

# 基于双星轨道参数的凌星光变模拟场景报告

## 1. 类地行星凌星模拟

**模拟现象：**模拟一个类似地球大小的行星凌星经过类太阳恒星的情形。这种“类地行星凌日”现象指行星从我们视角经过恒星盘面，造成恒星亮度微弱下降<sup>1</sup>。对于地球绕太阳的情况，凌日仅会使恒星光度下降约84 ppm（0.0084%），持续时间十余小时<sup>1</sup>。由于周期约一年，凌日极为罕见且信号微弱，是天文观测中最具挑战的目标之一。

**参数示例及范围：**

参数	示例值	合理范围
半长轴 (AU)	1.00	0.5–2.0（类太阳恒星宜居带）
轨道偏心率	0.02	0–0.20（近圆形轨道）
轨道倾角 (°)	90.0	89–90（需要接近90°才发生凌星）
恒星质量 ( $M_{\odot}$ )	1.0	0.8–1.2（G型主序星）
半径比 ( $R_p/R_*$ )	0.009	0.008–0.02（类地至超地行星）
观测噪声 (ppm)	30	0–1000（取决于仪器精度）

**科学解析：**这一模拟可帮助评估搜寻地球类似行星的可行性和要求。例如，地球大小行星凌日信号极其微弱，只有当观测精度达到数十ppm量级时才可能检出。**模拟能够回答的问题包括：**

- **是否可观测到凌星？** 给定典型空间望远镜的噪声水平（如20 ppm），单次84 ppm的凌日仅有约 $4\sigma$ 显著性。因此需要多次凌日积累才能确认地球类行星的存在，解释了为何凯普勒需长期连续观测。地面望远镜噪声通常在数百ppm，难以直接发现如此浅的凌日信号。
- **凌星参数透露什么行星信息？** 凌日深度（约0.008%）直接对应行星半径与恒星半径之比，可用于推算行星大小<sup>2</sup>。凌日持续时间约十几小时，则反映轨道半径和行星公转周期<sup>3</sup>。结合恒星参数，这些观测可确认行星是否位于恒星宜居带，并为行星密度（需径向速度测量）和轨道倾角等提供约束。
- **对观测的要求：** 模拟还展示只有在**极高精度**和**长时间基线**下才能探测类地行星凌星。例如凯普勒太空望远镜具备在6.5小时积分下达到20 ppm精度的能力，使其有望探测84 ppm的微弱信号。这强调了空间任务在寻找地球孪生行星方面的必要性。

**参考文献：** Winn (2010)综述了凌日法探测原理<sup>2</sup>；PNAS论文指出地球绕太阳的凌星深度仅约84 ppm，持续约13小时<sup>3</sup>。Christiansen 等(2012)分析了开普勒数据，单次地球凌日信号仅约 $4.2\sigma$ ，需要多次观测累加。

## 2. 热木星凌星模拟

**模拟现象：**模拟一颗“大型类木行星”（热木星）围绕类太阳恒星的凌星情形。热木星通常质量和尺寸接近木星，但轨道非常靠近恒星（周期仅几天），因此凌日发生频繁且信号显著<sup>4</sup>。例如著名的HD 209458b就是一颗热木星，每3.5天绕行一次，其凌日使恒星亮度骤降约1.7%，持续约3小时<sup>5</sup>。如此深的凌日易于观测，曾是首批被光度法确认的系外行星类型<sup>6</sup>。

参数示例及范围：

参数	示例值	合理范围
半长轴 (AU)	0.047	0.02–0.10（典型热木星轨道）
轨道偏心率	0.0	0–0.2（高温导致近圆轨道）
轨道倾角 (°)	86.0	84–90（倾角较小也可凌星）
恒星质量 ( $M_{\odot}$ )	1.1	0.8–1.3（F–G型恒星）
半径比 ( $R_p/R_*$ )	0.13	0.10–0.20（木星-恒星半径比）
观测噪声 (ppm)	200	0–500（地面空间均可观测）

