

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.XX.XX

三颗大振幅盾牌座 δ 型变星的脉动性质及脉动频率分析

阿衣扎达·居马哈力¹, 吕成龙², 艾力·伊沙木丁^{1,2}, 杨涛只³, 沈丽娴⁴

(1. 新疆大学 物理科学与技术学院, 乌鲁木齐 830017; 2. 中国科学院 新疆天文台, 乌鲁木齐 830011; 3. 西安交通大学 物理学院, 西安 710049; 4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 10004)

摘要: 大振幅盾牌座 δ 型变星 (High-Amplitude δ Scuti Stars, HADS) 是盾牌座 δ 型脉动变星的一个子类, 具有短脉动周期、大振幅以及单个或多个径向脉动模式的特点, 因而成为星震学研究的重要目标。本文利用凌日系外行星巡天卫星 (TESS) 提供的时序测光数据, 首次对三颗 HADS 进行了频率分析。结果显示, TIC 355547586 主要以基频和第一泛音脉动, TIC 358502706 主要以基频、第一和第三泛音脉动, 在它们的频谱图中还探测到了非径向脉动频率。TIC 260654645 以基频和第一泛音脉动。该源相位折叠曲线在亮度下降段接近光度极小值处有明显的凸起, 展现出天琴座 RR ab 型变星的特征, 且该源第一泛音与基频的周期比值大于对径向脉动的理论预测值, 结合它在赫罗图上位置偏离 HADS 脉动不稳定带的特征, 值得对该源进一步深入研究。

关键词: 大振幅盾牌座 δ 型变星; 频率分析; 脉动模式

中图分类号:

文献标识码:

1 引言

脉动变星是由于恒星内部波动传播导致光度发生变化的一类恒星。在脉动变星的众多类型中, 盾牌座 δ 型脉动变星位于赫罗图上的主序带和经典不稳定带的交汇处, 通常具有 1 到 6 小时的短脉动周期和较明显的光变振幅^[1]。2000 年 McNamara 提出将光变振幅大于 0.3 星等的盾牌座 δ 型脉动变星定义为大振幅盾牌座 δ 型变星 (high-amplitude δ Scuti stars, 以下简称 HADS)^[1]。HADS 的光变曲线通常呈现出不对称性, 有效温度范围在 7000 至 8000K^[1-3]。观测研究显示在盾牌座 δ 型脉动变星中, HADS 的比例非常小, 目前发现的双模脉动的 HADS 不到 200 颗^[4, 5]。这些 HADS 分布在零龄主序至终龄主序的整个主序演

: 收稿日期; : 修回日期

: 国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作项目《中国与乌兹别克斯坦时域天文研究》(项目号: 2022YFE0126200); “天山英才” 培养计划 (2023TSYCLJ0053)

: 通讯作者: 吕成龙, lvchenglong@xao.ac.cn

化阶段^[6]。已确认的 HADS 通常呈现出一个或两个径向脉动模式, 这些模式主要源于基频或第一泛音频率的脉动^[6-9]。近几年, 也探测到极少数具有径向三模脉动的 HADS^[10-12]。

HADS 的自转速度通常较为缓慢, 其 $v \sin i$ 值一般不超过 30 km/s。这种相对较低的自转速度有助于维持恒星表面的稳定性, 进而突显出脉动模式的特征^[1, 3]。目前的研究表明, 缓慢自转可能是脉动不稳定带中变星产生大振幅脉动的一个必要条件^[13]。关于自转速度对恒星脉动的确切影响仍然需要进一步研究。小振幅盾牌座 δ 型变星一般展现出较多的脉动频率, 由于自转速度比较快导致它们的本征频率和自转分裂频率耦合, 从而使脉动模式的识别十分困难^[14, 15]; 而 HADS 自转速度小展现出脉动频谱相对简单, 脉动模式识别较为容易, 更便于构建恒星演化模型, 成为星震学研究的重要对象。

星震学通过分析恒星脉动频谱研究恒星的内部结构, 是目前认识恒星内部结构的唯一有效方法。在频谱图上, 脉动频率会呈现出不同的显著峰值。根据这些脉动频率, 而从中识别出的本征频率, 以及确认这些本征频率的脉动模式, 是构建和检验脉动变星的理论演化模型的基础^[16]。近十几年来, 开普勒和系外行星巡天卫星 (Transiting Exoplanet Survey Satellite, 以下简称 TESS) 空间望远镜为脉动变星的研究提供了连续长时序和高精度的观测数据, 极大提高了脉动频谱的精度, 提升了频率识别和模式认证的可靠性^[17]。

由于样本稀少, 对 HADS 的理解还不够充分尚需进行深入的研究。本研究利用 TESS 的时序测光数据对三颗 HADS 的脉动频率和脉动性质进行了分析。本文第二节对数据来源和处理方法做了介绍, 第三节给出了分析结果并进行了讨论, 第四节对本研究工作做了总结。

2 数据来源及处理

TESS 空间望远镜自 2018 年发射以来观测到大量盾牌座 δ 型脉动变星^[10]。TESS 是由麻省理工学院领导的一项 NASA 天文任务, 其主要科学目标是通过观测全天范围内恒星的光度变化来发现围绕附近明亮恒星转动的系外行星, 尤其是那些大小和温度可能适宜生命存在的行星。TESS 的观测策略是将天空分为 26 个区间 (sector), 并根据观测时间顺序进行排序。每个区间的观测时间大约为 27.4 天, 这使得其能够在两年的主要任务期间对几乎整个天空进行至少一次观测。

