日本天文学会刊物，2026年，**00**，1–9 doi:
10.1093/pasj/xxx000 提前在线发表日期:

arXiv:2611.31928v1 [astro-ph.SR] 24 Nov 2026

食双星 γ 天琴座恒星猎犬座VZ

JaeWoo LEE[1,*]

[1]韩国天文与空间科学研究院，大田34055，大韩民国
*电子邮箱：jwlee@kasi.re.kr

ORCID：0000-0002-5739-9804

摘要

我们结合已发表的光谱观测结果，利用凌日系外行星巡天卫星第50和第77扇区的测光数据，对食双星 VZ CVn 进行了详细分析。我们对 TESS 光变曲线进行了建模，以改进双星参数，并分析残差光变曲线以研究该系统的脉动性质。我们推导出主星的质量和半径分别为 $M_{\rm A} = 1.526 \pm 0.005\ M_{\odot}$ 和 $R_{\rm A} = 1.638 \pm 0.023\ R_{\odot}$，伴星的质量和半径分别为 $M_{\rm B} = 1.259 \pm 0.005\ M_{\odot}$ 和 $R_{\rm B} = 1.133 \pm 0.016\ R_{\odot}$。与 PARSEC演化模型的比较表明，该系统的金属丰度接近太阳金属丰度，为 $Z = 0.017$，年龄为 1.0 十亿年。对两个 TESS 扇区分别进行频率分析，发现了四个信号，其中可能有信号在两个扇区中均存在对应成分。其中两个频率 $f_2 = 4.7486$ 天$^{-1}$ 和 $f_6 = 7.1242$ 天$^{-1}$ 分别与第四和第六轨道谐波一致，这表明它们可能源于轨道，而不是独立的 δ Sct 脉动。主导频率 $f_1 = 1.7577$ 天$^{-1}$ 的脉动常数为 $Q_1 = 0.336$ 天，与 γ Dor 型 g 模脉动一致。较弱的信号 $f_5 = 1.9754$ 天$^{-1}$ 的脉动常数也为 $Q_5 = 0.299$ 天，但由于其信噪比较低，对该信号的探测仍属暂定性质。结合主星的物理性质和演化性质，这些结果支持将其归类为 γ Dor 脉动星，而不是此前提出的 γ Dor–δ Sct 混合脉动星。

关键词： 星震学 — 双星：食双星 — 恒星：基本参数 — 恒星：个体（猎犬座VZ）— 恒星：振荡（包括脉动）

1 引言

食双星（EB）系统中的脉动恒星，使得人们能够结合独立测定的恒星参数来研究其脉动性质。特别是，通过食现象和双线光谱双星测得的精确质量和半径，为脉动组分的结构和演化状态提供了有力约束。这些独立测定的参数还有助于检验脉动模型，并确定所观测振荡的性质。因此，包含脉动组分的食双星在恒星脉动和演化研究中受到了广泛关注（例如，Murphy 2018年；Southworth 与 Bowman 2026年）。

尽管在食双星中发现的脉动恒星数量不断增加，但随着观测数据的改进，一些系统的脉动性质仍不确定，或者可能需要重新审视。特别是，高精度空间测光使人们能够探测到此前未分辨的脉动信号，并重新评估早期分类。例如，GK Dra 长期以来一直被认为表现出 δ Sct 脉动，但对凌日系外行星巡天卫星测光数据的分析发现了额外的低频信号，这些信号可归因于γ Dor 脉动，表明该系统同时存在 δ Sct 和 γ Dor 脉动（Southworth 2024年）。类似地，此前被认为是 γ Dor 候选体的 V421 Peg 主星，最近利用凌日系外行星巡天卫星测光被确认是一颗 γ Dor 脉动星（Lee 2025年）。这些例子说明，详细的频率分析对于确定食双星的脉动特性至关重要。

VZ CVn（TIC 368129261、TYC 2003-780-1、HIP 66017、Gaia DR3 1449817995186764288）是一颗明亮的双线食双星，轨道周期约为 0.84 天。其变光现象由 Strohmeier & Knigge（1960）发现，随后该系统被 Strohmeier 等人（1962）归类为 β Lyr 型食双星。Harris（1968）、Ibano˘glu（1974）和 Cester 等人（1977）开展了早期测光观测和光变曲线分析。Popper（1988）首次获得光谱轨道，并将其与此前的测光结果结合，以确定两颗子星的物理性质，从而更准确地约束了 VZ CVn 的双星性质。 ˙Ibano˘glu 等人（2007）将新的双色测光与 Popper（1988）的径向速度（RV）结果相结合，并采用光谱质量比$q = 0.777$，得出了两颗子星修订后的绝对参数。之后，Pribulla 等（2009）利用 DDO观测获得了新的双线光谱轨道，得出了更精确的质量比 $q = 0.8252 \pm 0.0019$。Latkovi´c（2012）利用这些光谱结果分析了超过 14,000 次 WASP测量，进一步改进了该系统的测光参数和物理参数。

除食变之外，VZ CVn 早已被发现具有本征光变。Ibano˘glu（1974）报告了振幅约为0.05星等的光变，但无法将其归因于食现象或其他双星效应。随后， ˙Ibano˘glu 等人（2007）对这种变异的脉动性质进行了研究；他们从光变曲线中去除食效应和近邻效应后，提取出0.93566 天$^{-1}$ 的主频（对应周期为1.06876天）。根据这一周期、脉动常数以及主星在赫罗图（H-R图）中的位置，他们将主星确定为强候选 γ Dor型脉动星。Latkovi´c（2012）也在WASP残差中寻找脉动变异，并探测到0.9659和1.7101 天$^{-1}$的信号，但由于存在强烈的日混叠，其显著性被认为存疑。最近，Geldi & Sipahi（2025）分析了地基和TESS测光，并报告了四个频率，来自

