

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.02.06

# 三颗大振幅盾牌座 $\delta$ 型变星的脉动性质及脉动频率分析

阿衣扎达·居马哈力<sup>1</sup>, 吕成龙<sup>2</sup>, 艾力·伊沙木丁<sup>2</sup>, 杨涛只<sup>3</sup>, 沈丽娴<sup>2,4</sup>

(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 100049)

**摘要:** 大振幅盾牌座  $\delta$  型变星 (HADS) 是盾牌座  $\delta$  型脉动变星的子类, 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。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 3 颗 HADS 进行了频率分析。结果显示, TIC 355547586 主要在基频和第一泛音脉动, TIC 358502706 主要在基频、第一和第三泛音脉动, 在它们的频谱图中还探测到非径向脉动频率; TIC 260654645 在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径向脉动的理论预测值, 再加上它在赫罗图上偏离 HADS 脉动不稳定带, 因此其值得被进一步深入研究。

**关键词:** 大振幅盾牌座  $\delta$  型变星; 频率分析; 脉动模式

**中图分类号:** P145.2 **文献标识码:** A

## 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恒星。在脉动变星的众多类型中, 盾牌座  $\delta$  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 ~ 6 h 的短脉动周期和较明显的光变振幅<sup>[1]</sup>。2000 年 McNamara<sup>[1]</sup> 提出将光变振幅大于 0.3 mag 的盾牌座  $\delta$  型脉动变星定义为大振幅盾牌座  $\delta$  型变星 (high-amplitude  $\delta$  Scuti star, HADS)。HADS 的光变曲线通常呈现不对称性, 有效温度范围为 7000 ~ 8000 K<sup>[1-3]</sup>。观测研究显示, 在盾牌座  $\delta$  型脉动变星中, HADS 的比例非常小, 目前发现的双模脉动 HADS 不到 200 颗<sup>[4, 5]</sup>。这些 HADS 分布在零龄主序至终龄主序的整个主序演化阶段<sup>[6]</sup>。已确认

收稿日期: 2024-4-29; 修回日期: 2024-09-20

资助项目: 国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作项 (2022YFE0126200); “天山英才”培养计划 (2023TSYCLJ0053)

通讯作者: 吕成龙, lvchenglong@xao.ac.cn

的 HADS 通常呈现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<sup>[6-9]</sup>。近几年, 极少数具有径向三模脉动的 HADS 也被探测到<sup>[10-12]</sup>。

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, 进而突显脉动模式的特征<sup>[1, 3]</sup>。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必要条件<sup>[13]</sup>。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  $\delta$  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<sup>[14, 15]</sup>; 而 HADS 自转速度小, 展现出的脉动频谱相对简单, 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, 脉动频率呈现出不同的显著峰值。根据这些脉动频率, 从中识别出本征频率, 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<sup>[16]</sup>。近十几年来, 开普勒和系外行星巡天卫星 (Transiting Exoplanet Survey Satellite, 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<sup>[17]</sup>。

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 3 颗 HADS 的脉动频率和脉动性质进行分析。第 2 章对数据来源和处理方法做介绍, 第 3 章给出分析结果并进行讨论, 第 4 章对本研究工作做总结。

## 2 数据来源及处理

自 2018 年发射以来, TESS 空间望远镜观测到大量盾牌座  $\delta$  型脉动变星<sup>[10]</sup>。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 d, 因此其能够在 2 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<sup>[18]</sup>, 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值 (NaN)。此外, 为了提高数据的准

确性, 采用了  $5\sigma$  流量剪辑程序技术, 以排除任何明显的离群值。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, 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。这种转换使得研究者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进行 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<sup>[19]</sup>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。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。使用 Montgomery 和 O'Donoghue<sup>[20]</sup>提出的方法来确定频率的不确定性。

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  $\phi_n$  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,  $\Delta L$  是光度变化,  $A_n$  是振幅,  $f_n$  是频率,  $\phi_n$  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<sup>[21]</sup>在 1979 年提出了用于识别径向脉动模式的经验公式, 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, 则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。本文在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