本研究主要使用了 TESS 的 SPOC (Science Processing Operations Center) 测光数据^[18], 这些数据可以通过访问 TESS 星震科学运营中心 (TESS Asteroseismic Science Operations Center, TASOC) 在线获取。SPOC 测光数据主要基于两种处理方法: 简单孔径光度通量 (Simple Aperture Photometry, SAP) 和预搜索数据调整 (Pre-search Data Conditioning, PDC) 处理的 SAP 通量。PDC_SAP 处理方式不仅对 TESS 的机载系统进行了校正, 还考虑了邻近恒星对总流量的影响, 有效减少了外部因素对恒星光度测量的干扰。因此, 本研究使用 PDC_SAP 处理后的数据。

数据处理流程包括以下步骤: 首先, 对每个目标源的观测区间数据进行趋势去除。若是连续观测区间的数据, 要将其拼接后再清除其中的空 (NaN) 值。此外, 为了提高数据的准

确性, 采用了 5σ 流量剪辑程序技术, 以排除任何显著的离群值。接下来, 将 PDC_SAP 流量时间序列转换为相对星等时间序列, 并运用离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, 以下简称 DFT) 对这些星等变化进行处理。这一步骤将时域数据转换为频域数据, 即从光度随时间的变化转换为功率随频率的变化。这种转换能够更容易地识别和分析恒星的周期性脉动模式。

在进行 HADS 脉动频率分析时, 将时域测光数据通过 DFT 转换到频域, 脉动频率在频域中表现为功率谱上的峰值, 对应着恒星脉动的不同模式。本研究使用软件工具 PERIOD04 对不连续的时域测光数据执行 DFT, 并从频域中提取出相应的显著频率。显著频率的识别基于它们的信噪比 (S/N), 根据 Baran 等人的研究, 对于空间望远镜如 TESS 的数据, 信噪比的阈值定为 $5.2^{[19]}$ 。在提取频率的过程中, 当频率的信噪比小于 5.2 时, 便停止提取计算。频率的不确定性是使用 Montgomery & O' Donoghue 提出的方法来确定的^[20]。

在 $0\sim 50\text{ d}^{-1}$ 的频谱范围内寻找显著频率的过程中, 通常需要进行多次迭代的预白化步骤。这些步骤包括:

1. 执行 DFT, 将时序测光数据转换到频域。
2. 在频域的功率谱中, 识别出峰值最高的频率 f_n 。
3. 使用提取的频率 f_n 及其振幅 A_n 和相位 ϕ_n 构建一个正弦曲线, 该曲线用于拟合原始的时序测光数据。
4. 从原始时序测光曲线中减去拟合的正弦曲线, 得到残余的时序测光曲线。
5. 对残余时序测光曲线重复上述步骤, 以寻找其他的显著频率。

拟合时序测光曲线的公式为:

$$\Delta L = \sum_{n=1} A_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) \quad (1)$$

其中: ΔL 是光度变化, A_n 是振幅, f_n 是频率, ϕ_n 是 f_n 的相位。

在星震学研究中, 鉴别恒星的脉动模式是一项关键的工作。Stellingwerf 在 1979 年提出了用于识别径向脉动模式的经验公式^[21], 给出了不同径向脉动模式 (基频和泛音) 之间周期比的理论预测值:

$$0.756 \leq \frac{P_1}{P_0} \leq 0.787, \quad (2)$$

$$0.611 \leq \frac{P_2}{P_0} \leq 0.632, \quad (3)$$

$$0.500 \leq \frac{P_3}{P_0} \leq 0.525. \quad (4)$$

上述关系式中, P_0, P_1, P_2 和 P_3 分别对应基频、第一泛音、第二泛音和第三泛音模式的周期。本工作遵循以上的比例关系来识别 HADS 的脉动模式。在实际分析中, 如果观测到的不同模式之间的比值处于上述范围内, 那么可以认为这些频率为径向脉动模式。而那些不遵循这些周期比值的独立频率则可能代表非径向脉动模式。本文频率分析时为了简化表述, 基频、第一泛音、第二泛音和第三泛音分别标记为 F0、F1、F2 和 F3。

3 结果与讨论

本节，详细报告了对三颗 HADS 的分析结果，包括频率分析表、光变曲线、振幅谱以及相位折叠图。为了更深入地了解这些目标的特性，从 SIMBAD 数据库和最新的 TESS 星表 (Exoplanet Follow-up Observing Program, ExoFOP) 中获取了它们的赤经、赤纬、星等、有效温度等恒星参数，并用 Gaia DR3 提供的距离计算了它们的 TESS 绝对星等值列于表1。

TIC 355547586(UCAC4 161-218640) 在 Antoci 等人 (2019) 公布的星表里被分类为 HADS^[22]。在 TESS 空间望远镜的观测区间 1 和 27 有 TIC 355547586 的测光数据，本研究采用了区间 27 的两分钟曝光观测数据，时间跨度从儒略日 2459036.28297938 到 2459060.64568572 共 24.4 天。遵循上一节所述的数据处理流程，最后得到了包含 16469 个数据点的的光变曲线。图1(a) 展示了该源连续三天的数据振幅约为 0.35 星等，结合光变曲线的形状，该源符合 HADS 的典型特征。

通过傅里叶分析，提取出了 TIC 355547586 的 23 个显著频率 (见表2)。其中两个大振幅独立频率 f_3 与 f_1 的周期比为 0.7723，根据理论预测值可确认 f_1 和 f_3 分别是基频和第一泛音频率。