收稿：，**接收：**© 2026年。日本天文学会。

他们的脉动分析。他们将其中两个频率解释为 γ Dor型脉动，另外两个解释为 δ Sct型脉动，从而将主星归类为 γ Dor–δ Sct混合脉动星。如今，针对VZ CVn已有时间分辨率更高的TESS第77扇区观测，这一分类有必要利用这些数据进行进一步检验；这些观测也能够用于搜寻其他高频脉动信号。在本研究中，我们将TESS第50和第77扇区测光与Pribulla 等（2009）的光谱观测结果结合起来，以改进对VZ CVn双星性质的确定，并重新检验其主星的脉动性质。

2 凌日系外行星巡天卫星测光与食时

VZ CVn 曾由凌日系外行星巡天卫星（Ricker 等，2015）在第 23、50 和 77 扇区（S23、S50 和 S77）进行观测，采样 cadence 分别为 1800 秒、600 秒和 200 秒。采样频率更高的 S50 和 S77 观测数据用于主要的双星和脉动分析，同时也检查了 S23 数据，以独立验证所探测到的频率。凌日系外行星巡天卫星数据从 MAST 门户下载[1]。我们使用 SAP_FLUX 数据，并应用 Lee 等（2024）所述的去趋势和归一化处理流程。每个扇区均在内部数据间隙处划分为两个片段，并分别对每个片段的食外部分拟合二次多项式。随后，以 TESS 输入星表（TIC）v8.2（Paegert 等，2022）中的凌日系外行星巡天卫星星等 $T_{\rm p} = 8.903$ 作为最大光时的基准，将归一化通量转换为星等。所得的 S50 和 S77 光变曲线分别以儒略日（BJD）和轨道相位为横坐标，显示于图 1 的第一和第二面板中。如图所示，S77 观测包含一个较大的数据间隙，这是由于数据下行传输中断以及随后航天器进入安全保持模式所致，相关情况见 TESS S77 数据发布说明（DRN 108）[2]。

使用 Kwee & Van Woerden（1956）的方法，从处理后的 S50 和 S77 光变曲线中测量了食时。测得的食时及其不确定度分别列于表1的第一列和第二列，而食类型列于第五列。为获得适用于凌日系外行星巡天卫星观测数据相位折算的历表，对食时测量值进行了线性拟合。所得历表为

$$C = \mathrm{BJD}\ 2460396.20693(14) + 0.84246160(21)E, \quad (1)$$

其中，E 表示周期数。利用该历表计算得到的历元和 $O-C$ 残差分别列于表1的第三列和第四列。

3 双星建模与绝对参数

我们采用 Wilson–Devinney（W-D）代码（Wilson & Devinney 1971；Kallrath 2022），以与此前研究分离食双星相同的方式，分析了 VZ CVn 的 S50 和 S77 凌日系外行星巡天卫星光变曲线（例如 Lee 2025）。凌日系外行星巡天卫星光变曲线的形态及此前的研究表明，VZ CVn 是一颗分离双星，因此分析采用 W-D代码的模式 2。尽管 Popper（1988）曾获得较早的光谱轨道，我们采用了 Pribulla 等（2009）基于 DDO观测并使用展宽函数技术得出的较新视向速度解。

[1] https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html[2] https://archive.stsci.edu/tess/tess_drn.html

其视向速度半振幅分别为 $K_{\rm A} = 141.51 \pm 0.26\,\mathrm{km\ s^{-1}}$ 和 $K_{\rm B} = 171.48 \pm 0.25\,\mathrm{km\ s^{-1}}$，由此得到的光谱质量比为 $q = K_{\rm A}/K_{\rm B} = 0.8252 \pm 0.0019$，并用于我们的双星建模。

Pribulla 等（2009）根据分类光谱将 VZ CVn 归类为 F0V。尽管该光谱型指的是双星系统的合成光谱，但在此前的光变曲线分析中发现，主星约贡献了 V 波段总光的 80 %（˙Ibanoˇglu 等人 2007；Geldi & Sipahi 2025）。因此，预计 F0V 分类能够代表主星分量。根据 Pecaut & Mamajek（2013）的光谱型—有效温度标定，F0V 对应于 $T_{\rm eff} = 7220$ 开尔文。由于 Pribulla 等（2009）未给出光谱分类的不确定度，我们假定光谱亚型的不确定度为一个，对应于同一标定中 F0V 附近约 200 开尔文的不确定度。因此，我们为主星采用了 $T_{\rm eff,A} = 7220 \pm 200$ 开尔文。该数值在约 1σ 水平上也与 $T_{\rm eff,A} = 7000 \pm 24$ 开尔文相一致；后者由 ˙Ibanoˇglu 等人（2007）根据 $B-V$色指数独立估算得到。

采用了对数型边缘昏暗定律，系数由 W-D代码中提供的 Van Hamme (1993) 表格插值得到。主星的玻尔ometric反照率和重力昏暗指数固定为标准值 $A_{\rm A} = 1.0$ 和 $g_{\rm A} = 1.0$，次星的相应参数固定为 $A_{\rm B} = 0.5$ 和 $g_{\rm B} = 0.32$。通过设置 $F_{\rm A} = F_{\rm B} = 1.0$，假定两个组分均进行同步自转。

可调参数包括轨道历表（T_0、$P_{\rm orb}$）、轨道倾角（i）、次星温度（$T_{\rm eff,\ B}$）、无量纲势（$\Omega_{\rm A}$、$\Omega_{\rm B}$）以及主星光度（$L_{\rm A}$）。这些参数通过 W-D代码的微分修正程序进行迭代调整。在拟合过程中，我们还测试了允许轨道偏心率（e）和第三光（l_3）的解，但这两个参数均未得到统计上显著的非零值。因此，在最终的双星解中，我们采用了圆轨道（$e = 0$），且不包含第三光贡献（$l_3 = 0$）。S50 和 S77 光变曲线分别单独分析，并作为一个合并数据集进行分析。由于单独解在其不确定度范围内彼此一致，因此采用了合并解，并将其列于表2中。在估算拟合双星参数的误差时，同时考虑了质量比和主星有效温度的不确定度。遵循 Southworth & Bowman (2022) 的方法，我们通过在不同建模假设下探索其他 W-D 解来评估参数不确定度。