本章将详细报告对 3 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, 结果列于表 1。

表 1 3 颗 HADS 的基本恒星参数

	TIC 355547586	TIC 358502706	TIC 260654645
RA	+21h24min20.3s	+04h03min20.1s	+06h32min45.2s
Dec	-57°51'53.9''	-83°41'58.6''	-57°48'19.8''
TESS 星等/mag	12.6(1)	11.7(1)	12.55(1)
污染指数	0.014 264 153	0.030 483 834	0.083 216 82
$T_{\text{eff}}/\text{K}$	7 420(190)	7 690(161)	6 967(120)
$\lg g/\text{dex}$	4.1(1)	4.02(8)	3.6(1)
[Fe/H]	-1.512 4	0.610 1	-0.463 9
光度/ $L_{\odot}$	11(2)	14.7(8)	17(1)
密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	0.3(1)	0.25(6)	0.10(2)
$M/M_{\odot}$	1.7(3)	1.8(3)	1.6(3)
$R/R_{\odot}$	2.0(2)	2.16(8)	3.6(3)
距离/pc	1 339(119)	926(18)	1 564(49)
$V_{\text{R}}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	—	33.25	38.33
$M_{\text{TESS}}/\text{mag}$	1.97(1)	1.87(1)	1.58(1)

TIC 355547586(UCAC4 161-218640) 在 Antoci 等人<sup>[22]</sup>公布的星表里被分类为 HADS。TESS 空间望远镜的观测区间 1 和 27 中有 TIC 355547586 的测光数据, 本研究采用了区间 27 的 2 min 曝光观测数据, 时间跨度从儒略日 2 459 036.282 979 38 到 2 459 060.645 685 72 共 24.4 d。遵循上一章所述的数据处理流程, 我们最后得到了包含 16 469 个数据点的光变曲线。图 1a) 展示了该源连续 3 d 的数据, 振幅约为 0.35 mag, 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, 我们提取出 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 0.772 3, 根据理论预测值可确定  $f_1$  和  $f_3$  分别是基频和第一泛音频率。

对于时间跨度为  $\Delta T$  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, 我们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,

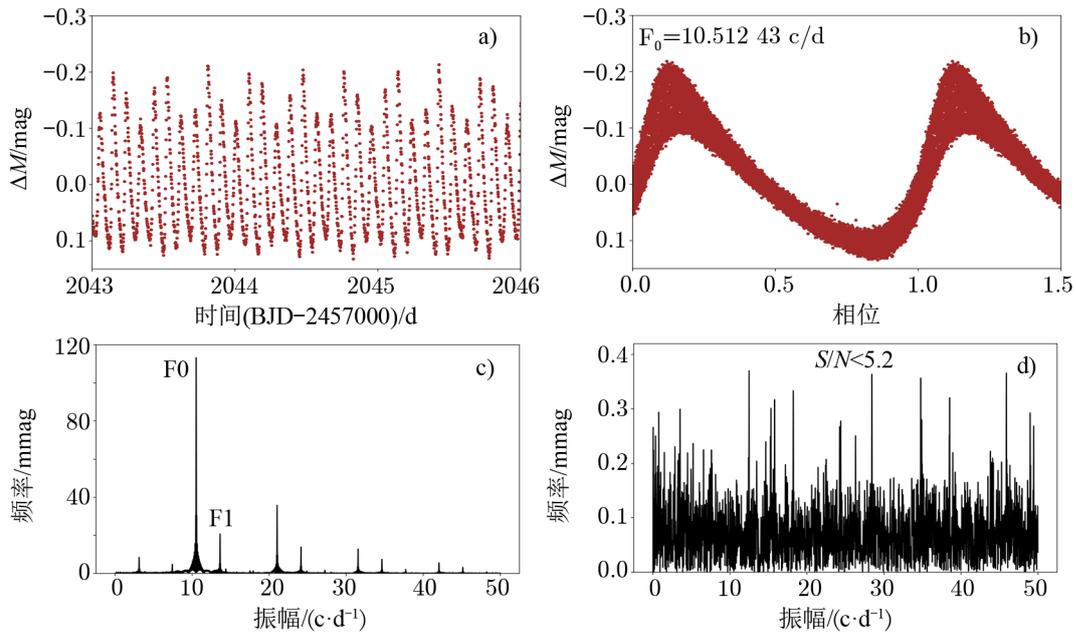


图 1 TIC 355547586 的部分光变曲线 (图 a), 相位折叠曲线 (图 b), 傅里叶振幅谱 (图 c), 白化掉所有显著频率后的残差 (图 d)