科学解析：热木星凌星模拟显示出巨型行星凌日的典型特征和科研价值。可能解答的科学问题包括：

- **行星物理参数测定：**由于凌日深度达1–2%，容易测出行星半径。例如HD 209458b凌日深度1.7%对应行星半径约为恒星的11–12%<sup>5</sup>。结合径向速度测量的质量，可求得行星平均密度，从而推断其内部组成是气态巨行星<sup>4</sup>。
- **大气和结构特征：**深凌日提供了研究系外行星大气的机会。当行星穿过恒星盘时，恒星光穿透行星大气，会在特定波长出现额外吸收。HD 209458b的凌日光谱中，人们探测到了钠元素和大气挥发物的印迹<sup>7</sup>。这证明凌日观测不仅能测尺寸，还能透露大气组成。此外，凌日持续时间和形状还能约束行星轨道是否与恒星自转对齐（需结合罗斯特效应测量）。
- **观测可行性：**热木星的凌日信号强，即使小型望远镜也可探测。事实上，业余天文学家曾使用口径仅16英寸的望远镜成功观测到HD 209458b凌日约0.02星等的变暗<sup>8</sup>。这种模拟验证了地基观测在探测较大、短周期行星方面的能力，也解释了为何早期系外行星多为热木星——因为它们最容易被检测到<sup>4</sup>。

参考文献：Charbonneau 等(2000)和 Henry 等(2000)首次报告了HD 209458b的凌日，测得约1.7%的光变<sup>5</sup>。AAVSO的分析指出该行星直径约为木星的1.43倍，凌日持续约3小时<sup>5</sup>。后续观测在其凌日光谱中发现了Na、H、O等原子特征，揭示出行星大气的存在<sup>7</sup>。

### 3. 红矮星宜居带行星凌星模拟

**模拟现象：**本模拟场景针对**红矮星（M型星）周围宜居带**的地球大小行星凌星。红矮星质量小、半径小（约太阳的10%），亮度低，宜居带距离也很近（典型0.01–0.1 AU）。这意味着行星公转周期短（几天至几十天），凌日频繁且由于恒星半径小，凌日信号相对较深<sup>9</sup>。例如TRAPPIST-1是一颗半径仅为太阳11%的超冷矮星，拥有7颗类地行星，其中3颗位于宜居带<sup>10</sup>。这些行星凌日造成的亮度下降约为0.3–0.8%，明显大于地球绕太阳的凌日幅度<sup>11</sup>。

参数示例及范围：

参数	示例值	合理范围
半长轴 (AU)	0.029	0.01–0.10（红矮星宜居带）
轨道偏心率	0.00	0–0.1（潮汐作用近圆轨道）
轨道倾角 (°)	90.0	88–90（对地球需接近掩食几何）
恒星质量 ( $M_{\odot}$ )	0.09	0.08–0.5（典型M星质量）

参数	示例值	合理范围
半径比 ( $R_p/R_*$ )	0.07	0.05–0.15 (行星/矮星半径比)
观测噪声 (ppm)	300	50–1000 (空间/地面观测)

**科学解析：**红矮星系的凌日模拟有助于探索小恒星周围宜居行星的发现潜力和特性。**可能解决的科学问题包括：**

- **宜居带行星的可探测性：**由于红矮星半径小，即使地球大小的行星也能产生约0.5%的深凌日<sup>[11]</sup>。这远高于空间望远镜典型噪声底限（几十ppm），因此探测此类行星相对容易。事实上，TRAPPIST-1行星就是通过小型地面望远镜首先发现的（凌日深度~0.4%–1%），随后利用Spitzer空间望远镜确认<sup>[10]</sup><sup>[11]</sup>。模拟可以量化不同大小行星在红矮星前凌日的信号强度，评估哪些望远镜能够探测。
- **多行星系统动力学：**红矮星宜居带常存在多颗行星（如TRAPPIST-1有7颗行星）<sup>[10]</sup>。凌日模拟结合N体动力学可研究行星间的引力作用，例如分析凌日计时变化（TTV）以推断行星质量和轨道共振关系<sup>[12]</sup><sup>[13]</sup>。多个凌日信号的相互影响也是当前系外行星研究的热点。
- **行星大气与宜居性：**红矮星光度低，有利于凌日时直接观测行星的大气特征，因为行星/恒星的光比更高<sup>[9]</sup>。模拟红矮星凌日光谱可评估我们在未来利用詹姆斯韦伯等设备探测这些行星大气的的能力。例如，AAS Nova指出TRAPPIST-1恒星很小，使得我们有望用现有和下一代望远镜详细研究其行星大气、表面条件和宜居潜力<sup>[9]</sup><sup>[14]</sup>。

