

Ap/Bp星的随机低频振荡研究*

何欢¹ 朱春花^{1†} 吕国梁¹ 沈冬祥²

(1 新疆大学物理科学与技术学院 乌鲁木齐 830046)

(2 长沙师范学院初等教育学院 长沙 410100)

摘要 Ap/Bp星指的是有效温度在8000 K到16000 K之间, 光谱类型在B8到F0之间, 并且具有较强且变化的磁场的恒星. 其表面的磁场强度从几十高斯到上万高斯不等. 随机低频振荡(Stochastic Low-Frequency Variability, SLFV)虽已在不同质量恒星中被普遍观测, 但现有研究多集中于大质量恒星. 使用TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)空间望远镜提供的高精度的测光数据, 将SLFV研究从大质量恒星拓展至中等质量的Ap/Bp星. 结果表明样本中Ap/Bp星的SLFV所对应的斜率 $\gamma < 4.6$, 绝大多数 γ 在0.5到2.5之间, 特征频率 ν_{char} 主要在0到1.8 d⁻¹范围内, 振幅 $\lg \alpha_0$ 主要分布在1.2到4.0之间. 与前人的研究结果一致. 分析结果显示, Ap/Bp星的质量、半径、演化程度和其SLFV没有相关性. 与观测对比后, 将Ap/Bp星的SLFV归因于内部重力波(Internal Gravity Wave, IGW).

关键词 恒星; 化学奇特; 技术: 测光; 方法: 数据分析

中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

Ap/Bp星指的是有效温度在8000 K到16000 K之间, 光谱类型在B8到F0之间, 并且具有较强且变化的磁场的恒星^[1]. 其表面磁场的强度从几十高斯到数万高斯不等, 这种磁场强度足以影响恒星的辐射传输和表面活动, 从而在它们的光变曲线上产生显著的特征, 导致光谱中通常表现出硅(Si)、铬(Cr)、锶(Sr)和铕(Eu)等元素的增强谱线, 这些超丰的元素有的可以达到太阳中对应元素值的100万倍. 磁场对其内部物理过程、自转等方面也产生重要影响^[2]. Ap/Bp星最引人注目的特性之一是与相同温度范围内的正常主序星相比, 它们的旋转速度较慢. 这些恒星的旋转周期可以短至

0.5 d, 大多数的旋转周期在2–10 d之间^[3].

Ap/Bp星存在脉动, 其脉动主要分为在其包层中以径向运动为主的压力模式(pressure modes, p-modes)和在其内部以水平运动为主的重力模式(gravity modes, g-modes)两类^[4]. 近年来随着日地关系观测台(Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO)^[5]、开普勒望远镜(Keplerian telescope, Kepler)^[6]和 TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)空间望远镜^[7]提供的连续高精度和高占空比的光度数据集, Ap/Bp星的星震学分析研究获得了一些进展. 最近通过星震学方法, Burssens等人限制了一些B型恒星的核心质量和年龄^[8]. Townsend等人测量了B型星的内部旋转剖面^[9].

2025-03-09收到原稿, 2025-07-16收到修改稿

*中国载人航天工程巡天空间望远镜专项科学研究项目(CMS-CSST-2025-A15)、国家自然科学基金项目(12163005)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01D85)资助

† chunhuazhu@sina.cn

Szewczuk等人通过分析晚期B星的相干脉动揭示了晚期B星的内部旋转轮廓和对流边界及包层混合轮廓的多样性^[10]. Zhong等人应用斜向脉动模型, 得到TIC96315731、TIC72392575和TIC3180077-96的自转倾角和磁倾角^[11]. 但只有很少的Ap/Bp星能通过研究g-modes的脉动得到其内部信息^[4].

除了脉动, Ap/Bp星如大质量恒星一样表现出随机低频振荡现象(Stochastic Low-Frequency Variability, SLFV). 这些振荡通常表现为光度的微小变化, 频率范围从几十到几千微赫兹不等. 目前的SLFV研究多集中于大质量恒星, 鲜少研究中质量恒星. Ap/Bp星的SLFV现象所对应的激发机制目前尚无定论. Cantiello等人提出, Ap/Bp星的SLFV可能是由亚表面对流区激发的, 并且对亚表面对流区激发的SLFV进行了模拟, 他们的数值模拟再现了观测到的SLFV典型值及在光谱赫罗图中的变化趋势^[12]. 近期多维流体力学模拟也详细地研究了在早型星中羽流穿透的机制^[13]. 多维流体力学的模拟结果已经证明, 在早型星的对流核心与辐射包层界面可以产生不同物理过程激发的IGW^[14-15], 这些IGW预计将产生观测到的SLFV和恒星表面附近的显著切向速度场^[16]. Schwarzschild最早讨论米粒结构是SLFV现象产生的原因^[17]. 由于后主序晚期A型和早期F型恒星的表面对流区不可忽视, 因此米粒结构被认为是解释其SLFV现象的原因^[18].

SLFV的研究提供了一种新方法研究Ap/Bp星的内部^[19-20]. Bowman等人利用对70颗早型星的高精度光度测量和高分辨率光谱观测结果, 研究了其SLFV与恒星参数之间的统计相关性. 研究表明, 更亮的恒星其SLFV振幅更大, 但对应的SLFV的特征频率更小. 同时研究表明, SLFV与宏观湍流展宽之间的相关关系为早型星内部重力波(Internal Gravity Wave, IGW)的存在提供了强有力的证据^[19]. 基于由Kepler/K2和TESS观测的167颗大质量恒星的更大样本, Bowman等人展示了对于所有质量约为 $3M_{\odot}$ 或更大质量恒星的SLFV的形态, 结果显示其SLFV和光度有正相关关系^[20]. Shen等人研究了55颗Ap/Bp星的SLFV, 得出Ap/Bp星SLFV没有质量依赖性, 同时Shen等

人也指出该结论受到样本容量的限制^[21].

