



评述

基于中国空间站的星际与行星际尘埃的捕获与溯源

王舒¹, 李爱根^{5*}, 高健³, 侯锡云⁴, 白永林², 王慎¹, 姜碧洧³, 郑锦坤², 赵瑞宁¹,
张伶俐¹, 谭盼⁴, 刘继峰^{1,5*}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119;

3. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875;

4. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023;

5. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 101408

*联系人, 李爱根, E-mail: lia@missouri.edu; 刘继峰, E-mail: jfliu@nao.cas.cn

收稿日期: 2024-06-04; 接受日期: 2024-07-31; 网络出版日期: 2024-10-23

国家自然科学基金(编号: 11988101, 11933004, 12373028)、新基石研究员项目和科学探索奖资助项目

摘要 物质是宇宙的基础, 研究宇宙必须对其物质组成进行研究. 宇宙中恒星际和行星际尘埃物质携带着恒星和太阳系形成与演化的丰富信息. 目前对宇宙尘埃的研究主要基于间接手段, 无法精确判定其化学组成、结构形态、尺寸分布以及来源等关键信息. 60年来, 人们一直尝试利用探空火箭、航天器、空间站、卫星、深空探测器等进行宇宙尘埃物质的直接研究, 目前尘埃的“原位”探测数据或采样返回数据主要用于样本数量的统计分布特性研究以及物质成分分析, 对样本的溯源工作并不多见. 本文总结了恒星际与行星际尘埃颗粒的间接性质研究结果, 已有的原位探测项目及进展, 并拟利用我国空间站平台开展宇宙尘埃颗粒的捕获与溯源, 准确判断返回的尘埃颗粒是来自于恒星际还是行星际, 并对溯源的尘埃颗粒在实验室内进行详细理化分析和研究.

关键词 星际尘埃, 行星际尘埃, 中国空间站

PACS: 98.58.Ca, 96.50.Dj, 96.30.Vb

1 引言

星际空间充斥着总量占星系质量约10%的气体(原子、分子和离子)和尘埃(固体微粒), 其中的尘埃是星际、星周、行星际空间的重要成分, 其尺寸分布涵

括从亚纳米(即大分子)、纳米到亚微米、微米的四、五个量级, 成分主要包括含碳尘埃、硅酸盐尘埃以及两者的复合体.

尘埃几乎与整个频域的电磁辐射相互作用, 从而改变富含尘埃的天体(如星系、类星体、活动星系

引用格式: 王舒, 李爱根, 高健, 等. 基于中国空间站的星际与行星际尘埃的捕获与溯源. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 129501
Wang S, Li A G, Gao J, et al. Capture and tracing interstellar and interplanetary dust particles through the China Space Station (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 129501, doi: [10.1360/SSPMA-2024-0209](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0209)

核、分子云、年轻星体、原行星尘埃盘、彗星、演化晚期恒星、超新星遗迹等)的形貌,全面影响天体物理的各个分支学科^[1].首先,尘埃吸收和散射(合为消光)紫外和可见光波段的星光,因消光通常随波长衰减,不仅减弱遥远天体的亮度,而且使天体颜色趋红(即红化),显著改变天体的能谱分布,并影响星系恒星形成率的测定.星际偏振,即由非球形的星际尘埃在星际磁场的作用下有序排列造成的选择消光,可以获得尘埃形状和星际磁场的有关信息.此外,在电磁辐射的高能部分,尘埃对X射线的吸收同样影响X射线源的亮度和能谱分布;尘埃对X射线的小角度散射也会形成X射线晕.同样重要的是,因能量守恒,尘埃吸收星光后会经振动激发而在红外、亚毫米、毫米波段再辐射,尘埃的红外辐射是测定星系恒星形成率的有力标尺.因角动量守恒,尘埃通过与原子和离子的碰撞获得角动量而激发转动,高速转动的尘埃在微波波段产生显著的电偶极辐射,从而影响对宇宙背景辐射的精确测定.

尘埃也是星际、星周物理与化学过程的重要参与者:演化晚期恒星的星风由星光辐射压通过尘埃与气体的动力学耦合而触发;尘埃通过光电效应产生的光电子加热星际气体以及原行星尘埃盘表层气体;尘埃表面是星际分子如 H_2 形成的关键场所,甚至是生命物质的起源场所;星际尘埃同时是恒星和行星系统形成的基石.

人们对宇宙尘埃的了解主要是通过尘埃与电磁辐射的相互作用(即消光、散射、红外辐射、偏振)而获得的“间接”信息.这种基于“遥感”对尘埃的认知,尚有相当的不确定性,如星际尘埃的尺寸分布,尘埃的化学组成、结构和形状,还存在争议和不确定之处.当前流行的几种星际尘埃模型在尘埃的化学组分和结构方面也具有显著差异,迄今为止还没有能完美地解释各种观测现象的“理想的星际尘埃模型”.国际上此前曾有少量研究对行星际尘埃(Interplanetary Dust Particles, IDPs)进行了原位实验观测^[2,3],但目前还没有对恒星际尘埃(Interstellar Dust Particles, ISDs)的原位实验观测研究.我国在宇宙尘埃的研究方面,主要集中于“间接”测定与观测模拟,尚无对于宇宙尘埃的“原位”空间探测系统研究.此外,对于恒星际尘埃的原子尺度组成和结构的研究,在国内外仍为空白.

为此,我们拟在我国空间站上开展宇宙尘埃颗粒的直接“原位”测量与捕获,在轨测量尘埃颗粒的速度

矢量和质量,并利用气凝胶收集器捕获尘埃颗粒,充分发挥空间站独特的优势,将捕获的尘埃颗粒带回地面专业实验室开展详细的物理化学分析.基于动力学轨道回溯、化学成分分析以及同位素异常分析等手段,对尘埃颗粒进行准确溯源,区分恒星际尘埃和行星际尘埃.由此获得的尘埃尺寸、结构、化学组成以及动力学和热力学演化等信息,将用于构建精准的尘埃模型,不仅可以揭示行星际尘埃的起源、演化乃至太阳系从原太阳星云到彗星、小行星的形成和演化过程,而且有助于精确扣除影响宇宙微波背景辐射测定的银河系前景辐射以及影响宇宙红外背景辐射测定的太阳系内星际尘埃前景辐射.

空间站尘埃探测将为我们未来分析与解释我国空间站巡天望远镜(China Space Station Telescope, CSST)^[4]的消光观测数据起到重要作用.另外,我国阿里原初引力波探测^[5]亦将在频率为几十GHz的微波领域开展工作,空间站尘埃探测的研究成果也将积极服务于阿里计划.

2 恒星际尘埃

遥远天体发出的电磁辐射被星际尘埃吸收和散射即消光,星际消光的强度随波长的变化显著不同,比如可见光和紫外波段的消光比红外波段的强,从而导致星际红化;同时,尘埃吸收光子后,在红外和远红外波段再辐射.从消光随波长的分布(即消光曲线)可知,星际空间一定存在着从纳米到微米尺寸的尘埃颗粒.基于消光曲线中2175 Å紫外消光驼峰、3.4 μm处的C-H特征、9.7 μm处Si-O特征、18 μm处O-Si-O特征以及其他消光特征,人们普遍认识到星际尘埃主要是由含碳尘埃和非结晶硅酸盐尘埃构成的.本节将介绍星际尘埃的尺寸分布、化学组分、结构和模型.

2.1 星际尘埃的尺寸分布

电磁辐射理论表明,固体颗粒对波长与其尺寸相当的电磁波的散射和吸收最为有效,因此从远紫外、可见光到中红外的多波段星际消光是限制星际尘埃尺寸分布最为有效的手段.根据星际消光,人们知道星际尘埃尺寸分布很广,涵括从亚纳米(即大分子)、纳米到亚微米、微米的四、五个量级^[6].其中,纳米尘埃是远紫外消光和近红外辐射的主要贡献者,而亚微米尘

埃是近紫外、可见光、近红外消光的主要贡献者. 当前, 对星际尘埃的尺寸分布的了解, 在亚微米尘埃方面比较透彻, 在纳米和亚纳米极小尘埃以及微米大尘埃方面所知有限. 在紫外和光学波段, 微米大尘埃的尺寸远大于波长, 其消光基本上不随波长变化^[1](即呈“灰色”), 因此, 紫外和光学消光无法约束这类尘埃的总量和尺寸分布; 这类尘埃主要在中红外波段产生消光, 近年来中红外消光观测被用以研究微米尺寸尘埃的数量与尺寸分布^[7]. 另外, 一些直接证据也表明, 星际介质中存在着微米尘埃颗粒. 例如, 微米尺寸的星际 SiC、石墨、 Al_2O_3 和 Si_3N_4 颗粒在原始陨石中被发现. 根据它们的同位素异常情况, 被证认为源自恒星的前太阳颗粒^[8]. Ulysses 和 Galileo 号航天器上的尘埃探测器已经探测到半径为 $2.0\ \mu\text{m}$ 的星际大尘埃从本地星际云流经日光层^[9-11]. 此外, 更大的星际尘埃(半径达 $20\ \mu\text{m}$) 也被雷达探测到, 作为流星以双曲线轨道进入地球大气层^[12,13].

