



天问二号尘埃分析仪探测机理与设计验证

李存惠^{1,2*}, 赵呈选¹, 谭旭³, 张小平⁴, 李世勋¹, 刘泽¹, 陈猛¹, 汪加洁⁵, 王鹁¹,
庄建宏¹, 张海燕¹, 游击林⁴

1. 兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理全国重点实验室, 兰州 730000

2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

3. 中国科学院国家天文台, 月球与深空探测重点实验室, 北京 100101

4. 澳门科技大学, 月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078

5. 西安电子科技大学物理学院, 西安 710071

*联系人, E-mail: licunhui@spacechina.com

收稿日期: 2025-01-02; 接受日期: 2025-02-07; 网络出版日期: 2025-05-19

国家自然科学基金(编号: 42004157)和空间环境与物质全国重点实验室基金(编号: WDZC-HGD-2022-08)资助项目

摘要 尘埃分析仪(Dust Multi-properties Analyzer, DMA)是天问二号任务中配置的重要科学载荷之一, 具备非接触探测活跃小行星311P喷发尘埃多种特性的能力, 其获得的探测数据可用于解答活跃小行星311P的起源和形成、活动机制、与其他彗星-小行星过渡天体之间的关系等科学问题. DMA将在天问二号探测器绕飞311P期间持续开展探测. 本文重点对DMA的探测机理、功能设计、地面定标与验证、科学数据等内容进行介绍, DMA将为小行星相关的科学研究提供原位的第一手可信数据.

关键词 天问二号, 尘埃分析仪, 小行星311P

PACS: 07.87.+v, 07.90.+c, 07.07.Df

1 引言

《2021中国的航天》白皮书中明确指出: “继续实施行星探测工程, 发射小行星探测器、完成近地小行星采样和主带彗星探测, 完成火星采样返回、木星系探测等关键技术攻关”. 天问二号是我国自主实施的行星探测工程的第二次任务, 是有关小行星的探测任务, 计划于2025年完成发射, 通过一次发射, 实现从近地小行星2016HO3采样返回地球, 之后前往活跃小行星

311P开展绕飞探测^[1].

活跃小行星兼具有类似彗发、彗尾的结构或其他质量损失的视觉特征以及喷射尘埃或气体的活动. 天问二号选定的目标天体之一——活跃小行星311P最初由美国“泛星计划”望远镜(Pan-STARRS)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尾迹. 311P的轨道的长半轴约为2.19 AU, 近日点距离约为1.94 AU, 远日点距离约为2.44 AU, 轨道周期约为3.24年. 哈勃太空望远镜在

引用格式: 李存惠, 赵呈选, 谭旭, 等. 天问二号尘埃分析仪探测机理与设计验证. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 279512

Li C H, Zhao C X, Tan X, et al. Verification of detection mechanism and design of dust multi-properties analyzer onboard Tianwen-2 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 279512, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0002](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0002)

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. 在观测时间段内, 311P共发生了9次尘埃喷发事件, 分别间隔数个星期到数月不等, 单次尘埃喷发活动持续时间的上限为2–8 d不等^[2]. 在天问二号探测器绕飞311P期间开展对其喷发尘埃的原位观测, 获得的科学数据有望回答诸多科学问题, 例如, (1) 尘埃活动与母体表面形貌特征的关系; (2) 311P内部结构、形成和演化历史; (3) 太阳系早期吸积过程、动力学演化历史、类地行星水的来源; (4) 311P喷发尘埃在复杂动力学环境下如何演化等.

2 尘埃分析仪概述

太阳系是一个自然实验室, 人类可以通过各种方法来研究尘埃的天体物理学. 在深空探测任务中配置尘埃分析仪进行原位尘埃探测, 可以确定尘埃的质量、速度、轨迹和成分等基础信息. 当尘埃的飞行速度较高时($>1 \text{ km s}^{-1}$), 此类尘埃粒子在分析仪内部可发生碰撞电离, 通过测量电离产生的总电荷量和脉冲信号的上升时间可反演出尘埃粒子的质量和碰撞速度, 通过对离子飞行时间的分析可以得出尘埃的化学成分^[3,4]. 该类尘埃分析仪已在尤利西斯号(Ulysses)、威尔德2号(Wild 2)、金星哈雷1号(Venera-Gallei 1)、卡西尼-惠更斯号(Cassini-Huygens)、月球大气和尘埃环境探测器(Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, LADEE)、欧罗巴快船(Europa Clipper)任务中应用, 典型代表如Cassini任务中配置的宇宙尘埃分析仪(Cosmic Dust Analyzer, CDA)^[5].

