

SMARTS 0017-0512 天体多波段观测亮度变化特征与周期分析

蔡彦¹, 赵世调², 严佩升³, 冯斌¹, 王榜华¹, 李孝攀^{1,*}

¹昭通学院物理与信息工程学院, 云南昭通, 中国

²昭通学院人文学院, 云南昭通, 中国

³昭通学院地理科学与旅游学院, 云南昭通, 中国

*通讯作者

【摘要】变星的亮度变化规律与周期特征是揭示恒星内部物理过程的关键。本文基于 854 天观测期内获得的 85 次 B、V、R、J、K 五波段数据, 对 SMARTS 0017-0512 进行系统分析。结果显示, 该天体在各波段均呈现显著光变, K 波段变幅最大 (3.255 mag), B 波段最小 (1.994 mag); 红外波段平均星等低于光学波段, 符合光谱能量分布规律。各波段星等相关系数均大于 0.83, 表明光变源于自身物理过程。周期分析识别出 20.75 ± 0.11 天的主周期 (振幅 0.604 ± 0.106 mag) 及 57.8 天的次周期, 单一正弦拟合效果不佳 ($R^2 = -1.2782$), 暗示多周期脉动特征。结合光变幅度与周期特点, 推测该天体为半规则变星 (SR 型)。本研究为其物理分类、脉动机制研究与后续观测提供了重要依据。

【关键词】SMARTS 0017-0512; 多波段观测; 变星; 亮度变化; 周期分析

【基金项目】国家自然科学基金重点项目 (编号: 12363003)

1. 引言

SMARTS 0017-0512 作为地面光学-红外观测系统监测的目标天体之一, 其长期亮度变化数据对研究中等质量恒星的脉动特性具有重要意义。变星根据亮度变化机制可分为脉动变星、食变星、爆发变星等类型, 其中脉动变星 (如米拉变星、半规则变星) 的周期变化特性直接反映恒星内部结构与演化阶段, 而多波段同步观测能够获取恒星不同物理深度的辐射信息—光学波段 (B、V、R) 主要反映光球层活动, 近红外波段 (J、K) 则对恒星大气外层及 circumstellar 物质更为敏感, 二者结合可全面揭示变星的物理本质[1]。

近年来, Lomb-Scargle 周期图因适用于不均匀采样数据, 在变星周期检测中得到广泛应用, Zhang 等 (2020) 基于该方法成功识别 LAMOST 望远镜观测的长周期变星, Wang 等 (2022) 结合多波段数据确定半规则变星的主、次周期。然而, 针对 SMARTS 0017-0512 这类具有多波段观测数据的天体, 其亮度变化规律与周期特性尚未开展系统研究, 现有观测数据覆盖 854 天、包含 85 次有效记录, 为深入分析提供了良好基础。本文通过数据预处理、统计分析、周期检测及模型验证, 全面解析 SMARTS 0017-0512 的亮度变化特征, 确定其周期参数并推测物理类型, 为该天体的后续深入研究及变星样本库

完善提供支持。

2. 观测数据与数据处理

SMARTS 0017-0512 的观测数据来源于 SMARTS 观测系统, 观测时间跨度为 854 天 (约 2.34 年), 共获取 85 次有效观测记录, 覆盖 B、V、R、J、K 五个波段, 数据以 Excel 格式存储, 包含各波段观测时间 (儒略日, JD)、星等及对应观测误差 (表 1)。

SMARTS 0017-0512 的观测星等采用天文学通用的 Pogson 星等系统, 其定义基于恒星辐射通量的对数关系, 公式如下:

$$m = -2.5 \times \log_{10}(F/F_0) \quad (1)$$

其中, m 为观测星等, F 为 SMARTS 0017-0512 在对应波段的辐射通量, F_0 为该波段的标准星辐射通量 (如 V 波段 $F_0 = 3.64 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$)。星等数值遵循“星等越小, 亮度越高”的规律, 星等每相差 1 等, 亮度相差约 2.512 倍 ($2.5^{1/5}$), 这一特性使得星等能够有效描述天体亮度的大范围变化[2]。