通过对星际消光曲线的拟合, 可以反演得到星际尘埃的尺寸分布和化学组分. 广泛使用的标准尘埃模型是 Weingartner 和 Draine^[14] 构建的硅酸盐-碳尘埃模型, 简称 WD01 模型. WD01 模型可以很完美地同时解释紫外到近红外($912\ \text{\AA}$ – $3\ \mu\text{m}$) 的尘埃消光, 其包含纳米尺寸到亚微米尺寸的硅酸盐和碳尘埃. 需要说明的是, 该模型并没有考虑 Ulysses 和 Galileo 号航天器观测到的微米尺寸大尘埃. Draine^[15] 修改了该尘埃模型, 加入了 Ulysses 和 Galileo 号航天器测得的包括微米大尘

埃在内的尺寸分布^[16], 但是修改后的模型无法解释观测到的星际消光. 这是由于新加入的大颗粒尘埃贡献了大量的额外消光, 导致模型的消光曲线远高于观测的消光曲线. 例如, 对于常用的可见光 B, V, R 和 I 波段, 模型值超过了观测值 1.5–2 倍. 然而, Wang 等人^[7] 引入不连续的尘埃尺寸分布函数, 如图 1 左图所示, 碳尘埃的尺寸分布在亚微米和微米间有一个缺口. 该模型几乎完美地拟合了从远紫外到中红外的消光, 特别是中红外, 如图 1 右图所示. 标准尘埃模型(黑色实线)可以几乎完美解释紫外到近红外的消光, 但是不能解释 21 世纪以来观测到的相对平坦的 $3\text{--}8\ \mu\text{m}$ 中红外消光(不同颜色形状的符号表示). Wang 等人^[7] 加入微米尺寸尘埃并引入不连续的尘埃尺寸分布后, 不仅解决了前面提到的微米尺寸尘埃引入额外消光的问题, 还解释了经典尘埃模型存在的中红外消光不足问题.

星际尘埃的尺寸到底如何分布, 是否正如 Wang 等人^[7] 所预测的那样, 还需要空间探测来解谜. 空间站尘埃探测预计将会收集一批亚微米到微米量级的尘埃颗粒, 分析其成分并获得尺寸分布, 帮助人们了解微米级尘埃.

2.2 星际尘埃的化学组分

目前通过天文观测, 人们推断宇宙尘埃中主要有碳、氧、镁、铝、硅和铁等元素. 星际吸收和辐射光谱以及星际元素减损揭示了星际尘埃的可能化学组分. 本节主要介绍星际尘埃的三种主要化学组分: 硅酸

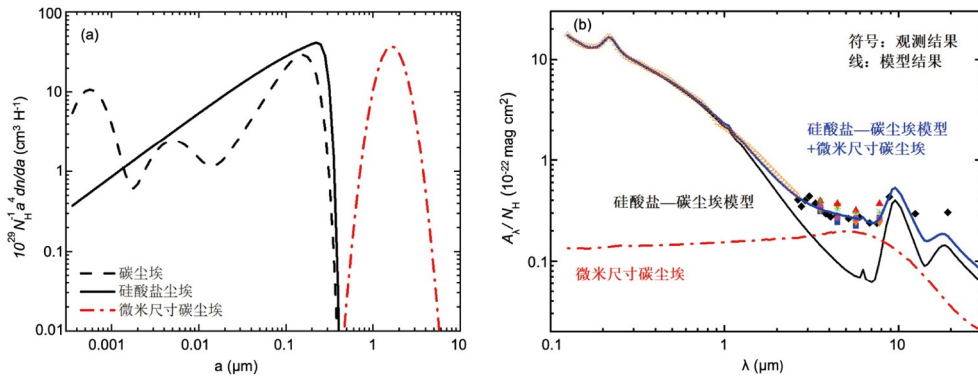


图 1 (网络版彩图) Wang 等人^[7] 模型的尘埃尺寸分布(a)和消光曲线(b). 微米尺寸的碳尘埃(红色虚线)与亚微米尺寸的碳尘埃(黑色虚线)的分布间有明显的非连续性. 微米尺寸的碳尘埃是中红外消光的主要贡献者, 正好解释不同颜色符号绘制的中红外观测消光

Figure 1 (Color online) Dust size distribution (a) and extinction curves (b) of the Wang et al. [7] model. There is a clear discontinuity between the distributions of micrometer-sized graphite (red dashed line) and submicron-sized graphite (black dashed line). Micrometer-sized graphite is the main contributor to the mid-infrared extinction (different color symbols).

盐尘埃、碳尘埃、铁尘埃.

红外波段9.7和18 μm 波长处的两个吸收光谱带是星际红外吸收光谱的最显著特征, 分别来自于硅酸盐的Si-O和O-Si-O振动, 这表明硅酸盐是星际尘埃的重要成分. 星际9.7和18 μm 吸收光谱带的主要特点是宽且平滑, 没有精细结构, 因此星际硅酸盐主要是非结晶的形式. 结晶(Crystalline)硅酸盐具有原子排列有序的晶格结构, 在9–40 μm 波段范围内有许多尖锐的特征谱带, 但这些特征谱带并没有在星际空间观测到, 因此通常认为星际硅酸盐结晶率低于5%^[17–19]. 然而, ISO和Spitzer光谱观测表明, 演化晚期恒星产生大量的结晶硅酸盐^[20]. Jiang等人^[21]报告了在一颗行星状星云周围(IRAS 16456-3542)含有极其丰富的结晶硅酸盐(>90%), 是迄今为止报告的有结晶硅酸盐的源中最高的. 星周尘埃是星际尘埃主要来源之一, 但星周结晶硅酸盐抛射到星际空间之后的去向令人困惑. 然而, 有研究者认为星际结晶硅酸盐的含量可能被严重低估了^[22].

国际上已有的尘埃空间原位探测项目对硅酸盐尘埃的结晶度也没有统一结论. NASA的空间探测项目Stardust航天器探测到的7颗星际尘埃里有2颗是结晶形式, 4颗是非结晶形式. Cassini航天器上的尘埃探测器探测到硅酸盐几乎都是非结晶形式, 与星周结晶硅酸盐不同. 这表明星周结晶硅酸盐在扩散到星际空间的过程中可能被宇宙线照射而非结晶化了, 或者被完全摧毁, 有学者认为星际空间中也能够形成尘埃^[23]. 表1给出了Stardust和Cassini航天器探测到的星际尘埃

性质.

硅酸盐尘埃主要有2种成分, 一种是含有4个氧原子的橄榄石(Olivine, $\text{Mg}_{2x}\text{Fe}_{2-2x}\text{SiO}_4$, $0 \leq x \leq 1$), 它是地球中最常见的矿物之一, 也出现在部分陨石、月球、火星及彗星上. 另一种是含有3个氧原子的辉石(Pyroxene, $\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x}\text{SiO}_3$, $0 \leq x \leq 1$), 它是一种常见的单链结构的硅酸盐造岩矿物, 广泛存在于火成岩和变质岩中.

碳尘埃是星际尘埃的另一重要成分, 但星际碳尘埃的具体化学组分和结构尚不清楚, 可能是结晶态的石墨或非结晶态的氢化无定形碳(Hydrogenated Amorphous Carbon). 星际消光曲线上最为显著的紫外2175 Å消光驼峰一度被认为是石墨的电子吸收跃迁产生的. 石墨也是陨石中通过同位素异常鉴别出的前太阳尘埃的重要种类之一. 另外, 弥漫星际云呈现的3.4 μm 吸收特征表明星际空间亦有氢化无定形碳尘埃, 其脂肪C-H键振动产生3.4 μm 吸收. 后来, 在星际空间观测到3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3和12.7 μm 红外发射光谱特征, 表明多环芳香烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH)分子也广泛存在于星际空间, 并且也很可能是2175 Å消光驼峰的载体. 与上矛盾的是, 尘埃空间原位探测项目Ulysses, Galileo, Stardust, Cassini等航天器都没有明确地探测到碳尘埃. 例如Stardust航天器探测的尘埃中有1颗成分不确定, 可能有碳, 极有可能是压缩气凝胶中的碳污染, 也不排除可能是星际尘埃的残留物. 在分析Cassini航天器的星际尘埃质谱时发现几乎所有谱中都看到了一个碳峰, 但是这些几乎都是来自探测器靶板的污染. 在忽略探测器靶板污染的情

表 1 Stardust和Cassini航天器探测到的星际尘埃性质

Table 1 Properties of ISDs detected by the Stardust and Cassini spacecraft

性质	Stardust	Cassini
探测到的星际尘埃数量	7(取回)	36(未取回)
有成分探测的尘埃数量	6	36, 成分差异小
硅酸盐	2结晶, 4非结晶	以非结晶为主, 缺少结晶硅酸盐
碳	可能	可能
铁	5(1富铁硅酸盐)	部分
富含镁的硅酸盐	6(2镁橄榄石)	基本上都是
氧化物	1	基本上都是
硫化物	3	需进一步分析
质量	大颗粒, 质量 3×10^{-12} g	小颗粒, 质量 5×10^{-13} g
结构	1颗可能是以碳为主, 1颗是具有核幔结构的单一硅酸盐, 5颗是不同尺寸(从微米到纳米)的物质组成的复杂聚合体	小于几百纳米的颗粒是紧凑的, 微米量级的颗粒可能是多孔聚合体

况下, 测到的C/O比值约为 0.32 ± 0.25 , 与本地星际云的星际介质中尘埃的C/O比值 0.32 ± 0.29 一致. 如果假设检测效率非常低, 则测到的C/O比值会降低到 <0.032 , 远低于星际介质尘埃的比值. 行星际尘埃含碳, 测量行星际尘埃的碳含量, 本身是很有意义的(如区分彗星起源-富碳, 小行星起源-贫碳). 而进入太阳系的星际尘埃是否含C是一个未知问题, 还没有定论. 目前空间探测到的含C尘埃样本数少, 有几种解释. (1) 含C尘埃在进入日球层之前的路程上很快就升华了, 因而在日球层内探测不到碳尘埃^[24], (2) 含C尘埃的辐射压大, 无法进入太阳系^[25]. 但是 Silsbee和Draine^[26]得出与Kimura^[25]不一样的结果. 实际上, Stardust测到的7颗星际尘埃中, 有1颗可能含C, 我们的观测计划将进一步限制进入太阳系的星际尘埃的碳含量.