活跃小行星喷发的尘埃速度较低, 一般在 m s^{-1} 量级的尺度, 同时环绕或伴飞此类小天体时, 探测器的速度也较低, 因此对此类尘埃特性原位观测时需在不改变原始特性的前提下, 开发非接触、非扰动的测量方法. 欧洲航天局罗塞塔(Rosetta)任务搭载了颗粒冲击分析仪与尘埃收集器(Grain Impact Analyser and Dust Accumulator, GIADA), 在绕飞67P彗星时利用激光尘埃粒径系统(Grain Detection System, GDS)、撞击传感器(Impact Sensor, IS)以及5个不同朝向的石英晶体微量天平(Quartz Crystal Microbalances, QCMs)对彗发尘埃的粒径、速度、动量和累积质量进行了持续测量^[6]. 在Rosetta任务中实现了低速尘埃特性综合类探

测载荷迄今为止的唯一一次成功应用. 在Rosetta任务中, 还搭载了基于原子力显微技术的微成相尘埃分析系统(Micro-Imaging Dust Analysis System, MIDAS), 能对尺度最小到20 nm的圆形、斜长、扁平的单体或团聚体尘埃颗粒进行3D成像^[7]. Rosetta任务还配置了光学、光谱和红外远程成像系统(Optical Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging System, OSIRIS)和彗星二次离子质量分析仪(COMETARY Secondary Ion Mass Analyzer, COSIMA)^[8]. 因此Rosetta任务对67P彗星的尘埃观测最为全面, 粒径测量覆盖了从纳米级到千米级的超宽范围.

3 尘埃分析仪工作模式

天问二号任务搭载的科学载荷尘埃分析仪借鉴了Rosetta任务中GIADA多功能集成化的设计理念, 坚持“高集成、低耦合、互印证、自管理”的设计原则, 在满足重量、功耗、体积等工程约束的前提下, 用独立的两个探测通道对单个尘埃事件和微小尘埃质量流同步完成粒径、速度、动量、形貌、通量、成分的探测, 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. 当单个尘埃进入DMA的探测通道, 首先非扰动地穿越激光光幕, 最终与动量转移铝板碰撞完成动量转移并停留在动量转移铝板上. 微型相机对动量转移铝板的特定区域定期成像, 利用微型相机近距离拍摄尘埃的高分辨率图像可以实现对尘埃形貌的准确测量. 使用3个QCM完成对微小尘埃累积质量、通量、成分的测量, 其中2个QCM采用国际合作的形式由中意双方联合研制, 集成了热重分析功能, 以实现在水冰、挥发物、有机物分子的成分探测, 该尘埃原位分析仪(Dust *In-situ* Analyzer, DIANA)的设计详见参考文献^[9,10]. 天问二号任务中配置的尘埃分析仪最终实现的技术指标如表1所示.

DMA随天问二号探测器发射入轨后, 在2016HO3的采样任务结束前, 处于断电关闭状态. 当探测器释放返回舱后, 继续向311P转移期间, 每半年开机自检一次, 每次自检开机时间约为40 min, 对DMA的健康状态进行监测和判断. 直至抵达311P附近, 长时间开机持续对311P的喷发尘埃进行探测. 根据尘埃分析仪科学任务需求, 尘埃分析仪在轨开机工作时具有2种正常工作模式:

表 1 尘埃分析仪实现的技术指标

Table 1 Technical specifications of DMA

物理量类型	直接测量	反演获得	指标范围	测量单元
速度	√	—	$0.2\text{--}500\text{ m s}^{-1}$	粒径测量单元 + 动量测量单元
动量	√	—	$2\times 10^{-10}\text{--}2\times 10^{-4}\text{ N s}$	动量测量单元
形貌	√	—	$5.24\text{ }\mu\text{m}$	微型相机
累积质量	√	—	$1\times 10^{-9}\text{--}3\times 10^{-4}\text{ g cm}^{-2}$	QCM + DIANA 测量单元
粒径	—	√	$1\text{--}1000\text{ }\mu\text{m}$	粒径测量单元
质量	—	√	$1\times 10^{-10}\text{--}4\times 10^{-1}\text{ g}$	动量测量单元
通量	—	√	$\geq 6\times 10^{-12}\text{ g cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$	QCM + DIANA 测量单元

探测模式和自检模式. 探测模式主要用于科学数据和工程状态参数的采集; 自检模式主要用于了解模块性能及其变化情况. 在其他时段DMA关机, 载荷管理器将温度监测数据下传, 用以了解和掌握DMA的温度环境, 判断DMA是否温度超限. 尘埃分析仪模块上电后默认进入探测模式, 通过注入指令进行模式切换(如图1).