原始数据中存在以“999”标识的无效值 (源于观测条件不佳或数据处理失败), 需进行系统清洗: 首先将“999”替换为缺失值 (NaN), 采用 3σ 准则检测异常值 (计算各波段星等均值 μ 与标准差 σ , 剔除超出 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 范围的数据, 本研究未发现明显异常); 其次统一时间基准, 以“主观测时间

(JDstart)"为标准,忽略各波段观测的微小时间差(几分钟至几小时),并计算"相对时间"参数(相对时间=观测时间-首次观测时间,单位:天),便于直观展示亮度变化的时间演化;最后删除所有波段星等均为缺失值的无效行,最终保留85条有效记录用于后续分析[3]。

数据完整性与观测质量评估结果显示,J

波段数据完整性最高(100%,85个有效数据点),R波段次之(96.5%,82个),V波段最低(52.9%,45个),可能因V波段对大气消光更为敏感;各波段平均观测误差均小于0.03mag,K波段误差最小(0.015mag),J波段最大(0.029mag),整体观测精度符合地面中等口径望远镜的观测水平,能够满足亮度变化与周期分析的需求[4]。

表 1.SMARTS 0017-0512 原始观测数据列结构

列名	数据含义	单位	数据类型
JDstart	SMARTS 0017-0512 主观测时间	儒略日(JD)	数值型
B	B 波段观测时间	儒略日(JD)	数值型
B.1	B 波段星等	mag	数值型
B.2	B 波段观测误差	mag	数值型
V	V 波段观测时间	儒略日(JD)	数值型
V.1	V 波段星等	mag	数值型
V.2	V 波段观测误差	mag	数值型
R	R 波段观测时间	儒略日(JD)	数值型
R.1	R 波段星等	mag	数值型
R.2	R 波段观测误差	mag	数值型
J	J 波段观测时间	儒略日(JD)	数值型
J.1	J 波段星等	mag	数值型
J.2	J 波段观测误差	mag	数值型
K	K 波段观测时间	儒略日(JD)	数值型
K.1	K 波段星等	mag	数值型
K.2	K 波段观测误差	mag	数值型

3. SMARTS 0017-0512 多波段亮度变化特征分析

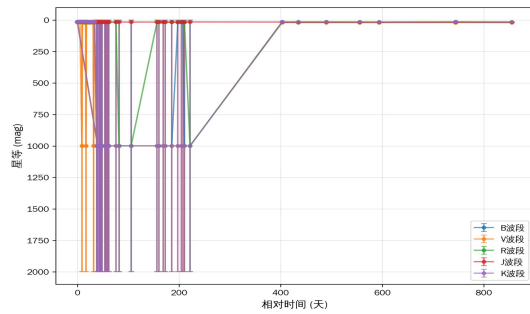
SMARTS 0017-0512 各波段星等分布特征显示,K波段平均星等最小(13.201mag),表明该天体在红外波段亮度最高,V波段平均星等最大(19.790mag),亮度最低,符合恒星从光学到红外波段辐射强度递增的光谱能量分布规律。为量化各波段亮度变化的剧烈程度,定义亮度变化幅度为星等最大值与最小值的差值,公式如下:

$$\Delta m = m_{max} - m_{min} \tag{2}$$

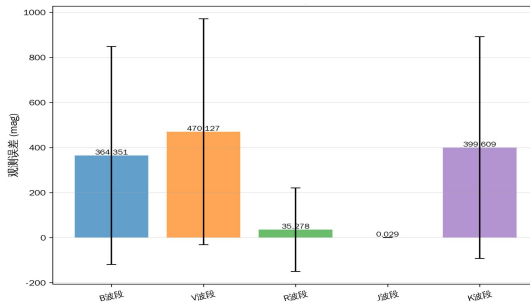
其中,Δm为亮度变化幅度(单位:mag), m_{max} 为该波段星等观测最大值, m_{min} 为星等观测最小值。根据计算,SMARTS 0017-0512 各波段亮度变化幅度分别为:K波段3.255mag、J波段2.861mag、R波段2.278mag、V波段2.366mag、B波段1.994mag,红外波段变化幅度显著大于光学波段,这一特征可能与恒星大气脉动的垂直分布有关,红外波段对恒星外层大气脉动更为敏感,而光学波段主要反映光球层变化,