在银河系的星际介质中, 形成尘埃的主要元素按星际参考丰度从高到低依次为氧(O)、碳(C)、镁(Mg)、硅(Si)和铁(Fe). 通常有90%或更多的铁从气相中消失^[27], 这表明铁是继O和C之后对星际尘埃质量贡献最大的元素, 占弥漫星际区域中尘埃质量的大约25%. 然而, 到目前为止, 人们对含铁物质的性质知之甚少. 硅酸盐颗粒以星际辉石或橄榄石类似物的形式为铁提供了一个可能的储存库. 然而, 星际介质中的气态铁的减损模式与Si和Mg的模式不同, 这表明Fe与Si并不都绑定在同一颗粒上, 因此大多数硅酸盐颗粒可能是以含Mg为主的. 另外, 星际 $9.7 \mu\text{m}$ 硅酸盐吸收特征的形状和强度也表明, 硅酸盐物质是富含镁的, 而不是富含铁的^[28]. 因此, 星际铁的很大一部分($\sim 70\%$)可能以其他形式存在, 如铁氧化物、铁硫化物或金属铁^[29-31]. 金属铁和铁氧化物的磁偶极辐射处于几十GHz的微波频率, 从而会影响宇宙微波背景辐射的精确测量, 也可能是宇宙奇异前景微波辐射的载体^[32].

2.3 星际尘埃结构和模型

基于天文观测现象和可能的尘埃成分, 人们提出了多种尘埃模型: 如“硅酸盐-石墨-PAHs”模型、“硅酸盐核-碳质壳”核幔模型、“复合尘埃”模型等. 此外, 由于观测到了星际偏振, 我们还知道星际尘埃是非球形的. 但碳尘埃和硅酸盐尘埃究竟是分离的、核幔形式、还是复合的, 我们并不清楚, 当前的几种主流尘埃模型各执一词.

经典且主流的硅酸盐-石墨模型是由两个物理上独立的球形尘埃成分组成, 每个成分在 $50 \text{ \AA}$ – $0.25 \mu\text{m}$ 的尺寸范围内具有幂律尺寸分布(简称MRN)^[33]. Draine团队^[14,34]扩展了硅酸盐-石墨模型, 加入了小颗粒的多环芳香烃成分作为碳尘埃的小尺寸末端, 尺寸分布也从简单的MRN幂律调整为多个对数正态分布, 构成“硅酸盐-石墨-PAHs”模型, 习惯简称为WD01模型.

在星际介质中, 由于粒子间的相互碰撞, 尘埃颗粒被打碎再重新凝聚组合, 就会形成疏松多孔的尘埃, 甚至是更复杂的结构. Greenberg^[35]在复杂的星际循环演化方案中提出核幔模型, 即硅酸盐核心-碳质壳模型. 该模型颗粒是较大的硅酸盐颗粒被一层含碳的有机难熔物质所覆盖, 这层材料是由冰混合物的紫外线光解产生的, 它试图模拟星际空间中发生的物理和化学过程. Li和Greenberg^[36]发展了该模型, 还加入了多环芳香烃成分和小石墨颗粒群, 以解释远紫外消光上升以及所谓的“未认证红外辐射带”和 $2175 \text{ \AA}$ 消光驼峰.

Wright^[37]认为尘埃会在超新星产生的激波中碎裂, 小颗粒碎片再聚合形成的星际尘埃颗粒应该具有不规则的结构. 基于此, Mathis和Whiffen^[38]提出了复合模型, 即星际颗粒由小颗粒硅酸盐、真空(体积约为80%)和各种碳(非晶碳、氢化非晶碳、有机难熔尘埃)复合组成, 尘埃颗粒在 0.03 – $0.9 \mu\text{m}$ 的尺寸范围内具有幂律尺寸分布. 此外, 为了解释 $2175 \text{ \AA}$ 消光驼峰, 该模型还需要一个单独的小颗粒的石墨成分. 鉴于星际介质中重元素的相对丰度可能低至太阳的65%^[39], 为了满足此丰度限制, Mathis^[40]修订了复合模型, 得出了一个约45%的真空度. 但Li^[41]从物理上证明引入真空度并不能降低星际消光对重元素丰度的要求. 后来, Zubko等人^[42]为了解释未认证红外辐射带又加入了小颗粒的多环芳香烃尘埃.

这些模型的最主要差异体现在尘埃的化学组分和结构上. “硅酸盐-石墨-PAHs”模型假定各尘埃成分分离的, 即石墨颗粒和硅酸盐颗粒在尺寸上是分离的. “硅酸盐核-碳质壳”核幔模型的石墨颗粒和硅酸盐颗粒是核幔的形式, 即硅酸盐颗粒被一层含碳的有机难熔物质所覆盖. “复合尘埃”模型假定星际尘埃是由小颗粒硅酸盐和非结晶碳尘埃复合组成, 结构疏松多孔(即含有一定体积的真空). 此外, 当前尘埃模型都不能解释观测到的红外偏振现象. 例如, 球形的“硅酸盐-石

墨-PAHs”模型不能解释存在的星际偏振现象. 核幔模型预测 $3.4\ \mu\text{m}$ 吸收特征是偏振的, 这与观测到的非偏振 $3.4\ \mu\text{m}$ 特征不符^[43]. 复合模型预测 $9.7\ \mu\text{m}$ 特征和 $3.4\ \mu\text{m}$ 特征具有相似的偏振度, 也与观测不一致. 基于空间站尘埃探测, 特别是尘埃的非破坏性检测, 我们可以获得关于尘埃的几何结构的信息, 从而区分这三类模型.

3 行星际尘埃

行星际尘埃是指起源于太阳系内小天体的尘埃, 包括彗星、小行星、柯伊伯带天体等甚至更远的奥尔特云. 它们受到引力与非引力效应的影响而演化. 本节将介绍行星际尘埃的起源和演化、化学组分及现有黄道云模型和微流星体分布模型.

3.1 行星际尘埃的起源和演化

彗星活动(近日时挥发、喷发甚或解体)、小天体间的碰撞等事件会产生大量不同尺寸的尘埃颗粒. 对地球轨道附近的尘埃颗粒而言, 其主要来源是木星族彗星(远日点在木星轨道附近, 公转周期小于20年), 其次是小行星. 在1AU附近, 最新的工作表明80%的尘埃颗粒来自木星族彗星, 19.5%来自小行星带, 0.5%来自哈雷型彗星(公转周期在20–200年之间)^[44]. 对外太阳系(木星轨道以外)而言, 尘埃的主要来源包括柯伊伯带天体、哈雷型彗星、木星族彗星以及奥尔特云彗星(起源于奥尔特云, 公转周期超过200年), 但目前尚缺乏有效观测数据约束, 关于各来源的尘埃颗粒在现有尘埃分布中的具体比重或它们的产生机制目前尚无定论^[45].

行星际尘埃颗粒在产生之后会在引力和非引力效应的作用下进一步演化. 无论何种尺寸的尘埃颗粒, 都会受到来自太阳和大行星(及其卫星)的引力影响. 取决于尘埃母体的轨道类型和所处区域, 该效应的效果也不尽相同. 尘埃颗粒有可能长期地“束缚”在某一共振或非共振区域之内, 也可能由于其轨道的混沌特性在多个共振区域之间来回穿越^[46], 从而逐步弥散至星际空间. 此外, 尘埃颗粒与大天体的近距离相遇事件会在短时间尺度上显著地改变其轨道, 使其从太阳系内的一个区域直接穿越至另一个区域^[47]. 与近地天体从主带区域演化至地球轨道附近类似, 上述两种机制

通常在一起作用, 即在混沌效应作用下尘埃离开其母体轨道, 并最终在大天体引力的直接作用下离开共振区域并逐步迁移至地球轨道附近.