迄今, 仅极少数Ap/Bp星能借助g-modes脉动揭示其内部结构^[4], SLFV的研究又几乎局限于大质量恒星, 样本稀缺致使中等质量区间Ap/Bp星的内部信息及其SLFV激发机制仍尚无定论.

为了弥补这一现状, 本文使用TESS从第1扇区到第72扇区观测到的短时标TPF数据, 研究了215颗Ap/Bp星的SLFV的物理原因, 并为它们建立了星表. 在第2节介绍了数据来源, 第3节介绍了提取光变曲线和处理频率谱的方法, 第4节给出了本工作的结果, 并讨论了这两百多颗Ap/Bp星的SLFV的物理机制, 在第5节对本工作进行了总结.

2 数据来源

TESS望远镜通过将天空划分为13个观测扇区, 每个扇区的观测范围约为 $24^{\circ} \times 96^{\circ}$, 对整个天空进行了系统的观测. 卫星大约每27 d完成一个扇区的观测周期, TESS望远镜提供的测光数据具有高精度、高时间采样率的特点, 为研究恒星的物理特性提供了宝贵的数据资源.

本文选用了2009年Renson和Manfroid提供的星表、2017年Netopil等人提供的星表以及2020年Hümmerich等人基于LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) DR4调查所给出的星表. 这些星表为本文提供了广泛的Ap/Bp星候选样本.

由于后续计算Ap/Bp星的物理参数需要V波段星等以及距离等数据, 本文排除了数据不完整的Ap/Bp星. 因为邻近恒星在测光中对目标星的SLFV有影响, 因此, 本文在数据处理环节中增加了对样本中恒星的污染率评估, 并只保留污染率低于5%的Ap/Bp星. 经过筛选, 最终在初始样本中的643颗Ap/Bp星中, 有215颗恒星符合样本筛选标准. 这215颗Ap/Bp星最终被选为本研究的样本, 并用于后续的详细分析. 图1是215颗Ap/Bp星在天球坐标系中的分布图, 每颗五角星代表一颗Ap/Bp星, 并且用TESS采样时间进行颜色编码, 红色实线表示银河. 为了满足本研究对Ap/Bp星的分析需求, 本文从MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes)数据库中下载了目标恒星在1至

72号扇区的120 s特定区域观测图像, 这些图像构成了后续分析的数据基础。

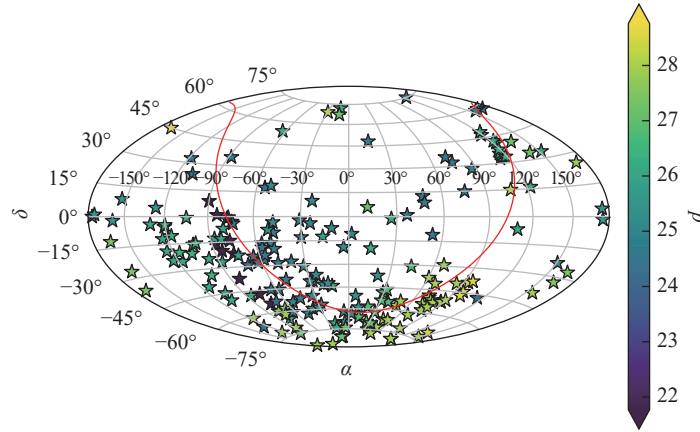


图 1 Ap/Bp星在天球坐标系中的分布图. 五角星表示Ap/Bp星, 红色实线表示银河, 颜色代表不同恒星被TESS连续观测的天数.

Fig. 1 The distribution map of Ap/Bp stars in the celestial coordinate system. Five-pointed stars represent Ap/Bp stars, the red solid line marks the Galactic plane, while the colors indicate the number of consecutive days each star was observed by TESS.

3 分析方法

3.1 TESS光变曲线提取

Lightkurve是一个用于Kepler和TESS时间序列分析的工具包, 本文利用Lightkurve进行数据的处理, 以获得目标恒星的TESS光变曲线. 在测光孔径的选择中, 本文用中位数绝对偏差乘以1.4826得到标准偏差, 光度孔径则是选择所有通量高于中位数亮度的标准偏差倍数的像素. 由于TESS的像素分辨率相对较低, 每个像素大约覆盖 $21''$ 的视场, 容易导致多颗恒星的光在一个像素内混合. 为了最小化邻近恒星导致的光度测量污染, 同时保持目标恒星的最高通量, 本文对光度孔径进行了优化处理. FluxCT (Flux Contamination Tool)被设计用于识别TESS时间序列数据中的污染通量, 主要用于检测TESS任务获取的图像数据中可能受到邻近恒星光污染的区域. FluxCT通过访问Gaia EDR3数据库, 寻找在特定恒星观测区域内可能混入的外来光源, 进而计算出这些光源对观测结果的污染程度. 污染率对Ap/Bp星的SLFV所对应的振幅 $\lg \alpha_0$ 影响小, 对其特征频率 ν_{char} 和斜率 γ 影响大, 污染率大于5%时相对误差显著, 故本文通过FluxCT排除污染系数较高的像素,

使样本中Ap/Bp星的光度孔径污染率低于5%. 污染率的计算如下:

$$C_{\text{con}} = 100\% \times [1 - 10^{0.4(T_{\text{total}} - T_{\text{target}})}], \quad (1)$$

其中 T_{total} 是测光孔径内所有污染源的TESS星等之和, T_{target} 是目标星的TESS星等^[22].