DMA中微型相机按照默认每天开机一次进行拍照, 在拍照时由预设通道的LED灯进行照明, 当外部注入指令改变时, 可改变LED的通道, 微型相机工作约30 min后关机. 24 h后DMA的主控再次给微型相机上电拍照, 微型相机的工作流程依此模式循环. 激光器组件随整机同时开机, 并按照预设的温度先进行热电制冷器控温, 控温过程不超过3 min即可满足出光条件, 在激光器芯片未达到出光温度条件时, 激光器组件由于自保护机制不出光, 当控温条件达到时激光器输出976 nm的脉冲激光, 并在工程参数中表征光输出状态, 在外部注入指令的干预下, 激光输出可人为关闭. DIANA随DMA同时开机, 并保持吸附-加热解附的工作模式循环往复, 模式切换时间间隔为45 d, 两个探头均先开启尘埃累积模式, 45 d之后探头开启热重分析功能, 升温速率控制为 1 K min^{-1} , 其中探头1的热重分析功能温度范围为工作温度至370 K, 探头2的热重分析功能温度范围为工作温度至500 K.

4 地面定标及验证实验

单个尘埃粒径测量定标首先利用光学显微镜对待

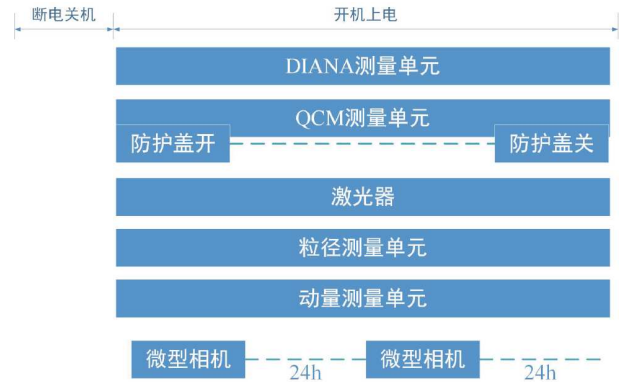


图 1 尘埃分析仪的工作模式

Figure 1 Workflow of DMA.

测颗粒样品的粒径大小进行测量, 获得待测样品颗粒的真实粒径大小, 然后采用粒子拾取仪器, 将已知粒径大小的颗粒从一定高度静止释放, 在近似自由落体运动情况下, 颗粒会以一定速度定向穿过激光探测区域, 通过记录不同粒径大小颗粒对应的光散射信号值, 建立起颗粒散射信号值 F 与颗粒粒径 D 的对应关系. 地面定标测试中采用了不同粒径大小的二氧化硅、钠钙玻璃、氧化锆、铜球等材质的球形颗粒进行试验. 如图2所示, 通过将3个信号通道的结果进行整合, 给出了二氧化硅球形颗粒定标测试结果与米氏理论散射曲线对比图. 从图2可以看出, 球形颗粒的试验结果与理论仿真结果具有很好的一致性.

基于二氧化硅球形颗粒的大量定标试验结果, 结合激光散射理论限定, 在均方根误差最小条件约束下, 通过多项式拟合, 建立颗粒散射信号值 F 与颗粒粒径 D 的对应关系:

$$F = 6.8622 \times D^2 + 307. \quad (1)$$

基于颗粒定标测试建立的颗粒散射信号值 F 与颗粒粒径 D 的对应关系, 利用已知粒径大小的球形二氧化硅颗粒进行验证. 表2给出了验证测试中反演粒径结果及百分比偏差. 从表2可以看出, 多次测试的颗粒粒径均值百分比偏差均低于15%. 此外, 对于折射率较小的二氧化硅颗粒, DMA粒径测量单元在非真空条件下可以实现对9–1000 μm 颗粒的检测, 而在高真空条件下, 可以实现对粒径小于5 μm 的二氧化硅颗粒的检测; 对于折射率较大的铜球颗粒, DMA粒径测量单元在非真

