

# 主带彗星尘埃特性的科学问题与探测方案

李存惠<sup>1</sup>, 张小平<sup>1,2</sup>, 赵呈选<sup>1</sup>, 刘晓东<sup>3,4</sup>, 游击林<sup>2</sup>, 王 鷗<sup>1</sup>, 张海燕<sup>1</sup>, 李世勋<sup>1</sup>, 刘 泽<sup>1</sup>

(1. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000; 2. 澳门科技大学 月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078;  
3. 中山大学 航空航天学院, 深圳 518107; 4. 中山大学 深圳市智能微小卫星星座技术与应用重点实验室, 深圳 518107)

**摘要:** 研究主带彗星的起源和形成、非活跃期主带彗星的特性以及主带彗星与其它彗星、小行星之间的关系, 需形成能够覆盖尘埃颗粒特性的原位探测方法。针对中国即将实施的“天问二号”探测任务, 在分析主带彗星尘埃特性与科学问题关系的基础上, 提出一种在不引起彗星空间环境变化的前提条件下, 通过非接触测量主带彗星喷发尘埃粒径、速度、动量、形貌、通量的集成复合探测方法, 该设计方案已应用到“天问二号”任务的工程设计实践。

**关键词:** 主带彗星; 311P; 尘埃特性; 原位探测

**中图分类号:** P11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2024)06-0613-08

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230160

**引用格式:** 李存惠, 张小平, 赵呈选, 等. 主带彗星尘埃特性的科学问题与探测方案[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(6): 613-620.

**Reference format:** LI C H, ZHANG X P, ZHAO C X, et al. Scientific issues and detection schemes on the dust characteristics of main belt comets[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(6): 613-620.

## 引言

主带彗星这一概念最早由 Hsieh 和 Jewitt<sup>[1]</sup> 在 2006 年提出, 指的是轨道位于小行星主带内, 其轨道偏心率和轨道倾角与主带内的小行星相似, 同时在近日点会喷射气体和尘埃, 但外形和成分又很像彗星, 为具有彗发和彗尾的一类特殊小天体。因其兼具小行星和彗星的特征, 所以被命名为主带彗星。由于所喷发的物质组成不确定, 有些学者也将其作为活跃小行星的一种。活跃小行星兼具有类似彗发、彗尾的结构或其它质量损失的视觉效果及喷射气体或尘埃的活动特征。

通常认为小行星形成于内太阳系, 缺少挥发分; 彗星形成于柯伊伯带 (Kuiper Belt) 和奥尔特云 (Oort Cloud), 富集挥发分。兼具小行星和彗星特点的主带彗星自 2006 年发现以来, 其是如何形成和演化的, 一直备受关注。至今主带彗星是否形成于内太阳系及其喷发机制都不明确, 在科学方面存在极高的探测价值, 因此各国都制定了主带彗星的相关探测计划, 如卡斯塔利亚 (Castalia)、普罗秋斯 (Proteus) 计划<sup>[2-3]</sup>。中国目前正在研制的“天问二号”探测任务, 将通过一次发射实现近地小行星伴飞、附着、取样返回

和主带彗星绕飞, 为小天体的起源及演化等前沿研究提供科学探测数据, 并采集小天体的真实样品, 使中国深空探测的科学研究水平迈上一个新台阶<sup>[4]</sup>。“天问二号”在对小行星 2016HO3 采样返回后, 轨道器仍然将以接近第二宇宙速度逃离地球的引力, 飞向主带 311P/PANSTARRS 彗星 (由 Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System 巡天计划发现, 又称 P/2013P5, 下文简称 311P) 与其会合, 最终实现对其低速绕飞探测。

中国首次小行星任务的目标之一就是 对 311P 进行探测。311P 的轨道离心率和倾角与主带内的小行星相似, 在活跃时同时具有彗发和彗尾。因此, 开展 311P 尘埃及其活动机制研究, 将满足中国小行星探测的科学目标要求。在中国首次小行星探测任务中探测主带彗星喷发尘埃并分析其特性具有重要的意义, 获得 311P 的尘埃物理、动态特性及其空间分布特征, 其科学数据将为探索主带彗星的起源和演化过程提供支撑, 有望回答主带彗星的起源和形成、主带彗星气体的活动机制、非活跃期主带彗星的特性、主带彗星与其它彗星和小行星过渡天体之间的关系等一系列重大科学问题。

收稿日期: 2023-10-31 修回日期: 2024-03-10

基金项目: 行星探测工程天问二号任务有效载荷喷发物分析仪研制项目; 空间环境材料行为及评价技术重点实验室基金 (WDZC-HGD-2022-08)

## 1 主带彗星尘埃的科学问题

彗星分为彗核、彗发、彗尾3部分,主要由冰、挥发物和尘埃组成。其喷发尘埃的尺寸分布、速度、动量、通量等是反映彗星特征的基本关键参数。测量这些基本参数对于开展科学探测具有重要的意义。

### 1) 彗星尘埃活动与表面形貌特征的关系

彗星尘埃活动的触发机制是太阳光照射导致挥发物的升华。升华产生的气体将加速尘埃,引起尘埃的各种运动,主要表现为彗星表面的细丝或喷注。喷注形成的物理过程包括活跃点源喷流和凹陷表面区域喷流等。