尺寸较小的尘埃颗粒还受到太阳辐射的影响, 该效应主要以三种形式体现. 第一种形式是太阳光压产生的斥力, 对质量为 $10^{-11}\ \text{g}$ 以下的尘埃颗粒, 该斥力甚至会大于太阳引力, 此时尘埃颗粒在该斥力的作用下会离开太阳系. 事实上, 由于离心力的存在, 即使光压产生的斥力小于太阳引力, 尘埃颗粒也有一定概率会离开太阳系, 一般称这类可离开太阳系的微小粒子为 β -微流星体^[48]. 第二种形式是P-R (Poynting-Robertson)效应, 该效应会产生与尘埃运动方向相反的拖曳力, 在该拖曳力的长期作用下, 尘埃颗粒的轨道半长径会逐渐减小并最终演化至太阳附近而终结其寿命, 在此过程中尘埃颗粒的轨道也会逐步变圆. Grün等人^[49]的研究表明, 对质量小于 $10^{-9}\ \text{g}$ 的尘埃颗粒而言P-R效应是影响其通量的主导因素. 太阳风对尘埃颗粒轨道也会产生类似P-R效应的影响, 但一般而言要弱一些, 约为P-R效应的30%左右且受太阳活动影响^[50]. 第三种形式是Yarkovsky效应, 这是一种由粒子自转和有限热容造成的滞后辐射现象, 分周日效应与季节效应两种. 对尘埃颗粒而言周日效应并不明显但季节效应可能会对尘埃颗粒的整体迁移速率有影响^[51]. 除热力学效应外, 尘埃颗粒通常都会带有一定电荷, 粒子在行星际空间复杂的充放电过程^[52]以及变化的行星际磁场会使得尘埃颗粒的轨迹表现出复杂的动力学行为^[53].

除引力与辐射效应外, 尘埃颗粒间的碰撞效应也不可忽略. Dohnanyi^[54]的研究表明, 影响尘埃颗粒寿命的撞击类型主要为粒子间的粉碎性(Crushing)撞击事件而非冲蚀(Erosive)撞击事件. 对粉碎性撞击事件, 单纯考虑撞击效应, 当数量-质量分布满足一定的幂律关系时可取得平衡, 即一定数量的粒子会因碰撞事件而消失, 但同时又有相同数量的该尺寸粒子经由更大尺寸粒子的粉碎性撞击事件生成^[54]. 此外, Grün等人^[49]之前的研究工作表明, 对质量 $>10^{-5}\ \text{g}$ 的尘埃颗粒, 尘埃颗粒间撞击效应是影响其寿命的主要因素, 而对质量在 10^{-10} – $0^{-5}\ \text{g}$ 之间的尘埃颗粒, 其撞击生成率要远高于P-R效应移除的效率, 因此可能不是处于一个平衡状态. 另一方面, 最新的研究工作表明, 大尺寸的尘埃颗粒的碰撞平均时标可能要远大于其理论估计

值^[44], 因此质量在 10^{-10} – 0^{-5} g之间的尘埃颗粒的撞击生成率可能没有预先估计的那么高. 除尘埃颗粒间的碰撞事件外, 尘埃颗粒由于其组分以及松散的结构, 靠近太阳时会挥发或解体, 这也是影响尘埃颗粒数量的一个因素^[45].

现今观测到的尘埃颗粒的尺寸-通量分布是在上述多种效应共同作用下的结果, 至于该分布目前是否处于平衡状态, 尚待进一步观测数据证实. 可以肯定的是, 在上述效应的共同作用下尘埃颗粒会逐渐离开原轨道并弥散至周围甚或更远的区域, 因此通过各种途径收集到的尘埃颗粒可能与其来源区域相距甚远, 并且其形态和物质组成也可能发生了变化. 从动力学意义上针对单个星际尘埃颗粒开展溯源工作几乎不可能实现. 尽管如此: (1) 对速度较快的星际尘埃而言, 它们的轨迹为双曲线轨迹, 在系内的演化时间较短, 根据尘埃颗粒的质量、密度以及速度等信息, 可在较短时间内一定精度意义上反演其轨迹; (2) 不同来源的尘埃颗粒相对地球的入射速度有一定的大小和方向分布, 结合此信息以及探测信息可从概率上推测收集到的尘埃颗粒的可能来源. 这也是本项目的特色之一.

3.2 行星际尘埃的化学组分

行星际尘埃的尺寸在 $1\ \mu\text{m}$ – $1\ \text{mm}$ 之间, 典型值为 5 – $15\ \mu\text{m}$ ^[45,55]. 其形态蓬松多孔, 体密度(含孔隙)在 0.3 – $6.0\ \text{g/cm}^3$ 之间, 平均值为 $2.2\ \text{g/cm}^3$ 左右. 去除孔隙后, 其平均真密度为 $3.4\ \text{g/cm}^3$ 左右^[56]. 两相比较可得IDP的孔隙率为40%左右^[56].

IDP主要由硅酸盐、硫化物、含碳物质等构成, 按化学组分可分为球粒(Chondritic)和非球粒(Non-chondritic)两类. 球粒IDP在化学组分上与球粒陨石十分相似, 大部分元素的相对丰度都在CI型陨石(一种球粒陨石, 可能起源于主带内的含水碳质小行星^[46])的2–3倍以内^[55]; 非球粒IDP主要指富钙、富铝、富硅的难熔矿物、单晶硅酸盐、富铁硫化物等, 有些会附着细小的颗粒^[45,55,57]. 球粒IDP可以从形态上进一步分为多孔(Porous)和光滑(Smooth)两类, 分别简称CP和CS, CP由化学组分各异的亚微米颗粒聚合而成, 而CS则有着平板状或纤维状的结构^[45,55].

测量IDP在红外波段的吸收光谱可以推测其矿物学. Fraundorf等人^[58]率先在IDP的吸收光谱中发现了 $10\ \mu\text{m}$ 附近的显著的吸收特征, 并认为该特征可能来

自于镁铁硅酸盐. 在此基础上, Sandford和Walker^[59]测量了26个尺寸在 10 – $40\ \mu\text{m}$ 之间的IDP的吸收光谱, 发现 $10\ \mu\text{m}$ 附近的吸收特征普遍存在, 并且可以依据该特征的轮廓将IDP分为辉石类、橄榄石类和层状晶格硅酸盐类: 辉石类IDP在 10 和 $20\ \mu\text{m}$ 附近有吸收特征, 其中 $10\ \mu\text{m}$ 特征很宽, 由多个强度相当的吸收峰构成, $20\ \mu\text{m}$ 特征相对较窄, 但吸收更强; 橄榄石类IDP在 10.1 , 11.3 , $11.9\ \mu\text{m}$ 处有吸收峰, 强度递增; 层状晶格硅酸盐类IDP在 $9.8\ \mu\text{m}$ 处有对称且光滑的吸收特征, 多伴有 3.0 , 3.4 , 6.0 , 6.8 , $12.5\ \mu\text{m}$ 等处的弱特征. 在Sandford和Walker^[59]的样本中, 辉石类和橄榄石类各占25%左右, 以CP为主, 而层状晶格硅酸盐类占50%左右, 以CS为主.

目前认为, CP主要成分是无水结晶硅酸盐、GEMS (Glass with Embedded Metal and Sulfides)、硫化物、含碳物质等^[55]. 从形态上看, 这些物质先各自形成亚微米尺寸的颗粒, 而后才聚合形成蓬松多孔的结构. 总的来说, CP在 $10\ \mu\text{m}$ 附近的硅酸盐特征与彗星和年轻的Herbig Ae/Be星十分相似, 因而其母体可能是彗星^[55]. CS的主要成分是结晶度较低的水合层状晶格硅酸盐, 有些还含有碳酸盐^[60,61]. 水合硅酸盐的存在说明CS的母体上曾经发生过水蚀过程, 该过程存在于主带小行星中^[62].

彗星由原行星盘上的尘埃碰撞聚合而成, 保存了太阳系最原初的物质成分, 研究起源于彗星的CP可以帮助我们理解太阳系形成初期的物理和化学环境. CP中最常见的无水结晶硅酸盐是顽火辉石(MgSiO_3)和镁橄榄石(Mg_2SiO_4), 其中顽火辉石呈独特的平板状或晶须(Whisker)状, 可能是冷凝而成^[55,63]. 位于CP表层的硅酸盐晶体会长期受到太阳风和太阳耀斑粒子的辐照, 因而它们的表面会被不断剥蚀, 内部也会留下粒子径迹. Bradley等人^[64]从径迹的面密度(10^{10} – $10^{11}\ \text{cm}^{-2}$)估计出CP暴露在辐照下的时标约为 10^4 年. 此外, 长期辐照也会造成硅酸盐晶体边沿的氧、铁、镍、硫等元素超丰(相对太阳系元素丰度)^[65]. GEMS是一种 0.1 – $0.5\ \mu\text{m}$ 大小的内部有铁镍合金、富铁硫化物等夹杂物的椭球状镁硅酸盐^[55]. Bradley^[65]发现CP表层和内部的GEMS均表现出长期辐照造成的氧、铁、镍、硫等元素超丰, 其中铁、镍、硫的相对丰度甚至比CP表层的硅酸盐晶体还高, 这说明GEMS在CP形成之前就已存在. 另一方面, GEMS的吸收光谱与星际硅酸盐的

光谱十分相似, 它们都在 $9.7\ \mu\text{m}$ 处有光滑的吸收特征^[66], 因而有人认为GEMS可能起源于星际空间^[55,65]. 含碳物质是组成CP的另一重要成分, 它们遍及CP表里, 常作为基质包裹在矿物颗粒周围^[55]. Flynn等人^[67]在IDP的吸收光谱中发现了 $3.4\ \mu\text{m}$ 附近的吸收特征, 证实了IDP中存在脂肪碳氢物质. Clemett等人^[68]利用质谱仪在IDP中发现了PAHs, 这些PAHs的分子质量在200–300 amu之间, 且多为奇数, 可能是仅有两三个苯环的含氮PAHs.