为了揭示恒星的真实光变特征, 本文实施了一系列的数据预处理步骤以消除背景噪声的干扰. 首先, 本文定义了一个基于阈值的背景孔径掩模, 该阈值设置为亮度中位数以下一个标准差, 以此将亮度较低的像素纳入分析, 有效排除了背景噪声的影响. 此外, 本文采用了回归校正和像素级去相关来进一步消除系统性背景噪声. 同时, 本文还运用了Lightkurve中的sigma工具, 移除了那些通量值超过平均值 ± 3 倍标准偏差的点, 以识别并排除数据中来源于仪器误差或宇宙射线的异常值. 为了纠正长期仪器趋势, 包括不连续的跳跃和缓慢的漂移, 本文对光变曲线进行了线性或低阶多项式的拟合处理. 为了便于观察, 数据校正完成后, 本文将光度数据转换为星等单位. 最后, 本文用Ap/Bp星的连续观测段数据画出完整的光变曲线, 并消除了其光变曲线的长期趋势. 图2是经过使用孔径选择和数据缩减后的TIC462877348由第36至

第37扇区数据画出的光变曲线, 其中 ΔM 是相对星等.

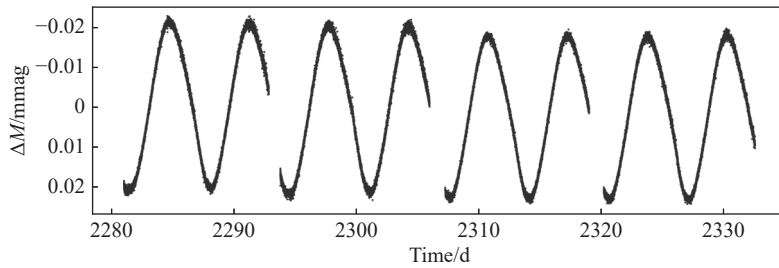


图 2 TIC462877348由扇区36和37组成的光变曲线

Fig. 2 The light curve of TIC462877348, which results from combining 2 sectors (sectors 36 to 37)

3.2 频率提取

在对Ap/Bp星SLFV分析时, 因为SLFV在频谱中对应红噪声部分信号, 所以本文需要将光变曲线中的显著信号全部移除, 直到只剩下噪声信号. 在频谱分析中, 频率分辨率与观测时间成正比, 合并数据可以减少由于观测条件变化引起的随机误差. 因此本文提取并移除显著信号之前将Ap/Bp星中所有具有连续扇区的光变曲线组合成一条组合光变曲线以便更好地提取脉动信号. Smurfs是一种依靠python库的Lightkurve和eleanor包采用完全自动化的方式从时间序列中提取显著频率的工具, 本文使用Smurfs工具提取并移除光变曲线的显著频率.

信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)是衡量信号质量的一个重要指标. 根据2021年Bowman和

Michielsen的研究, 本文在使用smurfs过程中仅将SNR值大于4.6的信号视为显著的脉动信号^[23]. 此外, 窗口大小的选择会影响频率分辨率和噪声抑制, 窗口大小的选择应该根据恒星的不同演化阶段进行优化设置. 根据Bursens的方法, 在本文的研究中, 对于早期演化阶段的B型矮星、亚巨星和巨星(对应于BV和BVI的光谱类型), 窗口大小设置为5. 对于B型巨星、亮巨星和超巨星(对应于BIII、BII和BI的光谱型), 窗口大小值设置为1. 对于A型恒星, 本文将窗口大小设置为2^[24]. 样本中所有Ap/Bp星都使用上述方法提取频率, 例如TIC355824995提取结果如图3所示. 图3的左图是其处理好的光变曲线, 右图是使用smurfs工具从其光变曲线中提取出的频率结果.

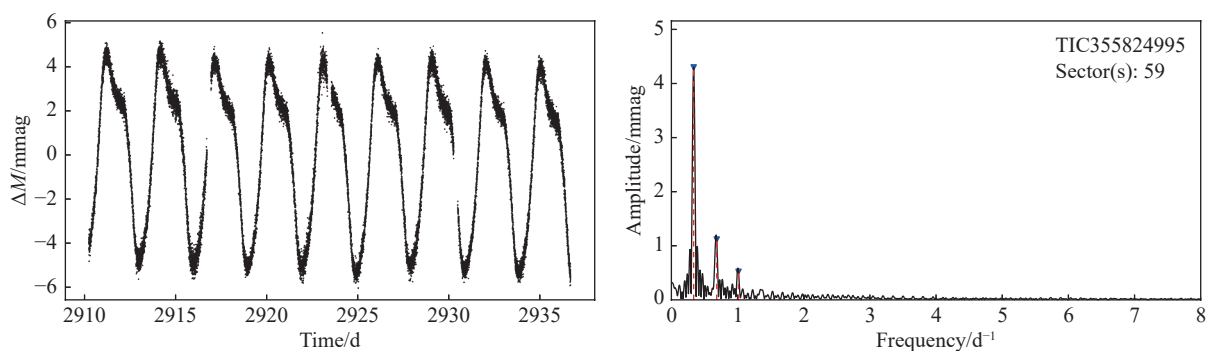


图 3 TIC355824995频率提取结果. 左图是其光变曲线, 右图是频谱图, 频谱图中蓝色倒三角标志为显著频率.

Fig. 3 The frequency results of TIC355824995. The left panel shows the light curve of TIC355824995, the right panel shows the spectrogram, and the blue inverted triangle in the spectrogram indicates significant frequencies.

3.3 分析方法

移除显著信号后剩下的光变曲线所对应的频谱为残余频谱, Ap/Bp星的SLFV信号在残余频谱中的体现为红噪声部分, 为了深入研究其特点, 其形态本文用洛伦兹函数(Lorentzian function)来拟合, 具体表现形式如下^[19]:

$$\alpha(\nu) = C_w + \frac{\alpha_0}{1 + \left(\frac{\nu}{\nu_{\text{char}}}\right)^\gamma}, \quad (2)$$

其中 $\alpha(\nu)$ 表示在频率 ν 处对应的振幅, α_0 是比例因子, 表示零频率处的振幅, C_w 是白噪声项.