Belton<sup>[5]</sup>将彗星尘埃喷射分为由浅表层水冰升华产生的I型连续性尘埃喷射、从局部地形点如活动坑或悬崖边缘发出的丝状结构II型喷发、在短时间内尘埃爆发产生的瞬态事件III型喷发,称为彗星爆发。与I型的喷发不同,III型喷发往往只能持续几分钟的时间,并产生明亮的喷注现象,且不会随着彗星的周期性转动而重复出现。这些喷发的源区往往是在陡峭的悬崖附近<sup>[6]</sup>,发生的时间为清晨或下午,可能是由于黎明时分阳光照射而产生的热应力或是热流穿透到较深部富含挥发分的区域而导致尘埃喷射。尽管这三类喷发的发射源区和发生时间是完全不同的,但它们也可能彼此之间存在相互关联。例如,I型喷射活动也可能发生在坍塌悬崖脚下的水冰暴露区域。当然,在爆发中喷出的大质量颗粒也可以回落到彗核表面,从而为喷射持续地提供原材料,形成类似尘埃雨的现象。由于67P彗星表面强烈的尘埃活动,在彗星表面形成了光滑的尘埃池形貌。天文观测表明,部分主带彗星如133P的尘埃活动强度比67P低得多<sup>[7]</sup>。由于彗核本身的转动,彗星尘埃的运动受彗核引力、离心力、科里奥利力及喷发气流阻力或推力的影响。阻力或推力系数往往根据经验决定,缺少大量的测量数据。通过对主带彗星喷发尘埃粒子的速度和通量进行测量,将会为彗星尘埃动力学模型提供更多详细的情况,在此基础上可进一步研究彗星尘埃活动强弱对表面形貌的影响。

2) 观测尘埃活动强弱有助于研究主带彗星内部的结构、形成和演化历史

主带彗星活动性的强弱和变化特征与它的形成和演化历史具有密切的关系<sup>[8]</sup>。最能直接反映尘埃活动性强弱变化的是水冰的分布,或者表面尘埃层的厚度<sup>[6]</sup>。其中表面尘埃层厚度对彗星活动性的影响尤为重要。水冰升华时产生的质量通量可由文献<sup>[9]</sup>中的公式估计,它与尘埃层的厚度呈反相关关系。尘埃活动时的质量通量与水分子呈正相关的关系,两者之间的计算

参见文献<sup>[10]</sup>。目前利用天文观测结果给出的主带彗星活动性结果误差很大。比如根据观测估计出水的生产率与67P等典型木星族彗星的生产率相比太低,意味着133P彗星可能有较厚的尘埃层,且抑制了产水率<sup>[6]</sup>。但该文献的估计表明从133P彗星尘埃层下面升华的水分子却不足以引发尘埃活动。也猜测133P的活动可能是由区域近地表冰块的升华产生的,这些冰块是一次撞击事件暴露的。虽然这是目前比较认可的机制,但也存在其它的可能。对彗星尘埃活动强弱及其变化特征的系统性测量,对于研究其形成和演化历史至关重要。

### 3) 通过彗尾尘埃研究可优化尘埃动力学仿真

彗星彗尾的尘埃粒子受到太阳光压、太阳引力、太阳风电磁力等摄动力的作用,在这些力的作用下,尘埃粒子会形成特定的彗尾构型、尺寸分布与速度分布。通过对彗尾中尘埃粒子的探测,可获取尘埃粒子的尺寸、速度与空间分布等信息,进而可对尘埃动力学仿真提供指导与验证,并可推测与尘埃动力学密切相关的彗星附近的太阳风等空间环境信息。

4) 通过彗星尘埃研究太阳系早期的吸积过程、动力学演化历史、类地行星水的来源

太阳系早期尘埃粒子的吸积主要有3种模型,粒子团簇聚合模型(Ballistic Particle-Cluster Aggregate, BPCA),主要是以团簇为基础,通过吸附粒子进行生长,生成更大的团簇,这一吸积模型的特点是能够生成较为致密、孔隙度低的更大的团簇;团簇—团簇聚合模型(Ballistic Cluster Cluster Aggregate, BCCA),一定大小的团簇之间可聚合为更大的团簇,形成的大团簇往往结构松散、孔隙度高;分层聚合模型(Hierarchical Aggregates),基础尘埃粒子(nm至0.1 μm左右)通过粒子—团簇聚合(BPCA),成为几微米左右的1级团簇,这些1级团簇通过团簇聚合生成更大的2级团簇,2级团簇间可进一步聚合生成3级团簇。大团簇也可以通过粒子—团簇聚合吸收基础尘埃粒子成为更大的团簇。反过来,高速尘埃粒子也可以破坏已有的团簇,使之分解成较小的团簇。