3.3 现有黄道云模型和微流星体分布模型介绍

利用搭载在Helios探测器上的光度计, Leinert等人^[69]成功地测得了相同散射几何下0.3–1AU的黄道光强度的变化, 并据此得出了1AU之内黄道云尘埃颗粒的丰度随日心距离的变化关系($\sim r^{-1.3}$). 此外, 该工作指出尘埃颗粒的分布在空间近似对称, 且对称平面相对黄道面的轨道倾角限制在 2° 以内. 根据这些结果, Leinert和Grün^[70]推测黄道云的结构为透镜状结构, 短长轴比约为1:7. 在1AU之外, Pioneer 10号和11号携带的光度计的探测结果表明, 大约在3.3AU之外黄道光的强度已与背景光的强度相当^[71].

行星际尘埃只散射很少的日光, 超过90%的日光被吸收然后在红外波段辐射, 因此红外探测是行星际尘埃的有效探测手段. IRAS (Infrared Astronomical Satellite)卫星在12, 25, 60和 $100\ \mu\text{m}$ 波段进行了巡天观测, 该卫星的观测结果表明黄道云存在一些明显的结构, 譬如证实了小行星尘埃带的存在并发现很多彗星留下的痕迹^[72]. COBE (Cosmic Background Explorer)卫星的进一步观测给出了黄道云中更为精细的结构^[73], 该卫星的观测结果表明在地球轨道附近黄道云存在聚集现象(尘埃环), 这种现象可能与尘埃颗粒和地球的共振现象有关^[74].

建立行星际尘埃的分布模型对预测航天器轨迹可能经历的微流星体撞击风险、指导探测器的参数设计以及规划探测器运行过程中的轨迹、对探测结果进行科学分析等至为重要. 根据早期的空间探测数据(Explorer 16号、23号和Pegasus卫星), 结合地面雷达探测HRMP的结果, Cour-Palais^[75]建立了NASA最早的地球附近的尘埃模型. 该模型指出地球附近的尘埃环境与行星际空间相比并无明显差别, 因此探测器采取一般的防护措施已足够保障安全, 使阿波罗探月任务得以

实施. 结合月表微陨石坑的数量统计以及Pegasus卫星的观测结果, 并考虑尘埃颗粒之间的相互碰撞, Grün等人^[49]给出了1AU附近的星际尘埃分布模型, 该模型适用质量在 10^{-18} –1 g之间的尘埃颗粒. 对直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的尘埃颗粒而言, 该模型给出的尘埃数量要比基于月表微陨石坑统计给出的数量低两个量级. 该分布模型采用了直观明显的数学公式, 便于使用, 图2给出了基于该公式的结果.

基于雷达观测数据、Helios和Pioneer 10号的探测以及Grün的尘埃模型, 结合星际尘埃的五个可能来源区域(考虑了二体轨道), Divine^[76]也建立了相应的尘埃模型, Staubach等人^[77]在此模型的基础上进一步加入了辐射效应的影响以及Ulysses、Galileo和其他一些原位探测的数据. Jones^[78]于2004年开始建立NASA的MEM (Meteoroid Engineering Model)系列模型和相关软件, 迄今已有多个版本, 最新版本为MEM-3^[79].

与上述经验估计模型相对应的是基于动力学数值模拟的演化模型. 第一个此类模型是ESA的IMEM (Interplanetary Meteoroid Environment Model)模型^[80], 最新的版本是IMEM2^[81]. 类似的模型还有Nesvorný等人^[82]提出的动力学模型. 这类模型的通常做法是考虑一定数量的、不同来源的(木星族彗星、哈雷型彗星、长周期彗星、主带小行星等)行星际尘埃. 首先基于这些天体的轨道随机生成大量尘埃颗粒的初始样本, 综合考虑引力和非引力因素以及尘埃颗粒间的撞击效应, 并进行长时间的动力学积分. 通过这些积分

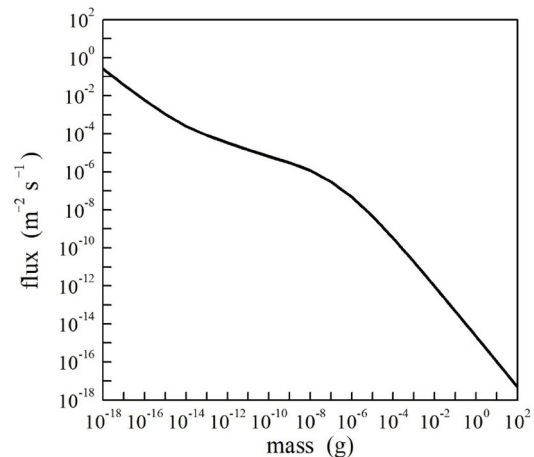


图2 Grün给出的行星际尘埃分布模型^[49]

Figure 2 The IPD flux model given by Grün (reproduced by the formulae given by ref. [49]).

结果模拟尘埃分布的理论值. 然后, 将这些理论值与实测值(黄道光亮度、空间探测器的原位探测)进行比对, 从而修正模型参数(如粒子的初始尺寸-数量分布关系、不同来源粒子的占比、粒子的总通量等), 并最终给出与实际观测相符的模型参数. 最新的研究比较了Grün模型、MEM3模型以及IMEM2模型的结果^[81], 该研究表明各尘埃分布模型给出的通量分布相一致.

4 宇宙尘埃空间探测进展

除了“间接”观测宇宙尘埃颗粒, 国际上还一直有利用航天器、空间站、卫星等进行宇宙尘埃的直接原位研究. 本节将介绍已有的主要原位探测项目及进展.

4.1 近地空间的尘埃探测

本节概述了过去30年间利用空间站、卫星和航天器在近地空间进行原位尘埃观测的各种任务. 这些任务搭载了不同类型的尘埃探测器, 主要通过分析撞击参数来区分人造碎片和自然尘埃颗粒, 并估算尘埃颗粒的通量.

4.1.1 和平号空间站Orbital Debris Collector实验

俄罗斯和平号空间站上搭载的轨道碎片收集(Orbital Debris Collection, ODC)实验, 其目的是捕获并返回低地球轨道上的人造和自然来源的颗粒, 以详细评估其成分构成和可能的来源, 并评估和平号高倾角轨道(51°)上的人造碎片环境.

ODC轨道碎片收集器采用了高度多孔、低密度(0.02 g/cm^3)的 SiO_2 气凝胶(0.63 m^2)作为基本收集介质. 于1996年3月23日被放置在和平号空间站上, 并在空间停留18个月后, 于1997年10月10日收回^[83]. 返回的ODC收集器显示了各种撞击特征. 从气凝胶中回收了许多保存完好的、未熔化的人造和自然尘埃颗粒的残留物, 表明尽管对超高速粒子的软捕获是有速度限制的, 但是气凝胶是低地球轨道中大多数颗粒的最佳捕获介质^[83,84]. ODC实验捕获的大多数粒子的直径小于 $20 \mu\text{m}$, 尺寸大于 $100 \mu\text{m}$ 的冲击物非常罕见. 其中, 有两个微流星体的最长尺寸是~5和~30 μm , 分别由富含铁的橄榄石、陨硫铁、两个嵌入无定形硅酸盐物质的尖晶石组成, 以及由富含铁的橄榄石、高钙辉石和蛇纹石组成^[84].

4.1.2 国际空间站上的尘埃探测实验

国际空间站上的尘埃探测MPAC&SEED实验(以下简称MPAC&SEED实验)是利用日本宇宙航空研究开发机构的微粒子捕获器(MPAC)和空间环境暴露装置(SEED)在国际空间站外部进行的空间材料暴露实验^[85]. MPAC&SEED实验分两个项目, 分别在国际空间站上的日本实验舱(简称JEM/MPAC&SEED)和国际空间站上的俄罗斯服务舱(简称SM/MPAC&SEED)上进行.

2009年7月23日至2010年4月9日, 作为JEM/MPAC&SEED实验的MPAC样品的 SiO_2 气凝胶和金板被暴露在太空中约8.5个月(259天). 其中, 气凝胶可以捕捉颗粒并估计撞击参数, 而金板用于测量撞击孔的数量并观察其形状. Waki和Kimoto^[86]报道了对该实验捕获的一些微粒子的撞击形态和粒子痕迹的初步分析结果, 可能捕捉到微流星体, 未来还需对颗粒进行详细分析.

