

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.02.01

活跃小行星 (3200)Phaethon 物理特性 研究进展

张欣怡^{1,2}, 季江徽^{1,2}, 姜浩轩^{1,3}

(1. 中国科学院 紫金山天文台 行星科学重点实验室, 南京 210023; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;
3. 滁州学院, 滁州 239099)

摘要: 详细回顾了活跃小行星 (3200)Phaethon 的近日点观测数据及近地观测事件, 分析了在近日点附近的活动性机制, 尤其是热裂解、水冰及 Na 升华驱动成因。基于 Phaethon 的光谱数据、反照率和偏振等研究, 总结了其表面的物理性质和成分等研究结果, 为全面理解该天体提供了丰富的证据。深入探讨了 Phaethon-双子座流星群复合体、活跃小行星分类及其溯源。在小行星轨道演化与热物理模型研究中, 利用 MERCURY6 积分器对 Phaethon 轨道根数进行千年尺度的反演, 初步得出 Phaethon 近日点距离等运动规律; 并基于先进热物理模型 (ATPM) 对红外多波段观测数据进行整合后拟合, 得出了 Phaethon 的热惯量、反照率和直径等数据。最后, 围绕活跃小行星的空间探测, 展望了 JAXA 空间任务 DESTINY+ 及中国天问二号的探测计划。

关 键 词: 小行星; 活动机制; 近地小行星

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引 言

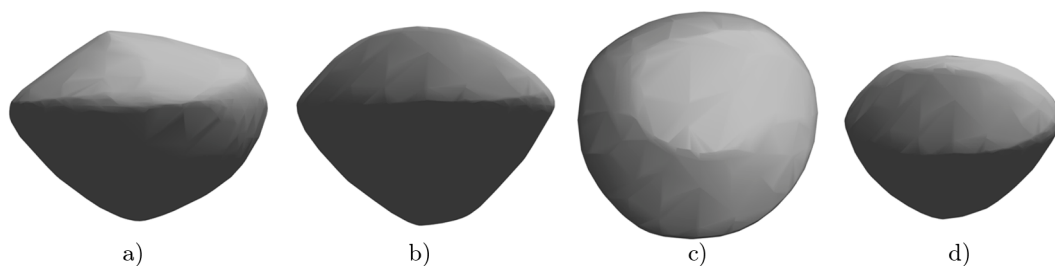
每年 12 月中旬的双子座流星雨是最强烈和最有规律的年度流星雨之一。1983 年, 红外天文卫星 IRAS (Infrared Astronomical Satellite) 巡天观测时, 在近双子座流星体的轨道上发现其母体为小行星 (3200)Phaethon (以下简称 Phaethon)^[1], 并在当时临时命名为 1983 TB^[2]。目前 Phaethon 被认为是一颗具有活动性的近地小行星, 可能起源于主带, 是介于彗星与小行星之间的关键天体, 也被称为活跃小行星^[3-5]。多色光度测量结果显示, Phaethon 的表面呈蓝色光谱^[6], 与呈现红色光谱的彗星核形成鲜明对比^[7]。

收稿日期: 2024-07-12; 修回日期: 2025-01-27

资助项目: 国家自然科学基金原创探索计划项目 (12150009)

通讯作者: 季江徽, jijh@pmo.ac.cn

根据阿雷西博天文台 (Arecibo Observatory) 观测可知, Phaethon 是一个有效直径为 5.7 km 的陀螺形状小行星^[8], 自转周期约为 3.6 h^[9]。2021 年对其用掩星观测方法得到更加精确的大小, 表明 Phaethon 赤道处直径为 6.13 ± 0.05 km, 两极直径为 4.40 ± 0.06 km, 显示为两极区域比先前更加扁平的椭球状^[10]。图 1 是 Phaethon 在不同视角下的形状模型。



注: a) 和 b) 是赤道方向旋转 90° 的视图, c) 是极点方向视图, d) 是斜上方 20° 视角。

图 1 Phaethon 4 个不同视角的形状模型^[11]

Phaethon 具备大椭圆轨道, 其半长轴 $a = 1.271$ AU, 偏心率 $e = 0.890$, 倾角 $i = 22.3^\circ$, 轨道周期为 523.5 d^①; 近日点距离 $q = 0.14$ AU, 远日点距离 $Q = 2.40$ AU, 位于木星 5.2 AU 半径轨道内部。另外两个小行星 (155140) 2005 UD 和 (225416) 1999 YC 的轨道根数和光谱与 Phaethon 相近, 它们和双子座流星群一起被统称为 Phaethon-双子座流星群复合体 (Phaethon-Geminid Complex, PGC)^[12-15]。

最初, Phaethon 被认为没有活动性^[16]。2009 年, 前导空间观测台 STEREO-A (Solar Terrestrial Relations Observatory-A) 的日光层成像仪 (HI-1) 首次报告了近日点附近 Phaethon 的增亮现象^[17]; 其于近日点后几小时达到亮度峰值, 而后在两天内消退^[18]。2012 年和 2016 年, 在 Phaethon 近日点附近仍有异常增亮现象, 并出现反太阳方向的尘埃尾迹, 表明这种活动现象能够反复出现^[4, 19]。

在小行星分类上, Phaethon 曾被归类为 C 型分支中的 F 型小行星, 后并入 B 型小行星^[20-24]。日本航天局 (JAXA) 与千叶工业大学行星探索研究中心合作, 策划通过一个名为 “DESTINY+” (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science) 的项目来探究 Phaethon。原计划于 2024 年发射, 现推迟至 2028 年发射, 并在之后飞越 Phaethon^[25]。中国也即将在活跃小行星探测方面有所部署, 2025 年发射的探测器 “天问二号” 目标之一即为活跃小行星 “311P”, 旨在为后续的木星和小行星探测任务做好铺垫工作^②。

第 2 章主要介绍 Phaethon 的重要观测事件; 第 3 章着重探讨近日点活动性的活动机制; 第 4 章介绍 Phaethon 观测结果的分析; 第 5 章介绍相关模型研究, 如轨道演化模型、热物理模型; 第 6 章介绍 Phaethon 与其他小行星的关系及族群讨论; 第 7 章介绍未来发射任务; 最后对全文进行总结并展望值得深入探索的方向。

① <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

② <https://news.cctv.com/2023/04/25/ARTIUz0nnpm6R9dvYm91eRwU230425.shtml>

2 重要观测事件介绍

2.1 近日点活动性观测

Phaethon 近日点距离太阳较近, 该处太阳距角小于 8° , 因此很难在此处进行直接观测。Jewitt 和 Li^[26] 利用 STEREO-A 上的 HI-1 相机^[27] 首次观测到 Phaethon 的活动性, 结果显示其在近日点时间后 (世界标准时间 2009 年 6 月 20.2 ± 0.2 日) 增亮了大约 2 mag, 几个小时后达到亮度峰值并在两天后亮度消退^[18]。排除了 Phaethon 的几何效应及等离子体撞击激发等原因后, 增亮现象被解释为由尘埃喷射所引起, 并以毫米级尺寸估算喷射出的尘埃总质量为 $2.5 \times 10^8 \text{ kg}$ ^[26]。

随后, Li 和 Jewitt^[19] 发现, 在 Phaethon 近日点附近的光学波段成像时, 出现类似彗星的尾状结构。2009 年和 2012 年, 天文学家发现该尾部在一天内增长到完整长度 (约 $2.5 \times 10^5 \text{ km}$), 这表明尘埃喷发的加速度至少为 $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 与 $1 \mu\text{m}$ 大小的球形尘埃颗粒受辐射压力作用一致, 以此估算喷射尘埃总质量约为 $3 \times 10^5 \text{ kg}$ ^[19]。根据 2009 年、2010 年与 2012 年的观测分析, 该增亮重复发生^[19], 并仅在增亮期间的两天内出现尾状结构^[4]。

2016 年 8 月 19.82 日, Phaethon 再次通过近日点后, 短期内增亮 2 mag^[28], 并在次日形成长度为 0.1° 的尾状结构。该结构拉长后很快消失, 与之前尾状结构基本相同^[4, 19]。基于 Schleicher-Marcus 相位函数, 在相位角高达 166° 的观测中, 微米级尘埃会因前向散射效应而增强^[29, 30]。如果把增亮归因于该机制, 即 Phaethon 经历了前向散射的相位角从而增亮; 之后随着相位角减小, Phaethon 变暗, 则可估算出尘埃大小为 $0.5 \mu\text{m}$, 总质量损失为 $10^4 \sim 10^5 \text{ kg}$ 。然而, 基于 STEREO 搭载的 COR2 日冕仪视场的大相位角探测数据有效散射截面的计算, 近日点期间喷出的尘埃质量 3σ 置信度上限为 300 kg ^[31], 远低于 HI-1 观测得出的 $3 \times 10^5 \text{ kg}$ 的总质量^[4]。因此, 微米级尘埃粒子喷射的相关性需更多证据。

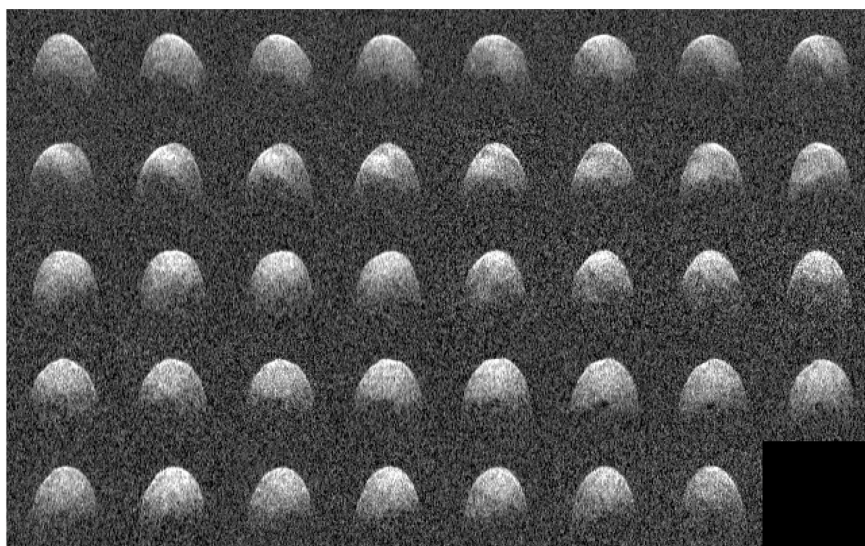
考虑到相比于 COR2 相机观测波段的差异性^[31], HI-1 在波长 400 nm 与 1000 nm 附近均有透射^[32], 而且 HI-1 相机的滤光片带通曾被发现 Na I D 线处有非微量透射^[33]。那么, Phaethon 的增亮行为被推测可能由 400 nm 附近的 Fe I 发射线或者在 $589.0/589.6 \text{ nm}$ 处的 Na I D 发射线所引起^[31]。2022 年 5 月, 太阳和日球层探测器 SOHO^[34] 的大角度光谱日冕仪 LASCO^[35] 和 STEREO-A 搭载 HI-1 成像仪捕捉到 Phaethon 释放的 Na I D 线^[36], 其拍摄到的 Phaethon 通过橘色滤光片的活动亮度比不能透过 Na I D 线的蓝色滤光片亮得多^[36]。人们利用 SOHO LASCO 日冕仪, 观测到 Phaethon 尾部发出 $589.0/589.6 \text{ nm}$ 的 Na I D 线处的共振荧光, 说明其变亮和尾部发展是 Na 释放的结果^[36]。这一观测现象极大支持了 Phaethon 的 Na 驱动增亮理论, 具体分析详见本文第 3 章。

2.2 地基观测

2017 年 12 月 16 日, Phaethon 以 0.069 AU 的距离掠过地球, 这是自 1974 年以来直到 2093 年最接近地球的一次, 许多探测在地基望远镜上展开, 可以对小型碎片^[5, 37] 和尘埃颗粒^[38] 进行高分辨率搜索, 以探寻 Phaethon 的活动性在近日点之外是否依然存在。然而探测没有发现活动性或者碎片痕迹, 这进一步佐证了双子座流星雨不是稳定活动产生的。

迄今为止, Phaethon 只在其近日点附近表现出微弱的活动。Ye 等人^[39]在 2017 年 12 月 14–18 日对 Phaethon 的气体 and 尘埃排放及碎片进行搜索, 结果表明其附近没有 15 ~ 100 m 的碎片; 与彗星 C/2017 O1 (ASASSN) 的光谱进行对比, 证实 Phaethon 没有彗星发射线。此次观测结果确定尘埃生成速率的 3σ 上限为 $0.007 \sim 0.2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[39]。此外, 在甚大望远镜对 Phaethon 的 $10.7 \mu\text{m}$ 观测结果中, 也没有发现尘埃排放和碎片存在^[38]。在加拿大-法国-夏威夷望远镜 (CFHT) 及中国新疆南山的兴明天文台的地面观测中, 均未发现 Phaethon 有彗星活动与米级碎片, 并估计其距太阳 1.449 AU 时, 质量损失上限为 $0.06 \pm 0.02 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$; 而在 1.067 AU 时, 为 $0.2 \pm 0.1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[22]。这种活动强度不足以供应双子座流星群。

