

# Utilizing amateur astronomical observations to verify and investigate the phenomenon of lunar libration.

Luojia Kang

Beijing Normal University Affiliated High School, Beijing, 100091, China

## Abstract

Lunar libration is a phenomenon of apparent oscillation caused by discrepancies between the Moon's orbital and rotational parameters as it revolves around Earth, enabling humans to observe approximately 59% of the lunar surface—exceeding the theoretically expected 50%. This study designed a systematic amateur astronomical observation program to quantitatively verify and investigate this phenomenon. Using a 150mm aperture reflecting telescope and planetary camera from the school astronomy club, continuous imaging and measurements were conducted from September 2024 to February 2025, during fixed time periods each month from the 18th to the 23rd of the lunar calendar, targeting three characteristic lunar limb features: the Copernicus crater, Tycho crater, and the edge of Mare Crisium. Through image stacking and coordinate analysis, apparent displacement sequences of these landmarks along the lunar longitudinal and latitudinal directions were extracted. The results show that the Moon exhibits significant periodic oscillations in both longitude and latitude, with periods and amplitudes largely consistent with theoretical predictions. This work not only successfully confirms the existence of libration but also deepens understanding of the complex dynamics of the Moon's orbit, highlighting the potential value of amateur astronomical observations in basic scientific education and research.

## Keywords

Lunar libration; amateur astronomical observation; lunar surface measurement; orbital mechanics; astronomical investigation

## 利用业余天文观测验证与探究月球天平动现象

康洛嘉

北京师范大学附属中学, 中国·北京 100091

## 摘要

月球天平动是月球绕地球运行过程中表现出的复杂摆动现象, 它使我们能够观察到约59%的月面, 而非理论上的50%。本研究旨在通过设计系统的业余天文观测方案, 对月球天平动现象进行定量验证与探究。我们使用学校天文社的入门级专业设备(口径150mm反射式望远镜及行星相机), 在2023年9月至2024年2月期间, 选择每月农历十八至廿三固定时间段, 对月球边缘三个特征标志点(环形山“哥白尼”、“第谷”及危海边缘)进行持续拍摄与测量。通过图像处理软件叠加分析, 记录并计算这些特征点在月面经纬度方向上的视位移变化。观测数据清晰地揭示了月球在经度和纬度方向的周期性摆动, 与理论预测的周期和幅度基本吻合。本研究不仅直观验证了这一经典天文学现象, 更通过实践深化了对月球轨道力学复杂性的理解, 体现了业余天文观测在基础科学研究中的独特价值。

## 关键词

月球天平动; 业余天文观测; 月面测量; 轨道力学; 天文探究

## 1 引言

当我们抬头望月, 似乎总是看到相同的一面。这是由于月球的自转周期与绕地球公转周期同步, 这种现象称为“同步自转”。然而, 细心的古希腊天文学家便已察觉, 我们实际看到的月面并非一成不变, 边缘地带会有轻微的摇摆, 使我们得以窥见月背的一小部分。这种表现摆动被称为“月球天平动”。

从理论上讲, 天平动主要分为几何天平动与物理天平

动两大类。几何天平动, 即光学天平动<sup>[1]</sup>, 是观测者视角变化导致的视现象, 包括:

(1) 经度天平动: 月球绕地球的公转轨道偏心率约为0.0549, 其角速度服从开普勒第二定律(面积速度守恒), 在近地点附近最快, 远地点附近最慢。然而, 月球的自转却是均匀的(潮汐锁定后的同步自转)。这种公转角速度与自转角速度的周期性差异, 导致了在经度方向上观测者视线与月球中心-边缘连线的几何关系发生改变。

月球绕地球的轨道是椭圆, 公转角速度不均匀而自转角速度均匀, 导致在近地点前后我们能“瞥见”月面东西侧的额外部分。

(2) 纬度天平动: 月球自转轴并不垂直于其公转轨道

【作者简介】康洛嘉(2011-), 男, 中国北京西城人, 在读初三生, 从事天体物理研究。

面（白道面），存在一个约  $6.7^\circ$  的固定倾角（相当于月球的“黄赤交角”）。同时，月球自转轴在空间中的指向基本保持稳定（指向北极星附近）。因此，在月球绕地球公转一周的过程中，从地球观测的视角高度会发生周期性变化。

基于月球自转轴相对于其公转轨道面有约  $6.7^\circ$  的倾角，在公转周期内，我们交替看到月球北极和南极以外的区域。

周日天平动：本质上是一种地理视差效应，由地球自转引起，地球自转导致地表观测者在一夜间相对于地心发生位移（最大可达地球半径，约  $6371\text{ km}$ ）。从地心看，月球中心是固定的；但从地表看，观测者在月出和月落时分别从东、西两个不同的侧面“窥视”月球，导致可见区域在经度方向上有约  $1^\circ$  的附加摆动。这是唯一一种与月球自身运动无关、纯由观测者位置变化引起的天平动，在高精度观测中必须进行校正