对于时间跨度为 ΔT 的时序数据集，其频域的频率分辨率为： $\sigma_v = \frac{1}{\Delta T}$ 。通过精确地识别和去除混叠频率，能够从数据中提取出显著频率及其对应的振幅。表2列出了 TIC 355547586 的两个径向频率：基频 f_1 (标记为“F0”)、第一泛音 f_3 (标记为“F1”) 以及组合频率 (如 f_4, f_6, f_7) 和倍频 (f_2, f_5, f_8, f_{13})。表中 f_{11} 可能为非径向频率，与基频和第一泛音有多个组合频率 ($f_{16}, f_{17}, f_{19}, f_{23}$)，但无法确定准确的脉动模式。图1(b) 展示的是按基频 10.51243 d^{-1} 折叠的相位曲线，图1(c) 是该源的傅立叶振幅谱，图1(d) 是白化掉所有显著频率后的残差。

表 1 三颗 HADS 的基本恒星参数。

	TIC 355547586	TIC 358502706	TIC 260654645
R.A.	+21 ^h 24 ^m 20.3 ^s	+04 ^h 03 ^m 20.1 ^s	+06 ^h 32 ^m 45.2 ^s
Decl.	-57°:51':53.9"	-83°:41':58.6"	-57°:48':19.8"
TESS mag	12.6(1)	11.7(1)	12.55(1)
Contamination	0.014264153	0.030483834	0.08321682
T_{eff}	7420(190)K	7690(161)K	6967(120)K
$\log g$	4.1(1)dex	4.02(8)dex	3.6(1)dex
[Fe/H]	-1.5124	0.6101	-0.4639
Luminosity	11(2) $L_{\odot}$	14.7(8) $L_{\odot}$	17(1) $L_{\odot}$
Density	0.3(1)g/cm ³	0.25(6)g/cm ³	0.10(2)g/cm ³
M	1.7(3) $M_{\odot}$	1.8(3) $M_{\odot}$	1.6(3) $M_{\odot}$
R	2.0(2) $R_{\odot}$	2.16(8) $R_{\odot}$	3.6(3) $R_{\odot}$
Distance	1339(119)pc	926(18)pc	1564(49)pc
RV	-	33.25(km/s)	38.33(km/s)
M_{TESS}	1.97(1)mag	1.87(1)mag	1.58(1)mag

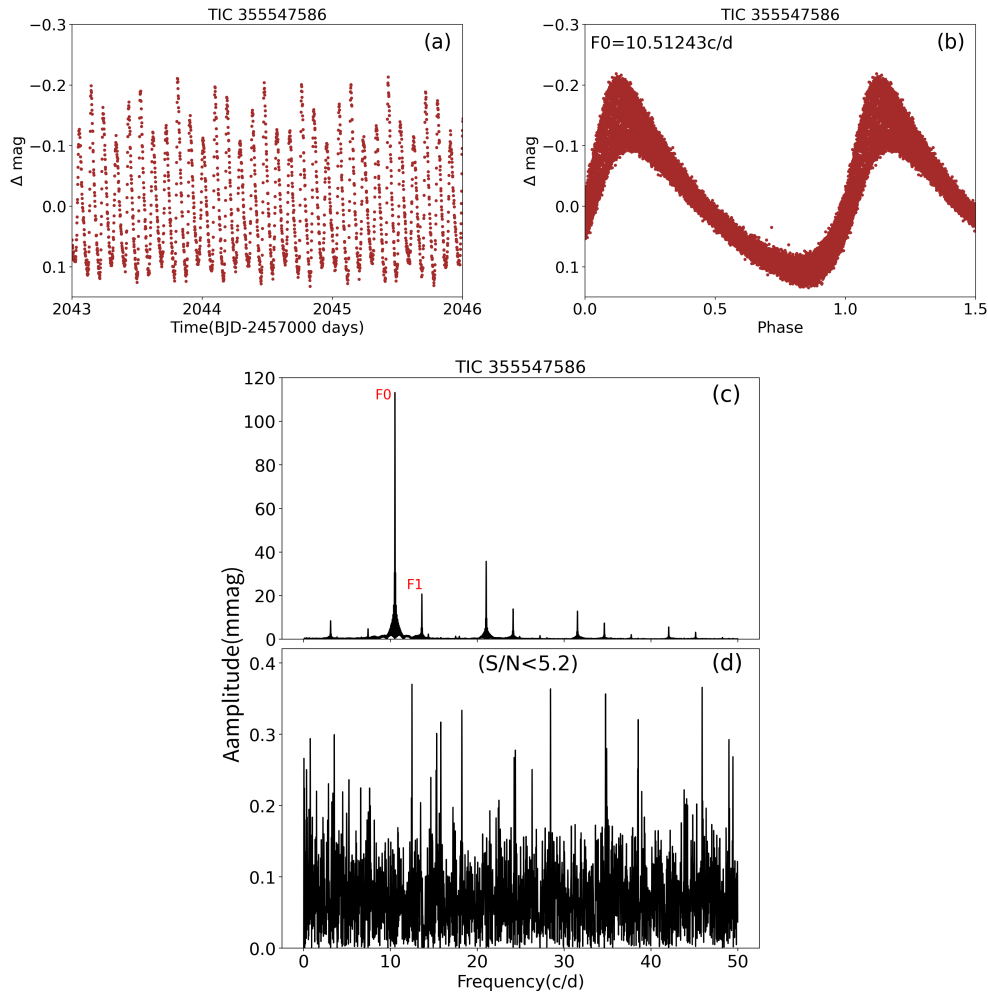


图 1 TIC 355547586 的部分光变曲线 (a), 相位折叠曲线 (b), 傅立叶振幅谱 (c), 白化掉所有显著频率后的残差 (d)