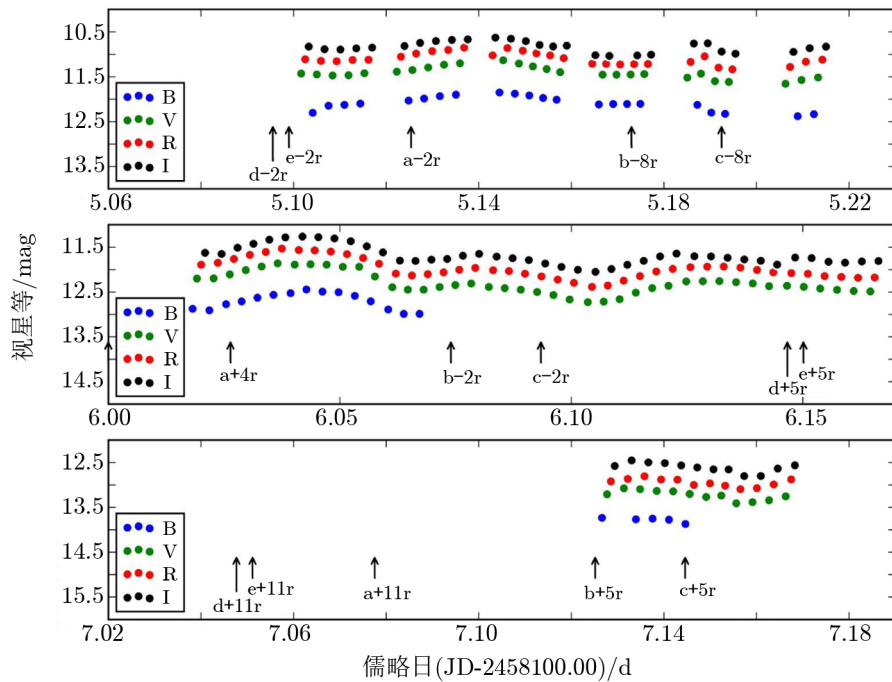
Phaethon、太阳与地球轨道的几何关系导致在相位角为 0° 条件下很难直接获得绝对星等, 因此难以用绝对星等和红外观测估算的反照率来计算直径。此次近距离掠过地球为雷达精确测定 Phaethon 尺寸创造了条件。图 2 为阿雷西博天文台观测的旋转图像, 基于该观测估计出 Phaethon 等效直径为 5.7 km ^[8], 这比之前利用热物理模型估算的结果 ($5.1 \pm 0.2 \text{ km}$ ^[3]) 要大。观测揭示 Phaethon 可能呈现扁球形: 赤道和低纬度区域有千米级的大型凹地, 并在其中一个极点附近有一个明显的雷达暗特征, 推测是陨石坑^[8]。



注: 2017 年 12 月 16 日、17 日和 18 日阿雷西博观测的 Phaethon 一组距离-多普勒图像显示其完全旋转。

图 2 Phaethon 距离-多普勒旋转图像^[8]

地基观测获取了 Phaethon 更清晰的光变曲线、颜色和偏振等数据。Tabeshian 等人^[22]给出了其相位角在 $20^\circ \sim 100^\circ$ 范围内的光变曲线 (如图 3 所示), 得到 Phaethon 的平均颜色为 $B-V = 0.702 \pm 0.004 \text{ mag}$, $V-R = 0.309 \pm 0.003 \text{ mag}$, $R-I = 0.266 \pm 0.004 \text{ mag}$ 。其中, $B-V$ 波段颜色会随观测纬度发生变化, 且其光度变化也与阿雷西博报告的凹陷一致^[22], 表明 Phaethon 表面或有大型陨石坑, 这些陨石坑可能与双子座流星群有关。



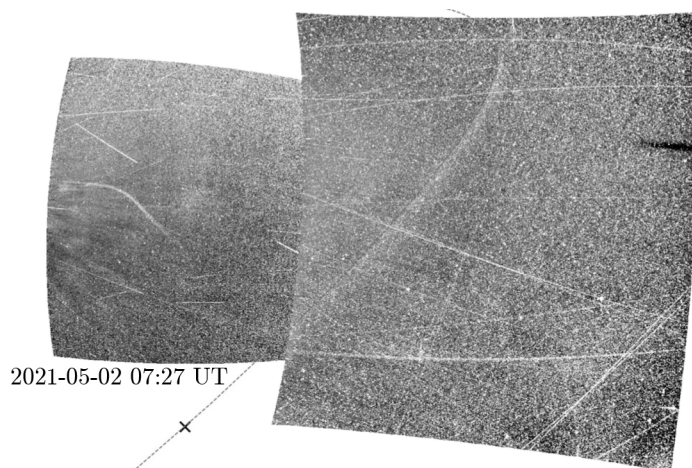
注: 图中字母 a 表示候选砾石, b 表示候选凹面, c 表示候选凹面, d 表示线性面, e 表示地暗点。

图 3 Phaethon 的光变曲线观测结果^[22]

掩星方法也可以高精度确定小行星尺寸。直接测量小行星掩盖背景恒星时投射在地面上的阴影, 其精度由测量时间精度决定。为了获取更精确的尺寸, DESTINY+ 科学小组成员利用掩星观测来估算 Phaethon 的直径, 共有 18 个观测站探测到恒星掩星现象^[40]。2021 年 10 月 3 日, 天文学家在日本西部观测到小行星 Phaethon 掩蔽了一颗位于御夫座亮度为 12 mag 的恒星, 该掩星的截面可以用一个椭圆来近似, 主次直径分别为 6.12 ± 0.07 km、 4.14 ± 0.07 km, 位置角为 $117.4^\circ \pm 1.5^\circ$ ^[40]。在 2021 年 10 月 13 日的恒星掩星的观测显示, Phaethon 主次直径分别为 6.13 ± 0.05 km、 4.40 ± 0.06 km^[10]。DESTINY+ 科学小组将根据这次掩星观测的结果修改 Phaethon 的三维形状模型, 以更准确地研发探测器。

2.3 PSP (Parker Solar Probe) 与尘埃相遇

2018 年 10 月 31 日—11 月 11 日, 帕克太阳探测器 (PSP) 任务中大视场成像器 WISPR 在距离 Phaethon 轨道的 0.0277 AU 范围内, 首次与其轨道上的尘埃相遇, 观测到的尘埃痕迹如图 4 所示^[41, 42]。两次观测到的最明显的尘埃痕迹都集中于近日点附近, 其分布与 Phaethon 的轨道高度重合, 而在近日点之外有所偏移^[41]。2022 年, Battams 等人^[42]再次总结并分析了 2018 年 10 月—2021 年 8 月期间, 九次独立飞行任务中遇到的尘埃观测结果, 发现尘埃轨迹并不完全遵循 Phaethon 的轨道, 其差距随着真近点角的增大而增大。如果对 Phaethon 的轨道根数进行修改, 将它的近日点角距恰好减少 1.0° ^[42], 则其轨道与观测到的尘埃痕迹几乎吻合。



注: Phaethon 的轨道由虚线表示, 黑色的 X 表示观测时 Phaethon 轨道离 PSP 最近的点。

图 4 2021 年 5 月 2 日 (E8) PSP 上的 WISPR-I 和 WISPR-O 观测记录^[42]

经估算其尘埃质量在 $10^{10} \sim 10^{12}$ kg 范围内, 远超 Phaethon 在目前活动水平上喷射的尘埃数量, 与双子座流星群的总质量相近。观测到的尘埃轨迹亮度大致均匀, 亮度与日心距的关系不明显, 因此推测尘埃已经均匀充满轨道^[42]。Battams 等人提出, 该尘埃轨迹可能由 Phaethon 附近的部分双子座流星体所产生, 因此可能与地球遇到的流星体不是同一起源^[41]。目前还不清楚该尘埃轨迹是否由 Phaethon 抛射出的大量尘埃所造成。

3 小行星活动机制

活跃小行星有多种活动成因机制, 包括辐射压力^[43]、静电排斥^[44]、升华(如 133P)^[45]、热裂解^[45]、自转不稳定性(如 311P)^[46]和撞击^[47]等。目前研究者认为, Phaethon 主要的活动成因可能为水冰升华、热裂解和 Na 驱动^[28], 此外还考虑自转不稳定性、辐射压力碎屑运动^[48]和内聚力^[49]的共同作用。这些活动会有交叉作用, 如旋转会促进热裂解的发生^[26]。Ryabova^[50]认为近日点活动中的尘埃与较早的双子座流星体很难区分开。

3.1 水冰升华

大多数流星群的母体彗星由冰升华导致质量损失^[45], 如尘埃颗粒由于冰的升华暴露在表面并被拖曳至空间中。与彗星不同, Phaethon 的活动只在通过近日点时被观测到活动性, 而在接近或超出地球轨道时从未被观测到任何尘埃或气体^[38, 39]。若升华是其活动的原因, 则需证明在 Phaethon 的某处存在挥发物能由高温引起升华。Jewitt 和 Li^[26]认为近日点附近温度约 1 000 K, 排除了 Phaethon 表面水冰的存在; 而其光谱在 $3 \mu\text{m}$ 区域内没有明确特征, 意味着其表面没有水冰或水合物, 但也不能排除内部水的存在^[51]。如果 Phaethon 起源于外太阳系, 则内部可能保存有水冰, 但能否驱动现在的活动须进一步研究。

假设 Phaethon 表面的热量传导至地下深处, 按照 Jewitt 与 Hsieh^[15] 计算的核心温度 ($T_c = 300 \text{ K}$), 水冰无法持续存在^[5]。MacLennan 和 Granvik^[52] 基于深埋水冰的可能性, 用 orbTPM 模型进行热力学分析, 估算出地下冰升华的时间尺度为 50 Ma, 地表 200 m 以内的水冰则会在 5.5 Ma 内完全升华, 因此内部水冰依然具有存在可能。

Yu 等人^[53] 提出尘埃-冰双层系统, 讨论内部水冰经过长期热演化还能够保留至今的可能性, 该系统中的升华/冷凝循环可以在近日点处出现瞬态气体爆发现象, 可解释观测到的尘埃尾迹。计算结果表明, Phaethon 失去所有埋藏冰的时间尺度为 6 Ma, 在演化过程中尘埃外层的厚度可达几百米, 这为如今 Phaethon 提供了埋藏水冰的可能性^[53]。并且在早期尘埃外层较薄的情况下, Phaethon 会更活跃。

3.2 热裂解

Phaethon 的尘埃尾迹只在近日点附近出现, 因此需考虑增亮现象可能是由于为尘埃颗粒脉冲释放增加了有效截面, 从而散射更多日光所致^[4]。其高达 $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的加速度与 $1 \mu\text{m}$ 大小的尘埃颗粒受辐射压力的作用一致, 说明尘埃小到足以被辐射压强烈加速^[4]。2016 年对增亮现象的观测显示, 在经过近日点后 1 d 内, 形成了一个由半径约 $0.5 \mu\text{m}$ 尘埃粒子组成的尾迹^[28]。Li 和 Jewitt^[19] 认为, 相比于冰升华, 近日点高温下更可能导致热裂解。矿物材料如含水硅酸盐干燥收缩导致的热断裂和分解是既能产生尘埃又能将其从表面喷出的过程, 尘埃则是热断裂时的产物^[19, 26, 54]。

热裂解机制中会抛射尘埃的四个过程为^[26]: (1) 热断裂时的张力可以抛射尘埃; (2) 静电力机制可清除尘埃, 表面离子促进尘埃的吸附和释放^[55]; (3) 太阳风的辐射压也会在近日点处清除小于 1 mm 的尘埃^[54]; (4) 旋转使得表面尘埃在自转中清除, Phaethon 的旋转周期大约为 3.6 h ^[3], 根据 Phaethon 赤道较宽的形状提高了辐射压清除尘埃的尺寸上限^[5]。因岩石受热开裂, Phaethon 增亮和尘埃尾迹现象会在近日点反复出现^[19]。

高温下产生尘埃的过程伴随着岩石结构改变、化学结合水损失、受热不均膨胀、迅速升温等过程而引起热裂解。Phaethon 预计的近日点温度范围为 $743 \sim 1050 \text{ K}$, 达到许多岩石能够分解的最低温度^[54]。温度升高使得化学结合水逐渐丧失, 晶体结构变化, 岩石整体收缩导致内部应力强度不足而开裂, 并产生尘埃。然而该过程产生的气体阻力不足以抵抗引力而喷射。岩石的循环加热和冷却导致内部不均匀热膨胀^[56, 57], 局部应力超过材料强度则会导致裂纹产生和扩大^[56, 58]。陨石样品实验显示, 裂纹生长和分解与假设的风化层生成时间尺度一致^[59], 表明该过程可能比撞击更易分解出风化层^[56, 57, 60]。此外, 迅速升温也使固体导热不足引起热膨胀, 较大温度梯度在少于其热传导时间尺度时作用于局部足以引发热断裂。利用自转周期计算出其昼夜温差 $\delta T \approx 500 \text{ K}$ ^[61], 通过热梯度模拟表明, 热裂解从 Phaethon 赤道区域喷出高达 2 cm 的颗粒^[62]。如果温度变化缓慢, 颗粒膨胀性质不同的岩石间产生切应力超过结构强度, 也会发生热裂解^[26]。

双子座流星群质量为 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ kg}$ ^[63], 在千年尺度上损失速度为 $320 \sim 3200 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[63]。根据简化模型测算出增亮抛射尘埃质量为 $2.5 \times 10^8 \text{ kg}$ ^[26]。Jewitt 等人^[4] 以 $1 \mu\text{m}$ 大小的尘埃等条件重新估算出增亮损失质量为 $3 \times 10^5 \text{ kg}$, 质量损失率约为 $0.1 \sim 3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Hui 和

Li^[28]对 Phaethon 在 2016 年活动事件中抛射尘埃进行了计算, 得到其质量为 $10^4 \sim 10^5$ kg, 平均质量损失率为 $0.1 \sim 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 这与之前的结果相符。可以看出 Phaethon 并没有让双子座流星群得到稳定补充, 流星体的起源问题仍未解决^[45]。但不能排除热裂解是双子座流星群来源的可能性。此外, 2009 年和 2012 年的近日点与异常亮度增加之间的相位滞后约为 0.5 d ^[19], 该现象与热裂解尘埃喷发之间的关系尚未明确。

3.3 Na 驱动理论

对 Phaethon 的研究表明向阳面温度大于 1000 K 足以使岩石蒸发^[3], 岩石成分的升华也可以作为触发因素^[64], 以清除表面物质从而暴露出次表层, 使得活动可以持续发展并导致灾难性破裂。岩石成分中的 Na 也是长久易挥发元素之一, 像 Phaethon 这样不含地表水的天体有可能出现 Na 驱动的活动。双子座流星体陨石中 Na 存在耗竭情况使其丰度较低^[65], 或由于尘埃被抛出后经高温使得 Na 成分被耗尽^[66]。Masiero 等人^[67]认为高温下的 Na 在小行星表面升华, 从而导致尘埃抛射, 而不是先抛射再耗尽。为了进行验证, 该研究使用热物理模型 NIMBUS^[68]进行模拟, 结果表明, 在局部地区可能会形成浓度比原始丰度至少高一倍的 Na, 加以撞击可引起爆发^[67]。此外, Na 离子的电离和移动也可以促进 Phaethon 表面尘埃颗粒的吸附和释放^[44]。