我们通过双星模型拟合得到的光变曲线参数与 Pribulla 等（2009）的视向速度半振幅 $K_{\rm A}$ and $K_{\rm B}$相结合，以确定 VZ CVn 的绝对参数。这些量汇总于表2下半部分。两个组分的玻尔修正（BC）根据其有效温度，采用 Flower（1996）的标定关系以及 Torres（2010）提供的修正值计算得到。利用视星等 $V = 9.24 \pm 0.03$ 和色 excess $E(B-V) = 0.014 \pm 0.003$，通过距离模数确定 VZ CVn 的距离；星际消光估计为 $A_V = 3.1E(B-V)$。V和 $E(B-V)$的数值取自 TIC v8.2（Paegert 等，2022）。基于食双星得到的距离为 229 ± 13 秒差距，与根据 Gaia DR3 视差推得的距离 227.1 ± 0.8 秒差距（$\pi = 4.404 \pm 0.016$ 毫角秒；Gaia 合作组等，2023）高度一致。

为研究 VZ CVn 的演化状态，我们将两个组分的观测性质与 PARSEC

v1.2S恒星演化模型（Bressan 等（2012））进行了比较。图 2 展示了质量接近这两个组分的演化轨迹，以及年龄分别为 0.8、1.0 和 1.2 十亿年的等时线。两个组分的观测位置总体上与金属丰度接近太阳金属丰度（ $Z = 0.017$）且年龄约为 1.0 十亿年的模型相符。主星似乎已经演化离开零龄主序，而伴星仍相对接近零龄主序。

4 脉动分析

图1第三和第四个面板中显示的随轨道相位变化的残差光变曲线，以及图3所示的时间序列残差，揭示出明显的脉动变化，其峰峰值振幅约达40毫厘磁。为尽量减小食现象对脉动信号的影响，频率分析仅使用轨道相位为0.085–0.415和0.585–0.915范围内的食外残差。分析采用PERIOD04程序（Lenz和Breger（2005））进行，频率范围覆盖各数据集的奈奎斯特极限（Lee等（2014））。

由于两个扇区相隔约两年，因此分别对凌日系外行星巡天卫星S50和S77的残差光变曲线独立进行频率分析。残差数据的时间跨度分别为S50的20.60天和S77的28.06天，对应的形式瑞利频率分辨率分别为$R_{\rm S50} = 0.0485$ 天$^{-1}$ 和 $R_{\rm S77} = 0.0356$ 天$^{-1}$。根据Loumos和Deeming（1978），我们采用 $1.5R$ 作为频率分辨率的实用判据。在两个扇区中均检测到的信号，若其频率差在该判据范围内，则视为可能的对应信号。鉴于S77具有更长的时间跨度和更高的采样 cadence，因此采用S77的频率作为代表值，而振幅和相位则分别针对两个扇区确定。

以 S/N > 4.0 作为提取候选频率的阈值，以便与Geldi和Sipahi（2025）的结果进行比较，我们在每个扇区中识别出六个频率。然而，Baran和Koen（2021）表明，对于凌日系外行星巡天卫星测光而言，根据观测采样 cadence和数据覆盖情况，采用更高的 S/N ~ 5 检测阈值可能更为合适。因此，我们将 S/N 低于约5的候选频率视为暂定检测结果。图4展示了S77和S50数据的振幅谱，以及对六个S77频率进行预白化后的残余谱。S77中检测到的频率按其检测顺序列于表3，并标记为 f_1至 f_6。除图4所示频率范围外，未检测到其他显著频率。

仅在S50中检测到的另一个频率标记为f_7。四个频率 f_1、f_2、 f_5和 f_6在两个扇区中都有可能的对应频率。S50和S77中的 f_1 和 f_5 频率差异超过其形式不确定度，且 f_1 的振幅在两个扇区之间也有所变化。这些差异的起源仍不确定，信号之间的对应关系并不一定意味着它们具有相同的脉动模态。然而，主导频率 f_1 在两个扇区中都处于 γ Dor频率域内。

S77 频率 f_3在 S50 中未被检测到，它接近组合频率 $f_1 - f_{\rm orb}$，二者相差 0.0585 天$^{-1}$，表明两者可能存在关联。在两个扇区中都检测到了标记为 f_4 的信号，不过其频率 $f_{\rm S77} = 1.2741$ 天$^{-1}$ 和 $f_{\rm S50} = 1.2008$ 天$^{-1}$相差 0.0733 天$^{-1}$。这一差值略微超过 $1.5R_{\rm S50}$，因此我们认为这两个 f_4 信号之间的关联仍属暂定。对于 S77， f_4 与 $f_1 - f_3$ 之间的频率差为 0.0286 天$^{-1}$，小于所采用的分辨率判据。相比之下，S50 的频率 f_4 接近轨道频率，差值仅为 0.0138 天$^{-1}$，这表明两个 f_4 信号可能具有不同的起源。Geldi & Sipahi (2025) 报告了通过分析凌日系外行星巡天卫星数据得到的四个频率，分别为 1.71273 天$^{-1}$、4.74934 天$^{-1}$、1.937549 天$^{-1}$和 7.120613 天$^{-1}$ 。这些频率可分别与我们的 f_1、 f_2、 f_5和 f_6相关联。特别是， f_2 和 f_6的频率分别接近第四和第六轨道谐波，与其结果吻合良好。在我们的分析中，仅使用了食外残差，而先前研究对食相的处理并未明确说明。数据选择或频率分析程序的差异可能在一定程度上解释了两项研究之间的差异。

尽管与轨道谐波重合的频率也可能源于潮汐激发或受扰动的脉动，但通常认为，这类振荡在圆轨道双星中的显著程度低于偏心系统。图4所示的谱窗函数在轨道频率的偶数倍处呈现出结构，这反映了两次食现象受到的周期性掩蔽。这些发现支持将 f_2 和 f_6分别关联到 $4f_{\rm orb}$ 和 $6f_{\rm orb}$，并将其视为轨道变异，而非独立的 δ Sct脉动。