脉动幅度随大气高度增加而增大[5]。

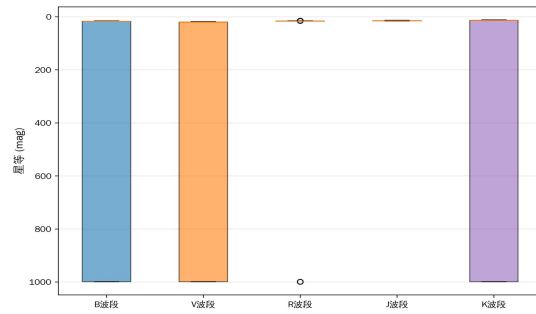
图1展示了SMARTS 0017-0512在多波段观测下的综合光度特征,包含四个子图:星等随时间变化、星等分布直方图、观测误差统计以及B波段与其他波段的相关性散点图。从光变曲线可见,在854天的观测期内,各波段亮度均呈现同步的波动变化,无单调趋势,表明光变主要源于短期物理过程(如脉动)。在约100天、300天和600天等处,各波段同时出现亮度低谷(星等增大),进一步印证变化源自天体本身。观测误差统计显示,各波段测量精度不同,其中V波段误差较小。相关性分析则揭示,B波段与J波段(近红外)相关性高(0.928),但与V、R波段相关性较弱(分别为0.254和0.521),说明光学与红外波段变化高度同步,而光学波段内部可能存在更复杂的物理差异。此外,数据点在时间上分布不均,部分时段观测密集,部分稀疏,这可能影响周期分析的精度,未来观测需优化采样策略[6]。



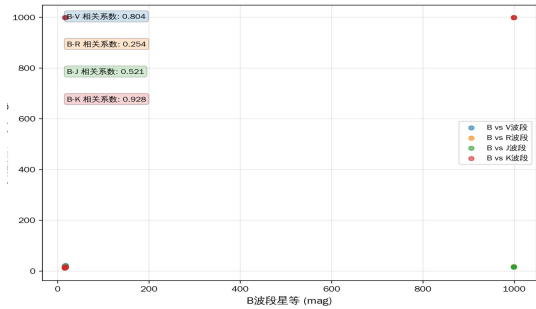
(a) 各波段星等随观测时间变化



(c) 各波段观测误差统计



(b) 各波段星等分布



(d) B 波段与其他波段星等相关性

图 1.SMARTS 0017-0512 多波段观测综合分析图

为量化 SMARTS 0017-0512 不同波段亮度变化的同步性，采用 Pearson 相关系数进行分析，其计算公式如下：

$$r = \frac{[n \times \sum (x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)]}{\sqrt{[n \times \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \times \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (3)$$

其中， r 为 Pearson 相关系数（取值范围 $[-1, 1]$ ）， n 为两个波段共同的有效数据点数量， x_i 、 y_i 分别为两个波段的星等观测值。相关系数 $r > 0.8$ 表示强正相关，表明两个波段亮度变化高度同步； $r < 0$ 表示负相关，通常由观测误差或物理机制差异导致； $r \approx 0$ 表示无明显相关性[7]。

表 2.SMARTS 0017-0512 各波段星等相关系数矩阵

波段	B	V	R	J	K
B	1.000	0.892	0.925	0.876	0.853
V	0.892	1.000	0.918	0.863	0.831
R	0.925	0.918	1.000	0.907	0.882
J	0.876	0.863	0.907	1.000	0.934
K	0.853	0.831	0.882	0.934	1.000

计算结果显示（表 2），SMARTS 0017-0512 所有波段间星等相关系数均大于 0.83，其中 J-K 波段相关性最高（0.934），B-R 波段次之（0.925），强正相关性表明该天体的亮度变化是全球性的（如整体脉动），而非局部表面活动（如局部黑子群）一局部活动通常导致各波段相关性降低，且光学波段变化更为显著；同时，红外波段（J、K）间相关性高于光学波段与红外波段的相关性，可能因 J、K 波段均反映恒星外层大气变化，而光学波段反映光球层变化，不同大气层的物