表 2 TIC 355547586 的 2 min 曝光数据中提取的显著频率

$f_i$	频率/ $d^{-1}$	振幅/ $10^{-3}mag$	相位	信噪比 ( $S/N$ )	频率对应的模式
$f_1$	10.512 43(1)	113.174 32(6)	0.231 91(9)	932.5	F0
$f_2$	21.024 83(4)	35.733 28(6)	0.954 1(3)	332.2	2F0
$f_3$	13.612 07(7)	20.081 12(6)	0.126 9(5)	97.0	F1
$f_4$	24.124 45(1)	13.486 48(6)	0.900 7(8)	105.8	F0+F1
$f_5$	31.537 2(1)	12.753 77(6)	0.708 6(8)	155.8	3F0
$f_6$	3.099 6(2)	8.568 84(6)	0.546(1)	80.1	F1-F0
$f_7$	34.636 5(2)	7.261 71(6)	0.346(1)	64.6	2F0+F1
$f_8$	42.049 6(3)	5.460 49(6)	0.459(2)	73.3	4F0
$f_9$	7.412 7(3)	4.226 76(6)	0.656(2)	37.9	2F0-F1
$f_{10}$	45.149 7(5)	3.103 24(6)	0.317(3)	36.5	3F0+F1
$f_{11}$	14.363 1(6)	2.381 82(6)	0.985(5)	18.8	...
$f_{12}$	37.736 7(7)	1.998 33(6)	0.223(5)	24.9	2F1-F0
$f_{13}$	27.225 0(9)	1.646 03(6)	0.999(6)	17.9	2F1
$f_{14}$	24.877 9(1)	1.339 77(6)	0.842(8)	17.1	F0+F1
$f_{15}$	17.924(1)	1.228 51(6)	0.850(8)	15.9	3F0-F1
$f_{16}$	13.901(2)	0.726 50(6)	0.42(1)	10.0	...
$f_{17}$	35.393(2)	0.685 73(6)	0.44(1)	7.0	...
$f_{18}$	48.250(2)	0.685 25(6)	0.66(1)	8.9	2F0+2F1
$f_{19}$	3.851(2)	0.575 30(6)	0.48(1)	7.9	...
$f_{20}$	28.011(2)	0.618 85(6)	0.07(2)	7.8	4F0-F1
$f_{21}$	0.178(2)	0.669 63(6)	0.66(2)	5.7	...
$f_{22}$	16.711(3)	0.474 82(6)	0.33(2)	6.4	2F1-F0
$f_{23}$	12.473(4)	0.371 51(6)	0.60(3)	5.6	...

注: 在这些频率中, 有两个峰值为独立频率, 其余为倍频或组合频率; “...”表示非径向频率。

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 1b) 展示的是按基频  $10.51243 \text{ d}^{-1}$  折叠的相位曲线, 图 1c) 是该源的傅里叶振幅谱, 图 1d) 是白化掉所有显著频率后的残差。

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<sup>[22]</sup>。TIC 358502706 在 TESS 空间望远镜观测区间 1、12、13、27 和 39 中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 2 458 624.956 7046 到 2 458 682.358 442 99 共 56.3 d 的数据。经过处理后, 我们得到由 33 905 个数据点组成的光变曲线, 图 2a) 中, 选取该源 3 d 的测光数据作了展示, 振幅大约为 0.30 mag; 图 2b) 是该源按基频  $11.674079 \text{ d}^{-1}$  折叠的相位图; 图 2c) 为该源的傅里叶振幅谱; 图 2d) 是经白化后得到的残差。