为进行独立比较，我们还使用本研究推导的双星参数分析了凌日系外行星巡天卫星S23观测数据。对食外残差进行频率分析后，在1.9380、1.7090和1.8051天$^{-1}$处发现了三个信号，信噪比为 > 5 。前两个频率分别接近S50和S77中识别为 f_5 和 f_1的频率。相比之下，在S23中未检测到与 f_2 和 f_6 对应的显著信号；这两个信号分别接近 $4f_{\rm orb}$ 和 $6f_{\rm orb}$。S23 残差数据覆盖24.60天，对应的形式瑞利频率分辨率为 $R_{\rm S23} = 0.0407$ 天$^{-1}$。

5 总结与讨论

我们结合凌日系外行星巡天卫星 S50 和 S77 的测光数据以及 Pribulla 等（2009）的光谱观测结果，对 VZ CVn 进行了研究。我们利用凌日系外行星巡天卫星光变曲线改进了双星参数，并研究了其主星的脉动特性。本研究的主要结果总结如下。

1. 采用光谱质量比 $q = 0.8252 \pm 0.0019$ 以及根据其 F0V 光谱型估计的主星有效温度 $T_{\rm eff,\ A} = 7220 \pm 200$ K，我们使用 W-D代码对凌日系外行星巡天卫星测光数据进行了建模。由 S50 和 S77 独立获得的解在不确定度范围内相互一致，因此采用联合解确定该系统的绝对参数。所得质量和半径分别为 $M_{\rm A} = 1.526 \pm 0.005$ $M_\odot$ $M_{\rm B} = 1.259 \pm 0.005$ $M_\odot$ $R_{\rm A} = 1.638 \pm 0.023$ $R_\odot$ 、 、 、 和 $R_{\rm B} = 1.133 \pm 0.016$ $R_\odot$。 229 ± 13 秒差距的食双星测距与 Gaia DR3 给出的 227.1 ± 0.8 秒差距距离高度一致。与 PARSEC v1.2S 模型的比较表明，该系统的金属丰度接近太阳金属丰度 $Z = 0.017$，年龄约为 1.0 十亿年。

2. 对 S50 和 S77 食外残差进行独立的频率分析后，在每个扇区中均发现了六个信噪比为 > 4.0 的候选频率。其中， f_1、 f_2、 f_5 和 f_6 在两个扇区中都有

可能的对应信号。对于这些信号，采用 S77 的频率作为代表值。其余信号包括 f_3，可能与 $f_1 - f_{\rm orb}$ 相关，以及 S77 信号 f_4，可能与 $f_1 - f_3$ 相关。S50 信号 f_4 接近轨道频率，而 f_7 仅在 S50 中被检测到。

3. Geldi & Sipahi (2025) 将其第一（1.713 天$^{-1}$）和第三（1.938 天$^{-1}$）频率解释为 γ Dor 脉动，将其第二（4.749 天$^{-1}$）和第四（7.121 天$^{-1}$）频率解释为δ Sct 脉动，并因此将 VZ CVn 主星归类为 γ Dor–δ Sct 混合脉动星。然而，我们的分析表明， f_2 和 f_6 分别与 $4f_{\rm orb}$ 和 $6f_{\rm orb}$一致。因此，这些信号更可能与轨道谐波有关，而不是独立的 δ Sct 脉动。主导频率 f_1 位于 γ Dor 频率域内，其脉动常数为 $Q_1 = 0.336$ 天，符合γ Dor 型 g 模脉动（$f \lesssim 4$ 天$^{-1}$ 和 $Q > 0.23$ 天；Handler & Shobbrook 2002；Uytterhoeven et al. 2011）。在两个观测扇区中均检测到的较弱信号 f_5也位于该频率域内，其脉动常数为 $Q_5 = 0.299$ 天，但由于其信噪比较低，当前检测仍属暂定。因此，我们得出结论：VZ CVn 的主星最好归类为 γ Dor 脉动星，没有令人信服的证据表明存在独立的 δ Sct 脉动。

作为一颗包含 a γ Dor 脉动星的食双星，VZ CVn 为研究恒星脉动提供了一个机会，其基本参数可通过独立方式加以约束。我们的研究结果还凸显了在研究近距离双星系统中的恒星脉动时，仔细解读轨道谐波处信号的重要性。

致谢

我们感谢匿名审稿人认真审阅稿件并提出建设性意见，帮助我们改进了本文。本文使用了公开的凌日系外行星巡天卫星（TESS）测光数据和由法国斯特拉斯堡 CDS 运营的 SIMBAD 数据库。我们衷心感谢 KASI 项目 2026-1-904-01 的支持。

参考文献

Baran, A. S., & Koen, C. 2021, AcA, 71, 113 Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., 等. 2012, MNRAS, 427, 127 Cester, B., Mardirossian, F., & Pucillo, M. 1977, 《天文学与天体物理学》, 56, 75 Flower, P. J. 1996, 《天体物理学杂志》, 469, 355 Gaia 合作组, Vallenari A., Brown A. G. A., 等. 2023, 《天文学与天体物理学》, 674, A1 Geldi, M., & Sipahi, E. 2025, TJAA, 6, 430 Handler, G., & Shobbrook, R. R. 2002, MNRAS, 333, 251 Harris, A. J. 1968, 《天文学杂志》, 73, 164 Ibanoˇglu, C. 1974, 13 119 A&AS, , Ibanoˇglu, C., Tas, G., Sipahi, E., & Evren, S. 2007, MNRAS, 376, 573 Kallinger, T., Reegen, P., & Weiss, W. W. 2008, 《天文学与天体物理学》, 481, 571 Kallrath, J. 2022, Galaxies, 10, 17 Kwee, K. K., & Van Woerden, H. 1956, Bull. Astron. Inst. Netherlands, 12, 327 Latkovi´c, O. 2012, Serb. Astron. J., 184, 77 Lee, J. W. 2025, PASJ, 77, 1365 Lee, J. W., Hong, K., Jeong, M.-J., & Wolf, M. 2024, 《天体物理学杂志》, 973, 113 Lee, J.W., Kim, S.-L., Hong, K., Lee, C.-U., &Koo, J.-R.2014, 《天文学杂志》,148, 37 Lenz, P., & Breger, M. 2005, Comm. Asteroseismology, 146, 53 Loumos, G. L., & Deeming, T. J. 1978, Ap&SS, 56, 285 Murphy, S. J. 2018, 预印本（arXiv:1811.12659）