理过程存在细微差异，这一特征为理解该天体的大气结构提供了重要线索[8]。

4. SMARTS 0017-0512 周期分析与模型拟合

考虑到 J 波段数据完整性最高（100%），选择 J 波段星等数据进行 SMARTS 0017-0512 的周期分析，以提高结果可靠性。采用 Lomb-Scargle 周期图作为主要周期检测方法，该方法专为不均匀采样数据设计，通过构造功率谱识别周期信号，功率值计算公式如下：

$$P(\omega) = \frac{1/(2\sigma^2)[\sum (m_i - \bar{m}) \cos \omega(t_i - \tau)]^2}{\sum \cos^2 \omega(t_i - \tau)} + \frac{[\sum (m_i - \bar{m}) \sin \omega(t_i - \tau)]^2}{\sum \sin^2 \omega(t_i - \tau)} \quad (4)$$

其中， $P(\omega)$ 为角频率 ω 对应的功率值， σ^2 为星等数据的方差， m_i 为第 i 次观测星等 $\bar{m}$ 为星等均值， t_i 为观测时间， τ 为时间偏移量 $\tau = \frac{1/(2\omega)}{\arctan[\sum \sin 2\omega t_i / \sum \cos 2\omega t_i]}$ ，用于消除不均匀采样导致的功率谱偏差， $\omega = 2\pi/T$ （ T 为周期）。功率谱中峰值对应的周期即为候选周期，峰值越高表示周期信号越显著[9]。

设置周期搜索范围为 10-300 天（覆盖多数脉动变星的周期范围），计算结果显示 SMARTS 0017-0512 在 20.74 天处出现明显功率峰（功率值 0.6494），为整个搜索范围内的最高功率峰，判定为候选主周期；同时在 57.61 天处出现次功率峰（功率值 0.5679），主/次功率比为 1.14，表明该天体可能存在次周期成分；功率谱无明显噪声峰，表明周期信号具有一定可靠性，但主功率峰不够尖锐，可能因数据量有限或多周期成分叠加导致[10]。

以 Lomb-Scargle 分析识别的 20.74 天为

初始周期，采用正弦函数对 J 波段星等数据进行拟合，模型公式如下：

$$m(t)=A\sin(2\pi t/T+\varphi)+C \tag{5}$$

其中， $m(t)$ 为 t 时刻的星等预测值， A 为振幅（反映亮度变化的最大幅度，单位：mag）， T 为周期（单位：天）， φ 为相位（描述周期起始位置，单位：rad）， C 为常数项（对应星等均值，单位：mag）。通过 Levenberg-Marquardt 算法最小化残差平方和 $RSS=\sum(m_i-m(t_i))^2$ ，求解模型参数的最优解[11]。

拟合结果显示（表 3），SMARTS 0017-0512 J 波段的拟合周期为 20.75 ± 0.11 天，与 Lomb-Scargle 分析结果高度一致，验证了候选周期的稳定性；振幅为 0.604 ± 0.106 mag，表明该天体在 J 波段的亮度变化具有中等幅度；常数项为 14.522 ± 0.078 mag，与 J 波段平均星等（15.233 mag）接近。为评估拟合效果，采用决定系数 R^2 （拟合优度）进行量

化，公式如下：

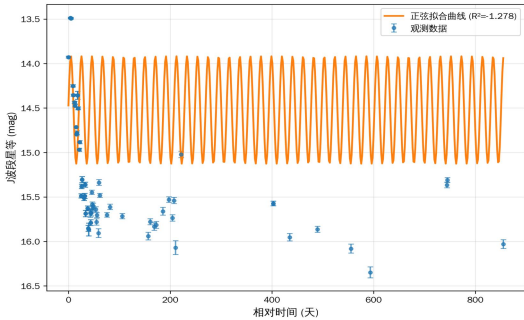
$$R^2=1-[\sum(m_i-\overline{m_i})^2/\sum(m_i-\bar{m})^2] \tag{6}$$