“罗塞塔”(Rosetta)探测器配置的显微成像尘埃分析系统(Micro-Imaging Dust Analysis System, MIDAS)、彗星二次离子质量分析仪(COMETARY Secondary Ion Mass Analyzer, COSIMA)和颗粒冲击分析仪与尘埃收集器(Grain Impact Analyser and Dust Accumulator, GIADA)3个载荷对67P彗星的尘埃特性进行了联合原位观测<sup>[11-15]</sup>,其测量结果进一步表明,这些微米级的尘埃颗粒是由更小尺度的亚微米级尘埃聚集而成,基体尘埃粒子的形状不是球形,而是长短轴

比值约为2.87的椭球体。分层聚合模型能更好地重现彗星尘埃粒子的形貌分布。但目前的分层粒子聚合模型也面临挑战, 主要是需计算更多尘埃粒子的聚合, 生成更大的尘埃粒子及粒子分布函数<sup>[16-20]</sup>。因此, 可根据观测到的尘埃颗粒的形貌特征和尘埃分布, 建立主带彗星的吸积模型, 确定这些团簇基本尘埃粒子的尺寸参数。将观测结果与数值模拟方法结合起来可建立吸积模型。比如, 将67P彗星观测的最小尘埃颗粒(尺寸、形貌和材质已知)作为基本颗粒, 将基本颗粒置于早期太阳系的模拟环境下(考虑重力场、辐射压、颗粒粘附力等等), 设置一定的初始位置和速度分布。一部分颗粒会以合适的速度相互碰撞并形成一级团簇。此时将一级团簇颗粒与观测的尺寸和形貌相比较, 进而调整基本颗粒的初始条件, 使模拟的一级团簇尺寸和形貌接近观测结果。之后, 继续执行2级团簇的生成, 并将模拟结果与观测结果进行对比。这样会进一步限制初始条件以及考虑更多的因素, 使生成的2级团簇也接近观测结果。之后的生成过程依此类推, 通过该方法可初步建立分层聚合模型的动力学过程。

根据太阳系演化模型, 大行星向内迁移时会将部分柯伊伯带天体传送至主带小行星的位置<sup>[21]</sup>。从原始太阳星云冷凝出来的颗粒, 在不同的日心距离下, 具有不同的环境温度和压力条件, 尘埃与挥发物比例也不一样, 导致形成的颗粒大小分布和形貌等也有所差别。因此, 通过对比分析主带彗星和木星族彗星如67P的尘埃形貌及粒度分布, 可以判断主带彗星是在主带形成的, 还是在柯伊伯带形成后迁移到主带的。这对于研究太阳系的动力学演化历史具有重要的意义。在太阳系形成初期, 太阳风中的大量H<sup>+</sup>会注入尘埃, 与尘埃中含氧化合物(如二氧化硅)的氧结合生成-OH, 即H<sup>+</sup>+ -O<sup>-</sup>=-OH。这一过程可在几万年的时间尺度内达到饱和。由于这些尘埃是类地行星的基本组成单元, 在行星吸积形成后, 早期注入的OH成为类地行星的物质来源之一, 经过一系列的物理化学过程<sup>[22]</sup>, 最终一部分OH以水或冰的形式存在, 构成类地行星水的一个重要来源。目前, 由太阳风注入导致的水含量占类地行星水的比重还不是很清楚<sup>[23-28]</sup>。为解决这一问题, 首先要估计太阳风注入能够产生的OH或水冰含量的上限。由于太阳风的能量有限(约1 keV), 其穿透深度一般小于50 nm, 这些OH主要富集在尘埃表面。OH的体积百分比依赖于尘埃颗粒的粒度分布函数。尘埃颗粒越大, OH的体积百分比越少; 反之, OH体积百分比越大。

OH含量与尘埃中的氧原子含量有关, 以二氧化硅

为例, 氧原子含量是 $4 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ 。假如太阳风的质子与50 nm深度以内的所有氧原子结合, 则OH的最大柱密度是 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 。但太阳风质子在尘埃中形成的OH含量会达到饱和值, 低于 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 。太阳风质子与尘埃的物理相互作用和化学反应过程可使用反应分子动力学来模拟, OH含量的饱和值和水分子含量也可被估计<sup>[29]</sup>。该模拟需明确尘埃的化学成分, 原子之间的相互作用势, 太阳风质子撞击时的ZBL势(模拟高能原子之间的屏蔽核斥力), 电子停止能等。更多详细过程见文献<sup>[29]</sup>。

太阳风注入尘埃时, 强度可由其密度和速度的乘积来描述, 平均而言它的密度与距离 $r^2$ 成反比。速度可用Parker的太阳风模型来估计, 当 $r$ 远大于临界点时, 太阳风的径向速度正比于 $\sqrt{1/r}$ 。通常在1 AU之后, 该速度趋于平坦。因此, 强度是先增后减。

反应分子动力学模拟的结果<sup>[29]</sup>表明太阳风质子注入尘埃后会同时产生OH和水分子。OH含量会达到一个饱和值, 但产生的水分子含量远少于OH含量。随着更多质子的注入, 质子与OH结合, 水分子的含量还会缓慢增加。