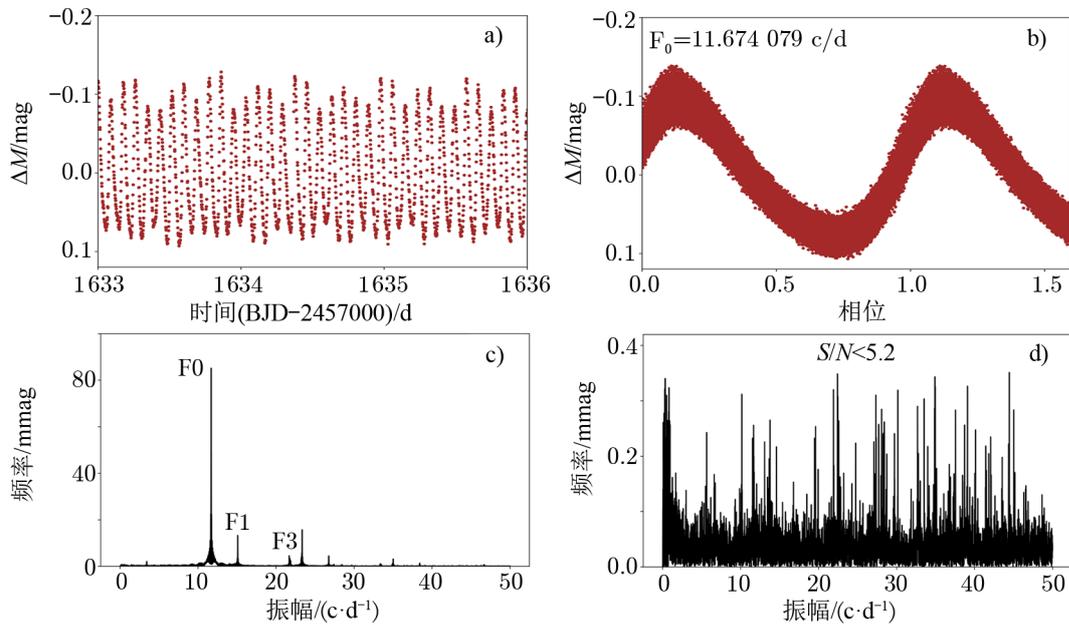


图 2 TIC 358502706 的部分光变曲线 (图 a)), 相位折叠曲线 (图 b)), 傅里叶振幅谱 (图 c)), 白化掉所有显著频率后的残差 (图 d))

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<sup>[23]</sup> 的研究结果一致。 $f_4$  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<sup>[21]</sup> 提供的径向脉动模式的周期比值范围, 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  $f_{13}$ 。

TIC 260654645(UCAC4-161-008109) 在 AAVSO 国际变星星表 (VSX) 中被归类为盾

表 3 TIC 358502706 的 2 min 曝光数据中提取的显著频率

$f_i$	频率/ $\text{d}^{-1}$	振幅/ $10^{-3}\text{mag}$	相位	信噪比 ( $S/N$ )	频率对应的模式
$f_1$	11.674 079(3)	83.976 78(3)	0.898 16(5)	1 265.0	F0
$f_2$	23.348 16(2)	15.038 48(3)	0.190 6(3)	115.9	2F0
$f_3$	15.082 98(2)	12.412 07(3)	0.317 1(3)	303.7	F1
$f_4$	21.689 05(6)	4.434 80(3)	0.555 5(9)	23.9	F3
$f_5$	26.757 09(6)	4.340 74(3)	0.569(1)	56.1	F1+F0
$f_6$	35.022 43(8)	3.034 64(3)	0.175(1)	60.0	3F0
$f_7$	3.409 0(1)	2.048 35(3)	0.149(2)	42.9	F1-F0
$f_8$	38.430 9(2)	1.364 72(3)	0.402(3)	24.9	2F0+F1
$f_9$	28.449 5(2)	1.228 49(3)	0.520(3)	18.7	3F0+F1+F3
$f_{10}$	27.422 7(3)	0.980 29(3)	0.721(4)	11.5	8F1-8F0
$f_{11}$	33.491(3)	0.890 21(3)	0.694(5)	11.1	F0+F3
$f_{12}$	46.696 0(4)	0.672 92(3)	0.185(6)	15.7	4F0
$f_{13}$	14.015 3(5)	0.543 39(3)	0.932(8)	10.8	...
$f_{14}$	45.674 9(5)	0.515 43(3)	0.466(8)	11.1	3F1
$f_{15}$	29.764 3(5)	0.462 93(3)	0.914(9)	10.6	4F0-4F1+2F3
$f_{16}$	8.265 1(5)	0.464 20(3)	0.728(9)	11.8	2F0-F1
$f_{17}$	10.013 2(6)	0.407 69(3)	0.22(1)	9.1	F3-F0
$f_{18}$	36.998 2(7)	0.359 03(3)	0.59(1)	7.3	F1+F3
$f_{19}$	43.463 3(7)	0.352 15(3)	0.87(3)	7.1	2F3