在未发现 HI-1 相机的带通 630 ~ 730 nm 之外发生泄漏之前, Phaethon 的增亮尾部一开始并未与 Na 升华产生联系^[4], 并且增亮现象可以解释为尘埃的前向散射增强作用^[28]。研究者认为, 微米大小的尘埃需 1 d 时间被辐射压力加速成尾部^[4, 28], 因此近日点后尾部看起来会被拉长。而后根据 HI-1 推测出的微米大小尘埃散射与 COR2 数据中尘埃质量不符, 说明 Phaethon 活动性原因值得进一步探讨。考虑到曾被排除的泄露成分^[33], 该增亮现象可包含 400 nm 附近的 Fe I 发射线或 589.0/589.6 nm 处的 Na I D 发射线^[31]。而根据 2022 年 5 月 SOHO LASCO 日冕仪和 STEREO-A 搭载的日光层成像仪 HI-1 的观测数据显示, 该增亮原因很可能是 Na I D 线^[36]。通过对发射线通量进行建模, 研究者发现气体升华的原子生成率的峰值在近日点后延迟 1 d, 该不对称模型能够更好地再现与 HI-1 观测值相似的光变曲线。通过对增亮尾部的形态进行模拟, 结果支持了气体升华驱动增亮的解释^[31]。

Zhang 等人^[36]模拟了由辐射压力、多普勒位移和太阳弗劳恩霍夫线对 Na I 尾巴的影响, 其荧光效率变化和加速情况可以再现 LASCO 和 HI-1 在 2022 年的观测和 17 次早期观测的尾状结构光度和形态, 近日点前后的不对称性也与观测情况相似。根据 Na I 尾部模型预计, 由于格林斯坦效应的影响, 近日点后尾部会出现物理上的延长。其效应表现为临近近日点时, Phaethon 的径向速度 $\dot{r} < 0$ 时, 表面 Na 原子的速度与之相近, 此处辐射压力起减速作用, 使其在速度 $\dot{r} \approx 0$ 发射的 D 线与太阳光谱的 Na I D 吸收线重合, 因此降低荧光激发率, 使得 Na 原子的加速度和挥发速度都受到抑制; 到达近日点时, Na 原子受辐射压力提升速度, 因此迅速产生发亮尾部, 向背离太阳的方向加速^[36]。此时尾部增亮并不代表实际活动性增强, 而体现了 Na I 尾部总体荧光效率的提升。通过 MCMC 过程建立 Na 尾部模型, 研究者得出 Na I 产出大约 $(1.09 \pm 0.15) \times 10^{29}$ 个原子, 并发现其温度依赖性与热解吸机制的预期值一致, 因此热解吸机制被认为是 Na I 产出的主要原因^[36]。这一发现表明 Phaethon 与 SOHO 观测到的产生 Na 发射的绕日彗星相关。

3.4 自转不稳定性

小行星的旋转速率可以通过外部扭矩、偶然撞击、释放气体和电磁辐射等机制, 加速到表面向心加速度上限值, 导致其在旋转过程中失去质量。较短的旋转周期会加剧热循环, 从而加强热断裂, 并驱使碎屑岩向重力势能最低的赤道区域移动^[69]。对于无冰的小行星, 辐射扭矩是使旋转的稳定性到达临界值的主要机制^[45]。

小行星表面受到热光子的辐射作用, 其每秒受到的辐射反冲净推力称为雅尔可夫斯基效应 (Yarkovsky effect)^[45, 70]。它与背离太阳面的辐射压力差使轨道半长径发生改变, 对米级至千米级天体作用显著, Phaethon 在此影响下半长轴持续减少。如果净作用力使小行星产生相对于质心的扭矩, 该扭矩称为 YORP 效应^[45], 可改变自转大小和自转轴指向, 并激发进动或快速旋转以致改变形态。目前认为双子座流星雨产生于千年时间量级^[71], 而根据计算得知 YORP 效应驱动的演化需要 1 Ma^[72], 那么 YORP 效应所引发的自转物质抛射可能不足以形成流星群。

如果 Phaethon 体积密度为 $500 \sim 1\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (B 型小行星的典型体积密度), 其 3.6 h 的自旋状态可能接近或高于其临界旋转周期^[73], 与其他活动机制共同作用则可能导致大规模的形变并引发物质抛射。事实上, 其陀螺形状^[3]及探测到的赤道脊形态^[10]均与表面物质由旋转驱动重塑向赤道方向的演化预期一致^[74]。旋转因素也增强了 Phaethon 结构破坏, 此时由范德华力组成的内聚力和结构摩擦力则可抵抗旋转带来的离心力, 并维持形状^[45]。

Nakano 和 Hirabayashi^[73]建立半分析模型以研究旋转对质量脱落机制的作用。他们提出, 在整个轨道寿命 (26 Ma) 内, YORP 效应使 Phaethon 随机地开始自转, 其最初的自旋周期比现在的周期短, 结构形变的幅度更大, 结合其他活动因素或导致较大的质量脱落事件, 产生了双子座流星群^[75], 此后自旋速度减慢, 演变为目前的陀螺形^[73]。关于旋转驱动的重塑过程和形变机制等内容, 有待更多研究解决。

3.5 其他增亮原因分析

除活动性外, Phaethon 增亮也可有其他原因, 如热辐射、太阳风作用、相位角散射效应等。考虑热辐射作用, 其近日点距离为 0.14 AU, 通过计算与阳光处于平衡状态的等温球形黑体的情况, 得到温度的下限约为 743 K ^[19], 温度上限为自转轴指向太阳的黑体的热辐射温度, 约 $1\,050 \text{ K}$ 。然而, Phaethon 的表面温度需要达到 $1\,650 \text{ K}$, 才能通过热辐射机制解释目前的异常增亮。因此 Phaethon 的近日点变亮不是由于表面的热辐射所致^[38]。考虑太阳风的作用, Phaethon 增亮发生在日冕亮度增加之后约 0.5 d, 在时间上不完全对等。从光度图上减去日冕背景后, Phaethon 增亮前后的光度曲线依然有明显变化^[26], 并根据 Phaethon 的亮度增加 2 mag, 进一步计算出日冕粒子密度为 $5 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$, 远大于该处日冕的密度 10^{10} m^{-3} ^[76], 这无法解释该处的增亮强度。鉴于 Phaethon 的相位角较大且变化, 考虑相位角散射效应。对比月球的相位函数亮度, Phaethon 在相位角 $80^\circ \sim 100^\circ$ 附近增亮了 1 mag 以上^[19], 持续时间为 2 d, 与理论上亮度逐渐衰减相矛盾, 因此可以认为增亮不是由相位角散射效应引起。此外, 岩石小行星表面镜面反射的影响也被排除^[19]。

4 Phaethon 观测结果分析

4.1 光谱与成分分析

Phaethon 为 C 型小行星中的 B 亚型^[6]，呈现出不寻常的“蓝色”光谱，即光谱呈现负斜率^[15]。如图 5 所示，根据观测光谱属性，Phaethon 在可见光波段 $0.37 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 显示出负斜率，没有吸收特征，在 $0.7 \sim 0.75 \mu\text{m}$ 附近，斜率进一步下降（更蓝）；近红外数据的变化很小，在 $1 \mu\text{m}$ 处有一个明显的负斜率，并且在 $1.2 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 之后光谱向上凹陷，随着波长的增加，负斜率逐渐变缓，到 $1.8 \mu\text{m}$ 时趋于平坦。总之，在整个可见光波长范围内，整体斜率有轻微的变化，在较小的波长范围内变化较大。

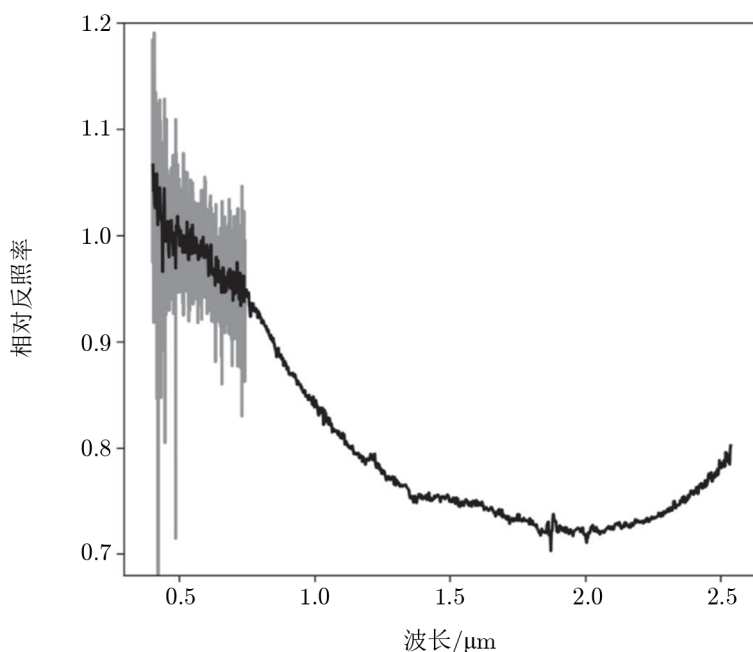


图 5 Phaethon 的旋转平均可见光-近红外数据 ($0.4 \sim 2.55 \mu\text{m}$)^[21]

因早期在紫外线 (UV) 波段并没有观测到吸收特征，Phaethon 最初被归为 F 型天体^[77]。如今 F 型分类并入 B 型分类^[78]，表现为 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 的波长范围内具有无特征的反射光谱，形状平坦或略带“蓝色”（即在该波段呈现负斜率），与同为 B 型的 (2)Pallas（以下简称 Pallas）家族小行星相似^[79]，而 Phaethon 的特殊之处在于光谱的负斜率部分更突出，因此 de León 等人^[75]认为它也可以是一个单独的分类。关于光谱分类和比较将在本文第 6 章中进行讨论。

Phaethon 的光谱吸收情况会根据位置而有所变化，如在自转不同相位的光谱斜率略有区别^[21]。Hanuš 等人^[3]认为 Phaethon 的北极在紫外光谱上的吸收变化情况可能与其他部分有明显的不同；Borisov 等人^[20]也推断出北极可能具有不同的偏振特性。还需要进一步的研

究去判断北极区域的物理机制, 以及是否在其他波段也有这样的光谱特性。由于颗粒大小也会影响光谱斜率, 陨石类型对比的研究也会受表面粒度等因素干扰。由于小行星表面可能并不均匀, 表面性质的纬度变化会导致观测角度和小行星姿态变化^[80]。但 Lee 等人^[81]通过研究光谱发现, 没有充足证据可证明表面不均匀性。

Phaethon 的反射光谱显示出其表面成分是经过严重热变的碳质球粒岩材料^[78, 79, 82-84], 其反照率从 1.0 μm 到 0.5 μm 增加了约 30%, 有约 36% 的富镁橄榄石^[52]。这可能是由于 Phaethon 经过近日点时所承受的加热改变了地表成分, 与极端加热导致的层状硅酸盐分解有关^[52]。碳质球粒陨石中含有的水分会与陨石中的橄榄石、辉石、蛇纹石等反应, 形成水合硅酸盐矿物, 而 B 型小行星经历了一定程度的脱水, 其成分会在含水与无水之间^[83]。而在 3 μm 处的特征表明, Phaethon 表面没有水合矿物^[64], 该特征应该是经过高温所导致^[84]。

有许多球粒陨石被认为可能是 Phaethon 表面的组成成分。Licandro 等人^[82]根据获得的近红外观测数据 (0.4 ~ 2.45 μm), 认为经过高度热处理的 CI 和 CM 陨石是最佳匹配成分。Madiedo 等人^[85]利用大气闪烁光谱推断出双子座球粒陨石的成分也与 CM 球粒的成分一致, 还发现 Phaethon 的近红外光谱与不含水的 CK 球粒陨石非常吻合。Clark 等人^[83]发现最匹配的光谱是经过热处理的 CK4 陨石 ALH85002 和 EET92002。CK4 陨石高度氧化, 含有 CAI、橄榄石、难熔金属硫化物、FeOx 以及高度难熔的石墨基质等成分, 这是由于原始铁镁硅酸盐、硫化物和复杂有机物经过大量热水循环再加工所致^[64]。在同为 B 型分类的相关研究中, 小行星 (101955)Bennu 的光谱与被加热到 1000 K 以上的 CI 球粒陨石 Ivuna 的样本最为吻合^[86]。Kareta 等人^[87]通过实验表明, Phaethon 的表面从近紫外线到至少 2.5 μm 波段光谱, 与加热的 CI 球粒陨石一致。最近 Maclellann 和 Granvik^[52]通过光谱混合模型计算出中红外发射率光谱, 并对各种矿物物种的存在进行了建模, 认为 Phaethon 与加热后的碳质球粒陨石 CY 最为接近, 两者的橄榄石丰度基本一致; 其层状硅酸盐在 300 ~ 500 K 温度下进行充分脱水和脱羟基后, 在 870 ~ 970 K 时转化为橄榄石。该过程可以模拟 Phaethon 所受高温而产生岩质变化。

4.2 蓝化表面成因

Phaethon 的特殊之处在其相对“蓝色”的表面, 可能是其风化表层的大颗粒尺寸、表面粗糙度、热蚀变或三者的任何组合的结果^[62]。近红外数据中的斜率变化可以解释为与颗粒大小有关的影响^[21], 该因素与偏振测量和热物理建模计算有关。陨石和小行星材料的光谱在增加有效颗粒大小时往往会具有更多负斜率 (更蓝)^[88], 如碳质球粒陨石随着颗粒尺寸的增大, 光谱会变蓝^[89]。实验表明, 在高温下碳质球粒岩经历表面的烧结机制后变质, 导致表面颗粒更加粗化^[88]。如果 Phaethon 表面是碳质球粒岩及其类似物, 则也会出现这种情况。