TIC 358502706(TYC 9492-2623-1) 在 AAVSO VSX 数据库中被归类为 HADS(B) 型变星, 与 Antoci 等人的分类一致^[22]。TIC 358502706 在 TESS 空间望远镜观测区间 1、12、13、27 和 39 有可利用的时序测光数据。区间 12 和 13 是连续观测的, 将这两段数据合并后, 得到了从儒略日 2458624.9567046 到 2458682.35844299 共 56.3 天的数据。经过处理后得到由 33905 个数据点组成的光变曲线, 图2(a) 中, 选取该源三天的测光数据作了展示, 振幅大约为 0.30 星等。图2(b) 展示的是该源按基频 11.674079d^{-1} 折叠的相位图。图2(c) 为该源的傅立叶振幅谱, 图2(d) 是经白化后得到的残差。

对 TIC 358502706 时序测光数据进行傅里叶分析后, 共提取到 19 个显著频率 (见表3)。其中, f_3 与基频的周期比为 0.7740, 这一结果与 Khruslov 的研究结果一致^[23]。 f_4 与基频的周期比为 0.5382, 这表明 f_3 和 f_4 分别对应于第一泛音和第三泛音的径向模式。虽然第三泛音与基频的周期比略高于 Stellingwerf(1979) 提供的径向脉动模式的周期比值范围^[21], 但基于探测到基频和第三泛音的多个组合频率 ($f_9, f_{11}, f_{15}, f_{17}, f_{18}$), 本研究初步将 TIC 358502706 分类为三模的 HADS。表3中列出了三个径向模式的频率: f_1 为基频 “F0”; f_3 为第一泛音 “F1”; f_4 为第三泛音 “F3” 以及它们的组合频率 (f_5, f_7, f_8) 和倍频 (如 f_2, f_6, f_{12})。此外, 还探测到了 1 个非径向频率 f_{13} 。

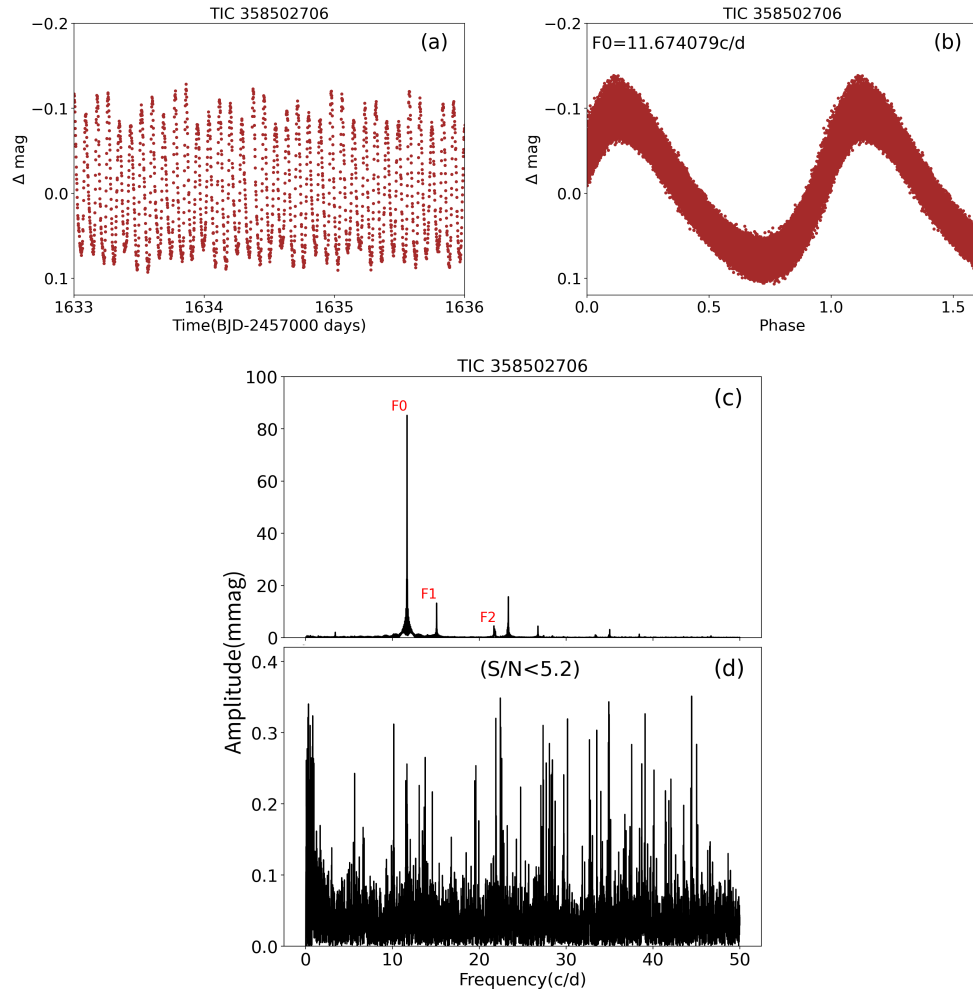


图 2 TIC 358502706 的部分光变曲线 (a), 相位折叠曲线 (b), 傅立叶振幅谱 (c), 白化掉所有显著频率后的残差 (d)