SM/MPAC&SEED实验采用超低密度 SiO_2 气凝胶(约 0.03 g/cm^3). 2001年, 三个相同的单元(每个单元的尺寸为宽570 mm, 高900 mm, 深158 mm)被暴露在太空中, 每个单元分别于2002年、2004年和2005年从国际空间站取回^[85]. Noguchi等人^[87]报道了在国际空间站捕获的一颗微流星体(命名为Hoshi)的矿物学、岩石学和氧同位素组成. 这个微流星体具有斑状橄榄石球粒的结构, 是一个球粒状天体的碎片, 它来自一个经历了热变质作用的原始母体.

4.1.3 SPADUS探测及尘埃溯源

Tuzzolino等人^[88]分析了Earth-orbiting Advanced Research and Global Observation Satellite (ARGOS, 轨道高度850 km)上搭载的Space Dust (SPADUS)探测器的数据, 探测到的尘埃颗粒尺寸范围为 $3.3\text{--}200 \mu\text{m}$. SPADUS的原理和聚偏氟乙烯(PVDF)探测器原理基本相同, 但 SPADUS 可以探测空间碎片的基本运行轨迹, 以了解碎片和碎片流的飞行轨道. SPADUS的PVDF尘埃轨迹系统在大约470天的时间间隔内共检测到258次尘埃撞击(16个探测器, 表面探测面积 $\sim 36 \text{ cm}^2$, 共 0.0576 m^2), 通量约为 $3.5 \times 10^3 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. 其中, 24次是D1-D2类型的事件, 即粒子冲击并穿透D1传感器然后冲击D2后部阵列传感器. 通过测量这24次事件中尘埃

颗粒的轨道, 可将自然起源的粒子与人造碎片分离, 由此识别出11个轨道碎片、7次行星际尘埃撞击和6次不确定来源撞击. 轨道碎片速度约为8 km/s, 行星际尘埃速度约为12.5 km/s.

4.1.4 其他尘埃探测或空间碎片项目

LDEF (Long Duration Exposure Facility)设备表面积约130 m², 在近地轨道空间运行了5.7年, 记录了大量与空间碎片和IDPs碰撞的信息, 其测得的1AU处尘埃颗粒直径峰值约为250 μm^[89].

Poppe等人^[90]分析了搭载在Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM)卫星上的Cosmic Dust Experiment (CDE)数据(2007年5月至2008年2月), 给出了400 km轨道附近的尘埃/碎片流量(按密度为2.5 g/cm³的球型颗粒计算). CDE为PVDF探测器, 测量范围为1.5–8 μm, 收集面积为0.11 m², 时间分辨率为1 s. CDE探测到的尺寸为1.5 μm的IDPs通量约为 $5 \times 10^3 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 而NASA通量模型给出的1.5 μm通量约为 $1.2 \times 10^3 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 0.1 μm通量约为 $1 \times 10^4 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$.

另外, 两艘STEREO (Solar TERrestrial Relations Observatory)航天器上的等离子WAVES探测器记录了两种类型的电压尖峰信号^[91], 其中一种信号来自太阳方向(只有一个天线收到)的尺寸约为350 nm的尘埃颗粒通量的强烈变化, 另一种宽带信号三个天线都有收到, 确认是源自亚微米和微米大小的尘埃颗粒撞击, 尺寸与经典的行星际和星际尘埃颗粒大小相当^[81]. 来自太阳方向的纳米大小尘埃颗粒的行星际通量仍然缺乏独立确认, 因此一直受到质疑^[92].

Zaslavsky等人^[93]分析了2007年至2010年期间, 由两台STEREO航天器上的S/WAVES仪器记录的尘埃撞击数据, 测量覆盖了 $\sim 10^{-19}$ – 10^{-17} g (纳米尺寸)和 $\sim 10^{-14}$ – 5×10^{-13} g (微米尺寸)的质量范围. 微米尺寸尘埃的通量与不同航天器上其他仪器的测量结果一致. Malaspina和Gosling^[94]在重新分析STEREO的数据后认为, 纳米尘埃的高通量会干扰微米尘埃的识别, 导致微米尘埃的通量被低估. STEREO无法直接通过尘埃颗粒的速度(>10 km/s)来区分行星际尘埃和星际尘埃, 但可以通过尘埃撞击时航天器的轨道(或姿态)来做区分.

Hirai等人^[95]分析了ALADDIN (The Arrayed Large-Area Dust Detectors in INterplanetary space)尘埃探测器在2010–2011年约300天观测期的测量数据,

给出了地球与金星轨道之间(0.72–1.1AU)大于10 μm的尘埃颗粒的空间数密度以及1773次最有可能的尘埃撞击事件. ALADDIN尘埃探测器的有效面积为0.54 m², 基于1AU距离处的典型撞击速度, ALADDIN探测器可以测量的尘埃颗粒质量范围为 6.3×10^{-11} – 1.2×10^{-8} g, 对应粒子直径约为4–22 μm (假设粒子密度为2.0 g/cm³).

4.2 深空尘埃探测

来自本地星际云的星际尘埃在1992年首次被明确地探测到^[96]. 从那时起, 在使用各种方法观测太阳系中的本地星际尘埃方面已经取得了很大的进展. 本节概述过去30年间利用航天器搭载尘埃探测器进行原位观测和样品返回的各种任务在探究星际尘埃方面的情况. 包括来自Ulysses, Calileo和Cassini任务中获得的星际尘埃流量、速度、方向和尺寸分布的原位测量, 来自Cassini的飞行时间测量和来自Stardust的星际尘埃成分测量, 以及最新的New Horizon深空探测任务进展.

4.2.1 Ulysses

Ulysses尘埃探测器任务是在整个太阳纬度范围内探索太阳附近几个天文单位内的日球层, 直接探测行星际空间中质量在 10^{-16} – 10^{-6} g的尘埃颗粒, 研究尘埃颗粒的物理和动力学特征^[97]. Ulysses尘埃探测器还分析彗星、小行星和星际粒子所占的比例^[98]. Ulysses尘埃探测器是一个多重冲击电离探测器, 尘埃颗粒的质量和撞击速度是通过测量撞击电荷信号的振幅和上升时间确定的. 根据实验室对碳、硅酸盐和铁尘埃颗粒的撞击校准推断, 在20 km/s的撞击速度下, 质量敏感阈值为 4×10^{-15} g, 在40 km/s的撞击速度下, 质量敏感阈值为 6×10^{-16} g.

Ulysses尘埃探测器搭载在Ulysses航天器上, 于1990年10月6日发射, 2009年6月30日结束, 在轨道上运行了18年8个月24天, 航天器在70度以上的日面纬停留234天^[96]. 早期Landgraf等人^[16]对1992年和1998年之间测量的Ulysses星际尘埃数据的分析表明, 存在着一群质量高达 10×10^{-10} g的“大”的星际颗粒. 得出的气体与尘埃的质量比小于从天文观测中得出的比率, 这意味着星际尘埃集中在非常局部的星际介质中. Krüger等人^[99]分析了进入日球层的星际尘埃颗粒的质

量分布, 这些尘埃颗粒来自1992年2月至2007年11月期间获得的16年的Ulysses星际尘埃测量的整个数据集. 在Ulysses尘埃数据中, 总共确定了987个星际尘埃撞击. 在日球层中存在着尺寸范围从 $0.05\ \mu\text{m}$ 到 $>1\ \mu\text{m}$ 的星际颗粒. Ulysses在距太阳5AU范围内原位测量的总体尘埃尺寸分布与天文观测到的星际介质中的星际尘埃相比, $0.3\ \mu\text{m}$ 以下的小颗粒尘埃是不足的^[100,101]. 这是因为小尘埃颗粒被过滤掉了, 且探测器对小尘埃不敏感. Krüger等人^[99]得到的气体与尘埃的质量比约为193, 这个数值与通过对恒星视线的观测得出的气体与尘埃的质量比一致. Krüger等人^[99]的分析也证实了先前的结果, 即“大”(即 $\approx 1\ \mu\text{m}$ 大小)的星际颗粒存在于非常局部的星际介质中, 不容易被天文观测到.

4.2.2 Galileo

Galileo尘埃探测器的任务之一是直接观测行星际空间和木星系统中质量在 10^{-16} – $10^{-6}\ \text{g}$ 的尘埃颗粒, 以研究它们的物理和动力学特征^[98]. Galileo尘埃探测器与Ulysses航天器携带的尘埃仪器几乎完全相同, 也是一个多重冲击电离探测器, 能够测量尘埃撞击速度、质量和撞击方向, 以及可能的粒子电荷^[102,103].