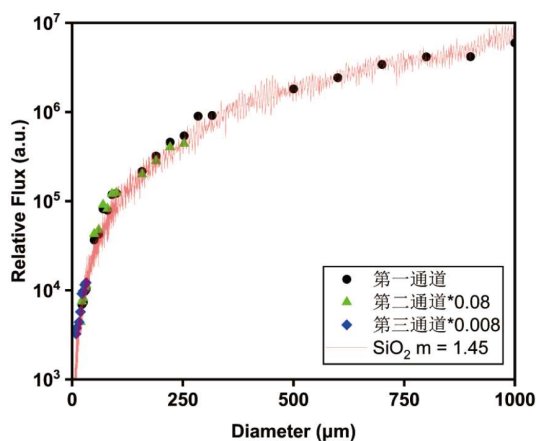


图 2 二氧化硅球形颗粒定标测试结果与米氏理论散射曲线对比图
Figure 2 Comparisons of calibration results using spherical SiO₂ particles and theoretical results calculated using Lorenz-Mie theory.

表 2 尘埃分析仪粒径定标的测试结果

真实粒径大 小(μm)	验证测试试验反演粒径(μm)及偏差				
	测试1	测试2	测试3	均值	偏差(%)
1000	1064.0	945.6	915.9	975.2	2.48
900	766.2	766.1	865.6	799.3	11.2
800	860.7	777.2	784.6	807.5	0.94
700	759.7	637.5	741.0	712.7	1.81
600	595.4	607.5	595.1	599.3	0.12
500	527.6	541.8	543.2	537.5	7.50

空条件下可以实现对2–300 μm颗粒的检测,而在真空条件下,可以实现对粒径小于1 μm的铜颗粒的检测.

单个尘埃速度测量选择飞行时间法,即通过分别测量尘埃颗粒经过激光光幕(短路径,预设光幕厚度3 mm)、光幕至动量板(长路径,预设路径长度124 mm)两段路径的飞行时间计算得到单个尘埃的归一化垂直速度.尘埃速度定标采用比较定标法,一方面可将待标定的DMA正样飞行产品与微粒子加速实时监测平台装置对同一次尘埃穿越事件测量获得的速度相比较^[1];另一方面对于尘埃颗粒较低速度测量(低于5 m s⁻¹)时,可将激光光幕测速与自由落体运动产生的理论速度值进行比较,并将自由落体至动量转移板飞行时间计算得到的平均速度与自由落体运动产生的理论平均速度进行比较.表3和4给出了利用微粒子加速实时监测平台装置和自由落体的不同速度定标结果,

表 3 尘埃分析仪速度定标的测试结果(标准设备)

单个微粒子 加速实时监 测平台装置 测量速度 (m s ⁻¹)	通过激光 光幕时间 计算得到 的速度 (m s ⁻¹)	相对偏差 (%)	激光光幕 至动量转 移板飞行 时间计算 得到的速 度(m s ⁻¹)	相对偏差 (%)	平均偏差 (%)
2.0	2.0	0	1.3	35.0	17.5
5.2	3.8	26.9	4.5	13.5	20.2
7.7	7.5	2.6	6.9	10.4	6.5
8.4	6.8	19.0	7.9	6.0	12.5
8.7	6.8	21.8	8.5	2.3	12.1
9.0	6.8	24.4	8.5	5.6	15.0
9.2	7.8	15.2	7.2	21.7	18.5
11.6	10.7	7.7	11.7	0.9	3.4
18.8	12.5	33.5	18.2	3.2	18.4

表 4 尘埃分析仪速度定标的测试结果(自由落体)

通过激光光 幕时间计算 得到的速度 (m s ⁻¹)	自由落体 理论计算 速度 (m s ⁻¹)	相对偏差 (%)	自由落体 至动量转 移板飞行 时间计算 得到的平 均速度 (m s ⁻¹)	自由落体 理论计算 平均速度 (m s ⁻¹)	相对偏差 (%)
2.78	2.75	1.0	3.1	3.15	1.6
2.88	2.75	4.5	3.13	3.15	0.6
2.76	2.75	0.36	2.95	3.15	0.68
1.034	1.019	1.47	1.823	1.850	1.46
1.034	1.019	1.47	1.802	1.850	2.60
1.028	1.019	0.88	1.829	1.850	1.14
1.030	1.019	1.08	1.822	1.850	1.51
1.029	1.019	0.98	1.806	1.850	2.38
1.035	1.019	1.57	1.823	1.850	1.46
1.034	1.019	1.47	1.822	1.850	1.51