TIC 260654645(UCAC4-161-008109) 在 AAVSO 国际变星表 (VSX) 中被归类为盾牌座 δ 型脉动变星, Antoci 等人将其定类为 HADS^[22]。在表1中列出了该源的基本参数。其中根据距离和视星等计算得到了 TESS 绝对星等为 $M_{\text{TESS}} = 1.58(1)$ 。TIC 260654645 在 TESS 空间望远镜的观测中覆盖多个观测区间, 本研究使用了采样间隔为 2 分钟的区间 12 和 13 的连续测光数据, 时间跨度从儒略日 2458626.46312538 至 2458682.35572725。经过处理, 总共获得该源的 36668 个数据点。图3(a) 展示了该源三天的光变曲线, 其振幅约为 0.34 星等, 光变曲线的形状主要由 F0 和 F1 两个径向脉动频率主导。

表4列出了 TIC 260654645 探测到的 17 个显著频率, 包括基频 f_1 (标记为 F0)、第一泛音频率 f_3 (标记为 F1), 以及这两个径向频率的倍频 (f_4, f_7, f_{14}) 和组合频率 (如 f_5, f_6 ,

f_8)。计算得到 F1 与 F0 的周期比为 0.8044, 略高于径向脉动模式理论预测值^[21], 但基于提取到了 f_1 和 f_3 的多个组合频率以及 f_3 显著的振幅值, TIC 260654645 可能是一颗以径向基频和第一泛音模式脉动的双模 HADS。图3(b) 为 TIC 260654645 按基频 10.98476d^{-1} 折叠的相位曲线。图3(c) 展示了该源的傅立叶振幅谱, 图3(d) 是白化掉所有显著频率后的残差。

图 3 (b) 展示按基频 10.98476d^{-1} 折叠的相位曲线中接近光度极小值时, 曲线出现明显的凸起, 另外相位图中表现出振幅和相位的调制现象, 这是具有布拉日科效应 (Blazhko effect) 的天琴座 RRab 型变星光变曲线形状的典型特征^[24]。然而, 天琴座 RR 型变星通常具有大约 $0.7M_{\odot}$ 的恒星质量和约为 0.6 的绝对星等, 光变周期范围为 0.3 至 1.2 天 (平均约 0.55 天)^[16, 25]。结合表1 中的基本恒星参数, 可以确认该源与典型天琴座 RR 型变星存在显著差异。此外, 在天琴座 RR 型变星的频谱图中, 通常会出现 1.5F0 频率, 但这一特征在 TIC 260654645 中并未体现。综合分析, 基本可以排除该源为天琴座 RR 型变星的可能性, 对于其中存在的振幅和相位调制现象, 值得进一步详细研究。

该源 F0 和 F1 的周比值高于理论预测值, 可能由恒星自转引起。根据澳大利亚主导的光谱观测项目 (Galactic Archaeology with HERMES, GALAH) 提供的数据, 该源的光谱谱线致宽速度 v_{broad} 仅为 20.5 km/s ^[26]。尽管自转速度较慢, 但研究表明, 即使是低自转速度也会影响 HADS 的周期比值^[27]。此外, 恒星的金属丰度也会对 HADS 的周期比值产生影响。通常, 金属丰度较低的恒星具有更高的周期比值, 例如凤凰座 SX 型脉动变星^[10]。因此, 从金属丰度来看该源也可能是凤凰座 SX 型脉动变星的候选体。