另外, 氘核(D)和H核的比值(D/H)也与尘埃的粒度分布函数有关。由于太阳风中D和H的速度接近, 而D的质量是H的2倍, 这样D原子具有更大的动能。由于D和H核带有相同的核电荷数, D核的穿透深度远大于H核。D核和H核的含量与表面薄层的体积有关, 由于穿透深度的不同, 而这一体积又依赖于颗粒的半径, 最后得到的D/H比值也与颗粒半径有关。根据以上分析, 尘埃粒径分布函数是决定早期太阳风注入产生的OH丰度及D/H比值的关键参数之一。彗星保留了太阳系早期的物质组成信息, 特别是主带彗星的轨道离类地行星轨道更近。对主带彗星尘埃颗粒分布函数的测量, 对于判断这些类地行星的基本组成单元中的OH含量及D/H比值, 在此基础上进一步研究太阳风质子注入是否是构成类地行星水的主要来源这一基本科学问题, 具有重要的学术价值。

## 2 311P的尘埃特性分析

311P最初由美国Pan-STARRS系统于2013年8月发现。311P的轨道位于主带内侧, 发现时观测到其具有与彗星相似的多条尘埃喷发尾迹。311P轨道的长半轴约为2.19 AU, 近日点距离约为1.94 AU, 远日点距离约为2.44 AU, 轨道周期约3.24年。311P的轨道位于小行星带内边缘附近, 目前推断311P很可能是Flora族S型小行星的成员, 可能对应LL球粒陨石。按照S类小

行星及LL球粒陨石密度的推测, 311P的密度约为 $1.2\sim 3.3\text{ g/cm}^3$ , 结合其半径和密度, 推算311P的逃逸速度约为 $0.13\sim 0.39\text{ m/s}$ <sup>[30]</sup>。

哈勃太空望远镜在2013年9月10日和23日, 以及2013年10月18日、11月13日、12月8日、12月31日和2014年2月11日期间对311P进行了观测<sup>[31]</sup>。所有观测图像都拍摄于311P经过近日点之前。刘晓东课题组及合作人员<sup>[32]</sup>在Jewitt等<sup>[33]</sup>工作的基础上, 基于哈勃望远镜的观测数据, 提取了311P尘埃尾的形态与亮度特征, 利用等时线——等力线模型拟合了尘埃尾形态, 并结合动力学模型对尘埃尾区域内的亮度进行了定量分析, 得到了尘埃喷发开始的时间与可持续时间的上限、尘埃尺寸的上下限与分布规律, 以及组成每条尘埃尾的粒子总质量与每次尘埃喷发活动期间311P的质量损失率, 讨论了311P的活动机制。311P尘埃尾的位置角从 $64^\circ$ 到 $238^\circ$ 不等。最长的尘埃尾是于2013年12月31日观测到的尾巴, 长度约为71 000 km。最短的尘埃尾是2013年9月10日观测到的尾巴, 长度约为15 000 km。尘埃喷发活动持续时间的上限从2 d到8 d不等。主导尘埃尾的粒子半径的上限是38.9 mm, 下限是6  $\mu\text{m}$ 。对于所有的尘埃尾, 尺寸分布遵循幂律分布大小, 分布指数在 $-2.29\sim -1.45$ 。不同彗尾包含的尘埃质量范围为 $0.5\sim 8\times 10^6\text{ kg}$ , 其中所有活动喷发出的尘埃总质量为 $\sim 3\times 10^7\text{ kg}$ ; 311P在每次尘埃喷发活动期间的质量损失率从1.08到30.3 kg/s不等, 平均的质量损失率约为1.59 kg/s。该文献还讨论和分析了311P尘埃喷发活动的成因<sup>[31]</sup>: 基本可以排除升华、连续撞击或行星(火星和木星)的潮汐力为活动起源的可能性。311P的喷发活动从远日点附近开始, 然后在近日点之前停止, 这与升华驱动活动的情况不同。其次, 木星在311P引起的潮汐力比311P的内部引力小了13个量级, 而火星的潮汐力影响则更低。最后, 311P在8个月内被连续撞击的概率也很低, 但无法排除初始撞击的影响。旋转破坏可能是引发尘埃喷发活动的起因, 尚未观测到与旋转破坏不相符的喷发现象。

### 3 空间尘埃特性原位探测方法

国际上至今共实施多项小行星、彗星探测任务, 实现了飞越、伴飞、取样返回等探测。小行星探测任务体现多样性和独特性的科学价值, 关系到探寻宇宙演化、物质结构、生命起源等重大基础前沿科学问题, 能反映公众感兴趣的资源开发等基础问题, 对于中国“开辟新疆域、揭示生命起源、推动技术进步、开发天然资源”等方面具有显著的意义。国外已成功实施

的典型彗星探测任务及部分代表性尘埃特性探测成果也不少, 这些成果可为中国的工程实践带来启示。

1986年3月14日, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发射的“乔托号”(Giotto)哈雷彗星探测器从距哈雷彗星彗核中心607 km处掠过, 拍摄了多张彗核照片, 并利用携带的尘埃撞击检测系统(Dust Impact Detection System, DIDS)对彗发的尘埃进行探测, 测量质量在 $10^{-19}\sim 10^{-6}\text{ kg}$ 范围内, 撞击尘埃粒子的通量包括多个压电陶瓷传感器。利用DIDS数据比较研究了接近彗核之前和远离彗核之后的尘埃环境。