经过长期热效应, Phaethon 表面层中靠近太阳区域的 Fe 及有机固体和较容易分解的岩石会发生升华^[3], 因此光谱上没有 Fe 留存, 使负斜率迅速增加^[90]。而光谱上比较相似的 Pallas 缺乏类似的热环境, 可能是由于相对增加了纳米 Fe 而减弱了蓝化^[83]。Lisse 和 Steckloff^[90]提出, 在近日点小于 0.15 AU 的类似 Phaethon 轨道上的任何小行星天体都可能存在蓝化的表面, 可通过对近日点附近大量绕日小行星的观测来检验, 以寻找是否存在蓝化表

面和周围富含 Fe 和 CHON 气体的彗星, 这些成分的升华过程比空间风化改变表面过程更快^[91, 92]。太阳风使 Phaethon 每次经过近日点时不断暴露出新的表面, 并通过升华作用保持表面的蓝色, 经计算得出近日点处 Fe 的损失率为 $Q_{\text{gas}} = 10^{22} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[62]。

除上述成分外, 高温下小行星表面的球粒岩中的 Na 会挥发并携带尘埃逸出^[67]。在 Fe、Na 等成分升华后, 部分岩石如辉石会分解成 SiO 和 O₂ 蒸汽, 并留下固体难熔橄榄石残留物^[90], 这样的升华过程会削弱辉石表面的固体基质, 留下的固体会在升华气体外流中作为夹带尘埃脱落。该理论也同样适用于类似环境的小行星 (如 2005 UD), 进一步检验可以通过 DESTINY+ 任务在近日点附近对 Phaethon 的表面进行现场测量^[93]。

4.3 反照率

许多小行星的几何反照率是通过结合红外线波段的辐射观测与可见光波段的光度观测算出^[88]。此外, 由于反照率和偏振遵循反比的 Umow 定律, 因此, 根据偏振观测也可以得出反照率^[79]。目前 Phaethon 主要测得的反照率范围是 0.08 ~ 0.13。基于 IRAS 的热红外数据, Tedesco 和 Desert^[7] 计算出 Phaethon 的反照率为 0.11, 高于 F 类光谱小行星的典型值 (0.03 ~ 0.07)。Hanuš 等人^[3] 利用热物理模型 (TPM), 基于 IRAS 和 Spitzer 数据得出 Phaethon 的几何反照率为 0.122 ± 0.008 , 高于 Tedesco 和 Desert 的计算结果。Masiero 等人^[94] 计算出 Phaethon 的几何反照率为 0.16 ± 0.02 , 验证了高反照率。

此外仍有一些研究者得到较低反照率的结果。Zheltobryukhov 等人^[95] 估计 Phaethon 在 R 滤镜下的几何反照率为 0.075 ± 0.007 , 这符合初始分类为 F 型的情况^[77]。Kareta 等人^[21] 在 2.0 μm 处观测到一个在更远的日心距上没有出现的热尾巴, 并对 Phaethon 的热辐射尾部进行了拟合, 并得出其反照率为 0.08 ± 0.01 。目前, 根据雷达测得 Phaethon 直径为 5.7 km^[8], 比之前的结果 (5.1 km^[3]) 更大, 这也可使得反照率被低估。

Phaethon 的表面具有较强偏振, 意味着通过理论计算出的几何反照率会低于通过辐射观测得到的估值^[20, 79, 88]。如果它的反照率较高, 那么 Phaethon 就偏离了 Umow 定律, 即对于太阳系小天体来说, 偏振与一般的几何反照率有反比的关系。由于光的多次散射在高反照率表面更多, 因此反照率较高区域的偏振度较弱^[88]。Devogèle 等人^[79] 根据偏振观测结果, 得出 Phaethon 的反照率约为 0.05, 与确定的 Phaethon 的辐射反照率有很大差别^[3]。而将 Phaethon 的强偏振情况结合更大的雷达观测直径进行计算, 结果支持了 Kateta 等人^[21] 得出的低反照率情况。而 Geem 等人^[96] 根据低相位角的偏振观测得出反照率为 0.11, 与高反照率相符。关于反照率的争议有可能是由于 Phaethon 表面异质不均匀造成的, 颗粒大小等因素也会影响反照率。

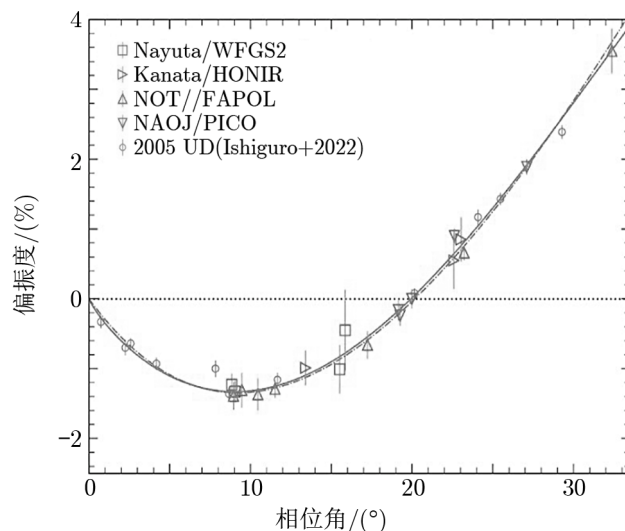
4.4 偏振分析

在不同相位角对小天体进行偏振测量可以更好地揭示其表面物质特性, 也有助于判断光谱分类, 并可以通过低相位角的偏振观测推断 C 型小行星是否含有水^[97]。在得出 Phaethon 的高反照率情况后^[3], 则需对偏振进行观测, 才能判断对应的偏振情况是否符合预期。Phaethon 的偏振水平较高, Devogèle 等人^[79] 获得的多色相位 $36^\circ \sim 116^\circ$ 偏振曲线显示, 在高相位角下其具有极强的线性偏振, 推测约 130° 的相位角处偏振度会达到最大

($P_{\max} \approx 45\%$)。根据 Umow 定律, 在表面颗粒大小 d 固定的情况下, 有经验公式能够表明 $P_{\max}$ 与反照率 A 之间的关系^[98]:

$$d = 0.03 \exp[2.9(\lg A + 0.845 \lg P_{\max})] \quad (1)$$

Devogé 等人^[79]根据 Umow 定律进行计算, 发现 Phaethon 的偏振反照率比 Hanuš 等人^[3]辐射观测建模确定的辐射反照率 0.122 低很多; 而 Geem 等人^[96]通过偏振测得反照率为 0.11, 该结果与高反照率更为接近。Geem 等人^[96]在较低相位角 ($8.8^\circ \sim 32.4^\circ$ 范围内) 测得 Phaethon 的偏振曲线, 如图 6 所示。Phaethon 的最小偏振度 $P_{\min} = (-1.3 \pm 0.1)\%$, 其偏振转折角为 $19.9^\circ \pm 0.3^\circ$, 最小偏振值可用以证明 Phaethon 表面更接近无水陨石的情况^[96]。



注: 图中实线和虚线分别为使用三角函数和线性指数函数拟合数据的曲线。

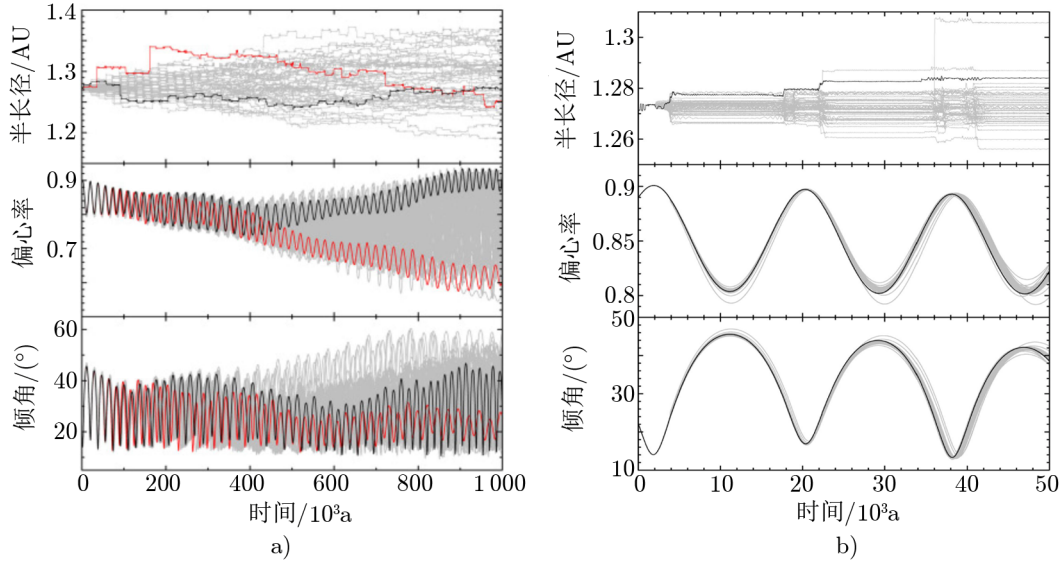
图 6 Phaethon 相位角 (α) 与偏振度 (P_r) 的关系^[96]

线性偏振度的最大值 $P_{\max}$ 和相位角 α 与表面颗粒大小相关^[88]。当其表面主要是大颗粒时, 表面覆盖的颗粒数量较少, 因此减少了光线的多重散射, 导致更强的偏振。如上文所述, Phaethon 表面高温烧结过程使得高偏振度与蓝色表面特征具备一致性。在反照率保持不变的条件下, 表面颗粒越大, 偏振就会相对越强。表面具有较大孔隙率也会导致更强偏振^[88]。Ito 等人^[88]在较高相位角处 ($\alpha = 106.5^\circ$ 时) 观测到 Phaethon 偏振高达 $(50.0 \pm 1.1)\%$, 以此估计其表面覆盖直径为 $150 \mu\text{m}$ 的颗粒; Geem 等人^[96]则估计表面颗粒直径约 $300 \mu\text{m}$, 这与热模型建模所得出的毫米大小的粒度^[99]有所区别。真实的颗粒大小还需进一步结合热物理建模来进行研究, 也很可能说明其表面的异质性^[100]。MacLennan 等人^[80]结合异质性的表面粒度进行分析后发现, Phaethon 的偏振情况与北半球粗粒度表面的情况较为一致。

5 Phaethon 相关模型研究

5.1 轨道演化模型

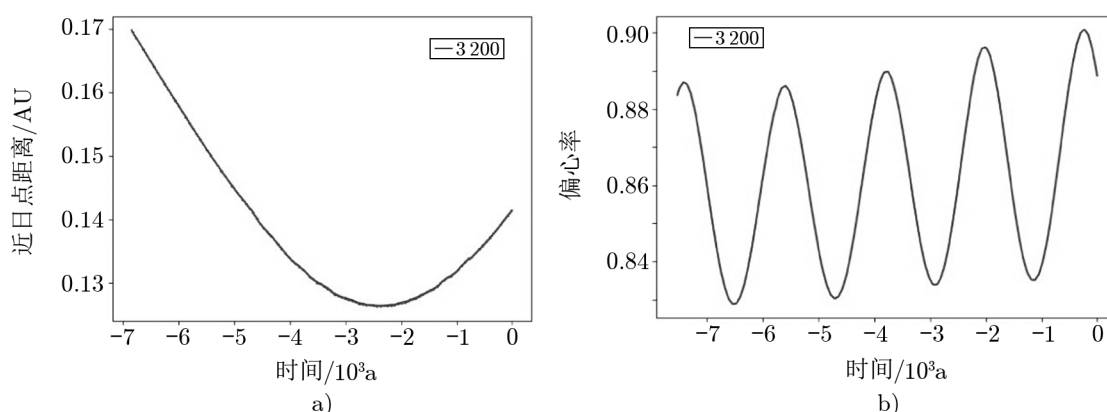
对目前 Phaethon 轨道根数取一个合理的变化区间,在该区间中的不同轨道根数进行同样的轨道反演,可以得知进化至当下的 Phaethon 轨道过去所具备的多种可能性。如相对于 Phaethon 轨道根数取 1σ 偏差,从中生成 100 个不同的根数进行反演^[3]。如果多个稳定演化都有一些共同点,则可以说明小行星的大致演化路径。图 7 为 Phaethon 动力学反演的结果^[3],选取微小差别(半长轴的 2×10^{-9} , 偏心率的 2×10^{-8} , 倾角的 3×10^{-7})的近似克隆轨道的 50 个克隆体进行反演。半长轴的演化显示出与行星交会的明显迹象,主要由行星相遇引起的短暂引力摄动引起的随机行走效应所主导,约在 4×10^3 a 前克隆体的半长轴开始发散。在图 7a) 中呈现的大约 10^5 a 的时间中,轨道半长轴的演化主要受到大行星引力摄动的影响,而偏心率 e 和倾角 i 的演化则不会产生明显扰动,但会受到半长轴累积扰动的长周期频率变化的影响。整体来看,Phaethon 的轨道偏心率在过去 3×10^5 a 中呈现出均匀的增加趋势。



注: a) 显示了 1 Ma 的整个综合时间跨度, b) 显示的只是前 5×10^4 a。展示标称轨道(黑线),以及 50 个克隆体的轨道(灰线)。过去真实的轨道演化可能是其中任何一个。红线代表克隆体进化,其偏心率稳定地减小到过去。

图 7 Phaethon 轨道的半长轴(顶端)、偏心距(中间)和倾角(底部)的动力学演化^[3]

本文利用 MERCURY6 积分器^[101]对 Phaethon 的轨道进行了动力学演化计算。如图 8 所示,大约 2×10^3 a 前,Phaethon 的轨道偏心率最高,导致其近日点距离 q 约为 0.126 AU,比当前值(约为 0.14 AU)小很多。由图 8 可知,偏心率在 2×10^3 a 附近达到最大值之前,有规律地缓慢增加。