Paegert, M., Stassun, K. G., Collins, K. A., 等. 2022, VizieR在线数据目录, IV/39 Pecaut, M. J., & Mamajek, E. E. 2013, 《天体物理学杂志增刊》, 208, 9 Popper, D. M. 1988, 《天文学杂志》, 95, 190 Pribulla, T., Rucinski, S. M., DeBond, H., 等. 2009, 《天文学杂志》, 137, 3646 Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., 等. 2015, 《天文学与仪器、系统和应用杂志》, 1, 014003 Southworth, J. 2024, 《观测者》, 144, 24 Southworth, J., &Bowman, D. M., 2022, 《天文台》, 142, 161 Southworth, J., & Bowman, D. 2026年, 《天文学与天体物理学年度评论》, 64, 223 Strohmeier, W., &Knigge, R. 1960, Verff. Remeis-Sternwarte, No. 6 Strohmeier, W., Knigge, R., & Ott, H. 1962, Verff. Remeis-Sternwarte, No. 13 Torres, G. 2010, 《天文学杂志》, 140, 1158 Uytterhoeven, K., Moya, A., Grigahcéne, A., 等. 2011, 《天文学与天体物理学》, 534, A125 Van Hamme, W. 1993, 《天文学杂志》, 106, 209 Wilson, R. E., & Devinney, E. J. 1971, 《天体物理学杂志》, 166, 605

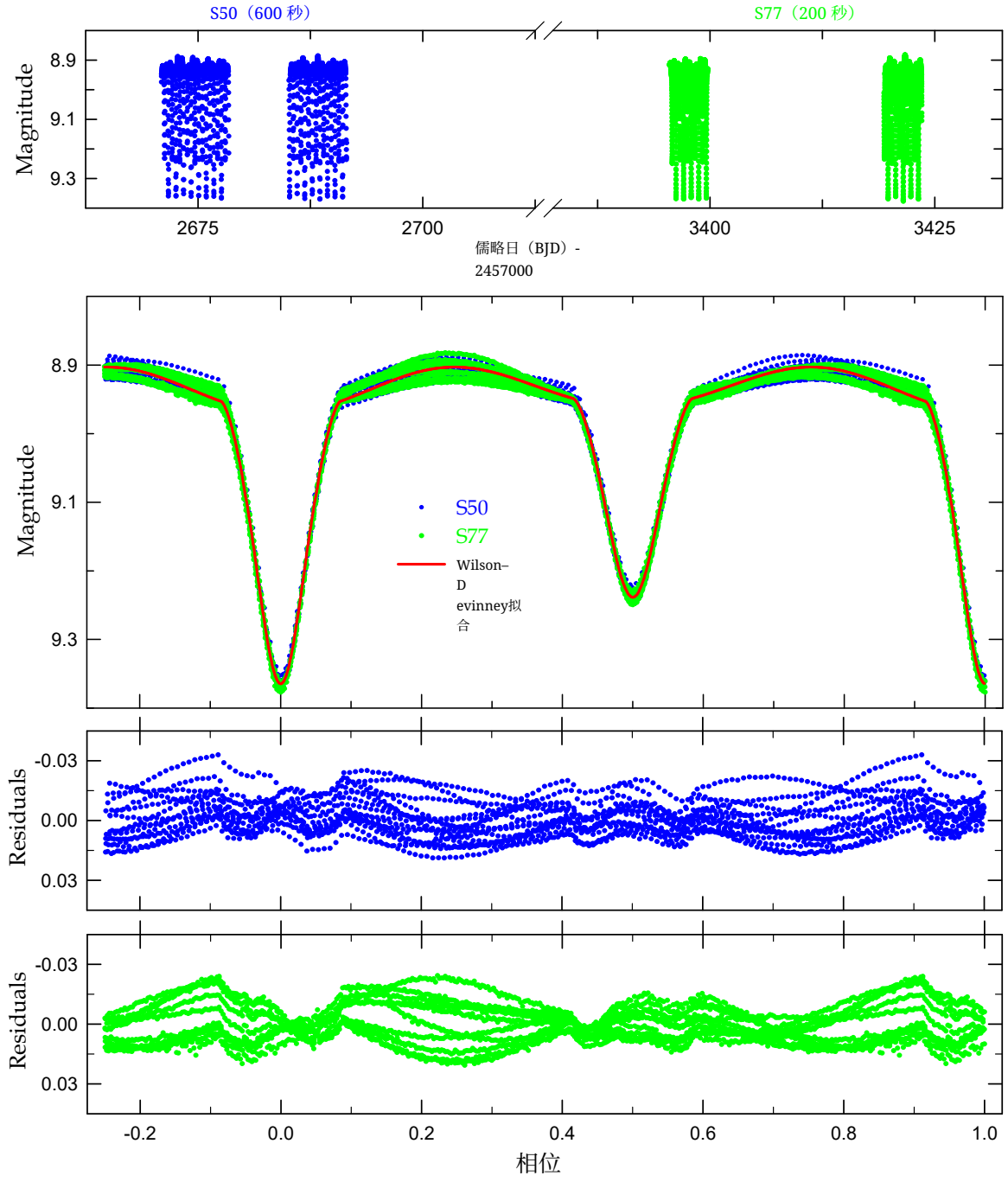

图1。 VZ CVn的凌日系外行星巡天卫星观测数据分别按儒略日（BJD）（上图）和轨道相位（第二图）分布。蓝色和绿色圆点分别表示第50和第77扇区中的单次测量值，红色实线表示通过我们的Wilson–Devinney拟合得到的合成模型。第三图和底图显示了双星模型对应的残差。替代文本：将第50和第77扇区的VZ CVn凌日系外行星巡天卫星光变曲线分别绘制为儒略日（BJD）和轨道相位的函数，并与合成双星模型进行对比。下方两图显示了减去模型后的残差。