2001年9月22日, 美国国家航空航天局(National Aeronautics Space and Administration, NASA)的“深空一号”(Deep Space-1)探测器以16.5 km/s的速度飞越“包瑞利19P”(Borrelly)彗星的彗发, 利用携带的光学载荷轻型集成相机/成像光谱仪获得了彗核及彗发的图像和红外光谱。

2004年1月2日, NASA发射的“星尘”(Stardust)探测器飞越“维尔特2号”彗星(81P/Wild2), 探测了81P彗星及彗发的成分组成。该探测器携带了3种与尘埃探测相关的科学载荷, 包括尘埃通量监测器(Dust Flux Monitor)、彗星与行星际尘埃分析仪(Cometary and Interstellar Dust Analyzer)和气凝胶尘埃收集器(Stardust Aerogel Collector)。

2014年8月, ESA发射的“罗塞塔”探测器经过10年的飞行到达木星轨道外的67P彗星。探测的内容主要是彗星尘埃的特性。“罗塞塔”的探测目标是67P彗星, 由“罗塞塔”轨道器和“菲莱”(Philae)着陆器两部分组成。“罗塞塔”轨道器携带了11台科学有效载荷, 用于对67P彗星进行科学探测, 以及在飞往67P彗星的途中对火星、小行星等进行观测。其中用于尘埃特性分析的包括OSIRIS(Optical, Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging System)、COSIMA、MIDAS、GIADA等。“罗塞塔”的探测结果发现67P彗星喷发尘埃存在两类: ①蓬松尘埃聚集体, 尺寸 $0.2\sim 2.5\text{ mm}$ 、平均体密度 $<1\text{ kg/m}^3$ ; ②致密尘埃颗粒, 质量范围在 $1.0\times 10^{-10}\sim 3.9\times 10^{-7}\text{ kg}$ 、尺寸 $80\sim 800\text{ }\mu\text{m}$ 、速度范围 $0.3\sim 12.2\text{ m/s}$ , 并且致密尘埃的喷发与太阳光照有着密切联系。

空间尘埃的物理/化学特性参数主要包括形貌、成分、粒径、速度、质量、密度、带电状态、吸积特性等。随着探测技术及新型功能材料和器件的不断成熟与应用, 探测原理与传统载荷也有明显的区别, 性能显著提升的新型探测载荷不断涌现, 如立体测绘相机、飞行时间质谱仪等载荷正在逐步实现产品更新换

代。同时尘埃探测载荷的集成度进一步增加, 在一个载荷中能对不同的物理/化学特性参数进行同时测量, 如在“卡斯塔利亚”(Castalia) 计划中规划的探测仪器 MIDIMA 载荷, 具备尘埃速度、质量、成分同时探测的能力<sup>[2]</sup>。截止目前已实施或正在实施的各类尘埃特性探测载荷的方法及对应的载荷名称见图 1。

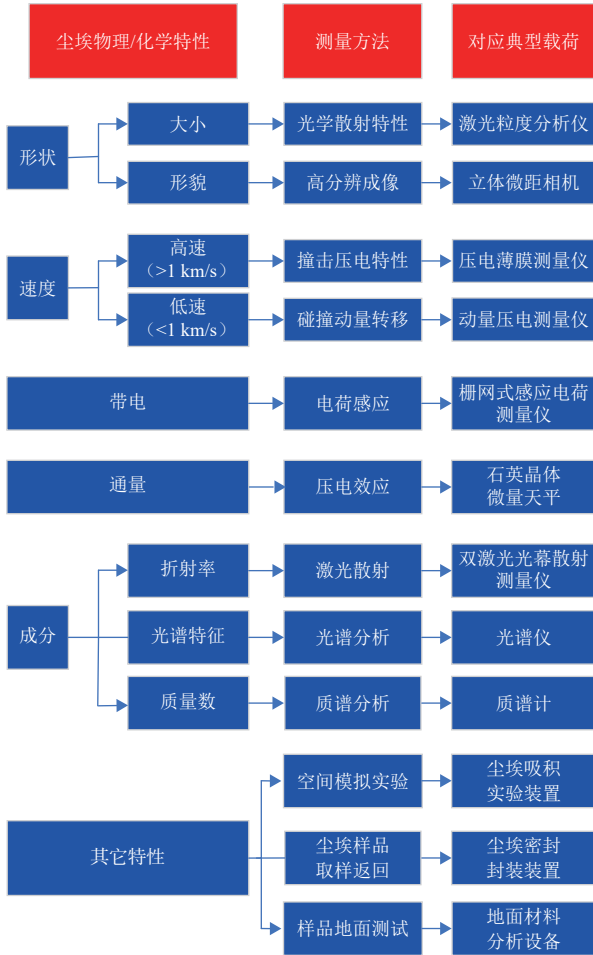


图 1 尘埃特性-测量方法-配置载荷的对应关系

Fig. 1 Corresponding relationship among dust characteristic, measurement method, and configuration loads