**参考文献：**Gillon 等(2017)通过凌日法发现TRAPPIST-1系统中7颗地球大小行星，其中3颗位于宜居带<sup>[10]</sup>。TRAPPIST-1恒星仅有太阳直径的11%，这使其行星的凌日信号相对巨大<sup>[9]</sup>。TEPCat数据库给出了TRAPPIST-1e行星的凌日深度约0.55%，轨道周期6.1天<sup>[11]</sup>。这些发现表明红矮星宜居带行星不仅常见，而且凌日极具可检测性，是下一个十年系外行星大气研究的重点目标。

## 4. 白矮星宜居带行星凌星模拟

**模拟现象：**该情景模拟一颗围绕**白矮星**运行的宜居带行星凌星。白矮星是太阳类恒星演化末期形成的小而致密星体，典型半径仅约0.01  $R_\odot$ （与地球相仿）<sup>[15]</sup>。其宜居带非常靠近（约0.005–0.02 AU<sup>[16]</sup>），行星公转周期只有数十小时到几天。由于白矮星尺寸极小，地球大小的行星凌星可造成**极深**的光变：若行星大小接近白矮星，凌日可能遮蔽大部分甚至全部恒星光<sup>[15]</sup>。例如，已发现的白矮星行星WD 1856+534 b（木星大小）每34小时绕行一次白矮星，凌日持续约8分钟，造成约56%的亮度下降<sup>[17]</sup><sup>[18]</sup>。这证明大行星可在白矮星前产生**近乎食**的现象。

**参数示例及范围：**

参数	示例值	合理范围
半长轴 (AU)	0.010	0.005–0.020 (白矮星宜居带)
轨道偏心率	0.00	0–0.5 (近距轨道可有偏心)
轨道倾角 (°)	90.0	89–90 (需要非常靠近90°)
恒星质量 ( $M_\odot$ )	0.60	0.4–0.9 (典型白矮星质量)
半径比 ( $R_p/R_*$ )	0.70	0.1–1.0 (行星/白矮星半径比)
观测噪声 (ppm)	500	50–5000 (白矮星较暗,噪声偏高)

**科学解析：**白矮星体系的凌星模拟探索了极端条件下行星的存在及可探测性。**关键科学问题包括：**

- **行星幸存与迁移机制：**白矮星由红巨星坍缩形成，其宜居带内原有行星会被吞噬或烧毁。若存在近轨道行星，需解释其如何在恒星演化过程中存活或后来迁移而来<sup>19 20</sup>。WD 1856+534 b的发现表明，巨行星可能通过动力学散射进入近白矮星轨道而未被潮汐撕裂<sup>21</sup>。模拟可测试不同偏心率和倾角下行星被白矮星捕获或幸存的可能性，帮助理解行星系统的最终命运。
- **凌日探测及大气特征：**模拟显示，白矮星行星的凌日信号非常显著，即使只有民用级别的望远镜噪声（上千ppm）也能发现数十%以上的光变。比如TESS卫星在粗测光情况下仍发现了WD 1856 b凌日，因为其深度达一半以上<sup>17</sup>。对于地球大小的行星，若其凌日能遮挡白矮星一大部分光，则非常容易检测。一些研究指出，若这样的行星存在，其**大气特征**（如氧气、臭氧）有望在凌日光谱中检测到，因为恒星光要穿过大量行星大气<sup>22</sup>。白矮星本身光谱简单、尺寸小，有利于突出行星大气的吸收信号。
- **宜居性及演化：**随着白矮星冷却，宜居带会逐渐向内收缩<sup>23</sup>。模拟表明，一颗在0.01 AU处绕行的行星，起初可能过热不适宜居住，但随着白矮星降温，宜居带移入该轨道，行星可能经历长达数十亿年的宜居期<sup>23</sup>。这一漫长且稳定的阶段为生命演化提供了可能。在白矮星周围寻找凌日行星，不仅能验证上述理论（如Agol 2011预测的连续宜居带范围<sup>16</sup>），还可将其作为另一类搜索地外生命的对象。

**参考文献：**Agol (2011)提出在白矮星0.005–0.02 AU范围存在“连续宜居带”，行星可在白矮星冷却过程中保持液态水条件达数十亿年<sup>23</sup>。2020年Vanderburg等在《Nature》报道了首例白矮星凌日行星WD 1856+534 b，周期1.4天，凌日使白矮星亮度下降约56%<sup>17</sup>。NASA新闻稿强调该白矮星仅比地球大40%，而行星半径约为白矮星的7倍，表明凌日时几乎完全遮蔽了恒星<sup>15</sup>。这一发现激发了寻找更小岩石行星的兴趣，因为若地球大小行星凌日白矮星，几乎可以产生“日全食”式的信号，极具观测价值。