DMA可以给出穿过测量区域的尘埃粒子飞越激光光幕的速度,如能到达动量转移铝板也可以同时给出穿越长路径的速度.分析定标数据可以确定,DMA原位探测获得飞行时间后,当得到的尘埃速度大于10 m s⁻¹时以长路径给出的速度取置信,当得到的尘埃速度小于10 m s⁻¹时,以长、短路径给出的平均速度取置信,

这样可以提高尘埃速度的测量精度. 因为在轨实际测试时, 待测尘埃进入探测通道的飞行方向未知, DMA 只得到了单次尘埃事件飞越短路径激光光幕、长路径激光光幕至动量转移铝板的飞行时间, 因此DMA最终给出了尘埃归一化后的垂直平均速度. 后续可以根据DMA原始数据中的尘埃撞击动量板的位置, 结合探测器朝向、探测器飞行速度, 定性得到进入探测通道的尘埃飞行方向, 进一步修正尘埃的绝对飞行速度.

QCM测量单元定标采用溶液滴定法. 即在易挥发中性溶剂配置一定浓度的固体颗粒物悬浊液, 使用标准取样装置吸取定量溶液将其滴定在QCM的石英晶体敏感电极的表面, 待溶剂挥发后, 读取频率变化并和溶质质量对应, 连续测量多点, 通过拟合获得QCM测量单元的质量灵敏度. QCM正样飞行产品定标测定的质量灵敏度为 $(3.94 \pm 0.13) \times 10^{-9} \text{ g Hz}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 拟合优度为0.97. 原位实际工作后获得QCM的频率变化乘以该质量灵敏度, 即得到活跃小行星311P的微小尘埃累积质量, 除以QCM频率的采集时间间隔, 即得到311P微小尘埃通量.

由于微型相机成像景深有限, 因此无法将黑白棋盘格标定板、分辨率板等工具置于实际成像区域上进行标定. 因此, 需设计专用工装(其高度低于动量转移铝板)来模拟动量转移铝板, 并将黑白棋盘格标定板置于微型相机成像区域, 开启微型相机正样飞行产品采集图像, 基于张正友标定法可实现畸变校正. 另外, 由于黑白棋盘格标定板上的格子长宽尺寸已知($1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 精度 $1 \mu\text{m}$), 在完成基本校正后, 通过测量黑白棋盘格标定板上线条长度占据的像素数可计算出物方分辨率(图像中每两个像元之间代表的实际物理大小或距离). 微型相机正样飞行产品的物方分辨率为 $5.24 \mu\text{m}$, 原位实际工作获得图像数据后, 将尘埃所占像素数乘以转换系数即可得到相关尺寸. 图3为使用不同矿物颗粒利用微型相机成像的验证结果.

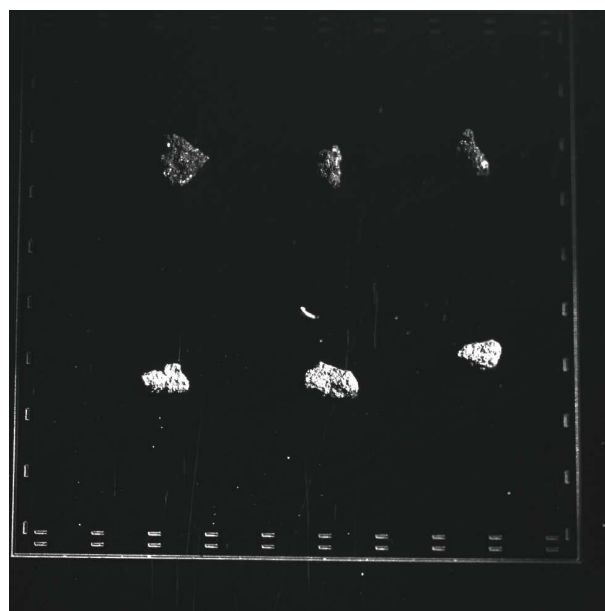


图 3 微型相机的地面验证图像

Figure 3 Ground verification images of miniature cameras.