### 4 集成复合一体化探测方案

为保证有限的寿命周期内, 在不改变尘埃原始特性的前提下, 对 311P 尘埃进行足够丰富和精细的探测, 获取足够多而丰富的数据, 必须选择尘埃特性多传感器集成的探测技术。在此基础上, 提出了中国“天问二号”任务对尘埃特性测量的方案, 目前已经完成了正样产品的研制, 具体为用两个独立的探测通道对单个尘埃事件和微小尘埃质量流同步完成多物理量、大动态、高效、高分辨的探测, 具体为将尘埃粒径、尘埃速度、尘埃动量、尘埃形貌自上至下依次同时构建

于一个探测链路中, 组成一个望远镜观测系统。当单个尘埃由入口进入, 飞行通过激光光幕并最终与动量转移铝板碰撞完成动量转移后停止为单个尘埃的测量过程。在不改变原始尘埃特性的前提下, 用非接触测量的方式即可完成单个尘埃在微米到毫米范围内、尘埃速度在 10 m/s 量级、尘埃动量最小可到  $1 \times 10^{-10}$  N·s 量级特性参数的准确测量。单个尘埃粒径测量基于尘埃颗粒与激光光束的相互作用来实现。该测量方法利用尘埃粒子与激光相互作用产生的散射信号, 采用温斯顿锥采集一定孔径角范围内尘埃颗粒的散射光通量, 经光电探测器转换成电信号后, 得到尘埃粒子的光学散射截面大小, 然后通过 Lorenz-Mie 理论的算法间接反演出尘埃粒子的等效球形粒径大小<sup>[34]</sup>。在任意波形信号源的调制下, 激光驱动电源驱动半导体激光光源产生一定频率的调制激光, 激光光束经过光学系统整形后在特定区域形成一定面积和厚度的均匀照明区(探测区)。在 90° 散射角位置, 散射光通量呈现较好的单调递增, 因此将温斯顿锥光收集器布置在激光光路 90° 方向。该测量方法具有精确、快速、非接触、不破坏粒子动力学特性、不附加外在偏压等优点。单个尘埃速度测量选择飞行时间法, 通过测量尘埃颗粒经过激光光幕(短路径, 已知光幕厚度)、光幕至动量板(长路径, 已知路径长度)的两段路径的飞行时间得到速度, 当速度大于 10 m/s 取长路径给出的速度取置信, 当速度小于 10 m/s 时, 取长、短路径给出的平均速度取置信。单个尘埃动量测量利用铅钛酸铅 (PbZrO<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub>, PZT) 固熔体陶瓷检测尘埃碰撞动量转移铝板产生的弯曲波得以实现, 在尘埃动量转移板背面布置多个 PZT 陶瓷柱, 可通过测量同一次尘埃碰撞事件产生弯曲波到达不同位置处 PZT 陶瓷柱的时间间隔, 可定位碰撞在铝板发生的位置。利用望远镜光幕入口面积小、停止端面积大的特点, 进而可定性反演出尘埃的入射角度。由于动量是以声波的形式通过动量转移板传输至 PZT 陶瓷柱, 对应动量转移板的声波传输性能对尘埃动量及速度测试尤为关键。声波的传输形式主要有压力波(纵波)、剪切波(横波)和弯曲波。PZT 陶瓷柱主要收集弯曲波的能量。在实际操作过程中, 横波与纵波的能量也有可能部分导入 PZT 陶瓷柱振动, 针对其 200 kHz 的共振频率点, 选择横波、纵波与弯曲波波速差异较大的纯铝材料制作动量转移板进行弯曲波的收集。微型相机对特定区域定期成像, 利用微型相机近距离拍摄尘埃的高分辨率图像可实现对尘埃形貌的准确测量。基于微型相机成像的尘埃形貌测量单元主要实现尘埃在测量平面上的投

影几何尺寸测量。尺寸测量通过成像系统采集图像的校正、增强、边缘提取等步骤完成。通过回传的采集图像数据,结合图像传感器像元尺寸、镜头焦距、工作物距、参考点阵等参数,可实现工作平面上任意成像目标的形貌测量;配置一个或多个不同朝向的石英晶体微量天平(Quartz Crystal Microbalance, QCM)以完成对微小尘埃( $<20\ \mu\text{m}$ )累积质量和通量的测量,在QCM的基础上集成热重分析功能,形成挥发性原位热重分析仪(Volatile In Situ Thermogravimetry Analyzer, VISTA),可实现对水冰、挥发物、有机物分子的探测。QCM主要利用微小颗粒的沉积引起石英晶体振荡频率变化的特点测量尘埃的累积质量。QCM传感器由测量石英晶片、参考晶片、支撑结构、粘性薄膜和测温元件组成。核心部分是由石英晶体表面两个圆形电极构成晶振,与反馈和能量供给电路构成振荡。同样由于石英晶体的振荡频率受表面沉积微粒沾染量的影响,且沾染量越大,石英晶体的振荡频率越小,这样就可以测量到表面的微粒沾染量。利用QCM数据的时间间隔,就可以反演计算尘埃质量流的通量。“天问二号”任务尘埃分析仪载荷的设计组成如图2所示。