注: 在这些频率中, 有两个峰值为独立频率, 其余为倍频或组合频率; “...”表示非径向频率。

牌座  $\delta$  型脉动变星, Antoci<sup>[22]</sup> 等人将其归类为 HADS。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 TESS 绝对星等为  $M_{\text{TESS}} = 1.58(1)$  mag。TIC 260654645 在 TESS 空间望远镜的观测中有多个观测区间, 本研究使用了采样间隔为 2 min 的区间 12 和 13 的连续测光数据, 时间跨度从儒略日 2 458 626.463 125 38 至 2 458 682.355 727 25。经过处理, 总共获得该源的 36 668 个数据点。图 3a) 展示了该源 3 d 的光变曲线, 其振幅约为 0.34 mag, 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 列出了在 TIC 260654645 中探测到的 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 0.804 4, 略高于径向脉动模式理论预测值<sup>[21]</sup>。由  $f_1$  和  $f_3$  的多个组合频率以及  $f_3$  显著的振幅值可知, 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 3b) 为 TIC 260654645 按基频 10.984 76  $\text{d}^{-1}$  折叠的相位曲线; 图 3c) 展示了该源的傅里叶振幅谱; 图 3d) 是白化掉所有显著频率后的残差。

图 3b) 展示在接近光度极小值时, 按基频 10.984 76  $\text{d}^{-1}$  折叠的相位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 RR ab 型变星光变曲线形状的典型特征<sup>[24]</sup>。然而, 天琴座 RR 型变星通常具有大约  $0.7 M_{\odot}$  的恒星质量和约为 0.6 mag 的绝对星等, 光变周期范围为 0.3 ~ 1.2 d (平