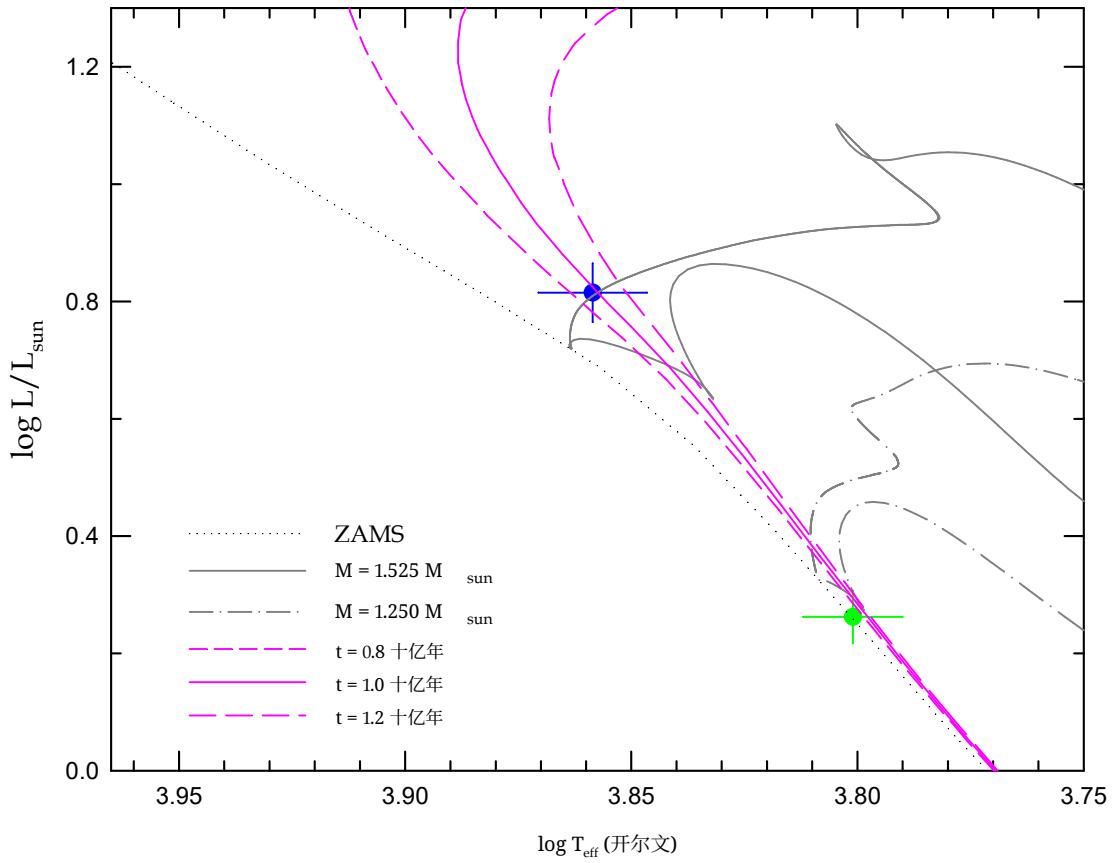

图2。 VZ CVn 的赫罗图。带误差棒的实心圆分别表示主星和次星。1.525 和 1.250 $M_{\odot}$ 的演化轨迹，以及年龄为 0.8、1.0 和 1.2 十亿年的等时线，基于 $Z = 0.017$ 的 PARSEC v1.2S 模型（Bressan 等（2012））。1.525 $M_{\odot}$ 的轨迹通过在 1.50 和 1.55 $M_{\odot}$ 模型之间进行插值得到。零龄主序以点线表示。替代文本：赫罗图显示了 VZ CVn 的主星和次星，并将其与 PARSEC 演化轨迹和等时线进行了比较。主星似乎已经演化离开零龄主序，而次星仍相对接近零龄主序。