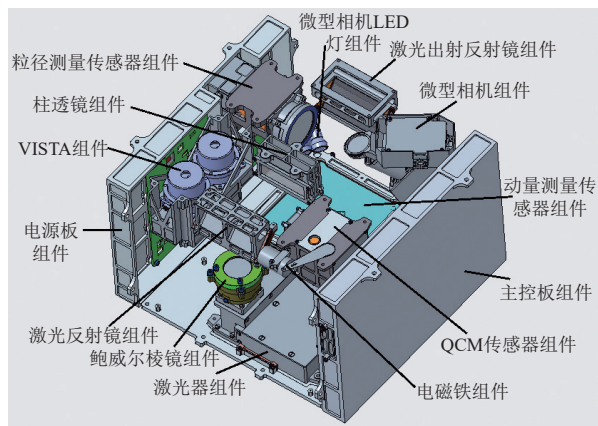


图2 “天问二号”任务尘埃探测载荷实施方案

Fig. 2 Implementation plan of dust detection payload of Tianwen-2 mission

## 5 结论

“天问二号”任务将实现从近地小行星2016 HO3采样返回地球,这将是首次从中国首次从行星际取回样品。同时在完成这一主任务后,“天问二号”还将前往311P彗星。针对低速伴飞311P彗星期间尘埃观测可解决的科学问题,提出了尘埃粒径、速度、动量、形貌、通量的集成复合探测方法。在“天问二号”任务工程条件的约束下,尘埃探测载荷较为合理地匹配了体积、重量、功耗等工程需求,同时该载荷具有较高的集成

性,各测量参数的结果可互证,进一步提高了获取科学数据的可信度。

通过测量311P彗星尘埃的粒径、速度、动量、形貌、通量等参数可获取该彗星的直接信息,将获得的数据和其它的观测和仿真结果比较,可以研究不同彗星附近喷发物分布和质量损失机制的异同以及311P的物理特性和形成过程,将为建立彗星与星际物质之间的联系提供直接基础数据,也可为小行星及彗星演化机制提供基础数据。

## 参考文献

- [1] JEWITT D. The active asteroids[EB/OL]. (2019-04-21)[2024-3-21]. <http://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/mbc.html>.
- [2] SNODGRASS C, JONES G H, BOEHNHARDT H, et al. The Castalia mission to main belt comet 133P/Elst-Pizarro[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 62(8): 1947-1976.
- [3] MEECH K J, A'HEARN M F, DEININGER W, et al. Proteus-searching for the origin of Earth's water[C]//Proceedings of Low Cost Planetary Missions Conference. Maryland, USA: IAA, 2011.
- [4] 李春来, 刘建军, 严韦, 等. 小行星探测科学目标进展与展望[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2019, 6(5): 424-436.  
LI C L, LIU J J, YAN W, et al. Overview of scientific objectives for minor planets exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 424-436.
- [5] BELTON M S. Cometary activity, active areas, and a mechanism for collimated outflows on 1P, 9P, 19P, and 81P[J]. *Icarus*, 2010, 210(2): 881-897.
- [6] FARNHAM T L, BODEWITS D, LI J Y, et al. Connections between the jet activity and surface features on Comet 9P/Tempel 1[J]. *Icarus*, 2013, 222(2): 540-549.
- [7] YU L L, HSIA C H, IP W H. Low-activity main-belt comet 133P/Elst-Pizarro: new constraints on its albedo, temperature, and active mechanism from a thermophysical perspective[J]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159(2): 1-10.
- [8] GUILBERT-LEPOUTRE A, BESSE S, MOUSIS O, et al. On the evolution of comets[J]. *Space Science Reviews*, 2015, 197: 271-296.
- [9] MEKLER Y, PRIALNIK D, PODOLAK M. Evaporation from a porous cometary nucleus[J]. *Astrophysical Journal*, 1990, 356: 682-686.
- [10] DAVIDSSON B, SAMARASINHA N, FARNOCCHIA D, et al. Modelling the water and carbon dioxide production rates of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, 509(2): 3065-3085.
- [11] BENTLEY M S, SCHMIED R, MANNEL T, et al. Aggregate dust particles at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 73-75.
- [12] MANNEL T, BENTLEY M S, SCHMIED R, et al. Fractal cometary dust—a window into the early Solar system[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 462: S304-S311.
- [13] HILCHENBACH M, KISSEL J, LANGEVIN Y, et al. Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: close-up on dust particle fragments[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 2016, 816(2): L32.