在推断恒星残余频谱中的SLFV轮廓参数时, 本文借鉴了Bowman等^[20]先前的研究方法, 采用贝叶斯马尔可夫链蒙特卡罗框架(Monte Carlo Markov Chain, MCMC), 并结合python包中的emcee库^[25], 从残差振幅光谱中推导出形态信息. 在这过程中使用了平坦先验条件, 并设置了128个平行链. 在每次迭代中, 每个参数链用于构建一个模型, 并使用Anderson等^[26]所用的似然函数(likelihood function)来评估每条参数链的模型构建结果, 似然函数的具体形式如下:

$$\ln L = - \sum_i^N \left\{ \ln[M_i(\theta)] + \frac{O_i}{M_i(\theta)} \right\}, \quad (3)$$

其中 N 表示残余频谱中的数据点数量, O_i 表示第 i 点的残余频谱的振幅值, $M_i(\theta)$ 表示模型在拟合参数 θ 的条件下第 i 点的振幅值.

本文采用Gelman和Rubin给出的标准来确认参数的收敛性, 并将迭代次数设置为1000次, 以确保足够的采样并使链充分混合^[27]. 每颗Ap/Bp星都通过上述过程进行分析. 例如, 图4是TIC295698744的对数振幅谱, (2)式的最佳拟合结果在图中用蓝色实线表示, 图中的红色点划线和绿色虚线分别代表红噪声和白噪声分量. 图5是使用MCMC方法得到的TIC295698744的SLFV拟合参数后验分布. 图中红色十字线表示中心最佳拟合值.

3.4 天体物理参数

本文使用了多色测光星等与恒星有效温度的经验关系计算了样本Ap/Bp星的物理参数. 首先

基于Ap/Bp星在Johnson UBV测光系统的星等值与三维消光图, 计算了每颗Ap/Bp星的消光系数与内禀色指数. 接着利用Netopil等人研究的CP2星的星等与恒星参数的经验关系以及内禀色指数^[28], 本文得到了样本中Ap/Bp星的有效温度 T_{eff} . 具体方法如下, 样本中Ap/Bp星的热改正BC由下式确定:

$$\text{BC} = -5.737 + 18.685\theta_{\text{eff}} - 15.235\theta_{\text{eff}}^2, \quad (4)$$

其中 $\theta_{\text{eff}} = 5040/T_{\text{eff}}$, 由此可得到Ap/Bp星的有效温度. 基于盖亚天文卫星(Gaia Astrometry Satellite)提供的距离参数 r ^[29], 本文使用下面公式可以得到Ap/Bp星的绝对星等,

$$M_v = m_v + 5 - 5 \lg r, \quad (5)$$

其中 M_v 是绝对星等, m_v 是目视星等.

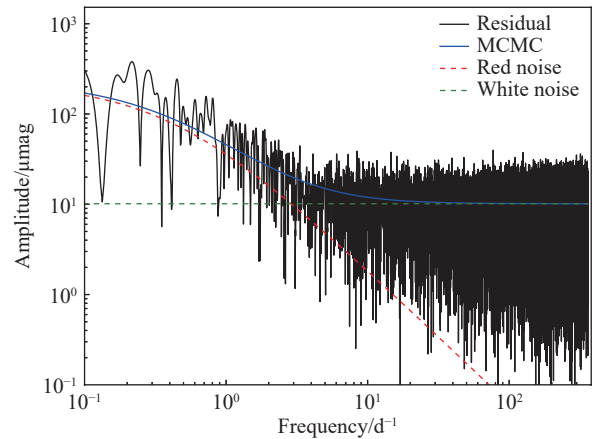


图4 TIC295698744的对数振幅谱. (2)式的最佳拟合结果用蓝色实线表示, 红色点划线和绿色虚线分别代表红噪声和白噪声分量.

Fig. 4 The logarithmic amplitude spectrum of TIC295698744. The best fit results from Equation (2) is represented by a blue solid line. The red dashed line and green dashed line represent the red noise and white noise components.

最后, Ap/Bp星的光度 L 可以通过下式计算得到:

$$\lg \left(\frac{L}{L_\odot} \right) = -0.4 [M_v - V_\odot - 31.572 + (\text{BC} - \text{BC}_\odot)]. \quad (6)$$

其中 $V_\odot = -26.72 \text{ mag}$, $\text{BC}_\odot = -0.19 \text{ mag}$ ^[30].

4 结果与讨论

在图6中,展示了Ap/Bp星样本中SLFV拟合参数之间的关系,每颗Ap/Bp星都按其光度进行颜色编码. Ap/Bp星的特征频率 ν_{char} 主要分布在0到1.8 d^{-1} 之间. SLFV的振幅 $\lg \alpha_0$ 主要分布在1.2到4.0之间,而斜率 γ 主要在0.5到2.5之间. 本文计算了斯皮尔曼秩序相关系数(Spearman rank-order correlation coefficients) R 来量化Ap/Bp星

样本中拟合参数之间的关系,并在相应图中的右上角进行了标记. 线性回归分析显示 $\lg \alpha_0$ 和 ν_{char} 之间存在负相关性($R = -0.20$),这表明具有较大变异性振幅的恒星倾向于有较小的 ν_{char} 值,本文的统计分析还表明 $\lg \alpha_0$ 和 γ 之间同样存在负相关性($R = -0.31$),同时 γ 和 ν_{char} 之间具有显著的正相关性($R = 0.52$). 这些拟合参数之间的显著相关性表明,具有较大SLFV振幅的Ap/Bp星可能具有较小的 ν_{char} 和 γ 值. 这与Shen等人的结果一致^[21].