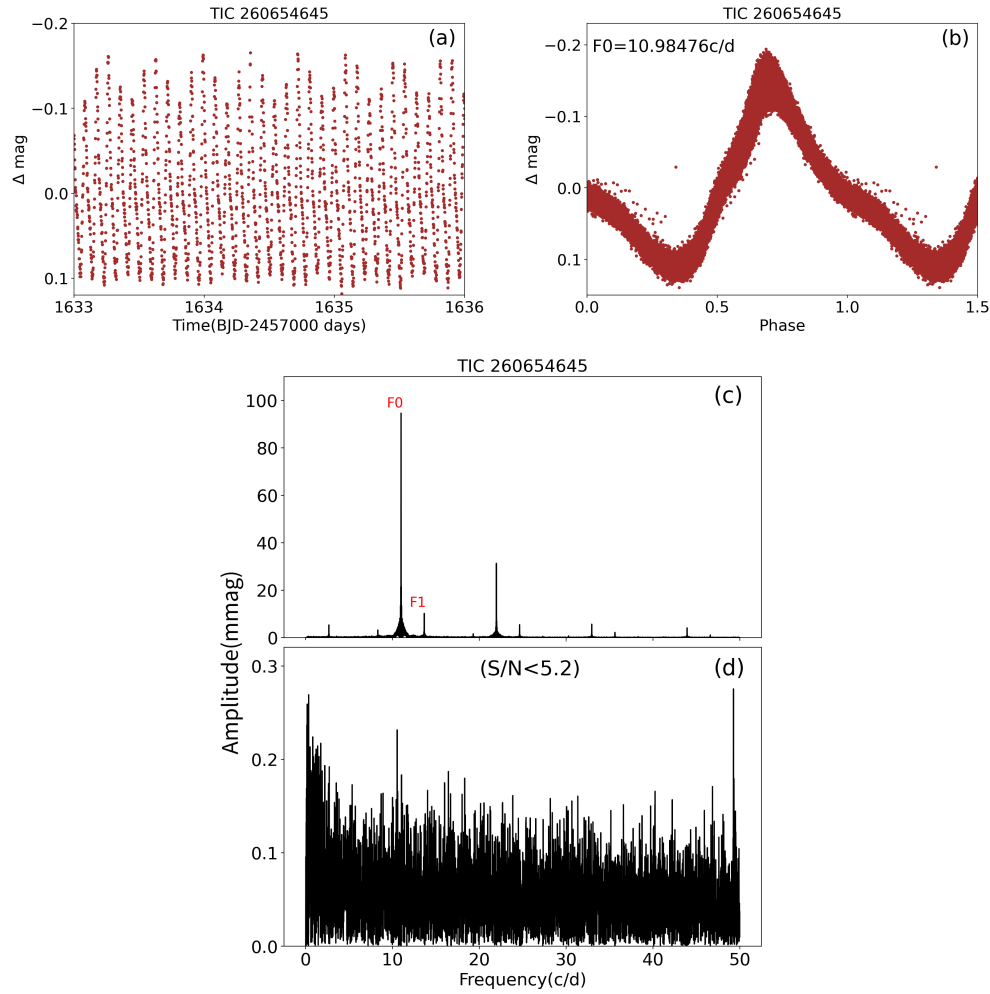


图 3 TIC 260654645 的部分光变曲线 (a), 相位折叠曲线 (b), 傅立叶振幅谱 (c), 白化掉所有显著频率后的残差 (d)

为了探究这三颗 HADS 的演化状态, 基于它们的 TESS 绝对星等和有效温度, 绘制了在赫罗图上的位置 (见图4)。该图中彩色的菱形点代表这三颗 HADS; 灰色实心点为从其他文献搜索的 HADS^[1, 9, 28-33]; 蓝色实心点代表的是吕成龙等人 2023 年发布的 7 颗 HADS^[10]。图中绿色实线表示零龄主序 ZAMS (Zero-Age Main Sequence), 两条黑色虚线代表 HADS 不稳定带的位置, 蓝色实线和红色实线分别为盾牌座 δ 型变星的脉动不稳定带的蓝边缘和红边缘^[1]。可以注意到 TIC 260654645 的分布与其他 HADS 相比存在明显的偏离, 结合该源在光变曲线中体现出的特征, 表明该源可能具有不同的物理特性或处于不同的演化阶段。

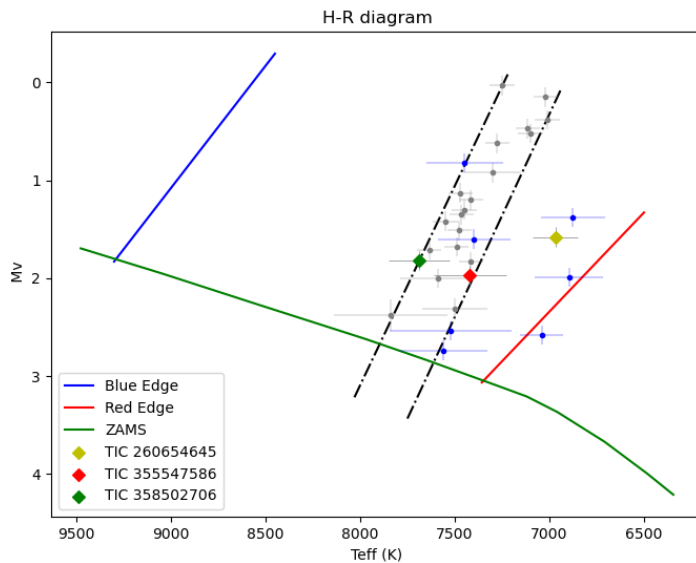


图 4 27 颗 HADS 恒星和本研究三颗目标源(彩色菱形点)在赫罗图上的位置

4 总结和展望

本文基于 TESS 空间望远镜的时序测光数据, 对三颗 HADS 进行了深入的频率分析。首次得出了这三颗 HADS 的脉动频率、振幅和相位等脉动参数以及脉动模式。

通过频率分析初步确定 TIC 3555475786 是双模径向脉动的 HADS, 同时也探测到一个非径向脉动频率。该源的光度变化主要由基频和第一泛音的径向脉动主导。TIC 358502706 呈现出三模径向脉动的特征, 也探测到一个非径向脉动频率。该源为后续研究三模脉动的 HADS 增加了新样本。TIC 355547586 和 TIC 358502706 的光变曲线和相位折叠图, 与典型的 HADS 特征相符。

TIC 260654645 是纯以双模径向脉动的 HADS。该源的相位曲线在亮度下降阶段接近光度极小值处出现明显的凸起, 显示出天琴座 RR ab 型变星的光变特征, 但根据其恒星参数基本排除该源是天琴座 RR ab 型变星的可能。该源具有较低的自转速度和较高的第一泛音与基频的周期比, 表明该源也可能是凤凰座 SX 型变星。另外, 该源呈现出振幅和相位的调制现象, 而且在赫罗图上的位置偏离典型 HADS 脉动不稳定带。这颗奇特的 HADS 值得进一步的观测和理论研究。

参考文献:

- [1] McNamara D H. 2000, 210: 373
- [2] BALONA L A. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 479(1): 183–191
- [3] Rodríguez E, López-González M J, López de Coca P. A&AS, 2000, 144: 469–474
- [4] Lee Y H, Kim S S, Shin J, et al. PASJ, 2008, 60: 551
- [5] Yang T Z, Zuo Z Y, Wang X Y, et al. arXiv e-prints, 2021: arXiv:2110.13594
- [6] Bowman D M, Hermans J, Daszyńska-Daszkiewicz J, et al. MNRAS, 2021, 504(3): 4039–4053
- [7] Yang T Z, Zuo Z Y, Sun X Y, et al. ApJ, 2022, 936(1): 48
- [8] Lv C, Esamdin A, Pascual-Granado J, et al. AJ, 2022, 164(5): 218
- [9] Poretti E, Rainer M, Weiss W W, et al. A&A, 2011, 528: A147
- [10] Lv C, Esamdin A, Hasanzadeh A, et al. ApJ, 2023, 959(1): 33
- [11] Xue H F, Niu J S. ApJ, 2020, 904(1): 5
- [12] Wils P, Rozakis I, Kleidis S, et al. A&A, 2008, 478(3): 865–868
- [13] Pamyatnykh A A. 2000, 210: 215
- [14] Chen X, Li Y. ApJ, 2018, 866(2): 147
- [15] Samadi-Ghadim A, Lampens P, Gizon L. A&A, 2022, 667: A60
- [16] Aerts C, Christensen-Dalsgaard J, Kurtz D W. Asteroseismology. [S.l.]: (Berlin-Springer), 2010
- [17] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2015, 1: 014003
- [18] Jenkins J M, Twicken J D, McCaulliff S, et al. 2016, 9913: 99133E
- [19] Baran A S, Koen C, Pokrzywka B. MNRAS, 2015, 448: L16–L19
- [20] Montgomery M H, O'Donoghue D. Delta Scuti Star Newsletter, 1999, 13: 28
- [21] Stellingwerf R F. ApJ, 1979, 227: 935–942
- [22] Antoci V, Cunha M S, Bowman D M, et al. MNRAS, 2019, 490(3): 4040–4059
- [23] Khruslov A V. Peremennye Zvezdy, 2022, 42(5): 28–34
- [24] Kurtz D Annual Conference and General Assembly of the. . [S.l.]: [s.n.] , 2022: 1
- [25] Stringer K M, Drlica-Wagner A, Macri L, et al. ApJ, 2021, 911(2): 109
- [26] Buder S, Sharma S, Kos J, et al. MNRAS, 2021, 506(1): 150–201
- [27] Suárez J C, Garrido R, Goupil M J. A&A, 2006, 447(2): 649–653
- [28] Yang T, Esamdin A, Song F, et al. ApJ, 2018, 863(2): 195
- [29] Poretti E, Suárez J C, Niarchos P G, et al. A&A, 2005, 440(3): 1097–1104
- [30] Christiansen J L, Derekas A, Ashley M C B, et al. MNRAS, 2007, 382(1): 239–244
- [31] Peña J H, Villarreal C, Piña D S, et al. , 2016, 52: 385
- [32] Balona L A, Lenz P, Antoci V, et al. MNRAS, 2012, 419(4): 3028–3038
- [33] Ulusoy C, Gülmez T, Stateva I, et al. MNRAS, 2013, 428(4): 3551–3558

Pulsation properties and frequency analysis of three High -amplitude δ Scuti stars

AYZADA Jumahali¹, LV Cheng-long², ALI Esamdin^{1,2}, YANG Tao-zhi³, SHEN Li-xian⁴

(1. Xinjiang University College of Physical Science and Technology, Urumqi 830017, China; 2. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. School of Astronomy and Space Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: High-Amplitude δ Scuti Stars (HADS), a subclass of δ Scuti pulsating variable stars, are characterized by short pulsation periods, large amplitudes, and single or multiple radial pulsation modes, making them an important target for astroseismology. In this paper, a frequency analysis of three HADS for the first time is performed using the time-series photometry data provided by the Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). The result show that TIC 355547586 pulsates at the fundamental frequency and first overtone, and TIC 358502706 at the fundamental frequency, first and third overtone. Non-radial pulsation frequencies were also detected in their frequency spectra. TIC 260654645 is pulsating at fundamental frequency and first overtone. The phase-folding curve of the source has a clear bulge in the brightness-decreasing phase near the luminosity minima, exhibiting the characteristics of a ab-type RR Lyrae, and the period ratio of the first overtone to the fundamental frequency of it is larger than the theoretical prediction for radial pulsation, which, combined with its positional deviation from the HADS pulsation instability band on the Hertzsprung–Russell diagram, makes the star worthy of further study.