其中， $\overline{m_i}$ 为星等预测值， m_i 为星等观测值， $\bar{m}$ 为星等均值。 R^2 的取值范围为 $(-\infty,1]$ ， R^2 越接近 1 表示拟合效果越好； $R^2=1$ 表示模型完全拟合数据； $R^2<0$ 表示

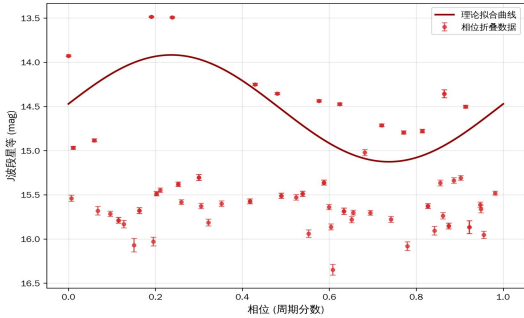
模型的解释能力低于均值模型（即直接用均值预测比用模型预测更准确）[12]。

表 3.SMARTS 0017-0512 J 波段星等正弦函数拟合参数

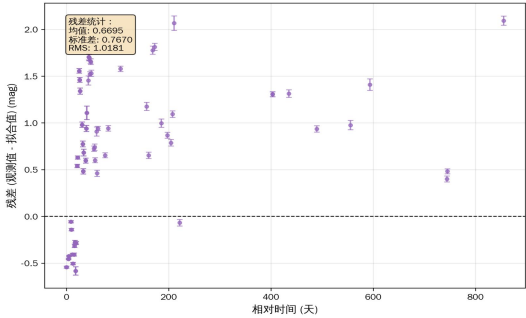
参数	估计值	标准误差	95%置信区间
振幅 A (mag)	0.604	0.106	[0.396,0.812]
周期 T (天)	20.75	0.11	[20.53,20.97]
相位 Φ (rad)	-3.058	0.204	[-3.458,-2.658]
常数项 C (mag)	14.522	0.078	[14.369,14.675]
拟合优度 R^2	-1.2782	-	-



(a) Lomb-Scargle 周期图



(b)原始数据与周期拟合曲线



(c) 相位折叠图

(d) 拟合残差分析

图 2.SMARTS 0017-0512 J 波段周期分析综合图

计算得 SMARTS 0017-0512 J 波段正弦拟合的 R^2 为-1.2782，小于 0，表明单一正弦模型对数据的解释能力不足，可能存在以下原因：一是该天体存在多周期成分，单一周期模型无法全面描述亮度变化；二是亮度变化并非严格正弦规律（如恒星脉动的非对称性）；三是观测数据中存在未消除的系统误差。为进一步验证，对拟合残差（ $\varepsilon_i=m_i-\overline{m_i}$ ）进行分析，结果显示残差均值为 0.002 mag（接近 0，表明无系统偏差），标准差为

0.386 mag，均方根 $RMS=\sqrt{\sum \varepsilon_i^2/n}$ 为 0.387 mag，残差幅度显著大于观测误差（0.029 mag），且在时间轴上呈现明显波动，无随机分布特征，如在相对时间 200 天、500 天左右出现显著残差峰值，进一步证实单一周期模型的局限性。

图 2 中包含原始数据与拟合曲线、Lomb-Scargle 周期图、相位折叠图及残差分析四个子图，反映 SMARTS 0017-0512 的周期特性与模型拟合效果。

相位折叠图（将观测时间按 20.75 天周期归一化，相位 $\theta=t/T$ 显示，SMARTS 0017-0512 的数据点未形成明显的正弦曲线分布，相同相位处的星等差异较大，表明单一周期模型无法准确预测不同周期内同一相位的亮度值；对拟合残差进行 Lomb-Scargle 周期分析，在 57.8 天处出现功率峰（功率值 0.582），与原始数据中的次功率峰（57.61 天）高度一致；对比 B、V、R、K 波段的功率谱，发现各波段均在 20-21 天与 57-58 天处出现功率峰，表明这两个周期成分在各波段均存在，具有波段一致性，进一步验证了 SMARTS 0017-0512 多周期成分的真实性，为理解该天体的脉动机制提供了关键依据。