## 5. 高偏心轨道行星凌星模拟

**模拟现象：**本场景模拟轨道**高度偏心**（椭圆形）行星的凌星特征。高偏心率行星在远星点运行缓慢、距恒星远，但在近日点急速掠过恒星附近。当近日点轨道平面朝向我们时，行星可能仅在靠近恒星时发生凌日<sup>24</sup>。这类凌日的一个特点是持续时间相对较短但高度不对称。例如系外行星HD 80606b偏心率 $e \approx 0.93$ ，公转周期111天，仅在靠近恒星最近的几小时内发生凌日，整个凌日长达12小时<sup>25</sup>。由于轨道偏心和倾斜，凌日的开始和结束时间及周期性会与等周期圆轨道情况有显著偏差，需要连续长时间观测才能完整记录<sup>26</sup>。

**参数示例及范围：**

参数	示例值	合理范围
半长轴 (AU)	0.50	0.1–1.0（远日点较远）
轨道偏心率	0.93	0.5–0.95（极端椭圆轨道）
轨道倾角 (°)	89.3	85–90（需接近临界以凌日）
恒星质量 ( $M_{\odot}$ )	1.0	0.8–1.5（类似太阳或略大恒星）
半径比 ( $R_p/R^*$ )	0.10	0.05–0.15（木星类行星为例）
观测噪声 (ppm)	100	50–1000（高精度连续测光需要）

**科学解析：**高偏心轨道行星的凌星模拟揭示了轨道形状对凌日可见性和光变曲线的影响。**可探讨的科学问题包括：**

- **凌日发生的条件：**高度偏心轨道上，行星只有在近日点附近才足够靠近恒星且满足凌日视线几何。例如HD 80606b在远日点距离恒星0.85 AU，近日点仅0.03 AU<sup>27</sup>。它每次经过近日点时受到恒星强烈照射，亮度骤增千倍，然后可能发生凌日<sup>28</sup>。模拟可以计算不同偏心率和轨道倾角下，行星发生凌日的

概率和频率。结果表明偏心轨道行星凌日的时间间隔往往不均匀，可能需等待多个周期才被捕捉到，这指导了实际观测策略。

- **凌日曲线与轨道参数**：在椭圆轨道中，行星在近日点速度最快，因而凌日持续时间相对比圆轨道同周期情况短<sup>26</sup>。通过模拟椭圆轨道凌日光变，可以从**凌日持续时间、非对称性等特征**反推轨道偏心率和近日点参数。当有多次凌日观测时，还可通过比较凌日定时与平均公转周期的偏差确定轨道的偏心和近拱角。另外，如果能够观察到行星的二次凌食（行星躲到恒星后面），初级和次级凌食的时间间隔也揭示偏心率的信息。
- **极端环境与动力学**：高度偏心轨道使行星在轨道上经历剧烈的环境变化：在近日点仰射强烈恒星辐射（类似“瞬间热木星”），在远日点则恢复冷却<sup>27</sup>。例如HD 80606b在近日点受到的光照通量比远日点高出约**1000倍**<sup>28</sup>。这种“过山车”式气候可通过凌日和后续红外观测加以研究，帮助我们了解行星大气对极端变化的响应。此外，模拟还可考虑其它天体扰动导致的轨道岁差或偏心变化，对凌日计时的影响。例如，有研究报告HD 80606b某次凌日比预测提早了20分钟，可能暗示另一颗伴星的扰动或系统测时不确定性<sup>29</sup>。

**参考文献**：Moutou 等(2009)在斯皮策望远镜观测下完整记录了HD 80606b一次持续约12小时的凌日<sup>25</sup>。其偏心轨道( $e \approx 0.93$ )使行星在0.03 AU处飞掠恒星，随后远离到0.85 AU<sup>27</sup>。这种轨道导致该行星在近日点体验到类似热木星的极端条件，而在远日点则相对温和<sup>27</sup>。另外，Laughlin 等(2009)利用斯皮策监测到HD 80606b在近日点大气突然升温并逐渐冷却的过程，验证了上述千倍辐射变化的理论<sup>28</sup>。这些观测和模拟相互印证，丰富了我们对于高度偏心轨道系外行星的认识。