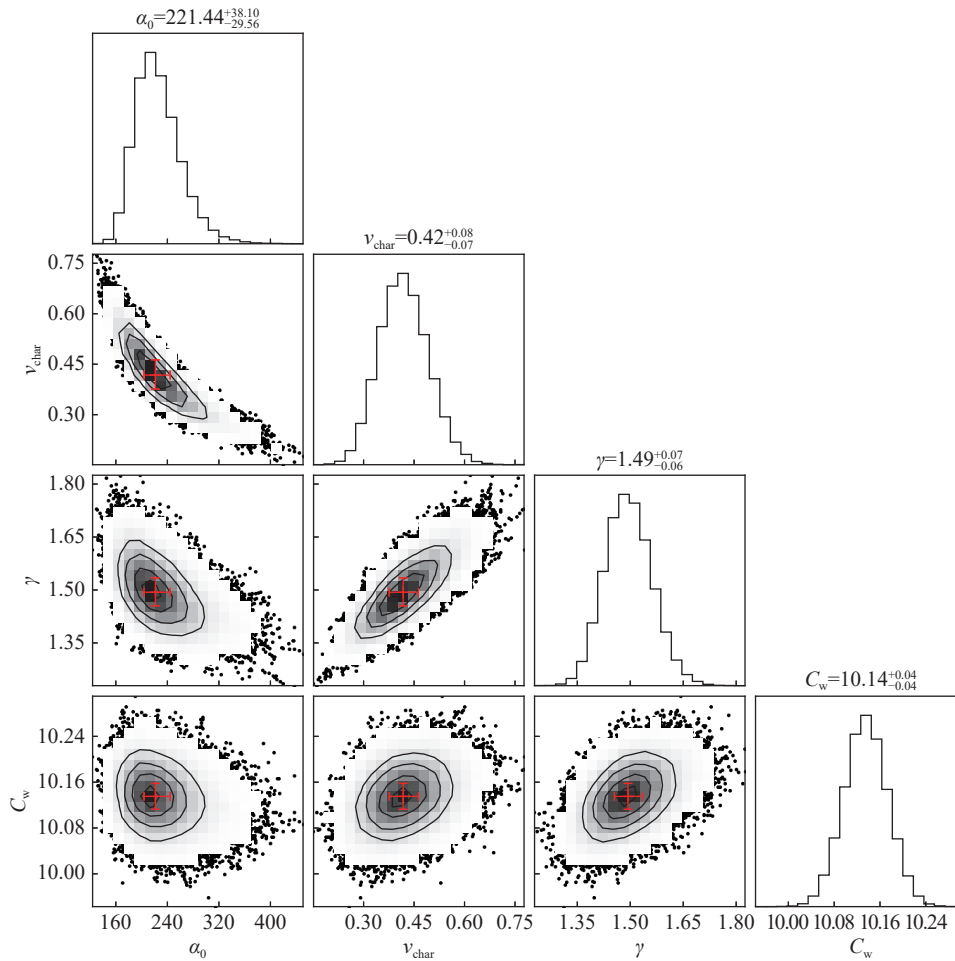


图 5 TIC295698744使用MCMC方法得到的SLFV拟合参数的后验分布. 红色十字线表示中心最佳拟合值.

Fig. 5 Posterior distributions of the SLFV fitting parameters for TIC295698744 obtained using MCMC. The red crosshairs indicate the central optimal fit value.

4.1 亚表面对流区

对于主序星来说,主序阶段对流主要发生在中心核以及靠近恒星表面的辐射包层区域即亚表

面对流区^[31]. 这种对流区的活动可以产生湍流,这些湍流通过对流羽流和对流涡旋将能量和动量传递到恒星表面,从而导致光度的变化. 在亚表面对

流区激发SLFV的前提下, 理论特征频率为 $v_{\text{char}} \approx 1/(2\pi\tau_c)$, 其中 τ_c 是亚表面对流区的平均对流时间^[32]. 在恒星演化过程中, 亚表面对流区向恒星内部更深的位置移动, 这种移动导致产生更大的压力尺度高度、更高的速度, 进而 τ_c 增加^[33]. 因此, 随着恒星年龄的增加, 将观察到SLFV的特征频率降低. 本文未发现上述规律. 图7是Ap/Bp星的SLFV的

拟合参数与质量和半径的关系图, 本文数据存在的每一颗Ap/Bp星用一个散点表示, 并用光度进行颜色编码. 如图7所示, SLFV的参数与恒星质量和半径之间不存在显著的相关性. 这一结果进一步否定了亚表面对流区激发SLFV的假设. 然而, 本文的样本多集中于质量偏小区域且演化程度不均匀, 这会给结果带来偏差.

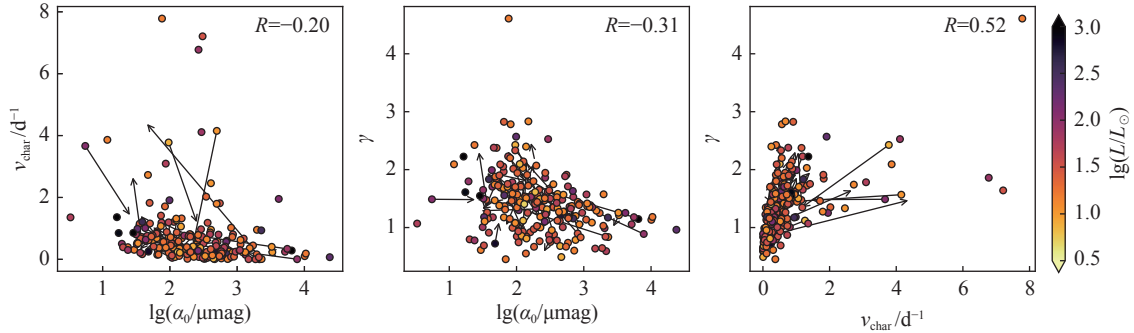


图 6 样本中Ap/Bp星的SLFV的拟合参数 $\lg\alpha_0$ 、 v_{char} 和 γ 之间的成对关系. 每颗Ap/Bp星用散点表示, 同一颗恒星的连续扇区用箭头连接, 散点的颜色代表其光度.

Fig. 6 The pairwise relationship between fitting parameters $\lg\alpha_0$, v_{char} and γ of SLFV for Ap/Bp stars in our sample. Each Ap/Bp star is shown as a scatter point, consecutive sectors for the same star are linked with arrows, and the color of the points encodes its luminosity.

