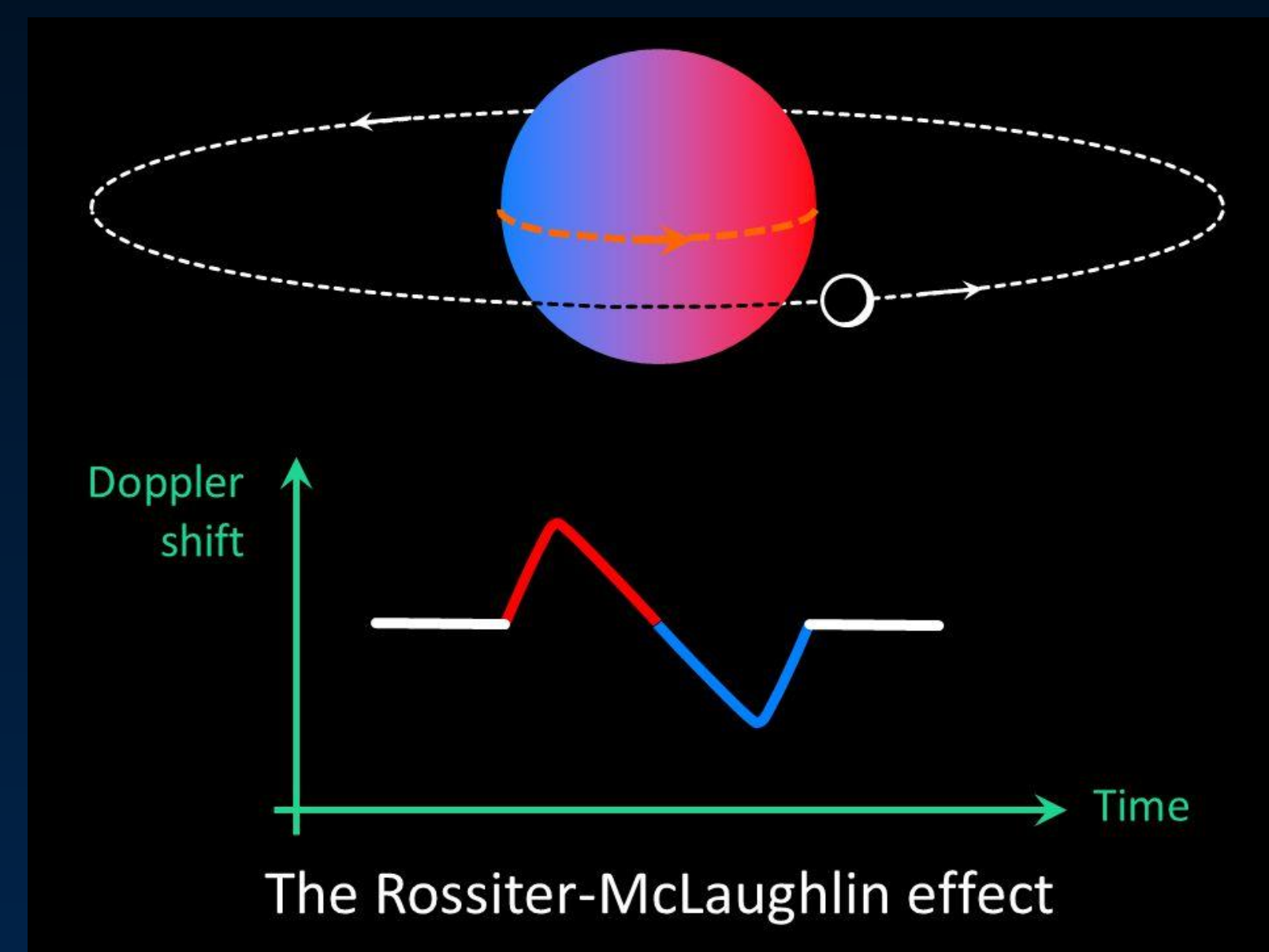
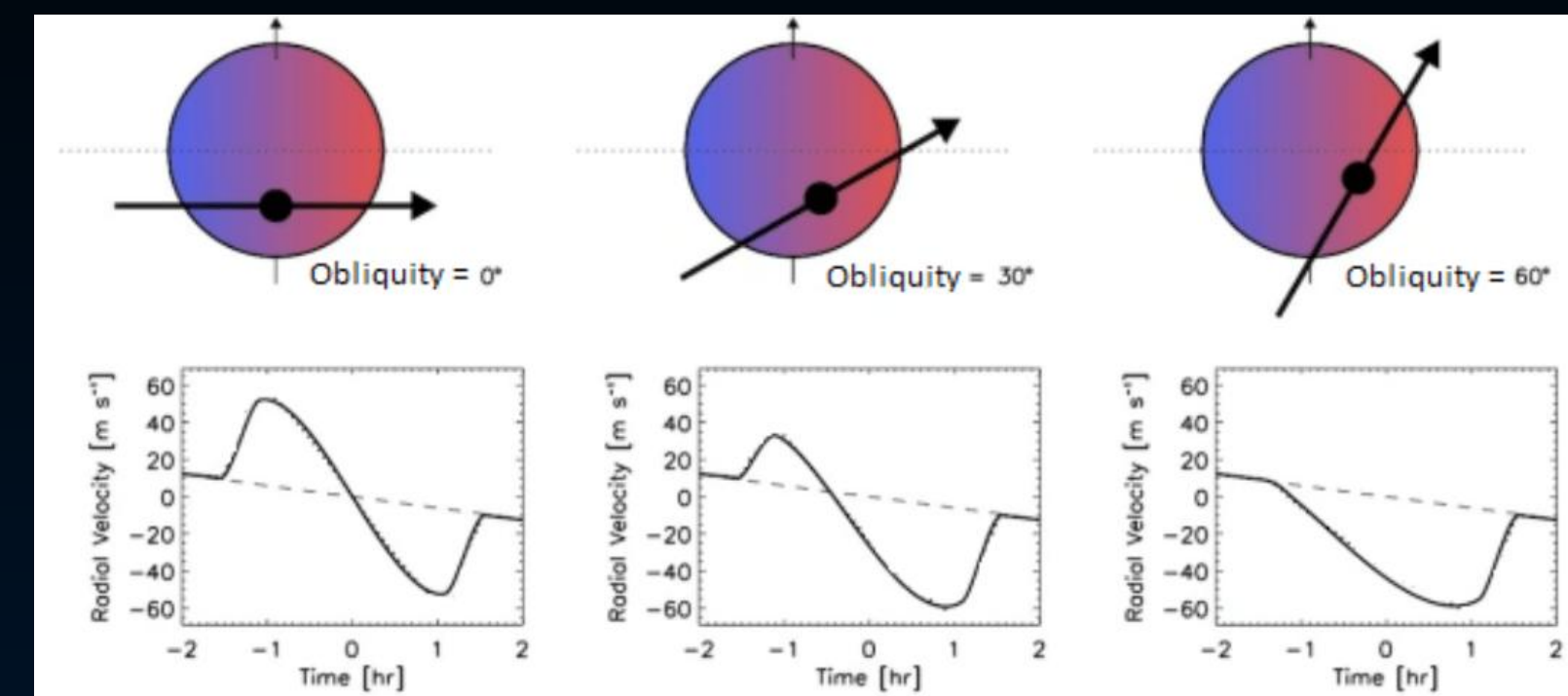