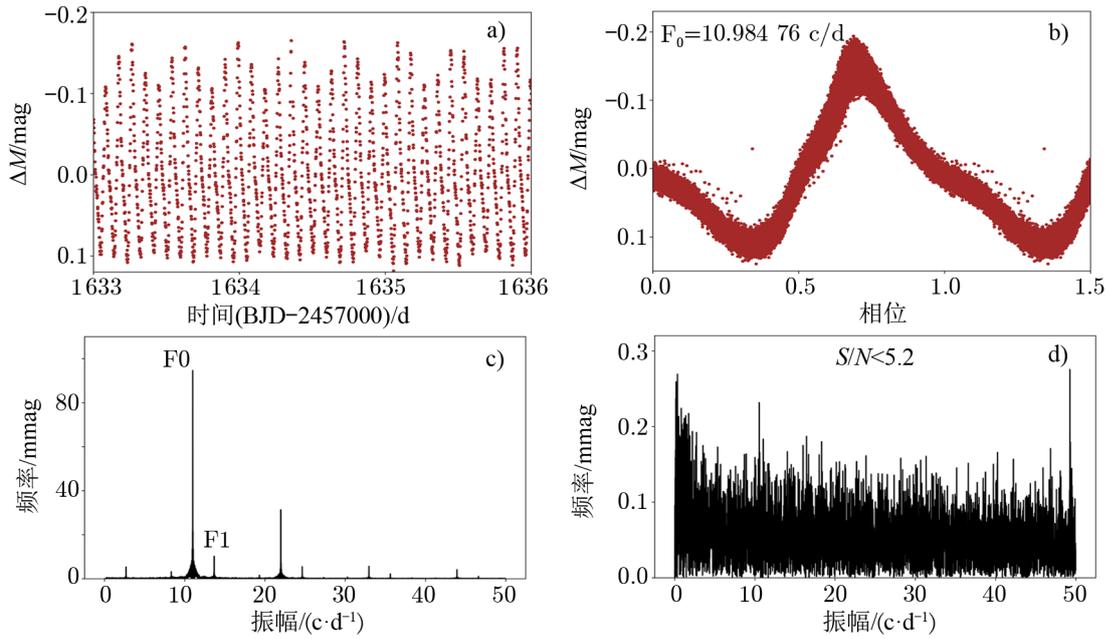


图 3 TIC 260654645 的部分光变曲线 (图 a), 相位折叠曲线 (图 b), 傅里叶振幅谱 (图 c), 白化掉所有显著频率后的残差 (图 d)

表 4 TIC 260654645 的 2 min 曝光数据中提取的显著频率

$f_i$	频率/d <sup>-1</sup>	振幅/10 <sup>-3</sup> mag	相位	信噪比 (S/N)	频率对应的模式
$f_1$	10.984 76(5)	99.353 415(5)	0.689 40(8)	1 051.3	F0
$f_2$	21.969 26(1)	31.287 55(5)	0.230 8(2)	463.8	2F0
$f_3$	13.656 25(5)	10.008 745(5)	0.515 5(8)	170.2	F1
$f_4$	32.953 73(8)	5.684 47(5)	0.561(1)	93.2	3F0
$f_5$	24.641 00(8)	5.588 19(5)	0.653(1)	90.9	F1+F0
$f_6$	2.671 55(9)	8.568 84(6)	0.546(1)	80.1	F1-F0
$f_7$	43.938 4(1)	4.213 57(5)	0.704(2)	83.5	4F0
$f_8$	8.312 7(2)	2.880 98(5)	0.832(3)	45.0	2F0-F1
$f_9$	35.625 6(2)	2.291 30(5)	0.900(3)	41.8	2F0+F1
$f_{10}$	19.297 1(3)	1.384 665(5)	0.472(5)	22.6	3F0-F1
$f_{11}$	46.610 3(4)	1.157 72(5)	0.103(7)	23.0	3F0+F1
$f_{12}$	30.282 0(6)	0.708 34(5)	0.40(1)	12.9	4F0-F1
$f_{13}$	16.329 3(9)	0.530 60(5)	0.69(1)	8.0	2F1-F0
$f_{14}$	27.312(1)	0.449 67(5)	0.92(2)	8.3	2F1
$f_{15}$	38.298(1)	0.436 161(5)	0.09(2)	6.8	F0+2F1
$f_{16}$	41.268(1)	0.345 70(5)	0.02(2)	6.3	5F0-F1
$f_{17}$	49.279(2)	0.275 61(5)	0.48(3)	5.7	2F0+2F1

注: 在这些频率中, 有两个峰值为独立频率, 其余为倍频或组合频率。

均约 0.55 d)<sup>[16, 25]</sup>。结合表 1 中的基本恒星参数, 可以确定该源与典型天琴座 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。由上述讨论可知, 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 的周期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  $v_b$  仅为 20.5 km/s<sup>[26]</sup>。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<sup>[27]</sup>。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<sup>[10]</sup>。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。

为了探究这 3 颗 HADS 的演化状态, 基于它们的 TESS 绝对星等和有效温度, 我们绘制了它们在赫罗图上的位置 (见图 4)。该图中彩色的菱形点代表这 3 颗 HADS; 灰色实心点为从其他文献搜索的 HADS<sup>[1, 9, 28-33]</sup>, 蓝色实心点代表的是 Lv 等人 2023 年发布的 7 颗 HADS<sup>[10]</sup>。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  $\delta$  型变星的脉动不稳定带的蓝边缘和红边缘<sup>[1]</sup>。可见, TIC 260654645 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。