4.2 内部重力波

IGW被认为主要由雷诺应力形式的涡旋或羽流穿透产生, 在稳定分层区域内传播, 其中浮力是主要的恢复力^[34]. 2013年Shiode等人利用1D非旋转模型, 发现 $M \geq 2 M_{\odot}$ 的恒星的对流核将在主序星阶段产生可观测的表面亮度变化^[35]. 2019年Edelmann等人对一个 $3 M_{\odot}$ 的恒星进行了3D模拟, 他们的研究表明, 由羽流穿透激发的IGW产生的 γ 在0到3之间^[36]. Lecoanet等人发现通过涡旋穿透激发的IGW将产生更大的 γ 值^[37]. 如图5所示, 本文从振幅谱中得出的 γ 在0到3的范围内, 结果更接近于认为SLFV是由羽流穿透引发的IGW所导致的.

Vanon等人通过不同年龄的 $7 M_{\odot}$ 恒星的3D RHD模拟, 得到 v_{char} 随着恒星演化而降低, γ 随着恒星演化而增加的结论^[13]. Shiode等人利用 $2 M_{\odot}$ 到 $30 M_{\odot}$ 并处于不同的演化阶段的非旋转模型, 也得出SLFV的 v_{char} 随着恒星演化而降低^[35]的

结论. 为了更准确地研究Ap/Bp星的SLFV与Ap/Bp星演化的关系, 本文将Ap/Bp星放置在赫茨普龙-罗素图(HR图)中. 为了清楚展示样本中Ap/Bp星的位置分布, 本文使用MESA工具计算了初始质量从 $1.5 M_{\odot}$ 到 $4.5 M_{\odot}$ 的非旋转太阳金属丰度的恒星在HRD中的演化轨迹^[38], 其演化轨迹在图中以黑色线表示. 图8左右两图中, 样本中的每颗Ap/Bp星由一个散点表示, 散点的大小与拟合参数 γ 成正例, 左右图中散点的颜色分别按拟合参数 $\lg\alpha_0$ 和 v_{char} 的大小进行颜色编码. 由图分析, Ap/Bp星处于主序阶段, 样本中的Ap/Bp星质量主要分布在 $1.5 M_{\odot}$ 到 $2.5 M_{\odot}$ 之间, Ap/Bp星SLFV的拟合参数与其质量之间的关系不明显, 这与Bowman等人的研究结果一致^[39]. 而通过图8, 本文未发现演化程度与 γ 和 v_{char} 之间的关系. 本文的结果表明, 样本的SLFV或由IGW激发, 但结果无法解释 γ 和 v_{char} 与演化程度无关的现象, 可能与样本中只有少量Ap/Bp星分布于演化后期有关.

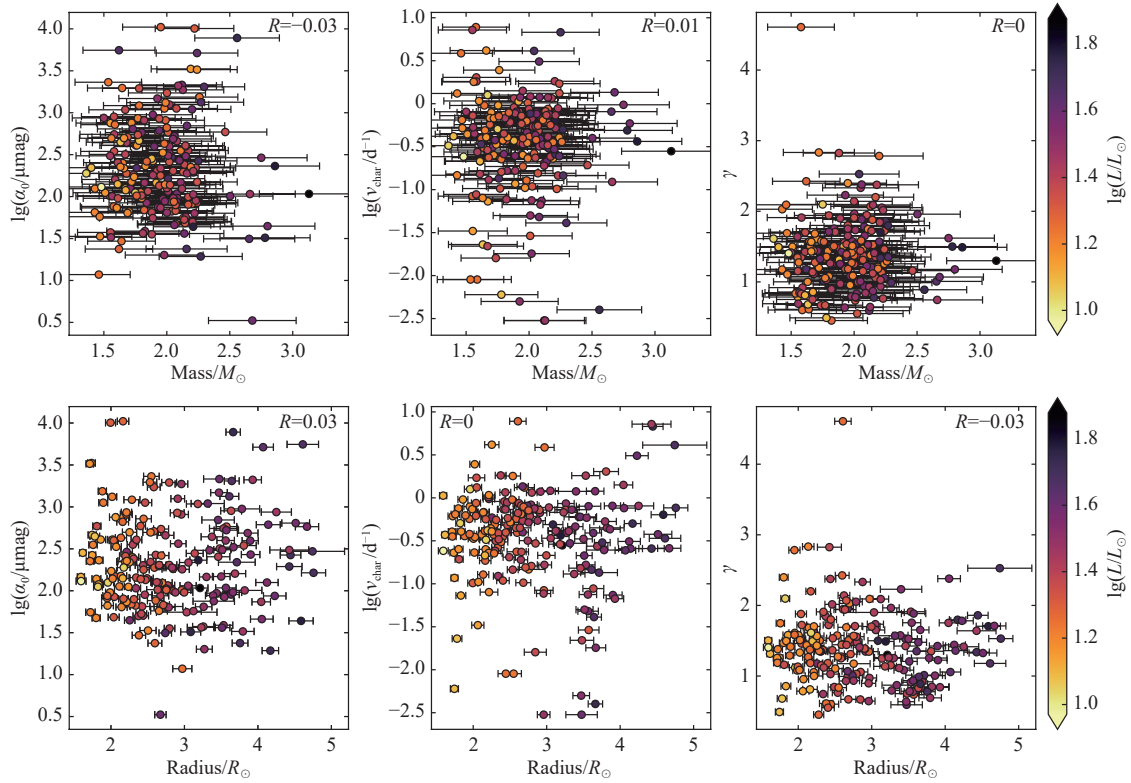


图 7 样本中Ap/Bp星的SLFV的拟合参数 $\lg \alpha_0$ 、 $\lg v_{\text{char}}$ 、 γ 与质量和半径之间的关系. 散点表示Ap/Bp星, 其颜色代表光度.

Fig. 7 The relationship between the fitting parameters of SLFV for Ap/Bp stars in the sample, namely $\lg \alpha_0$, $\lg v_{\text{char}}$, γ , and the mass and radius. Ap/Bp stars are shown as scatter points, with the color encoding their luminosity.