## 6. 掠边凌星现象模拟

**模拟现象**：该场景模拟**掠边凌星**，即行星仅从恒星边缘擦过的凌星情况。此时行星轨道平面与视线几乎平行，但略有偏差，导致行星在凌日时无法完全覆盖恒星圆面，而只是部分投影在恒星圆盘上<sup>30</sup>。掠边凌星的典型特征是光变曲线不呈平顶状（没有明显的平坦凌日中心），而是在进出食阶段逐渐变暗变亮，整个过程中恒星从未被完全遮挡。结果是凌日深度比相同行星完全凌日时要浅得多，且测量行星半径存在较大不确定性<sup>30</sup>。Kepler-447b就是一例掠边凌星的热木星：轨道冲着我们但略偏，冲掩参数 $b \approx 1.08$ ，导致凌日时只有约20%的行星圆面遮住恒星光盘，造成不足1%的亮度下降<sup>30</sup>。

**参数示例及范围：**

参数	示例值	合理范围
半长轴 (AU)	0.08	0.03–0.2（短周期行星）
轨道偏心率	0.12	0–0.3（一般不影响掠食判定）
轨道倾角 (°)	85.5	临界值附近（略小于90）
恒星质量 ( $M_{\odot}$ )	0.90	0.8–1.2（K/G型恒星）
半径比 ( $R_p/R_*$ )	0.18	0.1–0.2（以木星类为例）
观测噪声 (ppm)	100	50–300（需高信噪以辨别浅凌日）

注：掠边凌星发生在轨道倾角非常接近90°的情况下，其临界倾角由行星和恒星视圆半径决定；上表给出一典型示例。

**科学解析：**掠边凌星模拟对于理解**极限几何条件**下的凌日信号及其科研利用具有重要意义。**涉及的科学问题包括：**

- **参数测量的不确定性：**当凌日为掠边性质时，我们只能看到行星遮掩恒星边缘一小部分，无法产生完整的“平底”光变。这使得行星半径和轨道倾角存在高度相关的不确定性——较大的行星略为擦过恒星边缘，可能产生与较小行星深度掩食相似的光变<sup>30</sup>。模拟这种情况可以帮助量化这种退化：例如 Kepler-447b 的数据分析中，行星半径误差较大就是因为只有掠食凌日<sup>30</sup>。因此，掠边凌星提醒我们对行星大小的测量往往只能得到上限或下限，需要借助其他方法（如径向速度或多色光变）来辅助确认行星属性。
- **动力学与其他天体：**掠边凌星对轨道参数变化极为敏感。如果有其他行星引力摄动导致轨道平面稍有改变，凌日深度和持续时间都会发生明显变化<sup>31</sup>。因此，监测掠边凌星的历次凌日参数，可以作为搜寻额外伴星或卫星的手段。例如行星轨道进动、岁差或由于另一天体造成的倾角变化，都会让每次凌日的**深度、时间**产生可检测的差异<sup>31</sup>。这样的效应在完全凌日时较难察觉，但在掠边凌日时相对突出，可用极高精度光度和短时间采样率（如1分钟级别）进行监测<sup>31</sup>。这一模拟鼓励对掠边凌日系统进行密集观测，以期发现第三天体扰动、恒星非球形自转（引起轨道倾角周期变化）或行星环系等新奇现象。
- **极端情况验证模型：**掠边凌日提供了测试恒星边缘黑化（limb darkening）模型的机会。由于行星仅掩食恒星边缘区域，光变曲线对恒星边际的亮度分布非常敏感。通过模拟不同恒星光球模型并与掠边凌日实测曲线比对，可反演恒星的边缘昏暗效应参数。此外，在凌日进出相的细微起伏，可能揭示行星大气的存在或者行星形状的异常（如有环或延伸大气）。这些都需要非常高的信噪比才能辨别，但掠边凌日无疑是极端条件下检验各种模型假设的理想实验室。

**参考文献：**Lillo-Box 等(2015)确认了Kepler-447b是一例极端掠边凌日的热木星：其冲掩参数 $b=1.076$ ，只有约20%的行星投影覆盖恒星，使测得的行星半径存在较大误差<sup>30</sup>。作者指出，此类大冲掩率的凌日为探测**额外扰动**提供了机遇，例如可以检验是否存在额外行星引起的凌日变化、恒星脉动或行星极冠凌星等现象<sup>31</sup>。他们建议利用TESS、CHEOPS等高精度、高时间分辨率的后续任务对这类系统进行监测，以期从细微变化中发现新奇的动力学效应<sup>31</sup>。