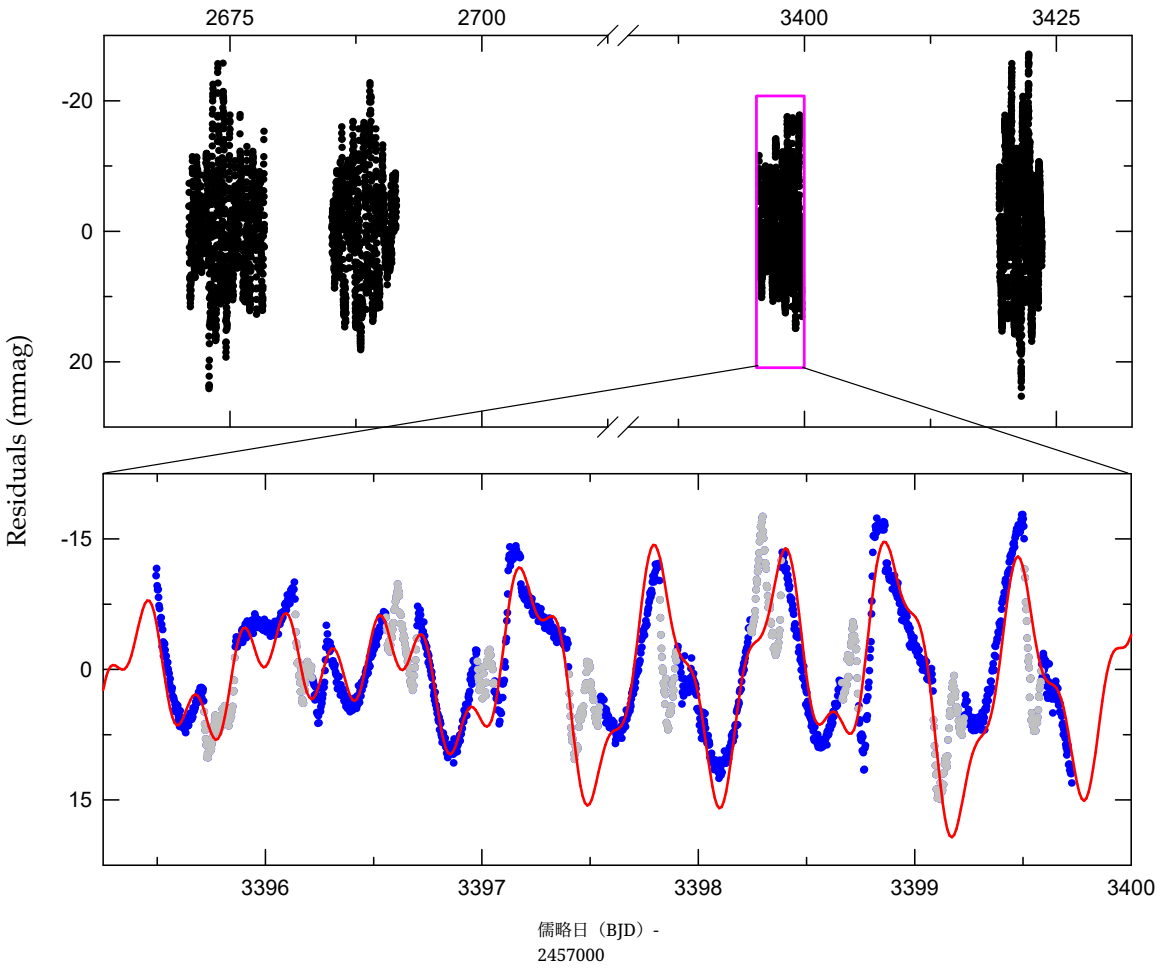

图3。 光变曲线残差随儒略日（BJD）的变化。下方面板显示上方面板中方框区域的放大视图。蓝色和灰色圆点分别表示食外和食内残差，红色实线表示对食外数据进行的多频拟合。