Galileo尘埃探测器搭载在Galileo航天器上, 于1989年10月18日发射, 2003年9月21日结束任务. Galileo星际尘埃测量是在1989年12月至1993年底期间获得的, 当时该探测器正在金星和火星轨道内穿越行星际空间, 有三个轨道段有利于在低于3AU的日心距离上探测到星际尘埃^[2]. Landgraf等人^[104]分析Galileo尘埃探测器收集到的数据确定了2.5AU以外的星际尘埃. Altobelli等人^[2]进一步分析得到了低至0.7AU的星际尘埃结果. Altobelli等人^[2]的结果与Landgraf等人^[104]一致, 并证实了之前Ulysses尘埃数据分析的结果, 即辐射压阻止了较小的星际尘埃颗粒(半径小于 $0.3\ \mu\text{m}$)到达太阳系的最内部区域. 此外, 他们的分析还表明, 引力聚焦效应在较大的星际尘埃颗粒(微米大小的颗粒)动力学中的重要性. 该效应导致这些颗粒在靠近太阳的区域密度增加, 并且影响尘埃颗粒的空间分布.

4.2.3 Cassini

Cassini-Huygens任务旨在探索行星际空间以及木卫二和土星系统中小尘埃颗粒的物理、化学和动力学特性. 利用搭载在Cassini航天器上的宇宙尘埃分析

器(Cosmic Dust Analyzer, CDA)对质量在 10^{-16} – $10^{-6}\ \text{g}$ 之间的尘埃颗粒进行直接观测, 研究它们的物理、化学和动力学特性与太阳、木星、土星及其卫星和星环的距离的关系, 以及它们与土星环、卫星和磁层的相互作用^[105]. Cassini航天器1997年发射, 2017年坠入土星大气, 在空间20年, 探索土星13年.

Altobelli等人^[2]分析Cassini航天器上的宇宙尘埃分析仪收集的2004年至2013年这10年的数据, 获得颗粒的质量分布、元素组成信息, 并判断这些颗粒是否为星际尘埃颗粒. 由于样本没有返回地球, 这些颗粒是否为星际尘埃颗粒, 主要是根据运动方向和速度判定的. 他们报道探测到了来自本地星际云的星际尘埃颗粒穿过了土星系统, 并确定了其中36颗星际颗粒的质量分布、元素组成以及土星的星际尘埃流量的下限, 见表1. 对这些颗粒进行物质分析后发现其成分差异小, 主要成分是一些成岩元素(镁、硅、铁和钙)构成的富含镁的硅酸盐和氧化物. 部分含有铁的包裹体, 但是硫和碳是缺乏的. Cassini航天器实际探测到的星际尘埃质量分布峰值位于约 $10^{-14}\ \text{g}$ (只代表小颗粒), 没有探测到大颗粒, 也没能探测到非常小的颗粒.

4.2.4 Stardust

Stardust航天器主要搜集彗发中的尘埃, 1999年发射, 2004年飞越彗星81P/Wild-2, 2006年释放返回器, 历时7年. Stardust航天器通过星际尘埃收集器(由气凝胶和铝箔组成)捕获尘埃颗粒, 并返回地球进行实验室分析颗粒的性质, 包括质量、成分、结构以及捕获速度.

Westphal等人^[106]报告了探测到Stardust航天器返回的可能来自星际的7颗星际尘埃颗粒(颗粒特征与星际尘埃流中的星际尘埃特征一致^[3]), 见表1. 其中3颗是通过气凝胶探测到的, 直径 $>1\ \text{mm}$ 的超大颗粒, 比星际介质的观测中确定的最大尘埃尺寸要大几百倍, 另外4颗是通过铝箔探测到的, 尺寸接近典型颗粒 $200\ \text{nm}$. 分析发现这7颗候选的星际颗粒的元素组成与星际尘埃的预测基本一致. 在元素组成、晶体结构和尺寸方面虽然有一些共同特征, 但又是多样的. 其中6颗颗粒的成分可以确定, 都有富含镁的硅酸盐成分, 但是没有碳. 剩下的1颗成分不确定, 可能有碳, 但极有可能是压缩气凝胶中的碳污染, 也不排除可能是星际尘埃的残留物. 在5颗颗粒中(Orion, Hylabrook以

及1061N,3, 1061N,4和1061N,5陨石坑), 还观察到1颗或多颗有明显的富铁相, 但是铁的化学形式是不确定的, 可能是纳米金属铁或FeS. 同时, 是否存在硫化物尘埃成分是一个有争议的问题, 不能排除FeS纳米颗粒是星际尘埃的一个组成部分的可能性. 气凝胶探测到的尘埃颗粒Orion和Hylabrook中的硅酸盐成分出乎意料都是结晶的, 而在铝箔中捕获的颗粒的残留物是无定形的. 悬而未决的问题是, 收集到的这些星际颗粒与通过尘埃与电磁辐射相互作用间接推断出的任何一种星际尘埃都存在差异. Stardust航天器探测到的星际尘埃成分、结构、尺寸也与后来的Cassini航天器的探测结果不一样(表1).

4.2.5 New Horizon

New Horizons任务旨在探测冥王星及其卫星系统, 并进一步探索柯伊伯带^[107]. New Horizon号航天器于2006年1月19日发射, 在2007年2月28日飞过木星, 在2008年6月8日飞过土星的轨道; 在2015年7月14日飞过冥王星的轨道. New Horizon航天器上携带着一个尘埃计数器(Venetia Burney Student Dust Counter, SDC). 该仪器由学生设计、建造、测试、集成, 现在由学生操作, 是New Horizon号任务的教育和公共推广工作的一部分^[108]. SDC是一个基于撞击的尘埃探测器, 被超高速尘埃颗粒撞击时会产生一个电信号, 由14个永久偏振的PVDF冲击传感器组成, 传感器的总敏感面积约为 0.1 m^2 , 其中12个暴露在太空中, 其余2个参考传感器被屏蔽并放置在仪器的底部. SDC能够探测质量在 10^{-12} – 10^{-9} g 范围内的颗粒^[107–109]. SDC将测量太阳系中从1AU到至少40AU的尘埃颗粒的密度和质量, 旨在描绘整个太阳系行星际尘埃群的大小和空间变化.

Poppe等人^[109]首次报告了SDC前四年的测量结果, 包括首次对外太阳系中亚微米级颗粒的测量. 在5AU内进行的SDC测量与之前Ulysses和Galileo测量的结果比较后发现在考虑仪器灵敏度、观测区域和指向性情况下, 三个仪器在内太阳系的行星际流量测量结果是很一致的. Piquette等人^[110]介绍了1–38AU的尘埃密度分布的最新结果. 与预期相比, SDC数据中似乎缺少大颗粒尘埃. 在航天器休眠的所有名义观测期内 (~5.5年)记录到的最大颗粒质量是 $6 \times 10^{-11} \text{ g}$. 此外, 记录到大于 $5 \times 10^{-11} \text{ g}$ 的颗粒的次数为0, 而模型预测的次

数为10–50.

5 我国空间站尘埃探测载荷方案

综上所述, 目前国际上对宇宙尘埃的探测既有通过尘埃与电磁波相互作用获得的“间接”探测(即星际消光、散射、红外辐射), 也有基于“原位”探测的宇宙尘埃探测或者宇宙尘埃收集项目. 而我国目前在星际尘埃的研究方面, 主要集中于星际消光的测定与模拟. 目前对尘埃的认知, 尚有相当的不确定性, 如星际尘埃(特别是微米尺度的大尘埃)的尺寸分布, 尘埃的化学组成、结构和形状, 尚无定论, 当前流行的几种星际尘埃模型, 在尘埃的化学组分和结构方面存在显著差异. “原位”探测方面, 目前存在可溯源尘埃无法开展详细理化分析, 捕获尘埃无法准确溯源的问题.

为解决这些问题, 我们提出基于我国空间站的宇宙尘埃探测项目, 即“凌霄探尘”计划: 利用我国在轨运行的空间站, 研制“宇宙尘埃探测与捕获器”并安装在我国空间站舱外, 开展“原位”的宇宙尘埃探测与捕获. 利用空间站独特的可返回地面的优势, 将捕获的尘埃样本带回到地面实验室开展详细的理化分析. 不同于以往的宇宙尘埃收集项目, 本项目将在捕获的同时, 测量被收集尘埃颗粒的速度矢量、质量、电荷等基本物理参数, 这些参数可提供有力的尘埃溯源证据, 从而使我们能准确判定其来源.

“凌霄探尘”计划的优势在于可以同时进行尘埃的溯源和捕获. 通过动力学溯源, 可以推测收集到的尘埃颗粒的来源(即星际还是行星际). 非破坏性捕获尘埃, 能够允许我们测量其尺寸、分析其结构以及化学成分. 这些信息对于构建新一代星际尘埃模型, 深入了解行星际尘埃的起源和演化, 以及研究太阳系从原始太阳星云到彗星和小行星形成的全过程都非常重要.

宇宙尘埃探测与捕获器在探测期间将运行在空间站约400 km高度的近地圆轨道上, 可能收集到的尘埃颗粒包括星际尘埃、行星际尘埃、微流星体、微小(人造)空间碎片等.