Key words: High-amplitude δ Scuti stars; frequency analysis;pulsation mode

表 2 TIC 355547586 的 2 分钟曝光数据中提取的显著频率

ID	频率 (d^{-1})	振幅 (mmag)	相位	信噪比 (S/N)	脉动模式
f_1	10.51243(1)	113.17432(6)	0.23191(9)	932.5	F0
f_2	21.02483(4)	35.73328(6)	0.9541(3)	332.2	2F0
f_3	13.61207(7)	20.08112(6)	0.1269(5)	97.0	F1
f_4	24.12445(1)	13.48648(6)	0.9007(8)	105.8	F0+F1
f_5	31.5372(1)	12.75377(6)	0.7086(8)	155.8	3F0
f_6	3.0996(2)	8.56884(6)	0.546(1)	80.1	F1-F0
f_7	34.6365(2)	7.26171(6)	0.346(1)	64.6	2F0+F1
f_8	42.0496(3)	5.46049(6)	0.459(2)	73.3	4F0
f_9	7.4127(3)	4.22676(6)	0.656(2)	37.9	2F0-F1
f_{10}	45.1497(5)	3.10324(6)	0.317(3)	36.5	3F0+F1
f_{11}	14.3631(6)	2.38182(6)	0.985(5)	18.8	...
f_{12}	37.7367(7)	1.99833(6)	0.223(5)	24.9	2F1-F0
f_{13}	27.2250(9)	1.64603(6)	0.999(6)	17.9	2F1
f_{14}	24.8779(1)	1.33977(6)	0.842(8)	17.1	F0+F1
f_{15}	17.924(1)	1.22851(6)	0.850(8)	15.9	3F0-F1
f_{16}	13.901(2)	0.72650(6)	0.42(1)	10.0	2F1-4F0+ f_{11}
f_{17}	35.393(2)	0.68573(6)	0.44(1)	7.0	2F0+ f_{11}
f_{18}	48.250(2)	0.68525(6)	0.66(1)	8.9	2F0+2F1
f_{19}	3.851(2)	0.57530(6)	0.48(1)	7.9	f_{11} -F0
f_{20}	28.011(2)	0.61885(6)	0.07(2)	7.8	4F0-F1
f_{21}	0.178(2)	0.66963(6)	0.66(2)	5.7	
f_{22}	16.711(3)	0.47482(6)	0.33(2)	6.4	2F1-F0
f_{23}	12.473(4)	0.37151(6)	0.60(3)	5.6	5F0-4F1+ f_{11}

注释: 脉动模式中“...”表示非径向频率。

表 3 TIC 358502706 的 2 分钟曝光数据中提取的显著频率

ID	频率 (d^{-1})	振幅 (mmag)	相位	信噪比 (S/N)	脉动模式
f_1	11.674079(3)	83.97678(3)	0.89816(5)	1265.0	F0
f_2	23.34816(2)	15.03848(3)	0.1906(3)	115.9	2F0
f_3	15.08298(2)	12.41207(3)	0.3171(3)	303.7	F1
f_4	21.68905(6)	4.43480(3)	0.5555(9)	23.9	F3
f_5	26.75709(6)	4.34074(3)	0.569(1)	56.1	F1+F0
f_6	35.02243(8)	3.03464(3)	0.175(1)	60.0	3F0
f_7	3.4090(1)	2.04835(3)	0.149(2)	42.9	F1-F0
f_8	38.4309(2)	1.36472(3)	0.402(3)	24.9	2F0+F1
f_9	28.4495(2)	1.22849(3)	0.520(3)	18.7	3F0+F1+F3
f_{10}	27.4227(3)	0.98029(3)	0.721(4)	11.5	8F1-8F0
f_{11}	33.491(3)	0.89021(3)	0.694(5)	11.1	F0+F3
f_{12}	46.6960(4)	0.67292(3)	0.185(6)	15.7	4F0
f_{13}	14.0153(5)	0.54339(3)	0.932(8)	10.8	...
f_{14}	45.6749(5)	0.51543(3)	0.466(8)	11.1	3F1
f_{15}	29.7643(5)	0.46293(3)	0.914(9)	10.6	4F0-4F1+2F3
f_{16}	8.2651(5)	0.46420(3)	0.728(9)	11.8	2F0-F1
f_{17}	10.0132(6)	0.40769(3)	0.22(1)	9.1	F3-F0
f_{18}	36.9982(7)	0.35903(3)	0.59(1)	7.3	F1+F3
f_{19}	43.4633(7)	0.35215(3)	0.87(3)	7.1	2F3

注释：脉动模式中“...”表示非径向频率。

表 4 TIC 260654645 的 2 分钟曝光数据中提取的显著频率

ID	频率 (d^{-1})	振幅 (mmag)	相位	信噪比 (S/N)	脉动模式
f_1	10.98476(5)	99.353415(5)	0.68940(8)	1051.3	F0
f_2	21.96926(1)	31.28755(5)	0.2308(2)	463.8	2F0
f_3	13.65625(5)	10.008745(5)	0.5155(8)	170.2	F1
f_4	32.95373(8)	5.68447(5)	0.561(1)	93.2	3F0
f_5	24.64100(8)	5.58819(5)	0.653(1)	90.9	F1+F0
f_6	2.67155(9)	8.56884(6)	0.546(1)	80.1	F1-F0
f_7	43.9384(1)	4.21357(5)	0.704(2)	83.5	4F0
f_8	8.3127(2)	2.88098(5)	0.832(3)	45.0	2F0-F1
f_9	35.6256(2)	2.29130(5)	0.900(3)	41.8	2F0+F1
f_{10}	19.2971(3)	1.384665(5)	0.472(5)	22.6	3F0-F1
f_{11}	46.6103(4)	1.15772(5)	0.103(7)	23.0	3F0+F1
f_{12}	30.2820(6)	0.70834(5)	0.40(1)	12.9	4F0-F1
f_{13}	16.3293(9)	0.53060(5)	0.69(1)	8.0	2F1-F0
f_{14}	27.312(1)	0.44967(5)	0.92(2)	8.3	2F1
f_{15}	38.298(1)	0.436161(5)	0.09(2)	6.8	F0+2F1
f_{16}	41.268(1)	0.34570(5)	0.02(2)	6.3	5F0-F1
f_{17}	49.279(2)	0.27561(5)	0.48(3)	5.7	2F0+2F1