## 7. 食双星互掩光变模拟

**模拟现象：**这一场景模拟**食双星系统**（互相发生掩食的双星）的光变曲线。食双星由两颗彼此绕转的恒星组成，轨道方向几乎沿视线，因此在轨道周期内会出现两次亮度显著下降：一次是较暗/小的恒星经过前方掩遮部分较亮/大的恒星光（初级食），另一次是较亮恒星遮住较暗恒星（次级食）<sup>32</sup>。与行星凌日不同，两颗恒星都有自身光亮，因此食双星初、次食的深度取决于两星的表面亮度和大小之比。<sup>33</sup> 例如，一个质量分别约 $2.49 M_{\odot}$ 和 $2.42 M_{\odot}$ 的近等双星（轨道周期43天），其光变曲线初级食深度约17%，次级食深度约13%<sup>33</sup>。深食发生时，系统总光约减少六分之一至五分之一，这在观测上非常明显。透过模拟此类光变，我们可以深入了解恒星参数。

**参数示例及范围：**

参数	示例值	合理范围
半长轴 (AU)	0.10	0.01–1.0（从接触到分离双星）
轨道偏心率	0.00	0–0.5（短周期往往接近0）
轨道倾角 (°)	90.0	85–90（需接近edge-on产生互食）
恒星质量 ( $M_{\odot}$ )	$1.0 + 0.7$	0.1–30（从红矮星到大质量恒星组合）
半径比 ( $R_2/R_1$ )	0.70	0.1–1.0（次星与主星半径比）
观测噪声 (ppm)	1000	0–10000（较大光变易于观测）

**科学解析：**食双星模拟在天文学中具有基础意义，因为它提供了直接测量恒星基本物理量的途径<sup>34</sup>。其科学贡献主要包括：

- **精确测定恒星参数：**通过拟合双星光变曲线，我们可获得两颗恒星的**半径、轨道倾角**和相对光度等参数<sup>34</sup>。配合光谱或径向速度观测还能求出恒星质量和轨道大小。如此，互食双星成为测定恒星**质量和半径**的黄金手段之一。例如，由食双星光变和径向速度，可以算出恒星的密度和表面重力，将其精确定位在赫罗图的相应位置，从而与恒星演化模型进行对比校验<sup>34</sup>。许多经典恒星参数（如恒星半径-光度关系）就是借助食双星观测确立的。
- **恒星结构与演化：**模拟和分析双星初、次食深度还可推断恒星的温度及光度比，因为初级食深度主要取决于较暗星遮挡较亮星的光通量比例，而次级食深度则等于较暗星自身光占总光的比<sup>33</sup>。通过比较初次食深度差，可以估算两星有效温度之比，进而了解它们的光谱类型差异<sup>33</sup>。例如，上例中17% vs 13%的食深表明两星温度相近（亮度比约0.8）<sup>33</sup>。这些信息结合恒星演化轨道，可判断哪颗恒星演化更快，是否有膨胀成为次巨星的迹象等。许多食双星的研究显示，两星中的大质量星往往已演化离开主序带，而低质量伴星仍在主序带上<sup>35</sup>。因此，食双星是验证恒星演化理论的理想实验室。
- **距离标定与宇宙学应用：**当我们充分了解食双星系统的参数后，其绝对光度可以通过恒星半径和有效温度计算得到。这使一些食双星成为**测距标杆**：比较绝对光度和视星等可独立推算距离。特别是造父变星所在的食双星或其它标准烛光，如果用模拟精准拟合其光变曲线，就能校准天文距离尺度，对宇宙学研究意义重大。此外，双星互食光变还可用于探测恒星自转及形变（如椭圆变光）现象，以及第三天体通过食时序变化（O-C曲线）露出的存在。

**参考文献：**Russell 和 Shapley 等人在20世纪初就阐明了利用食双星测量恒星尺度的方法，其思想沿用至今<sup>34</sup>。近期如Schmutz (2024)对一对质量约2.5  $M_{\odot}$ 的食双星HD 214220的分析，精确拟合了TESS光变曲线，得到两星半径之和约8.5  $R_{\odot}$ ，并确认主星已演化至核心氢燃尽阶段<sup>36</sup>。该研究强调了食双星光变结合Gaia卫星数据可提供前所未有的恒星参数精度<sup>34</sup>。总之，食双星互掩模拟在恒星物理中扮演着不可或缺的角色。