替代文本：VZ CVn 的光变曲线残差，显示食外和食内数据。下方放大面板显示相应的残差，以及根据食外数据得到的多频拟合。

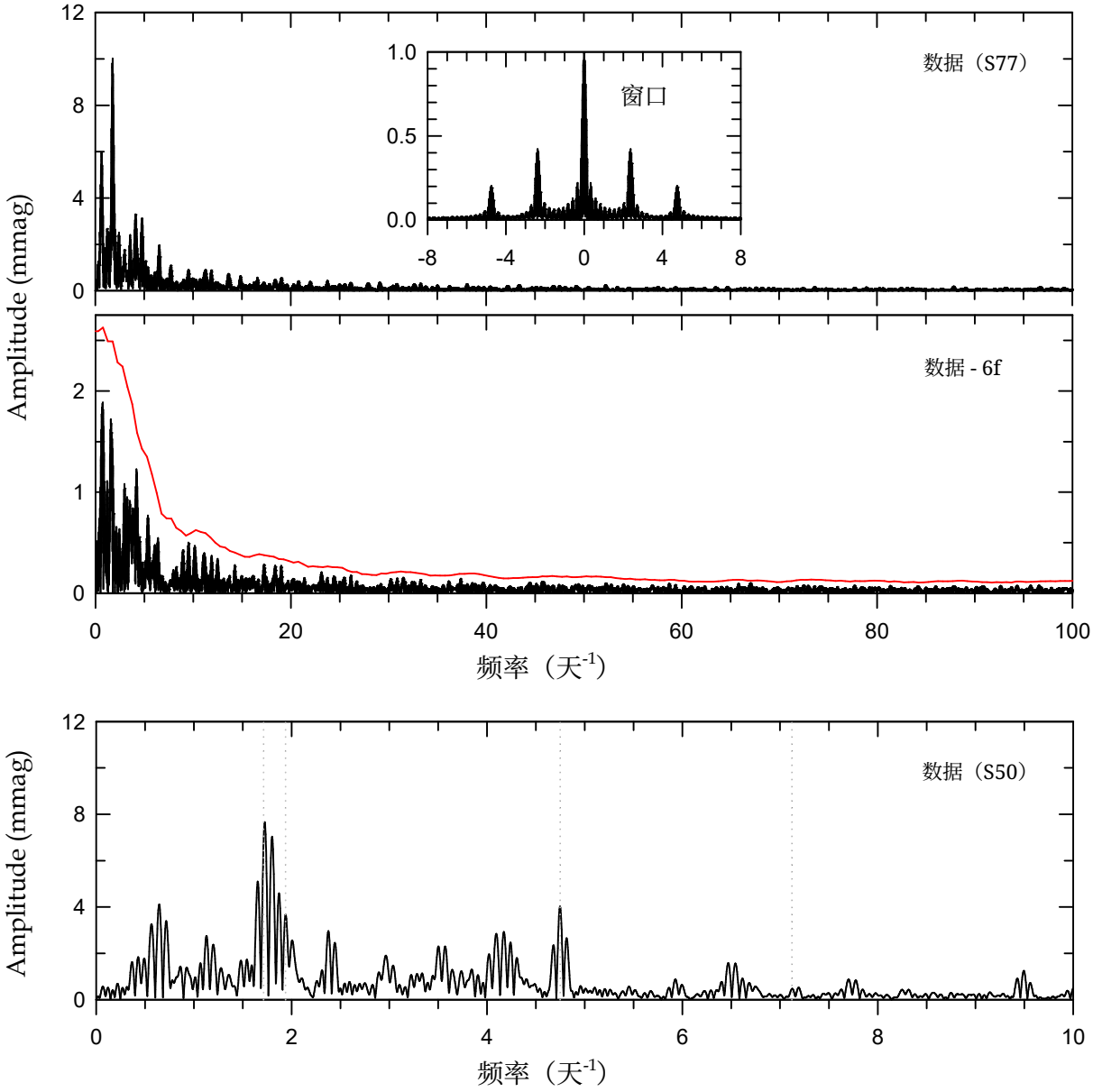

图4。食外凌日系外行星巡天卫星残差的 PERIOD04 周期图。顶部和中部面板分别显示 200 秒 S77 数据在预白化前以及使用检测到的六个频率进行预白化后的振幅谱。顶部面板中的插图显示 S77 数据的谱窗函数。中部面板中的红色实线表示噪声水平的四倍。底部面板显示 600 秒 S50 数据的振幅谱。垂直点线表示 Geldi & Sipahi (2025) 报告的四个频率。替代文本：VZ CVn 的凌日系外行星巡天卫星残差的 PERIOD04 振幅谱，展示 S77 数据在使用六个检测到的频率进行预白化前后的情况、插图中对应的谱窗函数，以及用于比较的 S50 数据。

表1. 凌日系外行星巡天卫星 VZ CVn 食时。

BJD	误差	E	O–C	Min
2,459,671.26832	±0.00006	−860.5	−0.00040	II
2,459,671.68977	±0.00001	−860.0	−0.00018	I
2,459,672.11089	±0.00007	−859.5	−0.00030	II
2,459,672.53163	±0.00008	−859.0	−0.00079	I
2,459,672.95420	±0.00011	−858.5	+0.00055	II
2,459,673.37662	±0.00021	−858.0	+0.00174	I
2,459,673.79552	±0.00015	−857.5	−0.00059	II
2,459,674.21620	±0.00017	−857.0	−0.00114	I
2,459,674.63871	±0.00005	−856.5	+0.00014	II
2,459,675.06071	±0.00014	−856.0	+0.00091	I

注：此表的完整内容以机器可读形式提供。此处仅展示部分内容，以说明其格式和内容。

表2. VZ CVn 的双星参数。

参数	主星（A）	伴星（B）
T_0 (儒略日（BJD）)	2,460,396.20691±0.00010	
$P_{\rm orb}$ (天)	0.84246161±0.00000014	
q	0.8252±0.0019	
i (度)	80.683±0.035	
$T_{\rm eff}$ (开尔文)	7220±200	6318±160
Ω	4.108±0.040	4.958±0.050
$\Omega_{\rm in}$†	3.460	
x, y	0.518, 0.277	0.567, 0.270
$l/(l_{\rm A}+l_{\rm B})$	0.7538±0.0018	0.2462
r (极点)	0.3014±0.0038	0.2120±0.0029
r (点)	0.3275±0.0055	0.2192±0.0034
r (侧面)	0.3093±0.0042	0.2143±0.0030
r (背面)	0.3199±0.0049	0.2178±0.0033
r （体积）‡	0.3105±0.0043	0.2148±0.0031
绝对参数:		
M ($M_\odot$)	1.526±0.005	1.259±0.005
R ($R_\odot$)	1.638±0.023	1.133±0.016
log g (cgs)	4.193±0.012	4.429±0.013
ρ ($\rho_\odot$)	0.348±0.015	0.867±0.038
L ($L_\odot$)	6.53±0.75	1.83±0.19
$M_{\rm bol}$ (星等)	2.70±0.12	4.08±0.11
BC（星等）	0.03±0.01	−0.01 ± 0.02
$M_{\rm V}$ （星等）	2.67±0.12	4.09±0.12
距离（秒差距）	229±13	

†内临界洛希面的势。‡平均体积半径。

表3。 凌日系外行星巡天卫星第50和第77扇区的 VZ CVn 频率解。

	$f_{\rm S77}$	$A_{\rm S77}$	信噪比$_{\rm S77}$	$f_{\rm S50}$	$A_{\rm S50}$	信噪比$_{\rm S50}$	$f_{\rm S77}-f_{\rm S50}$	识别
f_1	1.7577(07)	10.4(1.1)	16.73	1.7231(12)	7.9(1.0)	13.90	+0.0346	
f_2	4.7486(10)	4.2(0.6)	11.81	4.7496(11)	4.7(0.6)	14.47	−0.0010	$4f_{\rm orb}$
f_3†	0.5122(28)	2.8(1.1)	4.33	...	...	...	...	$f_1-f_{\rm orb}$，仅 S77
f_4‡	1.2741(28)	2.7(1.1)	4.37	1.2008(30)	3.2(1.0)	5.48	+0.0733	f_1-f_3
f_5	1.9754(29)	2.4(1.0)	4.16	1.9989(38)	2.4(1.0)	4.34	−0.0235	
f_6	7.1242(12)	1.9(0.3)	10.26	7.1245(12)	2.1(0.3)	13.92	−0.0003	$6f_{\rm orb}$
f_7	...	...	...	1.8745(22)	4.3(1.0)	7.52	...	仅 S50

注：频率（$f_{\rm S77}$, $f_{\rm S50}$）和振幅（$A_{\rm S77}$, $A_{\rm S50}$）的单位分别为天$^{-1}$ 和毫厘磁。括号中的数字为最后一位有效数字的不确定度，估算方法参见 Kallinger 等（2008）。频率按照其在 S77 中被检测到的顺序列出；仅在 S50 中检测到的 f_7 列于最后。†将 f_3 识别为 $f_1-f_{\rm orb}$ 尚不确定，因为 0.0585 天$^{-1}$ 的频率差略微超过所采用的 $1.5R_{\rm S77}$=0.0534 天$^{-1}$分辨率判据。‡ S50 和 S77 中与 f_4 对应的信号关联尚不确定，因为它们的频率差约为 $1.5R_{\rm S50}$。S77 中 f_4 的频率在所采用的分辨率判据范围内与 f_1-f_3 一致，而 S50 中的频率则接近 $f_{\rm orb}$。