注: a) 为轨道反演中近日点距离的演化, b) 为 7×10^4 a 尺度上偏心率 e 的演化。

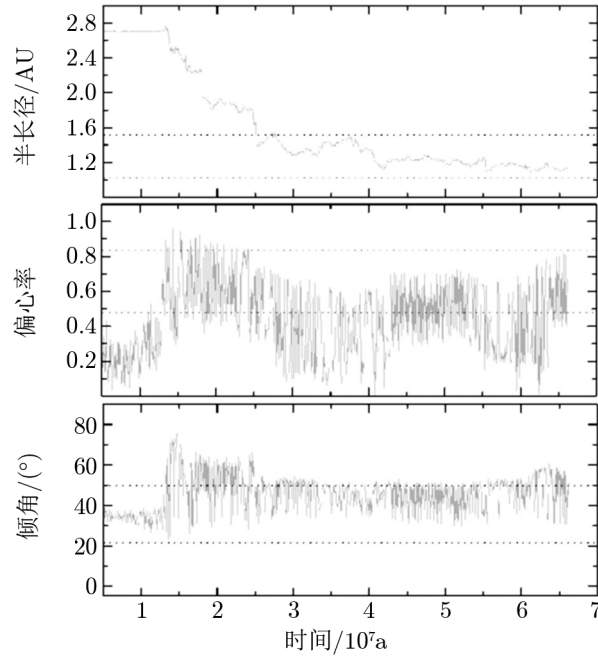
图 8 Phaethon 轨道反演中近日点距离与偏心率 e 的演化

对于 Phaethon 的溯源也可以通过轨道反演的方式进行探究。Pallas 家族是讨论最多的 Phaethon 来源之一^[62, 102]。在动力学机制的研究中, 内行星带中的大多数原始小行星家族 (C 型和 B 型) 都有附近的长期或平均运动共振^[62]。在 Pallas 家族的小行星中, 包含能够与木星共振的在 8:3 MMR 和 5:2 MMR 位置上的小行星。经过计算, 该位置小行星尺寸下限为 4.95 km, 并且在木星共振处可以通过偏心率进一步激发, 使得小行星穿越至火星或地球轨道附近, 这为类似 Phaethon 的近地小行星演化提供了一种可能性^[75, 103]。因此, de León 等人^[75]试图在木星 8:3 MMR 和 5:2 MMR 位置上进行克隆数值积分, 取对应于 Phaethon 各自轨道根数平均值的 1σ 偏差演化 1×10^5 a。结果显示, 约 93% 的粒子将会落入太阳, 而约 5% 的粒子则遇到了木星并落入, 只有 2% (即 21 个) 克隆体能够演化到火星与地球的轨道交叉区域; 当小行星进入近地空间时, 其偏心率开始在 $0 \sim 0.9$ 之间振荡, 共振将这颗小行星的偏心率泵到更高的值, 直到它与近地空间有所交叉。经过反演, 这颗小行星能够具有约 1.2 AU 半长径和高倾角的类 Phaethon 轨道, 因此, Pallas 家族的碎片的确有可能成为近地小行星并演化出与 Phaethon 相似的轨道^[75]。图 9 展示了一个有效的克隆体演化为类 Phaethon 轨道的过程。

Todorović^[103]做了更严格的动力学研究工作, 发现从 Pallas 家族的木星共振部分在 5:2 MMR 和 8:3 MMR 位置处, 分别有 43.6% 和 46.9% 的粒子能够满足类 Phaethon 轨道的演化途径^[103], 比此前更为有效。这说明近地天体群中可能存在着类似 Phaethon 轨道的 Pallas 家族演化成员。

5.2 热物理模型

热辐射度量是研究小行星物理特性的重要手段, 借助热物理模型可计算出小行星在特定轨道位置的红外辐射, 并与观测值进行拟合, 可获得小行星的热惯量 Γ 、尺寸 D 、反照率 A 和表面粗糙度 f_r 等参数信息^[104]。小行星热物理模型一般分为两大类。一类为简单模型, 假定小行星为球体, 包括标准热物理模型 STM、近地小行星热模型 NEATM、快速自



注：为在木星的 8:3 MMR 共振位置中的颗粒的半长轴、偏心率 and 倾角的演化。

图 9 虚拟 Pallas 碎片向类 Phaethon 轨道的动力学时间演化^[75]

转模型 FRM 等，在太阳辐射下，其表面可以瞬间达到平衡状态。使用相关经验公式计算小行星表面不同的温度分布，然后通过与观测数据的拟合，可获得小行星的反照率和尺寸等信息^[105]。另一类则为热物理模型，将小行星看做由若干三角面元组成的多面体，包括经典热物理模型 TPM、先进热物理模型 ATPM^[106, 107]、表层仿真热物理模型 RSTPM^[108]等。这类模型可近似代表小行星的真实形状^[109]，并在每个面元求解热传导方程，边界条件中考虑太阳辐射在小行星表面的多重散射、向内的热传导、向外的热辐射等多个物理过程^[104]。

本文借助先进热物理模型 ATPM^[106]对 Phaethon 的热物理参数进行了研究。结合 Phaethon 形状模型的数据^[11]，小行星表面任意面元的温度由以下公式求出：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (2)$$

其中， ρ 、 c 和 κ 分别为密度、比热容和热传导率。根据能量守恒，可确定其外部边界条件，即接收到来自太阳的辐射与其他面元的辐射之和，等于向内的热传导与向外发出的热辐射之和：

$$(1 - A_b) \left(s \psi \frac{F_s}{r_h^2} + F_{sc} \right) + (1 - A_{th}) F_r = \varepsilon \sigma T^4 \Big|_{z=0} + \left(-\kappa \frac{dT}{dz} \right) \Big|_{z=0}, \quad (3)$$

其中， A_b 为邦德反照率， F_s 为太阳常数， r_h 为日心距， s 为面元相对太阳的可见系数，即面元被太阳照射时 $s = 1$ ，被遮挡时 $s = 0$ ， ψ 为入射太阳光与面元法线的夹角的余弦值， $F_s = 1367.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 为太阳常数， F_{sc} 为其他面元对太阳辐射的散射， F_r 为面元之间的自

加热效应。为简化计算, 根据 Lagerros^[110] 提出的标准变换方式, 将温度 T 、时间 τ 、深度 z 做如下变换: $x = z/l_s$, $\tau = \omega t$, $u = T/T_e$, 其中 $l_s = \sqrt{2\pi\kappa P_{\text{rot}}/(\rho c)}$ 为趋肤深度, P_{rot} 为小行星自转周期, T_e 为有效温度, 此时热传导方程变为:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (4)$$

边界条件变为:

$$u^4 - \Phi \frac{du}{dx} = s \cdot \psi + (1 - A_b) \frac{F_{\text{sc}}}{\varepsilon \sigma T_e^4} + (1 - A_{\text{th}}) \frac{F_r}{\varepsilon \sigma T_e^4}, \quad (5)$$

其中, Φ 为热参数:

$$\Phi = \frac{\Gamma \sqrt{\omega}}{\varepsilon \sigma T_e^3}, \quad (6)$$

上式中, $\Gamma = \sqrt{\kappa \rho c}$ 为热惯量。通过求解上述方程, 可获得小行星表面温度分布 T , 并根据普朗克函数, 使 f_i 为面元 i 的可视因子, 则获得理论辐射通量 F_λ :

$$F_\lambda = \sum_{i=1}^N \varepsilon f_i B(\lambda, T_i). \quad (7)$$

本研究采用了 WISE、Spitzer、IRAS、AKARI 和 UKIRT 的 Phaethon 红外数据进行拟合 (共计 67 组观测历元, 详见表 1)。其中, Spitzer 望远镜的数据较多^[3], 但其观测时长仅 10 min, 为避免该部分数据在拟合过程中权重过大, 对其进行了区间离散化, 通过求平均的方式计算出整数波长的辐射流量值 (binned data), 详见表 2。其中采用的 WISE 在 2010 年的全波段观测数据, 仅考虑 W3 和 W4 波段的观测 (12 μm 和 22 μm), 沿用了 IRAS 和 UKIRT 的多波段红外观测数据^[3, 11, 111, 112]。

小行星表面的粗糙度对其热辐射特性也会产生显著影响, 例如粗糙表面会导致对太阳辐射的遮挡, 并造成局部温度升高, 同时使热辐射具有一定的方向性。本研究中, 使用半球形凹坑模型模拟小行星的粗糙表面, 并用 f_r 代表粗糙度 (凹坑占面元总面积的比例)。此时用有效邦德反照率表示粗糙面和光滑面对太阳辐射的反射情况:

$$A_{\text{eff}} = f_r \frac{A_b}{2 - A_b} + (1 - f_r) A_b. \quad (8)$$

此外, 邦德反照率与几何反照率的关系为 $A_{\text{eff}} = p_v q_{\text{ph}}$, $q_{\text{ph}} = 0.29 + 0.684 G$ 代表相积分, G 为斜率参数, 几何反照率与直径存在如下关系:

$$D_{\text{eff}} = \frac{1329 \times 10^{-H_v/5}}{\sqrt{p_v}}. \quad (9)$$

根据以上假设, 理论辐射通量中包含 3 个自由参数, 热惯量、粗糙度和几何反照率, 即 $F_\lambda = F_\lambda(\Gamma, f_r, p_v)$ 。拟合时, 我们在 (Γ, f_r, p_v) 参数空间中进行搜索, 并设定热惯量 Γ 的取值范围是 $0 \sim 500 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$, 设置粗糙度的取值范围为 $0 \sim 1$, 使用最小二乘法进行拟合, 最小 χ^2 值所对应的参数即为最佳拟合值:

$$\chi^2 = \frac{1}{n-3} \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_{\lambda_i}(\Gamma, f_r, p_v) - F_{\text{obs}}}{\sigma_i} \right]^2. \quad (10)$$

表 1 拟合所用多波段数据

时间 (JD)	$\lambda/\mu\text{m}$	流量/Jy	误差/Jy	参考文献
2445618.566846	12.0	2.826	0.317	[3]
2445618.566846	25.0	3.453	0.563	[3]
2445618.566846	60.0	1.101	0.250	[3]
2445618.781563	12.0	2.377	0.272	[3]
2445618.781563	25.0	3.617	0.610	[3]
2445618.781563	60.0	1.161	0.241	[3]
2445618.781563	100.0	0.445	0.096	[3]
2445618.853136	12.0	2.143	0.245	[3]
2445618.853136	25.0	3.601	0.594	[3]
2445618.853136	60.0	1.232	0.279	[3]
2445618.924708	12.0	2.164	0.257	[3]
2445618.924708	25.0	3.024	0.493	[3]
2445618.924708	60.0	1.212	0.249	[3]
2445618.996292	12.0	1.964	0.242	[3]
2445618.996292	25.0	3.275	0.483	[3]
2445618.996292	60.0	1.087	0.219	[3]
2445619.067876	12.0	1.852	0.255	[3]
2445619.067876	25.0	3.116	0.455	[3]
2445619.067876	60.0	1.007	0.237	[3]
2446054.797880	10.6	3.853	0.231	[111]
2446054.802080	19.2	5.380	0.323	[111]
2446054.806880	4.7	0.174	0.030	[111]
2446054.810380	8.7	2.566	0.103	[111]
2446054.812480	9.7	3.175	0.190	[111]
2446054.815280	10.3	3.326	0.200	[111]
2446054.817380	11.6	4.296	0.215	[111]
2446054.820780	12.5	4.436	0.266	[111]
2446054.822880	10.6	3.450	0.207	[111]
2446054.854181	10.6	3.646	0.219	[111]
2446054.913881	4.7	0.194	0.016	[111]
2446055.831186	4.7	0.022 1	0.018	[111]
2455201.75645	12.0	0.010 146 19	0.001 014 62	[112]
2455201.75645	22.0	0.028 864 37	0.002 886 44	[112]
2455201.88888	12.0	0.010 488 25	0.001 048 82	[112]
2455201.88888	22.0	0.031 795 24	0.003 179 52	[112]

表 2 拟合所用 Spitzer 数据

$\lambda/\mu\text{m}$	流量/Jy	误差/Jy
6.000	0.116 0	0.003 5
7.000	0.221 0	0.002 3
8.000	0.347 2	0.004 1
9.000	0.490 1	0.005 0
10.000	0.613 6	0.005 9
11.000	0.716 5	0.006 8
12.000	0.781 7	0.007 7
13.000	0.872 4	0.033 1
14.000	0.936 0	0.005 0
15.000	0.970 7	0.016 1
16.000	0.999 3	0.032 7
17.000	1.005 0	0.013 1
18.000	1.005 7	0.013 3
19.000	0.978 5	0.018 4
20.000	0.970 1	0.018 1
21.000	0.969 3	0.026 0
22.000	0.952 0	0.012 2
23.000	0.911 9	0.010 2
24.000	0.886 7	0.011 4
25.000	0.872 9	0.011 3
26.000	0.855 6	0.010 7
27.000	0.835 1	0.008 7
28.000	0.804 8	0.013 4
29.000	0.773 3	0.009 1
30.000	0.772 5	0.010 2
31.000	0.749 7	0.008 3
32.000	0.733 1	0.012 6
33.000	0.700 1	0.011 8
34.000	0.712 7	0.011 1
35.000	0.696 9	0.014 6
36.000	0.656 8	0.024 4
37.000	0.636 2	0.018 9

注：2005 年 1 月 14 日 (2453379.5JD) Spitzer IRS 观测数据^[3]。

如图 10 所示, 我们计算得到该小行星的热惯量大小为 $550^{+320}_{-160} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$, 反照率大小为 $0.1253^{+0.0034}_{-0.0020}$, 对应的直径为 $5.160^{+0.040}_{-0.0069} \text{ km}$, 对应的最小 χ^2 值为 3.590; 由于选取的数据较多, 导致拟合自由度偏大, 而与前人工作相比是同一量级且相对偏低^[3, 80, 94],

与已有的热物理参数拟合程度一致。该小行星在近日点附近有较强的活动性, 其颗粒较小的表壤成分可能会脱离表面, 留下颗粒尺寸较大的岩石等结构, 从而导致其表面热惯量比其他小行星偏大。我们将结果与其他文献中计算出的 Phaethon 热惯量进行了比较, 详见表 3。