- [14] MEROUANE S, ZAPRUDIN B, STENZE O, et al. Dust particle flux and size distribution in the coma of 67P/Churyumov-Gerasimenko measured in situ by the COSIMA instrument on board Rosetta[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 596: 1-12.
- [15] DELLA CORTE V, ROTUNDI A, FULLE M, et al. GIADA: shining a light on the monitoring of the comet dust production from the nucleus of 67P/Churyumov-Gerasimenko[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 583: 1-10.
- [16] SKOROV Y, RESHETNYK V, LACERDA P, et al. Acceleration of cometary dust near the nucleus: application to 67P/Churyumov-Gerasimenko[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 461(4): 3410-3420.
- [17] SKOROV Y, RESHETNYK V, REZAC L, et al. Dynamical properties and acceleration of hierarchical dust in the vicinity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 477(4): 4896-4907.
- [18] KOLOKOLOVA L, NAGDIMUNOV L, MACKOWSKI D, et al. Light scattering by hierarchical aggregates[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2018, 204: 138-143.
- [19] HALDER P, GANESH S. Modelling heterogeneous dust particles: an application to cometary polarization[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 501: 1766-1781.
- [20] SKOROV Y, RESHETNYK V, BENTLEY M S, et al. The effect of hierarchical structure of the surface dust layer on the modelling of comet gas production[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, 510(4): 5520-5534.
- [21] ALFVÉN H, ARRHENIUS G. Evolution of the solar system[R]. UAS: National Aeronautics and Space Administration, 1976.
- [22] DYAR M D, HIBBITTS C A, ORLANDO T M. Mechanisms for incorporation of hydrogen in and on terrestrial planetary surfaces[J]. *Icarus*, 2010, 208(1): 425-437.
- [23] MCCUBBIN F M, BARNES J J. Origin and abundances of H<sub>2</sub>O in the terrestrial planets, Moon, and asteroids[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 526: 115771.
- [24] JIN Z L, BOSE M. Hydration of nebular minerals through the implantation-diffusion process[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 913(2): 1-8.
- [25] IZIDORO A, PIANI L. Origin of water in the terrestrial planets: insights from meteorite data and planet formation models[J]. *Elements*, 2022, 18(3): 181-186.
- [26] ICHIMURA A S, ZENT A P, QUINN R C, et al. Hydroxyl(OH) production on airless planetary bodies: evidence from H<sup>+</sup>/D<sup>+</sup> ion-beam experiments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012(345-348): 90-94.
- [27] BRADLEY J P, ISH II H A, GILLIS-DAVIS J J, et al. Detection of Solar wind-produced water in irradiated rims on silicate minerals[J]. *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*, 2014, 111(5): 1732-1735.
- [28] ZHU C, CRANDALL P B, GILLIS-DAVIS J J, et al. Untangling the formation and liberation of water in the lunar regolith[J]. *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*, 2019, 116(23): 11165-11170.
- [29] HUANG Z Y, NOMURA K I, MORRISSEY L S M, et al. Molecular dynamics simulation of solar wind implantation in the permanently shadowed regions on the lunar surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(18): e2022GL099333.
- [30] JEWITT D, WEAVER H, MUTCHLER M, et al. The nucleus of active asteroid 311p/(2013 p5) panstars[J]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(6): 1-11.
- [31] BOUWENS R J, ILLINGWORTH G D, OESCH P A, et al. Discovery of  $z \sim 8$  galaxies in the Hubble ultra deep field from ultra-deep WFC3/IR observations[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, 709(2): L133.
- [32] LIU B, LIU X D, JIA X Y, et al. Active asteroid 311P/PanSTARRS: rotational instability as the origin of its multitaills?[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, 166(4): 156.
- [33] JEWITT D, AGARWAL J, WEAVER H, et al. Episodic ejection from active asteroid 311P/PANSTARRS[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 798(2): 1-12.
- [34] CUI Z C, LI C H, LIU Z, et al. Design and calibration of an optical system for interstellar dust particle size measurement[C]//Proceedings of Thirteenth International Conference on Information Optics and Photonics, Xi'an, China: SPIE, 2023.

作者简介:

李存惠(1984-), 男, 研究员, 主要研究方向: 空间尘埃探测载荷研制与原位探测数据分析。本文通信作者。

通信地址: 兰州市飞雁街100号(730000)

电话: (0931)4585819

E-mail: licunhui@spacechina.com

## Scientific Issues and Detection Schemes on the Dust Characteristics of Main Belt Comets

LI Cunhui<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoping<sup>1,2</sup>, ZHAO Chengxuan<sup>1</sup>, LIU Xiaodong<sup>3,4</sup>, YOU Jilin<sup>2</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>,  
ZHANG Haiyan<sup>1</sup>, LI Shixun<sup>1</sup>, LIU Ze<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China;

3. School of Aeronautics and Astronautics, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;

4. Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Microsatellite Constellation, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

**Abstract:** To study the origin and formation of Main Belt Comets (MBCs), the characteristics of non-active period MBCs, as well as the relationships between MBCs and other comets and asteroids are studied. It emphasizes the need to develop an in-situ detection method capable of covering the characteristics of dust particles should be developed. In light of the upcoming Chinese Tianwen-2 mission, the authors propose an integrated composite detection method for non-contact measurement was proposed based on an analysis of the relationship between the characteristics of dust in MBCs and scientific problems, which is capable of non-contact measurement of MBCs' ejected dust particle size, velocity, momentum, morphology, and flux without changing the original characteristics of the dust. This design has been applied to the engineering practice of the Tianwen-2 mission.

**Keywords:** main belt comets; 311P; dust property; in-situ detection

### Highlights:

- The scientific objectives and detection method of the dust for main belt comets detection are summarized.
- An integrated detection method for non-contact measurement of dust characteristic is designed to be compact.
- The detection of dust characteristics for 311P in China's Tianwen-2 mission will be an important opportunity for new scientific breakthroughs.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]