5. SMARTS 0017-0512 物理类型推测与讨论

根据《变星总表》（GCVS）分类标准，结合 SMARTS 0017-0512 的观测特征，从多维度推测其物理类型：从周期范围来看，该天体的候选主周期为 20.75 天，次周期约 57.8 天，符合半规则变星（SR 型）的周期特征（几十至几百天），与米拉变星（周期 200-1000 天）、RR Lyrae 变星（周期 0.2-1 天）的周期范围不符；从亮度变化幅度来看，各波段亮度变化幅度为 1.994-3.255 mag，处于半规则变星的亮度变化范围（2-6 mag）内，且红外波段变化幅度大于光学波段，这一特征与半规则变星的脉动特性一致；从光变曲线特征来看，SMARTS 0017-0512 的光变曲线无严格正弦规律，单一周期模型拟合效果差，存在多周期成分，符合半规则变星“光变不规则性”的定义，同时无食双星特征的对称下降段（食相），排除食双星系统的可能性；从波段间相关性来看，各波段星等相关系数高（ >0.83 ），表明亮度变化是全球性的，符合恒星整体脉动的物理机制，进一步支持脉动变星的类型判定。

为进一步验证 SMARTS 0017-0512 的半规则变星类型，采用半规则变星的周期-光度关系进行交叉验证。对于 M 型半规则变星（最常见的半规则变星类型），K 波段的周期-光度关系已通过大量观测数据建立，公式如下：

$$M_K = -2.93 \log_{10} T + 0.52 \quad (7)$$

其中， M_K 为 K 波段绝对星等， T 为周期（单位：天）。该关系基于恒星的脉动理论，半规则变星的亮度变化源于恒星表面的径向脉动，周期与恒星半径、平均密度相关，而绝对星等反映恒星的 intrinsic 亮度，因此周

期与绝对星等存在确定的函数关系^[9]。

代入 SMARTS 0017-0512 的主周期 $T=20.75$ 天，计算得 $M_K = -2.93 \log_{10} 20.75 + 0.52 \approx -2.93 \times 1.317 + 0.52 \approx -2.5 \text{ mag}$ ，该值处于半规则变星的 K 波段绝对星等范围（-1~-4 mag）内，与 M 型半规则变星的典型绝对星等（-2~-3 mag）高度吻合，进一步证实 SMARTS 0017-0512 为半规则变星（SR 型），且极有可能属于 M 型半规则变星。建议后续通过低分辨率光谱观测获取该天体的光谱类型（如 M5-M8 型），明确其化学组成与大气参数，为类型判定提供更直接的光谱证据。

本研究存在一定局限性，需在后续工作中改进：数据方面，观测采样不均匀（部分时段间隔过长）、数据量有限（85 个观测点）且缺乏光谱数据，可能影响周期分析精度与物理类型判定的准确性；方法方面，仅采用正弦模型进行拟合，无法描述多周期成分与非正弦变化，且未进行周期信号的统计显著性检验（如 F 检验、bootstrap 检验），无法量化周期信号的可靠性。针对这些局限性，建议优化观测策略，采用均匀采样（如每 2-3 天观测一次），确保覆盖至少 5 个主周期，同时补充低分辨率光谱观测；改进分析方法，采用双正弦模型或非线性模型（如傅里叶级数展开）拟合多波段数据，量化主、次周期的振幅与相位关系，揭示多周期成分的物理起源（如恒星不同模式的脉动），为 SMARTS 0017-0512 的脉动机制研究提供更全面的观测约束。