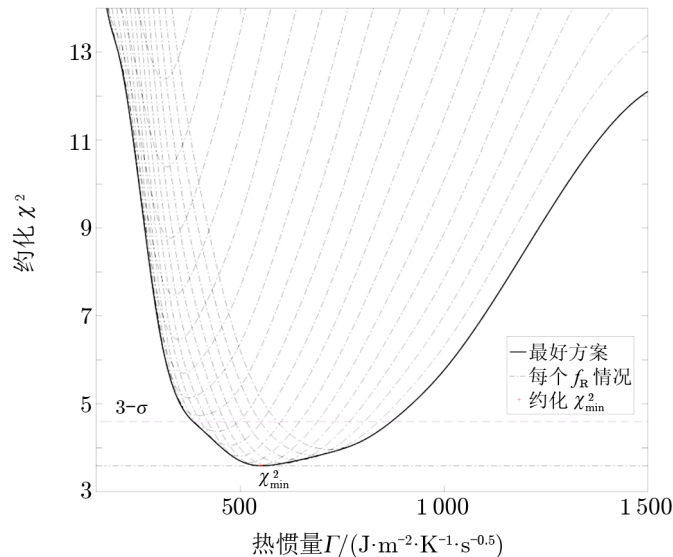


图 10 Phaethon 热惯量最小二乘法拟合结果

表 3 Phaethon 的热惯量

$\Gamma/(\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1})$	p_v	D_{eff}/km	χ^2_{min}	参考文献
550^{+320}_{-160}	$0.1253^{+0.0034}_{-0.0020}$	$5.160^{+0.040}_{-0.0069}$	3.590	
600^{+200}_{-200}	$0.122^{+0.008}_{-0.008}$	$5.1^{+0.2}_{-0.2}$	2.9	[3]
630^{+80}_{-70}	—	$5.4^{+0.1}_{-0.1}$	6.2	[80]
880^{+580}_{-330}	$0.16^{+0.22}_{-0.22}$	$4.6^{+0.2}_{-0.3}$	58	[94]

注: Γ 表示热惯量, p_v 代表反照率, D_{eff} 代表有效直径。

6 与其他小行星的关系

6.1 彗星与小行星分类讨论

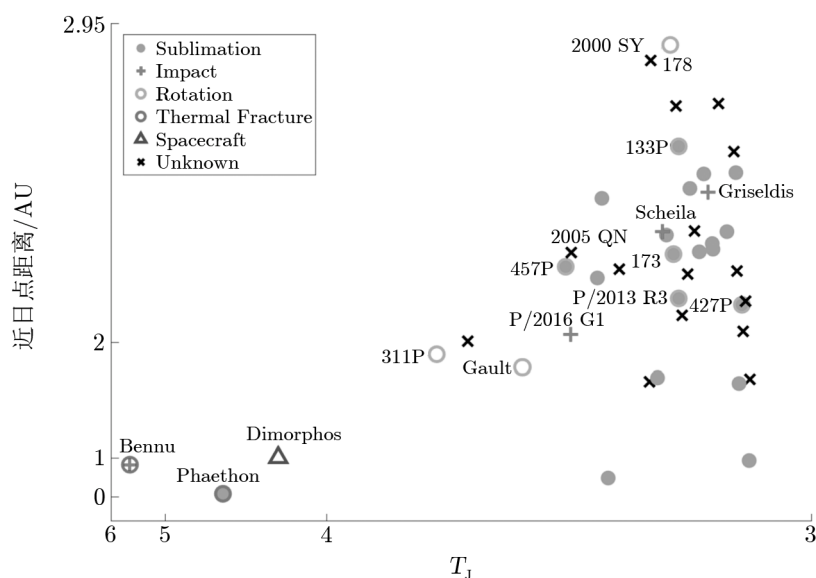
彗星和小行星是两种不同的小天体, 而活跃小行星是严格定义上的小行星与彗星的一种交叉, 其中大部分又被经常称为“主带彗星”^[15]。彗星与小行星的区别往往有三种分类。从观测角度看, 由挥发性物质导致具有非束缚大气层的小天体被称为彗星, 没有这种大气层则为小行星^[71]; 从成分上看, 彗星是在原行星盘雪线之外形成的富冰小天体, 而小行星则是在原行星盘内形成的无冰小天体^[45]; 在轨道方面, 研究者主要通过动力学参数来区分彗

星与小行星, 最常见的是相对于木星测量的 Tisserand 参数^[113]:

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[(1 - e^2) \frac{a}{a_J} \right]^{1/2} \cos i, \quad (11)$$

其中, a 、 e 和 i 是轨道的半长轴、离心率和倾角 (相对于木星轨道), 而 $a_J = 5.2$ AU 是木星轨道的半长轴。

Jewitt 等人^[45]给出了活跃小行星的定义: (1) 半主轴 $a < a_J$; (2) $T_J > 3.08$; (3) 有质量损失迹象的小天体, 例如有类似彗尾的现象出现。如上文所述, 其活动性起因可能是升华、撞击、旋转解体、热裂解等。图 11 为目前已知活跃小行星活动机制的统计结果。尽管多次观测已确定 Phaethon 的活动性, 然而, 关于它究竟更偏向于彗星还是小行星, 还需进一步讨论。轨道动力学分析表明, Phaethon 相对于木星的 Tisserand 参数 $T_J = 4.509$, 远远高于分界线, 因此轨道特征可以判断其为小行星。动力学模拟表明, Phaethon 可能像大多数近地小行星一样来自主带, 而彗星通常来自柯伊伯带或奥尔特云, 这也是它们的显著区别^[75]。Phaethon 与典型彗星核的光谱相比, 有更高的反照率、更蓝的光学和近红外光谱特征^[111]以及更高的体积密度^[11]。对双子座流星雨的观测分析表明, 其陨石密度在 $0.7 \sim 1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间, 低于彗星陨石的典型密度, 这表明 Phaethon 确实不是一颗典型彗星^[114]。



注: 图中不同符号代表活跃小行星的不同活动机制。

图 11 活跃小行星与其活动机制统计结果

在光谱分类方面, 最初被归类为 F 型的小行星显示出类似彗星的特性^[79]。Phaethon 虽然曾被认为是 F 型小行星, 但更多研究表明 Phaethon 属于 F 型小行星的说法并不完全确定。过去的 F 型小行星的偏振光谱反转角度呈现出异常低值, 大约为 17° ; 而目前观测到的 Phaethon 的偏振转折角为 $19.9^\circ \pm 0.3^\circ$ ^[96], 略微偏离 F 型分类。反照率方面,

Zheltobryukhov 等人^[95]估计 Phaethon 在 R 滤镜下的几何反照率为 0.075 ± 0.007 , 这似乎与暗 F 型小行星一致; 但 Hanuš 等人^[3]使用热物理模型得出的 Phaethon 几何反照率为 0.12, 这高于彗星一般的几何反照率, 也高于 F 型光谱小行星的典型值 ($0.03 \sim 0.07$), 但与构成 Pallas 碰撞家族的 B 型小行星一致^[115]。因此反照率是否能够支持 Phaethon 的分类, 还需深入研究。

Devogèle 等人^[79]通过拟合偏振光谱, 得出 Phaethon 与 B 型天体 Pallas 的相关性更高。该研究用 Phaethon 和其他 F 型小行星的光谱进行相位偏振拟合, 数据结果与 Phaethon 的偏振光谱有偏差^[79]; 而在与现代 B 型的拟合中, 结果与 Pallas 的偏振数据符合得很好, 其最佳拟合曲线的 rms 显著提高^[79]。综上所述, Phaethon 作为活跃小行星其性质更偏向于小行星, 并且与 B 型中的 Pallas 小行星更为相近, 即使 Phaethon 特殊的光谱负斜率使得它比其他 B 型小行星更蓝^[75]。

6.2 Pallas 族演化讨论

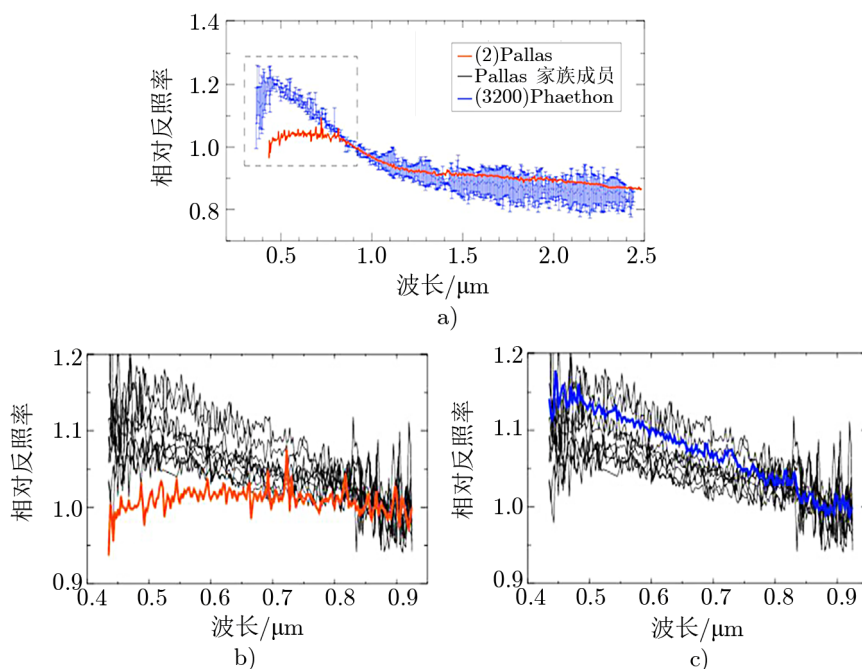
Lemaitre 和 Morbidelli^[102]最早注意到 Pallas 家族可能是 Phaethon 的来源。Pallas 是小行星带中的第三大天体, 平均直径为 550 km, 半长轴为 2.77 AU, 属于 B 型小行星^[62]。将其认定为 Phaethon 来源则需满足动力学机制和物理性质的要求, 这意味着 Phaethon 大小的 Pallas 家族成员可以形成行星交叉轨道, 成为高度倾斜的近地小行星, 物理性质上则成分相似, 体现在光谱上应当具有相似性^[62]。此外, Karetta 等人^[21]提出, Phaethon 的起源问题从根本上说是一个关于它现在和过去的活动性质的问题。

在动力学机制的研究中, Pallas 家族中存在处于木星 8:3 MMR 和 5:2 MMR 共振位置上的小行星, 该位置小行星尺寸下限为 4.95 km, 即与 Phaethon 的大小相当^[75, 103]。此处小行星则可通过偏心率进一步激发穿越至火星或地球轨道附近, 是一种合理的演化路径。如前文所述, de León 等人^[75]的克隆数值积分表明, 2% 克隆体能够演化到火星和地球的交叉轨道上, 最终可演化至类 Phaethon 轨道; Todorović^[103]也表明近地天体群中存在类 Phaethon 轨道的 Pallas 家族演化成员。

即便如此, Phaethon 并不能被认定为 Pallas 的演化成员。MacLennan 等人^[62]提出, 在动力学方面没有发现令人信服的证据表明 Pallas 最有可能是 Phaethon 的母体; 并认为倾角约 16° 的内主带 Svea 家族小行星可能与 Phaethon 更匹配, 与 Phaethon 演化中的高倾角特性接近。该研究使用 SWIFT_RMVS 积分器^[116]和 OpenOrb 软件计算克隆粒子的轨道根数, 发现与内行星的多次近距离相遇使得倾角等参数变得具有随机性, 因此否定基于倾角的相似性支持 Pallas 是 Phaethon 母体的观点^[62]。即便 Phaethon 在 5 Ma 前的平均倾角接近 Pallas 的倾角 33° , 但受内行星影响的变动范围较大, 平均值并不足以在统计意义上体现相关性^[62]。Svea 本身被归类为 C 型, 而家族成员中有一部分是 B 型^[117], 临近 3:1 MMR 木星共振位置, 也具备演化至近地轨道的可能性。值得注意的是, 如果在双子座流星群形成过程中 Phaethon 轨道发生改变, 那么其轨道反演工作会产生显著变化^[118]。

在光谱比对方面, 如图 12 所示, Phaethon 与 Pallas 及其家族成员的可见光和近红外光谱具备一定相似性^[75]。3 μm 附近的数据显示, Pallas 成分与加热 CM 球粒吻合, 也与

CR 球粒成分相似^[119], 而 Phaethon 的近红外光谱目前与 CK 和 CI 陨石更为吻合^[3, 83]。根据大气闪烁光谱推断出的双子座流星雨球粒陨石的成分与 CM 球粒的成分一致^[85], 说明双子座流星雨与 Pallas 成分具有一定相似性。图 12a) 中虚线方框内的差异源于尺寸和表层颗粒大小不同^[75]。如上文所述, 碳质球粒陨石随着颗粒尺寸的增大, 天体的光谱变蓝^[89], 较大天体会内聚表层更细小颗粒, 小天体则容易失去表层细颗粒被较粗的颗粒覆盖, 因此 Phaethon 光谱比 Pallas 更蓝。此外, Phaethon 由于烧结作用和去除 Fe 等成分^[83, 90], 可进一步解释比 Pallas 更蓝的特性。



注: a) Phaethon (蓝线) 与 Pallas (红线) 的可见和近红外反射光谱比较, 在 $1\ \mu\text{m}$ 外的相似行为表明相似组成, 虚线框突出差异体现 ($0.4 \sim 0.9\ \mu\text{m}$); b) Pallas 与 Pallas 家族成员的可见光谱进行比较; c) Pallas 家族成员与 Phaethon (蓝线) 的平均可见光谱比较。

图 12 小行星 Phaethon 与 Pallas 和 Pallas 家族成员的光谱比较^[75]

虽然 Phaethon 的几何反照率情况仍有争议, 但 Hanuš 等人^[3, 94]得出了高反照率约为 0.122 ± 0.008 , 与 Pallas 的高反照率 0.145 比较接近^[120]。而 Devogèle 等人^[79]得出的 Phaethon 相位偏振曲线, 与小行星 Pallas 的也相似。Kareta 等人^[21]认为不能忽视两者光谱等差异, 因此反对 Pallas 家族是 Phaethon 来源的说法。综上所述, Phaethon 在轨道和表面性质方面都有与 Pallas 相似之处, 但仍有争议; Phaethon 也很有可能来自于其他主带的小行星族^[21], 如 Svea 族。

6.3 PGC 关系研究

小行星 (155140)2005 UD 和 (225416)1999 YC 由于轨道根数和颜色与 Phaethon 的相似, 被认为有可能是 Phaethon 的分裂碎片或者曾经是一个整体^[12-15], 尤其 Phaethon 和