5 总结

DMA是一台多功能的低速($<1 \text{ km s}^{-1}$)尘埃特性探测载荷, 能够对尘埃粒径、速度、动量、形貌、通量、成分等多种特性同时完成测量, 本文介绍了天问二号任务中DMA的探测原理与仪器特性. DMA有两个独立的探测通道, 分别对单颗粒尘埃事件和微小尘埃质量流的特性进行同时探测, 将为311P尘埃特性及小行星科学研究提供数据保障. DMA正样飞行产品在完成研制后开展了地面定标测试及科学验证试验, 实现了对载荷功能性能与设计技术指标的验证. 在天问二号探测器绕飞311P期间, DMA将不断获得有关311P尘埃的科学数据. DMA将通过连续的原位观测和持续的科学数据积累, 丰富人类对此类小行星的认识, 为产出创新的重大科学发现作出贡献.

参考文献

- Li C L, Liu J J, Ren X, et al. Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 mission (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2024, 11: 304–310 [李春来, 刘建军, 任鑫, 等. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置. *深空探测学报*, 2024, 11: 304–310]
- Liu B, Liu X, Jia X, et al. Active asteroid 311P/PanSTARRS: Rotational instability as the origin of its multitails? *Astron J*, 2023, 166: 156
- Grün E, Dikarev V, Krüger H, et al. Dust in interplanetary space and in the local galactic environment. In: Witt A N, ed. *Astrophysics of Dust*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2004. 229–244

- 4 Grün E, Krüger H, Srama R. The dawn of dust astronomy. *Space Sci Rev*, 2019, 215: 46
- 5 Kempf S. Interpretation of high rate dust measurements with the Cassini dust detector CDA. *Planet Space Sci*, 2008, 56: 378–385
- 6 Colangeli L, Lopez-Moreno J J, Palumbo P, et al. The grain impact analyser and dust accumulator (GIADA) experiment for the Rosetta mission: Design, performances and first results. *Space Sci Rev*, 2007, 128: 803–821
- 7 Riedler W, Torkar K, Jeszenszky H, et al. MIDAS—The micro-imaging dust analysis system for the Rosetta mission. *Space Sci Rev*, 2007, 128: 869–904
- 8 Wang H, Sun C Y, Ju D D, et al. Dust environmental detection in deep space explorations (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2019, 36: 549–557 [王豪, 孙承月, 琚丹丹, 等. 深空粉尘环境探测技术综述. *航天器环境工程*, 2019, 36: 549–557]
- 9 Li C H, Zhang X P, Zhao C X, et al. Scientific issues and detection schemes on the dust characteristics of main belt comets (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2024, 11: 613–620 [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. *深空探测学报*, 2024, 11: 613–620]
- 10 Scaccabarozzi D, Martina C, Saggin B, et al. Feasibility design of DIANA, a dust analyzer developed for the Tianwen-2 mission. In: *Proceedings of the 11th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. Lublin: IEEE, 2024. 422–426
- 11 Wang W, Xue W, Wu S, et al. High-speed micro-particle motion monitoring based on continuous single-frame multi-exposure technology. *Materials*, 2022, 15: 3871

Verification of detection mechanism and design of dust multi-properties analyzer onboard Tianwen-2

LI CunHui^{1,2*}, ZHAO ChengXuan¹, TAN Xu³, ZHANG XiaoPing⁴, LI ShiXun¹, LIU Ze¹, CHEN Meng¹, WANG JiaJie⁵, WANG Yi¹, ZHUANG JianHong¹, ZHANG HaiYan¹ & YOU JiLin⁴

¹ National Key Laboratory on Vacuum Technology and Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China

² School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

³ Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

⁴ State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China

⁵ School of Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China

*Corresponding author (email: licunhui@spacechina.com)

The dust multi-properties analyzer (DMA), a vital scientific payload onboard the Tianwen-2 mission, is capable of non-intrusively detecting various characteristics of dust emitted by active asteroid 311P. The data obtained from these detections will provide significant references for researches on the origins, formation, activity mechanisms of active asteroid 311P, as well as on its relationship with other comet-asteroid transitional objects. The DMA is designed to continuously conduct detections orbiting active asteroid 311P. The scientific data of DMA will provide first-hand reliable input for asteroid-related scientific research. This study focuses on the introduction of the detection mechanism, functional design, ground calibration and verification, and scientific data of the DMA.

Tianwen-2, dust multi-properties analyzer, asteroid 311P

PACS: 07.87.+v, 07.90.+c, 07.07.Df

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0002](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0002)