公众观测系外行星扩展课题简介 (二)

2. 辅助RM效应观测

业余爱好者参与RM效应观测的必要性:

- RM效应测量需在凌星前后数小时进行连续光谱采集，对凌星中心时刻要求极高 (<1 分钟误差)
- 大众爱好者可在凌星前数周内协助进行连续光变观测，协助天文学家准确给出凌星时间的中心时刻和凌星发生区间
- 有效避免了大型望远镜在“偏离真正凌星”时段的有效运行，最大化光谱资源的科学产出



公众观测系外行星扩展课题简介 (三)

3. 开发以 AI 为驱动的公众数据筛选架构

■ 参与方式

具有编程特长的公众爱好者可开发AI模型，自动识别、筛选公众观测的凌星数据，识别微弱的凌星信号。

■ 输入数据的来源

➤ 公众数据库：

国家天文科学数据中心系外行星凌星公众数据库、美国的ExoFOP网站数据库和AAVSO数据库等

➤ NASA数据库：

Kepler (2009-2018)：2784颗确认行星，4717颗候选行星，周期约1-500天

TESS (2018-至今)：643颗确认行星，7655颗候选行星，周期以<27天为主



公众观测系外行星扩展课题简介 (三)

3. 开发以 AI 为驱动的公众数据筛选架构

■ 训练过程

卷积神经网络 (CNN) + 长短期记忆网络 (LSTM) , 识别光变曲线特征
(如深度 0.1-1% 热木星, 0.01-0.1% 类地行星)

■ 输出方式

候选行星信号: 凌星深度、中点时间、周期等参数

置信度评分: 标记潜在行星 (如 90% 概率为类地行星)