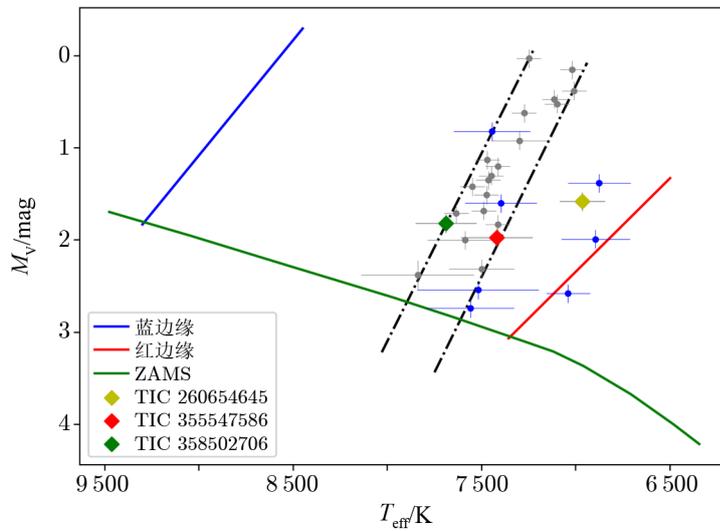


图 4 27 颗 HADS 恒星和本研究 3 颗目标源 (彩色菱形点) 在赫罗图上的位置

#### 4 总结和展望

本文基于 TESS 空间望远镜的时序测光数据, 对 3 颗 HADS 进行了深入的频率分析,

首次得出了这 3 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. In: Breger M, Montgomery M, eds. *Delta Scuti and Related Stars*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2000, 210: 373
- [2] Balona L A. *MNRAS*, 2018, 479(1): 183
- [3] Rodríguez E, López-González M J, López de Coca P. *A&AS*, 2000, 144: 469
- [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. <https://arxiv.org/abs/2110.13594>, 2025
- [6] Bowman D M, Hermans J, Daszyńska-Daszkiewicz J, et al. *MNRAS*, 2021, 504(3): 4039
- [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
- [13] Pamyatnykh A A. In: Breger M, Montgomery M, eds. *Delta Scuti and Related Stars*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 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*. Heidelberg: Springer, 2010: 1
- [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, McCauliff S, et al. In: Chiozzi G, Guzman J C, eds. *Software and Cyberinfrastructure for Astronomy IV*. Bellingham: SPIE, 2016, 9913: 1
- [19] Baran A S, Koen C, Pokrzywka B. *MNRAS*, 2015, 448: L16
- [20] Montgomery M H, O'Donoghue D. *Delta Scuti Star Newsletter*, 1999, 13: 28
- [21] Stellingwerf R F. *ApJ*, 1979, 227: 935
- [22] Antoci V, Cunha M S, Bowman D M, et al. *MNRAS*, 2019, 490(3): 4040
- [23] Khruslov A V. *Peremennye Zvezdy*, 2022, 42(5): 28
- [24] Kurtz D. *Annual Conference and General Assembly*. Paris: International Astronomical Union, 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

- [27] Suárez J C, Garrido R, Goupil M J. *A&A*, 2006, 447(2): 649  
[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  
[30] Christiansen J L, Derekas A, Ashley M C B, et al. *MNRAS*, 2007, 382(1): 239  
[31] Peña J H, Villarreal C, Piña D S, et al. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 2016, 52: 385  
[32] Balona L A, Lenz P, Antoci V, et al. *MNRAS*, 2012, 419(4): 3028  
[33] Uluşoy C, Gülmez T, Stateva I, et al. *MNRAS*, 2013, 428(4): 3551

## Pulsation Properties and Frequency Analysis of Three High-amplitude $\delta$ Scuti Stars

AYZADA Jumahali<sup>1</sup>, LV Chenglong<sup>2</sup>, ALI Esamdin<sup>2</sup>,  
YANG Taozhi<sup>3</sup>, SHEN Lixian<sup>2,4</sup>

(1. College of Physical Science and Technology, Xinjiang University, 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 100049, China)

**Abstract:** High-amplitude  $\delta$  scuti stars (HADS), a subclass of  $\delta$  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 asteroseismology. In this paper, a frequency analysis of three HADS is performed for the first time 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  $\delta$  Scuti star; frequency analysis; pulsation mode