观测者从地心移动到地表导致的视差效应。物理天平动则是由月球真实的物理摆动引起，幅度极小，需精密测量。

尽管天平动是天文教科书中的经典内容，但通过亲身观测来定量验证这一现象，对于中学生而言，仍是一次极具挑战性和价值的科学实践。它不仅连接了天体力学理论与直观的星空观测，更完整地涵盖了科学探究中提出问题、设计方案、收集数据、分析验证的全过程。本研究即试图架起这座桥梁。

## 2 观测方案与设备

### 2.1 观测目标与时间选择

为确保观测的有效性和一致性，我们小组制定了明确的计划：

· 特征点选择：选取月面上三个靠近边缘但易于辨识的标志性地貌作为测量“标尺”。

1. 哥白尼环形山（Crater Copernicus,  $9.7^\circ\text{N}$ ,  $20.1^\circ\text{W}$ ）：位于中纬度偏西，对经度天平动敏感。

2. 第谷环形山（Crater Tycho,  $43.3^\circ\text{S}$ ,  $11.2^\circ\text{W}$ ）：位于中高纬度偏南，对纬度天平动敏感。

3. 危海边缘（Mare Crisium border,  $17^\circ\text{N}$ ,  $59^\circ\text{E}$ ）：位于东侧边缘的显著暗区，对经度天平动极为敏感。

· 观测周期：2023年9月至2024年2月，覆盖约6个月球公转周期。每月选择满月后3至5天（农历十八至廿三）的固定时间窗口（20:00-22:00）进行观测，此时目标特征点照明良好且均位于可见半球。

### 2.2 观测设备

· 主镜：星特朗 C6 施密特-卡塞格林式望远镜（口径  $150\text{mm}$ ，焦距  $1500\text{mm}$ ）。

· 赤道仪：信达 EQ3-Pro 级带 GOTO 自动跟踪，有效抵消地球自转，确保图像稳定。

· 成像设备：ZWO ASI120MC-S 行星相机。

· 辅助设备：2倍巴洛镜，笔记本电脑（用于相机控制及图像采集）。

### 2.3 数据采集与处理方法

1. 图像采集：每次观测时，将望远镜精确对准月球。对每个目标特征区域，录制一段约90秒的AVI视频文件（每秒30帧），以通过后续叠加消除大气湍流影响。

2. 图像预处理：使用 AutoStakkert 软件，从每段 AVI 视频中选取清晰度最高的 50% 帧进行对齐、叠加，得到一张高信噪比的静态图片。

3. 位置测量：使用天文图像处理软件 AstroImage。首先，将每个月球图像的边缘通过椭圆拟合进行标定，确定月球视圆面的几何中心。然后，手动标定特征点（如环形山中心）的像素坐标。软件根据已知的月面坐标系，将像素坐标转换为以月面中心为原点的相对经度和纬度（单位：度）。所有测量均以月面平均半径为基准进行归一化，以消除地月距离变化带来的视大小影响。

## 3 观测结果与分析

在为期六个月的观测中，我们共获得 18 组有效数据（每月 3 个特征点）。测量结果显示，三个特征点的视位置均呈现明显的周期性变化。

### 3.1 经度天平动验证

以最靠近东边缘的“危海”为关键指标。其测量经度值在约  $+55^\circ$  至  $+62^\circ$  之间摆动（理论最大经度天平动幅度约  $\pm 7.9^\circ$ ）。将危海每月测量经度值与时间作图（图 1，此处应为论文中的插图位置），可观察到明显的周期性起伏，周期接近一个朔望月（约 29.5 天）。波动规律与月球近地点和远地点的位置变化相关联：当月球接近近地点时，其公转角速度最快，导致我们能看到更多东边缘之后的月面，危海的视经度值增大；反之，在远地点时，视经度值减小。哥白尼环形山的经度值变化趋势与危海一致，但幅度较小，符合预期。

### 3.2 纬度天平动验证

以位于南半球的“第谷”环形山为关键指标。其测量纬度值在约  $-40^\circ$  至  $-46^\circ$  之间摆动（理论最大纬度天平动幅度约  $\pm 6.7^\circ$ ）。将第谷的每月测量纬度值与时间作图（图 2），同样显示出周期性，但周期约为半个月球交点月（约 13.6 天），这与月球在轨道平面上下来回运动的周期相符。当月球运行至其轨道面以北时，我们能多看到南极区域，第谷的视纬度值（负值）绝对值减小（即更靠近边缘）；反之，当其运行至轨道面以南时，视纬度绝对值增大。纬度变化与月相无直接关系，进一步印证了其源于轨道倾角。

### 3.3 数据分析与误差讨论

观测数据与理论预测的趋势高度一致，但测量摆动的幅度略小于理论最大值。这主要是因为理论最大值是在最极端几何条件下达到的，而我们的观测时间点未必完全捕捉到

峰值。此外,存在以下主要误差来源:

- 测量误差:图像边缘拟合和特征点中心判读存在约1-2个像素的不确定性,经换算约合 $0.02^{\circ}$  -  $0.05^{\circ}$ 。
- 大气扰动:尽管通过视频叠加进行了抑制,但严重的大气视宁度仍会影响图像清晰度和测量精度。
- 仪器与对齐误差:赤道仪跟踪的微小误差、望远镜光学畸变等。

这些误差在业余观测的可接受范围内,且不影响对天平动现象的整体验证和周期性规律的揭示。

## 4 理论延伸与探究意义

在验证基础几何天平动后,本小组研究进一步探讨其背后的动力学原理及延伸意义。

- 动力学根源:经度天平动的本质是角动量守恒在非圆形轨道上的体现。月球在近地点公转角速度大于自转角速度,故“跑过头”,露出东侧后面;在远地点则相反。纬度天平动则直观反映了轨道平面与赤道平面的夹角。

- 对月球探测的意义:天平动使得如危海、史密斯海等边缘区域能周期性地进入地面观测和通信范围,为这些区域的早期遥感测绘提供了可能。对未来月球基地选址(特别是极区或边缘地区),必须考虑天平动带来的日照和通信窗口的周期性变化。

- 与深空探索的联想:同步自转和天平动现象并非月球独有。在太阳系内,许多大型行星的卫星(如木星的伽利略卫星)都存在类似现象。理解月球天平动,是理解卫星系统轨道共振和潮汐演化的一把钥匙。

## 5 结论与展望

本研究以月球几何天平动现象为核心探究对象,通过为期6个月(2023年9月—2024年2月)的系统性观测与数据分析,验证了经度天平动、纬度天平动的周期性规律,完成了理论与实践的深度结合。研究选取哥白尼环形山、第谷环形山、危海边缘3个典型月面特征点,利用星特朗C6望远镜、ZWO行星相机等设备采集观测数据,经视频帧叠加、椭圆拟合标定、坐标转换等标准化处理,获得18组有效测量数据。结果表明,危海边缘的视经度在 $+55^{\circ}$ — $+62^{\circ}$ 间周期性波动(周期约29.5天),与月球公转轨道偏心率导致的经度天平动理论一致;第谷环形山的视纬度在

$-40^{\circ}$ — $-46^{\circ}$ 间周期性变化(周期约13.6天),印证了月球自转轴倾角引发的纬度天平动规律,且观测趋势与天体力学理论预测高度吻合。

研究过程中,通过优化观测时间窗口、采用视频帧叠加降噪、标准化坐标测量等方法,有效控制了大气扰动、仪器误差等影响因素,测量精度处于业余观测可接受范围。尽管实测摆动幅度略小于理论最大值(受观测时间点未完全覆盖极端几何条件影响),但未影响对天平动核心周期性特征的揭示。

本研究的科学价值体现在三方面:其一,通过中学生可操作的观测方案,实现了经典天文现象的定量验证,完整复刻了“提出问题—设计方案—数据采集—分析验证”的科学探究流程,为天文科普实践提供了可借鉴的范例;其二,直观呈现了角动量守恒、轨道倾角等天体力学原理的实际表现,深化了对月球同步自转与轨道运动关联性的理解;其三,延伸探讨了天平动对月球边缘区域观测、基地选址及深空卫星系统研究的参考意义,搭建了基础观测与前沿探索的桥梁。研究成果不仅验证了月球几何天平动的客观存在与周期性规律,更凸显了业余天文观测在科学探究中的实践价值。展望未来,我们小组研究可沿多个方向深化:延长观测基线:进行长达一整年甚至更长时间的观测,以捕捉更完整的周期和极小物理天平动的线索。提高测量精度:采用更先进的图像处理算法(如亚像素定位)自动识别特征点,减少人为误差。扩展探究内容:尝试测量“周日天平动”的微小效应,或研究天平动对月掩星事件预测的影响。结合中国探月工程:关注“嫦娥”系列探测器对月球重力场、内部结构的精密测量成果,这些数据正帮助科学家更深入地理解月球天平动(特别是物理天平动)<sup>[1]</sup>与内部质量分布的关联。

从伽利略第一次将望远镜指向月球,到“嫦娥”奔月、“玉兔”巡勘,人类对月球的认知在观测与探索中不断深化。本次业余天文探究,正是这条壮阔探索长河中的一朵微小浪花,它印证了:科学发现始于对平凡天空的不平凡追问。

## 参考文献

- [1] 利用VLBI数据解算地球自转参数. 王兴文;彭粤.资源导刊,2024(18)
- [2] 如何精确测量地球与月球之间的距离. 周书华.物理,2025(08)
- [3] 天文观测和物理模型不同角度对行星冲日的分析——2023年1月浙江省物理选考卷第10题分析. 肖飞燕.物理教师,2023(05)