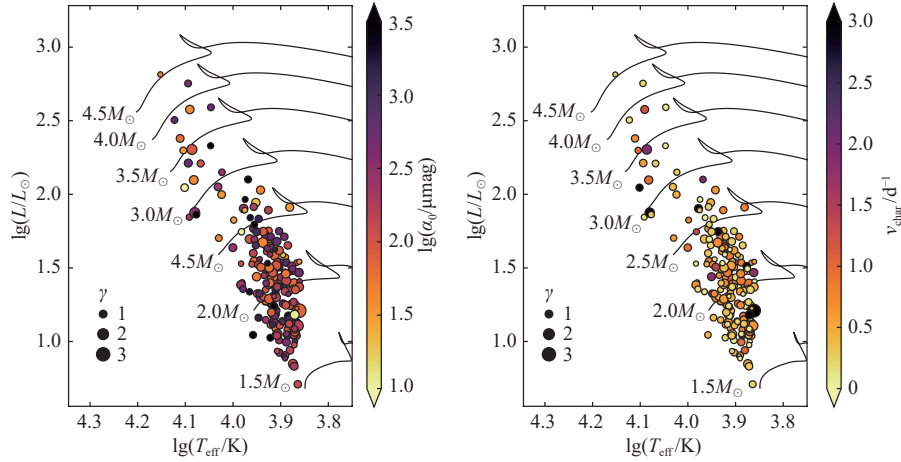


图 8 样本中Ap/Bp星在HR图上的位置. 左图每颗Ap/Bp星根据拟合参数 $\lg \alpha_0$ 进行颜色编码, 右图每颗Ap/Bp星根据拟合参数 v_{char} 进行颜色编码, 散点的大小与 γ 值成比例.

Fig. 8 The location of Ap/Bp stars in the HR diagram. Each Ap/Bp star is color-coded based on the fitting parameters $\lg \alpha_0$ (left panel) and v_{char} (right panel), with the size of the scatter points proportional to the γ values.

4.3 米粒结构

2011年Mathur等人发现米粒结构与数千颗脉动的类太阳型和红巨星的恒星参数之间存在显著的相关性, 这表明太阳表面的对流可以适当地推广至红巨星分支上的恒星^[40]. 此外, Kallinger等人将A型恒星中的SLFV归因于米粒结构^[41]. 2019年Bowman等人利用CoRoT光变曲线对一个由O、B、A和F型恒星组成的样本的SLFV的形态进行了参数化, 他们研究了米粒结构与恒星参数之间的缩放关系, 并得出结论, 对于SLFV在该样本恒星中不存在显著的缩放关系^[19]. 为了确定Ap/Bp星的SLFV是否与米粒结构有关, 本文将之前在类

太阳恒星中确定的缩放关系应用于Ap/Bp星, 其缩放关系如下:

$$v_{\text{char}} \propto gT_{\text{eff}}^{-1/2}, \quad (7)$$

$$A_{\text{gran}} \propto (g^2 M)^{-1/4}. \quad (8)$$

其中, g 是恒星表面重力, M 是恒星质量, A_{gran} 表示米粒结构的振幅.

图9是缩放关系图, 左图展示了 v_{char} 与 $gT_{\text{eff}}^{-1/2}$ 的缩放关系, 右图展示了 α_0 与 $(g^2 M)^{-1/4}$ 之间的缩放关系. Ap/Bp星用散点表示, 并根据光度进行颜色编码. 结果显示, v_{char} 和 $gT_{\text{eff}}^{-1/2}$ 之间, α_0 和 $(g^2 M)^{-1/4}$ 之间不存在相关关系, 这表明Ap/Bp星的SLFV不是由米粒结构产生的.

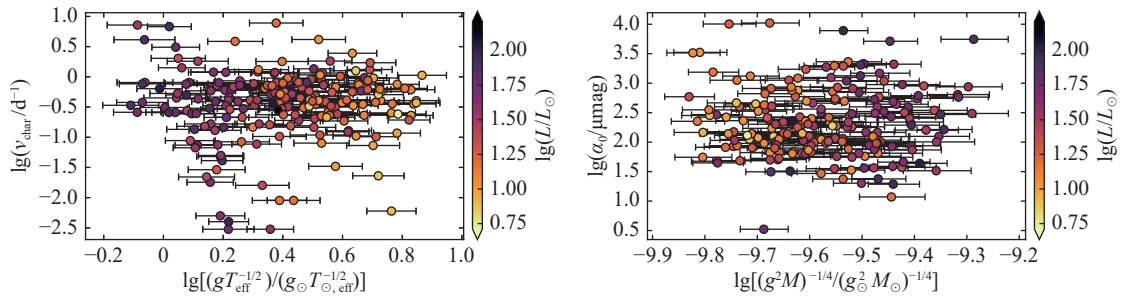


图9 v_{char} 与 $gT_{\text{eff}}^{-1/2}$, α_0 与 $(g^2 M)^{-1/4}$ 的缩放关系图. 散点表示Ap/Bp星, 其颜色代表光度.

Fig. 9 The scaling relationship diagrams between v_{char} and $gT_{\text{eff}}^{-1/2}$, as well as between α_0 and $(g^2 M)^{-1/4}$. Ap/Bp stars are shown as scatter points, with the color encoding their luminosity.

5 总结

本文使用来自TESS的观测数据研究了215颗Ap/Bp星的SLFV, 结果发现215颗Ap/Bp星都存在SLFV现象, 并且得到了其SLFV的拟合参数. 通过分析, 发现其SLFV与恒星的质量、半径、演化程度都不存在相关关系, 由于SLFV的起源目前仍存在争议, 本文将统计结果与各种潜在的激发机制进行了比较分析, 给出了其SLFV是由IGW激发的结论. 由于Ap/Bp星具有磁场, 且磁场会对恒星的对流和振荡模式产生影响, 从而影响Ap/Bp星的SLFV, 未来可以将磁场纳入分析.