## 8. 凌星观测能力评估模拟

**模拟现象：**本场景通过设置不同观测噪声水平，评估望远镜对凌星的探测能力。具体而言，可模拟在给定行星凌日参数下，不同仪器精度对光变信号提取的影响。例如，模拟一个地球大小行星绕G型恒星的凌日，分别叠加空间望远镜典型噪声（如50 ppm）和地面望远镜噪声（如1000 ppm），比较凌日信号是否可辨。通过系统改变噪声参数，我们可以找到探测特定大小行星凌日所需的最低信噪比条件，从而**评估各类望远镜的探测阈值**。

**参数示例及范围：**

参数	示例值	合理范围
半长轴 (AU)	1.00	0.01–1.0（依行星周期而定）
轨道偏心率	0.00	0–0.5（各类行星情况）
轨道倾角 (°)	90.0	85–90（需发生凌日）
恒星质量 ( $M_{\odot}$ )	1.0	0.1–1.5（视目标星类型）
半径比 ( $R_p/R_*$ )	0.009	0.001–0.1（从火星到海王星大小）
观测噪声 (ppm)	500 (示例)	10–1000（空间/地面典型噪声）

**科学解析：**通过这一噪声参数扫描模拟，可以为不同观测平台的凌星探测能力给出定量评估。**主要探讨的问题包括：**

- **探测阈值：**模拟可确定在不同噪声水平下，**可检测的最小凌日深度**。例如，在500 ppm噪声下，要求凌日深度显著大于500 ppm才能可靠识别，这相当于行星半径至少约恒星的2-3%（如海王星大小绕太阳型恒星）才能被地面小望远镜检测。而空间望远镜如开普勒噪声约20-50 ppm，则有能力发现凌日深度只有几十ppm的行星（地球大小绕亮星）。这一模拟能够绘制“行星半径-望远镜噪声”探测极限曲线，指引未来仪器的设计要求。例如，为探测太阳系类地行星的凌日，观测系统需达到<50 ppm的噪声水平并持续观测多个凌日周期。
- **多次凌日累积：**模拟还可评估通过多次观测累积信号提高信噪比的效果。如果单次凌日信号低于噪声，但行星周期短、凌日频繁，叠加多次观测可以显著提升探测概率。开普勒任务即通过对数百上千颗恒星长达4年的连续监测，累积出了多个仅百ppm量级的小行星凌日<sup>3</sup>。模拟可量化需要多少次凌日才能达到检测阈值，从而帮助制定观测策略（例如TESS需对同一恒星反复观测以发现小行星）。
- **不同望远镜性能比较：**通过设定不同的噪声水平，模拟可以直接比较空间与地面、不同口径望远镜的凌日探测能力。例如，Next Generation Transit Survey (NGTS)由多台小口径望远镜组成，通过同时观测提高信噪，比单镜头降低噪声约 $\sqrt{N}$ 倍<sup>37 38</sup>。实测显示，NGTS单台在30分钟尺度可达~400 ppm精度，多台合成后可优于100 ppm，已与TESS探测性能相当<sup>39</sup>。此类结果可通过模拟再现，以验证仪器性能。再如，开普勒空间望远镜对12等恒星的6小时CDPP约为20-30 ppm，远优于典型地面望远镜的数百ppm级，从模拟中可以清晰看出这种差异。这样的比较帮助确定哪些科学目标必须依赖空间观测，哪些可以由地面项目完成，从而优化资源配置。

**参考文献：**开普勒任务设计目标就是要达到约20 ppm的光度精度，以探测地球凌日84 ppm的信号。实际运行中，Kepler对明亮恒星实现了<10 ppm的极高精度，成功发现数千颗小行星<sup>40</sup>。TESS卫星由于像元较大和星等较亮目标，其单次测光噪声略高，但对于G<10等的恒星仍可达几十ppm量级，能探测2-3倍地球大小行星。另一方面，地面项目不断改进，例如多镜联合的NGTS已经在30分钟积分下实现了~100 ppm的精度，与TESS相媲美<sup>39</sup>。这些进展都可以通过模拟噪声对凌日信号影响得到直观体现，证明了提高测光精度对系外行星探测的关键作用。