可视化: 光变曲线 + 候选标记, 供公众验证和专业天文学家复核

■ 开发方式

征集擅长编程并熟练掌握AI技能的业余天文爱好者, 联合专业天文学家一起开发与测试



总结与展望



总结与展望 —— 属于公众的系外行星新时代

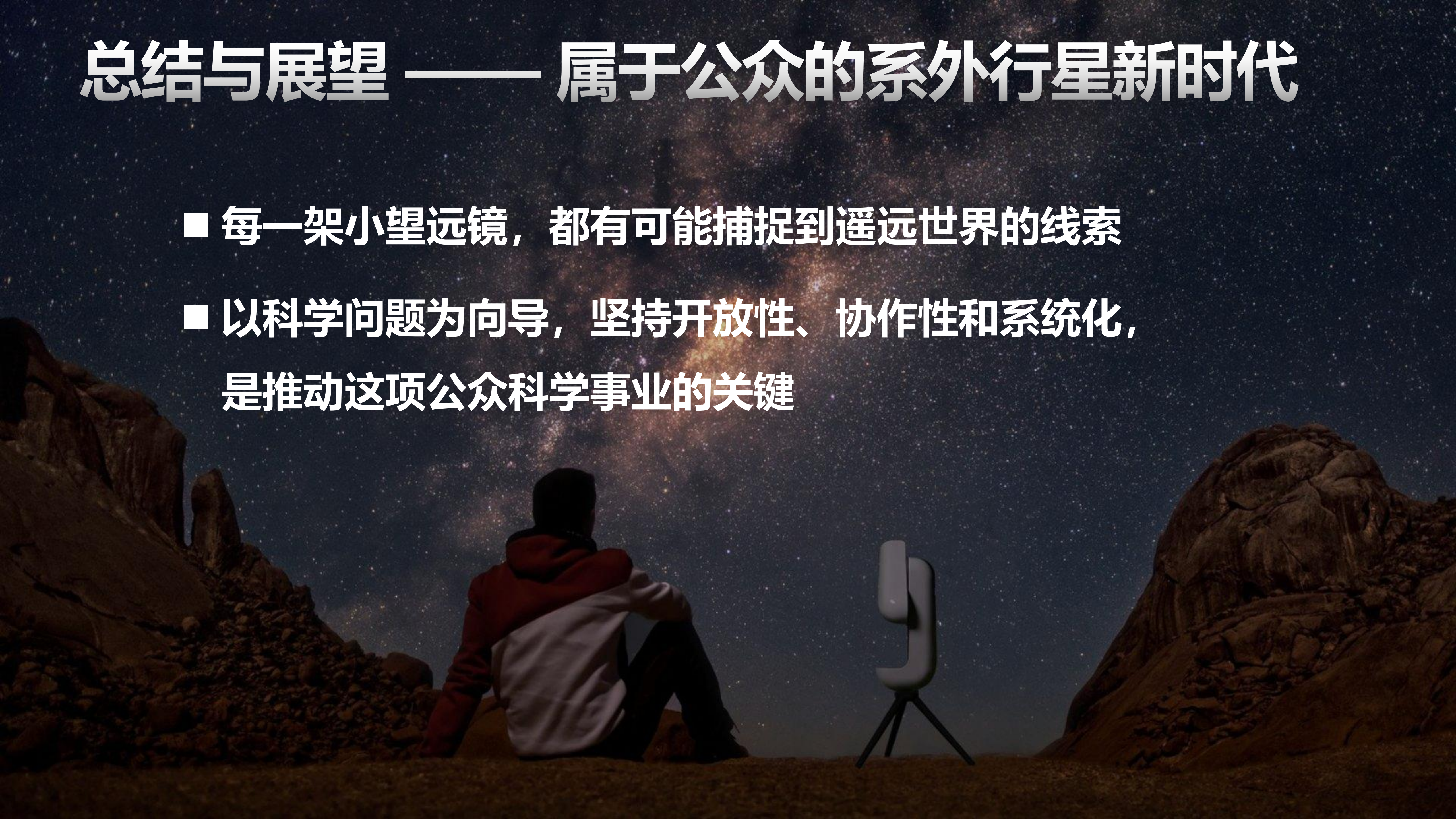
■ 截至目前，已有将近6000颗系外行星被确认，揭示了宇宙中行星系统的普遍性和多样性

■ 凌星法的贡献占70%以上，是业余爱好者参与的理想研究方式



总结与展望 —— 属于公众的系外行星新时代

- 每一架小望远镜，都有可能捕捉到遥远世界的线索
- 以科学问题为向导，坚持开放性、协作性和系统化，
是推动这项公众科学事业的关键



总结与展望 —— 属于公众的系外行星新时代

- 未来十年，人类将深入探测宜居带行星大气
- 更多宜居带内的类地行星样本将是寻找地外生命的关键目标
- 全球天文爱好者的协作将加速新世界发现，星空等待更多探索者

总结与展望 —— 属于公众的系外行星新时代

- 中国天文爱好者正奋起直追，下一颗系外行星可能因你而有名
- 星空属于每一个人，拿起你手中的望远镜，即可捕捉遥远行星的光影
- 你的参与，将助力人类发现新的世界
- 加入我们的行列，用每一次观测和探索来共同书写宇宙的未来



我们是孤独的吗？



唯有仰望星空，
才能寻找答案



谢谢