2005 UD 的色度相似性及其大小比进一步支持了它们的联系。它们与双子座流星群一起被统称为 Phaethon-双子座流星群复合体 (PGC)^[13]。PGC 的形成可能很古老^[13], 而双子座流星群的动态寿命则不超过几千年^[121]。Beech^[122] 分析了 3 个双子座火流星的性质, 发现流星群的年龄在 $(1 \sim 4) 10^3 \text{a}$ 之间。Phaethon 在 2000 a 前位置时近日点和偏心率有独特变化, 并且具备最小近日点距离^[3, 62], 可能与双子座流星雨的起源有关。Jewitt 等人^[5] 研究发现, 双子座流星雨可能是在几千年内的某个时间点发生灾难性事件的结果。

双子座流星群比典型的彗星流星群更加密集^[114], 其空间分布在峰值附近具有不对称性^[118], 由尺寸从 $10 \mu\text{m} \sim 4.5 \text{cm}$ 不等的颗粒构成^[123]。流星群的结构特征为^[71, 118]: 尘埃颗粒从母体轨道周围的点喷出而不是某一个点; 颗粒从面向太阳的半球上喷出; 颗粒的喷射速度与颗粒大小有关, 较大颗粒的喷射速度较小。这些性质使得双子座流星雨在观测中体现出独特的双峰活动剖面^[71]。粒子抛射后, 反作用力将会影响母体小行星的轨道和姿态。Ryabova^[124] 用半分析数值模型定量表征了双子座流星群的辐射分布, 可以应用于模拟流星雨观测。除地基观测外, PSP 观测到了双子座流星群的尘埃痕迹, 得出尘埃质量在 $10^{10} \sim 10^{12} \text{kg}$ 范围内, 该处尘埃很可能是流星体在 Phaethon 附近的部分聚集^[41]。

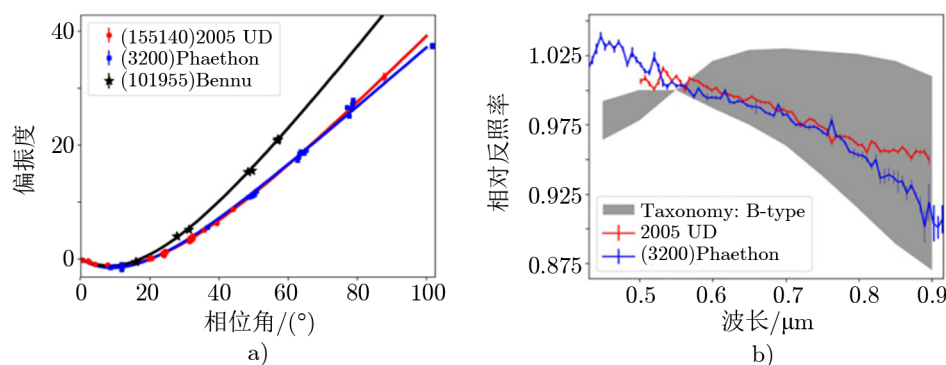
关于近日点处的质量损失, 讨论最多的原因为热裂解, 辅以旋转和辐射压力清除, 或由 Na 升华驱动。Kasuga 和 Masiero^[125] 对 PGC 有关的小行星进行天基热红外观测, 由此计算得出 Phaethon 的质量损失速率上限为 $2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 2005 UD 和 1999 YC 的质量损失速率上限为 $0.1 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 比对得知, 其质量损失差异很难通过稳态维持, 支持了双子座流星群由偶发事件形成的理论。

Cukier 和 Szalay^[126] 分别对 Phaethon 在突发的分裂事件和彗星尘埃活动条件下模拟预期流星群的位置, 利用 $1 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度分离的尘埃来模拟突发的分裂事件, 以与 Phaethon 和太阳的距离成反比的速率来模拟类彗星活动, 以相对速度为 0 的尘埃作对照。结果表明, 流星群的位置最符合分裂事件的形成机制, 而不是彗星形成机制, 表明双子座流星群可能是通过近日点附近灾难性的破坏而形成的^[126]。然而, 考虑到热裂解等质量损失机制在实验室环境和实际空间环境的区别, 进行该过程的定量研究应当通过更多的空间实验来开展^[12]。

除了双子座流星群与小行星的关系外, Phaethon 和另外两颗小行星是否来自于同一母体也值得进一步研究。2005 UD 的自转周期约为 5.2 h, 近日点距离约为 0.16AU ^[99], 其色指数与 Phaethon 相似^[127]。1999 YC 的自转周期约为 4.5 h, 近日点距离约为 0.24AU ^[128]。光谱上 Phaethon 和 2005 UD 相似性更大, 目前同属于 B 型天体, 可见光波段光谱极为相似, 都有蓝色特征^[99]; 而 1999 YC 的光谱表明其是 C 型, 整体的颜色更加偏红^[128]。此外, 小行星对 Phaethon-2005 UD 的周期 (3.6 h) 和大小比率与 Pravec 等人^[129] 提出的小行星成对自旋分裂形成模型相符。这表明 2005 UD 有可能是从 Phaethon 上分裂的一部分。

如图 13 所示, Devogèle 等人^[99] 对比了两个小行星之间的偏振相位曲线和光谱, 可以看出 Phaethon 和 2005 UD 偏振曲线几乎相同, 但与 Bennu 有较大差异, 并通过 NEOWISE 热物理建模表明其表面相似, 给出 2005 UD 反照率为 $p_v = 0.10 \pm 0.02$, 尺寸为 $1.3 \pm 0.2 \text{km}$, 热惯量为 $300^{+120}_{-110} \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。研究表明, Phaethon 表面颗粒大小范围为 $3 \sim 30 \text{mm}$, 而 2005 UD 表面颗粒大小范围为 $0.9 \sim 10 \text{mm}$ ^[99], 其原因可能是 Phaethon 的热环境使得

较细颗粒抛射, 或表面成分的热惯量差异。在近红外反射光谱中则有所差异, 2005 UD 相比于 Phaethon 更偏向正向的“红色”斜率, 这与 Phaethon 的蓝色负斜率并不相同^[99]。在成分上, Phaethon 与 CI 球粒陨石较为相近, 而 2005 UD 则基本不匹配^[87], 即使能够解释为经历的热环境不同, 也并没有找到能够符合在不同温度下呈现出两个小行星光谱的陨石成分。

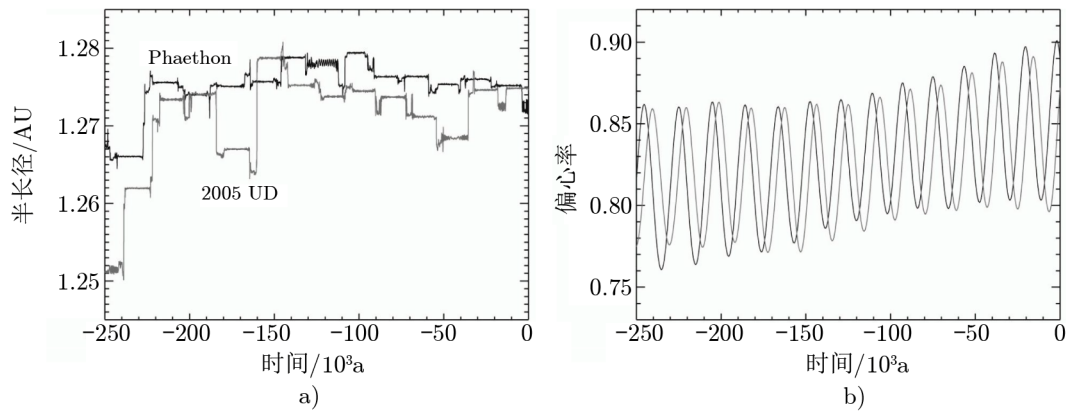


注: a) 为 2005 UD (红色)、Phaethon (蓝色) 和同为 B 型的 (101955) Bennu (黑色) 的相位偏振曲线比较图^[99]; b) 为 2005 UD、Phaethon 和 B 型光谱的比较图。

图 13 Phaethon 与 2005 UD 的相位偏振比较图^[99]

研究表明, Phaethon 轨道演化与 2005 UD 的在数千年内有很强的相关性^[130], 它们在大约 4600 a 前具有相似的轨道根数变化^[12]; 1999 YC 的轨道反演结果与其他两个小行星有差异, Ohtsuka 等人^[131]认为如果差异可解释为轨道的扰动, 则依然可认为该 3 个小行星相关。Hanuš 等人^[3]重复了 2005 UD 对标称轨道和 50 个克隆体轨道的演化计算, 证实了其轨道相似性。如图 14 所示, MacLennan 等人^[62]用 SWIFT 积分器对 1000 个 Phaethon 和 2005 UD 的随机轨道进行克隆体反演轨道积分, 计算了轨道历史中最小二乘意义上的最佳拟合轨道根数; 所有的克隆体轨道均经历了类似的偏心率的周期变化, 给两者分裂理论提供了可能性。在与内行星多次交会后进入近地天体区域时, 其倾角会发生重大变化, 也使目前的轨道相似情况变得尤为特殊^[12]。

然而, 即使来自于同一个天体, 这两个天体可能在大约 10^5 a 前从共同母体上分离^[3], 意味着其形成可能与流星群无关^[12]。此外, Ryabova 等人^[132]曾在动力学上对这一共同起源的说法提出了质疑, 认为如果三者相关则会在彼此的碎片流中存在。但该研究发现 2005 UD 与 Phaethon 的碎片交点远离, 而 1999 YC 与 Phaethon 的碎片分离交点更为相近, 但这不足以说明严格的相关关系。随后使用量化轨道相似性的 D_{SH} 标准^[133]来判断: Phaethon 和 1999 YC 的 $D_{SH} \approx 1.0$, 大于判断相关性的最大值 0.058^[134], 因此否认其相关性。



注: a) 为半长径时间反演比较, b) 为偏心率时间反演比较。

图 14 Phaethon 和 2005 UD 的轨道根数比较^[62]

7 预期任务及展望

目前对于 Phaethon 的研究在活跃小行星中较为全面,但在热物理模型、表面成分和异常增亮机制等方面存在诸多争议性内容,有待进一步深入研究。因此针对性的探测任务能够提供更精确的数据支持。日本航天局(JAXA) DESTINY+ 任务已将 Phaethon 列为探测目标,该任务将于 2028 年发射^[25, 135],预计会飞越 Phaethon,并有可能扩展至 2005 UD^[136]。DESTINY+ 任务旨在实现对 Phaethon 高分辨率成像、近距离飞越、高精度导航和宽范围观测。DESTINY+ 有三个科学载荷,分别为跟踪望远镜相机(TCAP)、VIS-NIR 多波段相机(MCAP)和尘埃分析仪(DDA),在近日点附近对 Phaethon 的表面和成分进行实地检测^[135]。TCAP 和 MCAP 会对 Phaethon 在最近距离 500 ± 50 km 处进行高速($36 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)飞越成像^[97, 137]; DDA 是由斯图加特大学领导的团队在卡西尼号尘埃分析仪(CDA)的基础上研发的,将直接测量 Phaethon 附近尘埃粒子的动力学参数和元素丰度^[138]。

DESTINY+ 的科学目标是探究宇宙尘埃的性质和起源,在深空巡航阶段测量 1 AU 附近的行星际与恒星际尘埃颗粒的物理性质与化学成分;并对 Phaethon 进行地质观测,了解活跃小行星的尘埃喷射机制和表面成分变化。它将由 Epsilon 运载火箭发射进入绕地球的椭圆轨道,然后使用电推进提高轨道以到达月球。随后,通过多次利用月球引力助推脱离地球引力场,再通过电推进前往 Phaethon,最终实现对其飞越观测^[93]。在飞越处,其地心距为 1.72 AU,日心距为 0.87 AU;其后 DESTINY+ 可能会前往 2005 UD^[93]。

在飞越任务前期,需详细了解 Phaethon 的大小、形状、反照率和自转状态,评估在其附近的尘埃和碎片环境。根据 Masiero 等人^[94]的估计,在距离 Phaethon 约 500 km 处搭载的尘埃分析仪可能遇到多达 10^3 个微米大小的尘埃。然而由于尘埃较为稀疏,PSP 和 DESTINY+ 等探测器直接受到尘埃撞击的可能性较低^[126]。对其尘埃活动的现场观测数据将成为研究活跃小行星性质的重要指标,并可能揭示 2005 UD 的活动迹象。DESTINY+ 对

Phaethon 星表面的直接观测将获得更精准的形状模型和对几何反照率建立热物理模型, 有助于更好地了解 Phaethon 的热历史及当前物理属性的形成原因。

在小天体探测任务方面, 中国的嫦娥二号于 2012 年 12 月 13 日在距小行星表面最近的 770 ± 120 m 处, 成功实现了对近地小行星 (4179) Toutatis 的飞越^[139], 相关研究揭示了其物理特性、自转特性、内部结构与形成机理, 取得了重大的国际影响。未来尤其在活跃小行星方面, 中国 2025 年发射的天问二号探测器任务目标之一——活跃小行星 311P, 计划通过一次发射, 实现从近地小行星 2016 HO3 采样返回地球; 之后前往 311P 开展伴飞探测, 其尺寸为 320 ~ 580 m, 科学探测围绕活跃小行星的形成和演化、气体活动机制等开展^[140]。面向小天体的天问二号任务是行星探测重大工程, 也是中国航天强国建设征程的标志性任务, 将为后续木星等深空探测任务奠定重要基础。

参考文献:

- [1] Whipple F L. IAUC, 1983, 3881: 1
- [2] Green S, Kowal C. IAUC, 1983, 3878: 1
- [3] Hanuš J, Delbo' M, Vokrouhlický D, et al. A&A, 2016, 592: A34
- [4] Jewitt D, Li J, Agarwal J. ApJL, 2013, 771: L36
- [5] Jewitt D, Mutchler M, Agarwal J, et al. AJ, 2018, 156: 238
- [6] Kartashova A, Husárik M, Ivanova O, et al. CoSka, 2019, 49: 367
- [7] Tedesco E F, Desert F X. AJ, 2002, 123: 2070
- [8] Taylor P A, Rivera-Valentín E G, Benner L A M, et al. P&SS, 2019, 167: 1
- [9] Kim M J, Lee H J, Lee S M, et al. AAP, 2018, 619: A123
- [10] Arai T, Yoshida F, Hayamizu T, et al. LPSC, 2022, 1: 2916
- [11] Hanuš J, Vokrouhlický D, Delbo' M, et al. A&A, 2018, 620: L8
- [12] Ohtsuka K, Sekiguchi T, Kinoshita D, et al. AAP, 2006, 450: L25
- [13] Ohtsuka K, Nakato A, Nakamura T, et al. PASJ, 2009, 61: 1375
- [14] Kasuga T. EM&P, 2009, 105: 321
- [15] Jewitt D, Hsieh H. AJ, 2006, 132: 1624
- [16] Belton M J S, A'Hearn M F. AdSpR, 1999, 24: 1175
- [17] Eyles C J, Harrison R A, Davis C J, et al. SoPh, 2009, 254: 387
- [18] Battams K, Watson A. IAUC, 2009, 9054: 3
- [19] Li J, Jewitt D. AJ, 2013, 145: 154
- [20] Borisov G, Devogèle M, Cellino A, et al. MNRAS, 2018, 480: L131
- [21] Karetta T, Reddy V, Hergenrother C, et al. AJ, 2018, 156: 287
- [22] Tabeshian M, Wiegert P, Ye Q, et al. AJ, 2019, 158: 30
- [23] Ohtsuka K, Ito T, Kinoshita D, et al. P&SS, 2020, 191: 104940
- [24] Lin Z Y, Yoshida F, Lin Y C, et al. P&SS, 2020, 194: 105114
- [25] ISAS. Space Science and Exploration Mission Progress. Japan: CAO, 2024, 1009: 11
- [26] Jewitt D, Li J. AJ, 2010, 140: 1519
- [27] Howard R A, Moses J D, Vourlidas A, et al. Space Sci. Rev., 2008, 136: 67
- [28] Hui M T, Li J. AJ, 2017, 153: 23
- [29] Schleicher D G, Bair A N. AJ, 2011, 141: 177
- [30] Marcus J N. ICQ, 2007, 29: 39
- [31] Hui M T. AJ, 2023, 165: 94

-
- [32] Bewsher D, Brown D S, Eyles C J, et al. *SoPh*, 2010, 264: 433
- [33] Schmidt C A. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2013, 118: 4564
- [34] Domingo V, Fleck B, Poland A I. *SoPh*, 1995, 162: 1
- [35] Brueckner G E, Howard R A, Koomen M J, et al. *SoPh*, 1995, 162: 357
- [36] Zhang Q, Battams K, Ye Q, et al. *PSJ*, 2023, 4: 70
- [37] Ye Q, Wiegert P A, Hui M T. *ApJ*, 2018, 864: L9
- [38] Jewitt D, Asmus D, Yang B, et al. *AJ*, 2019, 157: 193
- [39] Ye Q, Knight M M, Kelley M S P, et al. *PSJ*, 2021, 2: 23
- [40] Yoshida F, Hayamizu T, Miyashita K, et al. *PASJ*, 2023, 75: 153
- [41] Battams K, Knight M M, Kelley M S P, et al. *ApJS*, 2020, 246: 64
- [42] Battams K, Gutarra-Leon A J, Gallagher B M, et al. *ApJ*, 2022, 936: 81
- [43] Bach Y P, Ishiguro M. *AAP*, 2021, 654: A113
- [44] Kim Y, Jewitt D, Agarwal J, et al. *ApJ*, 2022, 933: L15
- [45] Jewitt D, Hsieh H, Agarwal J. *Asteroids IV*, 2015: 221
- [46] Bolin B, Denneau L, Veres P, et al. *CBET*, 2013, 3736: 1
- [47] Szalay J R, Pokorný P, Horányi M, et al. *P&SS*, 2019, 165: 194
- [48] Murdoch N, Sánchez P, Schwartz S R, et al. *Asteroids IV*, 2015: 767
- [49] Rozitis B, MacLennan E, Emery J P. *Natur*, 2014, 512: 174
- [50] Ryabova G O. *European Planetary Science Congress 2012*, 2012: EPSC2012–171
- [51] Takir D, Reddy V, Hanus J, et al. *LPSC*, 2018, 1: 2624
- [52] MacLennan E, Granvik M. *NatAs*, 2023, 1: 60
- [53] Yu L L, Ip W H, Spohn T. *MNRAS*, 2019, 482: 4243
- [54] Jewitt D. *AJ*, 2012, 143: 66
- [55] Colwell J E, Batiste S, Horányi M, et al. *RvGeo*, 2007, 45: RG2006
- [56] Molaro J L, Byrne S, Langer S A. *JGRE*, 2015, 120: 255
- [57] Hazeli K, El Mir C, Papanikolaou S, et al. *Icar*, 2018, 304: 172
- [58] Molaro J, Byrne S. *JGRE*, 2012, 117: E10011
- [59] Delbo M, Libourel G, Wilkerson J, et al. *Nature*, 2014, 508: 233
- [60] Basilevsky A T, Head J W, Horz F, et al. *LPSC*, 2015, 1: 1440
- [61] Krugly Y N, Belskaya I N, Shevchenko V G, et al. *Icar*, 2002, 158: 294
- [62] MacLennan E, Toliou A, Granvik M. *Icar*, 2021, 366: 114535
- [63] Blaauw R C. *P&SS*, 2017, 143: 83
- [64] Takir D, Kareta T, Emery J P, et al. *NatCo*, 2020, 11: 2050
- [65] Abe S, Ogawa T, Maeda K, et al. *P&SS*, 2020, 194: 105040
- [66] Kasuga T, Watanabe J I, Sato M. *MNRAS*, 2006, 373: 1107
- [67] Masiero J R, Davidsson B J R, Liu Y, et al. *PSJ*, 2021, 2: 165
- [68] Davidsson B J R. *MNRAS*, 2021, 505: 5654
- [69] Walsh K J, Richardson D C, Michel P. *AAS/DPS*, 2008, 40: 55.03
- [70] Vokrouhlický D, Bottke W F, Chesley S R, et al. *Asteroids IV*, 2015: 509
- [71] Ryabova G O. *MNRAS*, 2007, 375: 1371
- [72] Bottke J, William F, Vokrouhlický D, Rubincam D P, et al. *AREPS*, 2006, 34: 157
- [73] Nakano R, Hirabayashi M. *ApJ*, 2020, 892: L22
- [74] Walsh K J, Richardson D, Michel P. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2012: P34A
- [75] de Leon J, Campins H, Tsiganis K, et al. *AAS/DPS*, 2010, 42: 13.27
- [76] Li J, Raymond J C, Acton L W, et al. *ApJ*, 1998, 506: 431
- [77] Tholen D J. *Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry*. Tuscon: The University of Arizona, 1984: 1
- [78] DeMeo F E, Binzel R P, Slivan S M, et al. *Icar*, 2009, 202: 160
- [79] Devogèle M, Cellino A, Borisov G, et al. *MNRAS*, 2018, 479: 3498

-
- [80] MacLennan E, Marshall S, Granvik M. *Icar*, 2022, 388: 115226
- [81] Lee H J, Kim M J, Kim D H, et al. *P&SS*, 2019, 165: 296
- [82] Licandro J, Campins H, Mothé-Diniz T, et al. *A&A*, 2007, 461: 751
- [83] Clark B E, Ziffer J, Nesvorný D, et al. *JGRE*, 2010, 115: E06005
- [84] de León J, Pinilla-Alonso N, Campins H, et al. *Icar*, 2012, 218: 196
- [85] Madiedo J M, Trigo-Rodríguez J M, Castro-Tirado A J, et al. *MNRAS*, 2013, 436: 2818
- [86] Clark B E, Binzel R P, Howell E S, et al. *Icar*, 2011, 216: 462
- [87] Karetka T, Reddy V, Pearson N, et al. *PSJ*, 2021, 2: 190
- [88] Ito T, Ishiguro M, Arai T, et al. *NatCo*, 2018, 9: 2486
- [89] Johnson T V, Fanale F P. *J. Geophys. Res.*, 1973, 78: 8507
- [90] Lisse C M, Steckloff J K. *Icar*, 2022, 381: 114995
- [91] Nesvorný D, Jedicke R, Whiteley R J, et al. *Icar*, 2005, 173: 132
- [92] Lazzarin M, Marchi S, Moroz L V, et al. *ApJL*, 2006, 647: L179
- [93] Arai T. 42nd COSPAR Scientific Assembly, 2018, 42: B1.1
- [94] Masiero J R, Wright E L, Mainzer A K. *AJ*, 2019, 158: 97
- [95] Zheltobryukhov M, Chornaya E, Kochergin A, et al. *AAP*, 2018, 620: A179
- [96] Geem J, Ishiguro M, Takahashi J, et al. *MNRAS*, 2022, 516: L53
- [97] Ishibashi K, Hong P, Okamoto T, et al. *LPSC*, 2022, 2678: 1729
- [98] Shkuratov I G, Opanasenko N V. *Icar*, 1992, 99: 468
- [99] Devogèle M, MacLennan E, Gustafsson A, et al. *PSJ*, 2020, 1: 15
- [100] Okazaki R, Sekiguchi T, Ishiguro M, et al. *P&SS*, 2020, 180: 104774
- [101] Chambers J E. *MNRAS*, 1999, 304: 793
- [102] Lemaître A, Morbidelli A. *CeMDA*, 1994, 60: 29
- [103] Todorović N. *MNRAS*, 2018, 475: 601
- [104] Delbo M, Mueller M, Emery J P, et al. *Asteroids IV*, 2015: 107
- [105] Harris A W, Young J W, Bowell E, et al. *Icar*, 1989, 77: 171
- [106] Rozitis B, Green S F. *MNRAS*, 2011, 415: 2042
- [107] Davidsson B J R, Rickman H. *Icar*, 2014, 243: 58
- [108] Yu L L, Ip W H. *ApJ*, 2021, 913: 96
- [109] Durech J, Sidorin V, Kaasalainen M. *A&A*, 2010, 513: A46
- [110] Lagerros J S V. *AAP*, 1996, 310: 1011
- [111] Green S F, Meadows A J, Davies J K. *MNRAS*, 1985, 214: 29P
- [112] Cutri R M, Wright E L, Conrow T, et al. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014yCat.2328....0C>, 2025
- [113] Bonsor A, Wyatt M C. *MNRAS*, 2012, 420: 2990
- [114] Halliday I. *Icar*, 1988, 76: 279
- [115] Alí-Lagoa V, Delbo' M. *A&A*, 2016, 603: A55
- [116] Granvik M, Morbidelli A, Jedicke R, et al. *Nature*, 2016, 530: 303
- [117] Morate D, de León J, De Prá M, et al. *AAP*, 2019, 630: A141
- [118] Ryabova G O. *MNRAS*, 2016, 456: 78
- [119] Sato J. *NuPhS*, 1997, 59: 262
- [120] Alí-Lagoa V, de León J, Licandro J, et al. *A&A*, 2013, 554: A71
- [121] Ryabova G O. *SoSyR*, 1999, 33: 224
- [122] Beech M. *MNRAS*, 2002, 336: 559
- [123] Arendt R G. *AJ*, 2014, 148: 135
- [124] Ryabova G O. *MNRAS*, 2021, 507: 4481
- [125] Kasuga T, Masiero J R. *AJ*, 2022, 164: 193
- [126] Cukier W Z, Szalay J R. *PSJ*, 2023, 4: 109
- [127] Kinoshita D, Ohtsuka K, Sekiguchi T, et al. *A&A*, 2007, 466: 1153
- [128] Kasuga T, Jewitt D. *AJ*, 2008, 136: 881

- [129] Pravec P, Vokrouhlický D, Polishook D, et al. *Natural*, 2010, 466: 1085
- [130] Schunová E, Jedicke R, Walsh K J, et al. *Icar*, 2014, 238: 156
- [131] Ohtsuka K, Arakida H, Ito T, et al. *M&PSA*, 2008, 43: 5055
- [132] Ryabova G O, Avdyushev V A, Williams I P. *MNRAS*, 2019, 485: 3378
- [133] Southworth R B, Hawkins G S. *SCoA*, 1963, 7: 261
- [134] Schunová E, Granvik M, Jedicke R, et al. *Icar*, 2012, 220: 1050
- [135] Arai T, Destiny+Science Team. *LPSC*, 2023, 2806: 3017
- [136] Ozaki N, Yamamoto T, Gonzalez-Franquesa F, et al. *AcAau*, 2022, 196: 42
- [137] Hong P K, Lee S R, Kim S S, et al. *LPSC*, 2022, 53: 1720
- [138] Kobayashi M K, Kawai K K, Sakuma H S, et al. *LPSC*, 2018, 1: 1223
- [139] Huang J, Ji J, Ye P, et al. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3411
- [140] Jewitt D, Weaver H, Mutchler M, et al. *AJ*, 2018, 155: 231

Active Asteroid (3200) Phaethon Physical Properties

ZHANG Xinyi^{1,2}, JI Jianghui^{1,2}, JIANG Haoxuan^{1,3}

(1. CAS Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Chuzhou College, Chuzhou 23909, China)

Abstract: This paper provides a comprehensive review of perihelion observations and significant observational events such as ground-based observations of the active asteroid (3200) Phaethon during its close approach to Earth. It summarizes the current research priorities of (3200) Phaethon, followed by an investigation into the mechanisms governing its perihelion activity, in which the highly discussed thermal fracturing and the theory of water ice and Na sublimation driving theory are elaborated in detail. Detailed analyses of spectroscopic signatures, albedo variations, and polarization measurements are presented to elucidate surface composition and physical characteristics, thereby providing substantial evidence for understanding the asteroid's surface properties. Phaethon-Geminid Complex (PGC) relation discussions and studies such as the classification of active asteroids and the traceability of Phaethon are further summarized. In the study of asteroid dynamical evolution and thermal physics models, the MERCURY6 integrator was employed on the orbital elements of Phaethon on a millennial timescale to derive the results on the asteroid's perihelion distance and other orbital characteristics. Additionally, the advanced thermophysical model (ATPM) was applied to fit a compilation of infrared multi-band observational data, yielding estimates for thermal inertia, albedo, and diameter. Finally, JAXA space mission DESTINY+ and China's upcoming Tianwen-2 mission are discussed.

Key words: asteroid; mechanism of activity; near-earth asteroid