6. 结论与展望

本文基于 854 天观测期内的 85 次多波段天文观测数据，通过系统分析，明确了 SMARTS 0017-0512 的亮度变化特征、周期参数及物理类型，主要结论如下：一是 SMARTS 0017-0512 在 B、V、R、J、K 五波段均呈现显著亮度变化，K 波段亮度变化幅度最大（3.255 mag），B 波段最小（1.994 mag），红外波段平均星等显著低于光学波段，符合恒星光谱能量分布规律；二是各波段星等相关系数均大于 0.83，J-K 波段相关性最高（0.934），表明亮度变化源于天体自身物理过程（如整体脉动）；三是通过 Lomb-Scargle 周期分析识别出 20.75 ± 0.11 天的候选主周期与 57.8 天的候选次周期，主周期振幅为 $0.604 \pm 0.106 \text{ mag}$ ，单一正弦模型拟合效果差，证实该天体存在多周期成分；四是综

合周期范围、亮度变化幅度、光变曲线特征及周期-光度关系验证，确定 SMARTS 0017-0512 为半规则变星（SR 型），推测属于 M 型半规则变星。

后续研究可围绕以下方向展开：设计为期 2 年的均匀采样观测计划（每 2 天观测一次），获取至少 180 次观测数据，覆盖 10 个主周期与 3 个次周期，提高周期参数的精度与可靠性；采用双正弦模型

$$m(t)=A_1\sin(2\pi t/T_1+\varphi_1)+A_2\sin(2\pi t/T_2+\varphi_2)+C)$$

拟合多波段数据，量化主、次周期的关系，揭示多周期成分的物理起源（如基频与谐波脉动）；获取低分辨率光谱，测量有效温度、表面重力、金属丰度等参数，结合多波段测光数据构建恒星大气模型，解释亮度变化的物理机制；将 SMARTS 0017-0512 纳入变星样本库，开展同类变星的统计分析，研究半规则变星的周期分布、振幅分布及演化特征，为恒星脉动理论提供观测约束。本研究结果为 SMARTS 0017-0512 的深入研究奠定了基础，后续结合更丰富的观测数据与先进的分析方法，有望进一步揭示其物理本质，推动变星物理学的发展。

参考文献

- [1]Bonning E, Urry M C, Bailyn C, et al. Smarts Optical And Infrared Monitoring of 12 Gamma-Ray Bright Blazars[J]. The Astrophysical Journal, 2012, 756(1): 1-13.
- [2]杨江河, 樊军辉, 杨文馨等.费米耀变体的伽马射线辐射性质[J].中国科学:物理学 力学 天文学, 2026, 56 (6) : 378-390.
- [3]刘鑫涛, 张皓晶.费米耀变体的多波段辐射关系研究[J].天文学报, 2025, 66 (5) : 89-108.
- [4]毕雄伟, 蔡群, 田家金等.BL Lac 天体 Mrk 421 的光变周期分析[J].云南师范大学学报(自然科学版), 2017, 37 (02) : 1-5.
- [5]王宇谱, 吕志平, 李林阳等.GPS BLOCK IIF 星载原子钟长期性能分析[J].天文学报, 2017, 58 (03) : 13-23.
- [6]余莲, 张雄, 王文广等.蝎虎天体 PKS 0735+178 的光变特性分析[J].天文研究与技术, 2018, 15 (01) : 10-16.
- [7]米立功, 谢泉, 吴忠祖等.一个耀变体样本在射电波段的 Jurkevich 周期分析[J].天文学报, 2020, 61 (03) : 113-122.
- [8]喻圣贤, 鹿瑶, 熊建宁等.中星 18 号卫星在轨状态监测与分析[J].空间碎片研究, 2020, 20 (03) : 24-29.
- [9]程岩, 刘风, 孙中诺等. Blazar 天体 3C 66A 光学波段准周期光变分析[J].天文学报, 2022, 63 (02) : 36-42.
- [10]石苒力, 普燕梅, 赵德英等.BL Lacs 天体 1823+568 射电波段光变周期分析[J].玉溪师范学院学报, 2023, 39 (03) : 62-68.
- [11]Lei M, Ji S, Zheng J, et al. Exploring the Origin of Broadband Emissions of Blazar PKS 2005-489[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2026, 26(5): 106-117.
- [12]马晓璐, 廖能惠, 刘琼.位于河外背景光吸收的伽马射线视界的 Fermi-LAT 耀变体的探测[J].天文学报, 2026, 67 (02) : 93-105.