- 1 **Kepler Press Kit**  
[https://www.jpl.nasa.gov/news/press\\_kits/Kepler-presskit-2-19-smfile.pdf](https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/Kepler-presskit-2-19-smfile.pdf)
- 2 12 13 **A brief history of the TRAPPIST-1 system | Université de Liège**  
<https://popups.uliege.be/0037-9565/index.php?id=10277>
- 3 **Kepler Mission - Hunting for Exoplanets - eoPortal**  
<https://www.eoportal.org/satellite-missions/kepler>
- 4 5 6 7 8 **The Transiting Exoplanets HD 209458 and TrES-1 | aavso**  
[https://www.aavso.org/vsots\\_exoplanets](https://www.aavso.org/vsots_exoplanets)
- 9 10 14 **Pinning Down Properties of TRAPPIST-1 - AAS Nova**  
<https://aasnova.org/2018/01/29/pinning-down-properties-of-trappist-1/>
- 11 **TEPCat: TRAPPIST-1e**  
<https://www.astro.keele.ac.uk/jkt/tepcat/planets/TRAPPIST-1e.html>
- 15 **NASA Missions Spy First Possible ‘Survivor’ Planet Hugging White Dwarf Star - NASA**  
<https://www.nasa.gov/news-release/nasa-missions-spy-first-possible-survivor-planet-hugging-white-dwarf-star/>
- 16 **Transit Surveys for Earths in the Habitable Zones of White Dwarfs**  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011ApJ...731L..31A>
- 17 **TEPCat: WD 1856+534**  
[https://www.astro.keele.ac.uk/jkt/tepcat/planets/WD\\_1856+534.html](https://www.astro.keele.ac.uk/jkt/tepcat/planets/WD_1856+534.html)
- 18 **Bad Astronomy | First intact planet found orbiting a white dwarf - SYFY**  
<https://www.syfy.com/syfy-wire/astronomers-find-the-first-intact-planet-orbiting-a-white-dwarf-and-its-far-bigger-than>
- 19 20 21 **A giant planet candidate transiting a white dwarf | Nature**  
[https://www.nature.com/articles/s41586-020-2713-y?error=cookies\\_not\\_supported&code=bd5a62a8-29d3-41c7-b585-34e6e46dd88b](https://www.nature.com/articles/s41586-020-2713-y?error=cookies_not_supported&code=bd5a62a8-29d3-41c7-b585-34e6e46dd88b)
- 22 **Figure 3 from Transit Surveys for Earths in the Habitable Zones of White Dwarfs**  
<https://www.astroexplorer.org/details/apjl387122f3>
- 23 **Detecting Transiting Planets Around White Dwarfs | astrobit**  
<https://astrobit.org/2011/03/16/detecting-transiting-planets-around-white-dwarfs/>
- 24 **HD 80606 b | Exo.MAST**  
[https://exo.mast.stsci.edu/exomast\\_planet.html?planet=HD80606b](https://exo.mast.stsci.edu/exomast_planet.html?planet=HD80606b)
- 25 **HD 80606 b - Wikipedia**  
[https://en.wikipedia.org/wiki/HD\\_80606\\_b](https://en.wikipedia.org/wiki/HD_80606_b)
- 26 27 29 **Observation of the full 12-hour-long transit of the exoplanet HD 80606b - Warm-Spitzer photometry and SOPHIE spectroscopy | Astronomy & Astrophysics (A&A)**  
[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2010/08/aa14327-10/aa14327-10.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2010/08/aa14327-10/aa14327-10.html)
- 28 **Utilizing a Global Network of Telescopes to Update the Ephemeris ...**  
<http://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022AJ....164..178P/abstract>
- 30 31 **Kepler-447b: a hot-Jupiter with an extremely grazing transit | Astronomy & Astrophysics (A&A)**  
<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2015/05/aa25428-14/aa25428-14.html>
- 32 **Eclipsing Binaries | Planet Hunters**  
<https://blog.planethunters.org/2010/12/21/eclipsing-binaries/>

33 34 35 36 HD 214220 (BD+56 2813): An eclipsing binary with its primary component at the end of the main sequence | Astronomy & Astrophysics (A&A)

[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2024/01/aa47810-23/aa47810-23.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2024/01/aa47810-23/aa47810-23.html)

37 38 39 [discovery.ucl.ac.uk](https://discovery.ucl.ac.uk)

<https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10191993/1/121911A.pdf>

40 Best\*. Photometry. Ever. I: The Problem | AstroWright

<https://sites.psu.edu/astrowright/2014/04/18/best-photometry-ever-i-the-problem/>