参考文献

[1] Bagnulo S, Landolfi M, Mathys G, et al. *A&A*, 2000,

358: 929

- [2] Lignières F, Petit P, Böhm T, et al. *A&A*, 2009, 500: L41
- [3] Netopil M, Paunzen E, Hümmerich S, et al. *MNRAS*, 2017, 468: 2745
- [4] Aerts C. *RvMP*, 2021, 93: 015001
- [5] Wraight K, Fossati L, Netopil M, et al. *MNRAS*, 2012, 420: 757
- [6] Hümmerich S, Mikulášek E, Paunzen E, et al. *A&A*, 2018, 619: L41
- [7] Sikora J, David-Uraz A, Chowdhury S, et al. *MNRAS*, 2019, 487: 4695
- [8] Burssens S, Bowman D M, Michielsen M, et al. *NatAs*, 2023, 7: 913
- [9] Townsend R H D, Goldstein J, Zweibel E G. *MNRAS*, 2018, 475: 879
- [10] Szweczek W, Walczak P, Daszyńska-Daszkiewicz J, et al. *MNRAS*, 2022, 511: 1529
- [11] Zhong H J, Shen D X, Zhu C H, et al. *RAA*, 2024, 24: 085014
- [12] Cantiello M, Leccoanet D, Jermyn A S, et al. *ApJ*, 2021,

- 915: 112
- [13] Vanon R, Edelmann P V F, Ratnasingam R P, et al. *ApJ*, 2023, 954: 171
- [14] Le Saux A, Baraffe I, Guillet T, et al. *MNRAS*, 2023, 522: 2835
- [15] Herwig F, Woodward P R, Mao H, et al. *MNRAS*, 2023, 525: 1601
- [16] Horst L, Edelmann P V F, Andr assya R, et al. *A&A*, 2020, 641: A18
- [17] Schwarzschild M. *ApJ*, 1975, 195: 137
- [18] Pascual-Granado J, Garrido R, Suárez J C. *A&A*, 2015, 581: A89
- [19] Bowman D M, Aerts C, Johnston C, et al. *A&A*, 2019, 621: A135
- [20] Bowman D M, Burssens S, Pedersen M G, et al. *NatAs*, 2019, 3: 760
- [21] Shen D X, Li G, Abdusamatjan I, et al. *ApJ*, 2023, 955: 123
- [22] Shen D X, Zhu C H, L u G L, et al. *ApJS*, 2024, 275: 2
- [23] Bowman D M, Michielsen M. *A&A*, 2021, 656: A158
- [24] Burssens S, Simón-Díaz S, Bowman D M, et al. *A&A*, 2020, 639: A81
- [25] Foreman-Mackey D, Hogg D W, Lang D, et al. *PASP*, 2013, 125: 306
- [26] Anderson E R, Duvall T L, Jefferies S M. *ApJ*, 1990, 364: 699
- [27] Gelman A, Rubin D B. *StaSc*, 1992, 7: 457
- [28] Netopil M, Paurzen E, Maitzen H M, et al. *A&A*, 2008, 491: 545
- [29] Vallenari A, Prusti T, Arenou F. *A&A*, 2023, 674: 22
- [30] Torres G. *AJ*, 2010, 140: 1158
- [31] Xiong D R. *FrASS*, 2021, 7: 438870
- [32] Lecoanet D, Cantiello M, Anders E H, et al. *MNRAS*, 2021, 508: 132
- [33] Cantiello M, Langer N, Brott I, et al. *A&A*, 2009, 499: 279
- [34] Thompson W, Herwig F, Woodward P R, et al. *MNRAS*, 2024, 531: 1316
- [35] Shiode J H, Quataert E, Cantiello M, et al. *MNRAS*, 2013, 430: 1736
- [36] Edelmann P V F, Ratnasingam R P, Pedersen M G, et al. *ApJ*, 2019, 876: 4
- [37] Lecoanet D, Quataert E. *MNRAS*, 2013, 430: 2363
- [38] Paxton B, Smolec R, Schwab J, et al. *ApJS*, 2019, 243: 10
- [39] Bowman D M, Burssens S, Simón-Díaz S, et al. *A&A*, 2020, 640: A36
- [40] Mathur S, Hekker S, Trampedach R, et al. *ApJ*, 2011, 741: 119
- [41] Kallinger T, Matthews J M. *ApJ*, 2010, 711: L35

Study on Stochastic Low-Frequency Variability in Ap/Bp Stars

HE Huan¹ ZHU Chun-hua¹ LV Guo-liang¹ SHEN Dong-xiang²

(1 School of Physical Science and Technol, Xinjiang University, Urumqi 830046)
(2 College of Elementary Education, Changsha Normal University, Changsha 410100)

ABSTRACT Ap/Bp stars refer to stars with effective temperatures between 8000 K and 16000 K, spectral types ranging from B8 to F0, and strong, variable magnetic fields. The surface magnetic field strengths of these stars vary from tens of Gauss to tens of thousands of Gauss. Stochastic low-frequency variability (SLFV) has been detected across a wide range of stellar masses, yet most studies have concentrated on massive stars. Using high-precision photometry from the Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), we extend SLFV studies from massive stars to intermediate-mass Ap/Bp stars. The results show that the slope γ of the SLFV in the sample of Ap/Bp stars is less than 4.6, with the majority of γ values ranging from 0.5 to 2.5. The characteristic frequency ν_{char} is mainly within the range of 0 to 1.8 d⁻¹, and the amplitude $\lg \alpha_0$ is primarily distributed between 1.2 and 4.0. These findings are consistent with previous studies. The analysis reveals that there is no correlation between the mass, radius, and evolutionary stage of Ap/Bp stars and their SLFV. After comparison with the observations, we attribute the SLFV in Ap/Bp stars to internal gravity wave (IGW).

Key words stars: chemically peculiar, techniques: photometric, methods: data analysis