5.1 探测仪器方案设计

宇宙尘埃探测与捕获器将固定安装在我国载人空间站舱外, 在轨测量宇宙尘埃颗粒的质量和速度矢量, 并捕捉宇宙尘埃颗粒. 探测器基本技术指标如下:

探测质量范围: $5 \times 10^{-18} - 1 \times 10^{-6}$ kg;

探测速度范围: 10–50 km/s. 速度在10 km/s以上可以规避400 km高度轨道附近空间碎片的污染; 限制在50 km/s以下可以减少尘埃颗粒的破碎;

探测器敏感面积: 0.09 m^2 ($30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$).

设备的指向根据科学需求和工程约束而定. 宇宙尘埃探测与捕获器由径迹探测器、PVDF探测器、气凝胶收集器及配套的主体结构、电子学、热控和软件构成, 结构如图3所示.

径迹探测器由四组低电容的金属丝网栅构成, 高速飞行的宇宙尘埃通过金属网栅产生相应的感应电荷, 结合入射时间信息可以获得其入射角度、飞行速度、表面电荷等参数, 从而推演出宇宙尘埃的轨迹. PVDF探测器由多片PVDF薄膜组件拼接构成, 高速飞行的宇宙尘埃在其表面轰击产生高速、微弱电荷脉冲信号, 可以推算出入射粒子的动量参数; 结合径迹探测器的尘埃速度信息, 可以推算出入射尘埃颗粒的质量; 亦可根据PVDF薄膜表面撞击“孔洞”的形态和数量, 估算出入射尘埃颗粒的边缘特性和入射通量. 气凝胶收集器由气凝胶阵列和回收装置组成, 对捕获到的宇宙尘埃进行瞬间形态保存, 由航天员或机械臂取出并由货运飞船安全带回地面实验室供科学研究.

径迹探测器结构如图4所示, 主要包括屏蔽金属网、金属网栅、支撑结构、信号处理阵列等. 在复杂的空间电磁环境中, 屏蔽金属网为径迹探测器提供了稳定的电势场, 提升微弱信号探测的精准度; 两组正交金属丝网栅可捕获宇宙尘埃穿过时的位置信息, 空间分辨率与金属丝的数量和信号处理阵列的信噪比

相关.

径迹探测器的核心组件是两组金属网格结构, 包括入口网格和出口网格, 采用金属丝形成镂空结构允许宇宙尘埃自由进出, 分别用来测量宇宙尘埃入射和出射的位置坐标. 金属丝直径越小, 宇宙尘埃轰击在其表面的几率就会显著减小. 金属网格由在空间结构上正交的两片金属网栅组成, 分别对应平面内的一维坐标系. 高速带电荷粒子在穿越金属丝网栅的过程中, 产生纳秒量级的微弱脉冲信号, 经过电荷灵敏放大、脉冲整形后获取到的电脉冲参数与宇宙尘埃的速度、入射轨迹相关, 其测量原理如图5. 相邻两片金属网栅之间要确保正交关系, 整体放置在接地的屏蔽网栅内部, 降低空间电磁环境对入射微弱信号的影响.

在径迹探测器中涉及到多路高速、微弱电荷脉冲信号的放大、处理、鉴别、采集、存储等工作, 对于宇宙尘埃参数的计算至关重要. 其核心主要包括: 电源适配单元、探测器单元、信号处理单元、信号控制单元、热控电源、时钟单元、数据存储单元、数据传输单元等. 对于径迹探测器, 其中多通道微弱电荷信号的放大质量对宇宙尘埃的特性判定和分析起到了决定性作用.

PVDF尘埃探测器结构如图6所示, 主要包括: PVDF薄膜组件、支撑散热结构和导热层. PVDF薄膜组件采用永久极化材料薄膜制作, 其极化矢量垂直于薄膜组件的表面. 高速入射的尘埃颗粒轰击PVDF薄膜表面时, 会对偶极子产生瞬间的局部破坏, 在PVDF薄膜表面形成“弹坑”或者“孔洞”, 从而产生随机、高速、微弱的电荷脉冲, 该信号脉宽约为数十纳秒. 该信号强度、脉冲形状与撞击尘埃颗粒的质量和速度相

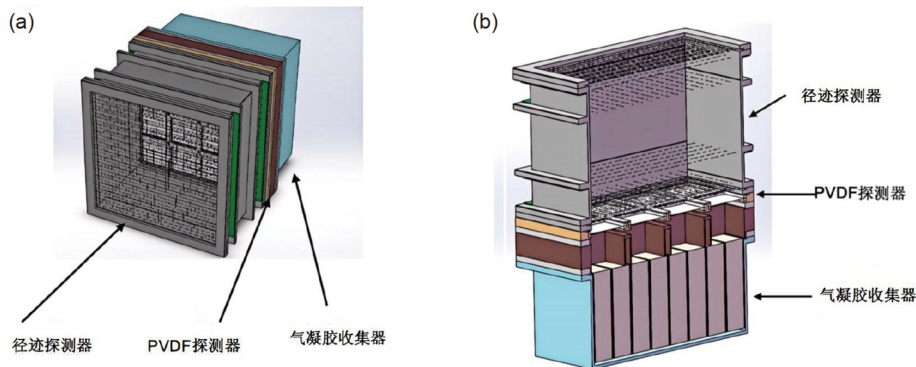


图 3 (网络版彩图)宇宙尘埃探测与捕获器(不含主体结构、电子学、热控等)三维模型图. (a) 整体视图, (b) 剖面视图

Figure 3 (Color online) 3D model of cosmic dust detector (excluding main structure, electronics, thermal control, etc.) (a) Overall view, (b) sectional view.

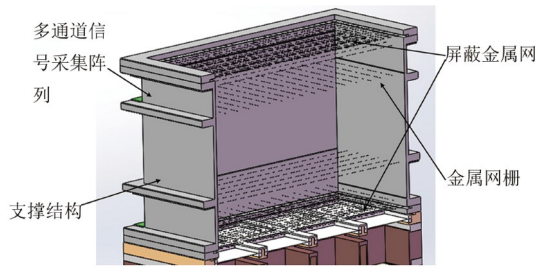


图 4 (网络版彩图) 径迹探测器结构图

Figure 4 (Color online) 3D Model of track detector.

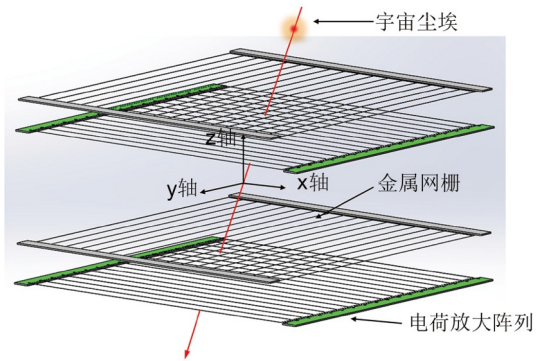


图 5 (网络版彩图) 径迹测量原理

Figure 5 (Color online) Principle of track measurement.

关, 结合径迹探测器的速度矢量结果, 能够推算出宇宙尘埃的质量. 同时, 穿透PVDF薄膜继续飞行的尘埃颗粒碎片会射入气凝胶内部, 由PVDF薄膜产生的脉冲信号可对其位置信息进行有效标记. 另外, 宇宙尘埃在PVDF薄膜表面轰击形成的“孔洞”直径主要由其轰击时的投影表面决定, 可用于尘埃轮廓的预估.

PVDF探测器的原理是通过尘埃撞击并穿透PVDF薄膜产生的电荷脉冲信号计算入射宇宙尘埃颗粒的质量, 测量原理如图7所示. PVDF是一种有机压电

聚合物, 由PVDF薄膜制作的大面积压电冲击传感器, 输出信号与尘埃的质量和速度相关, 利用尘埃径迹探测器的速度数据, 就可以结算出尘埃颗粒的质量.

气凝胶收集器由包裹在铝箔中的低密度气凝胶块组成, 结构模型如图8所示. 当宇宙尘埃高速撞击到气凝胶时, 将进入气凝胶内形成萝卜状尘埃轨迹, 并最终被气凝胶所收集.

SiO_2 气凝胶的密度可以制备连续可变、前低后高, 这样密度逐渐变化的方式可以减少高速宇宙尘埃颗粒在与气凝胶撞击过程中瞬间产生的热量, 从而尽量降低对捕捉到的宇宙尘埃颗粒物质形态的影响. 依据项目研究的实际需要, 气凝胶被分割成许多小块, 便于样品的安装、固定、检查和分配, 尺寸初步为 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 3\text{ cm}$. 另外, 为防止气凝胶在发射、航天员操作、货运飞船下行过程中的污染、损坏, 需要设计特殊的密封保护装置.

5.2 科学目标和拟解决关键科学问题

项目主要利用空间站平台开展宇宙尘埃颗粒的捕获与溯源, 并将捕获的尘埃样本送到地面开展精细理化分析. 通过对已经溯源的恒星际和行星际尘埃颗粒的实验室研究, 完善现有尘埃模型. 主要科学目标包括:

为银河系微波前景辐射、宇宙微波背景辐射的精确测量提供基础, 从而为原初引力波探测提供必要条件.

对太阳系内星际尘埃的热辐射、宇宙红外背景辐射的精确测量提供基础.

对探索从原太阳星云到太阳系的形成和演化提供直接证据.

本项目同时能增进对极端环境下的固体材料生存

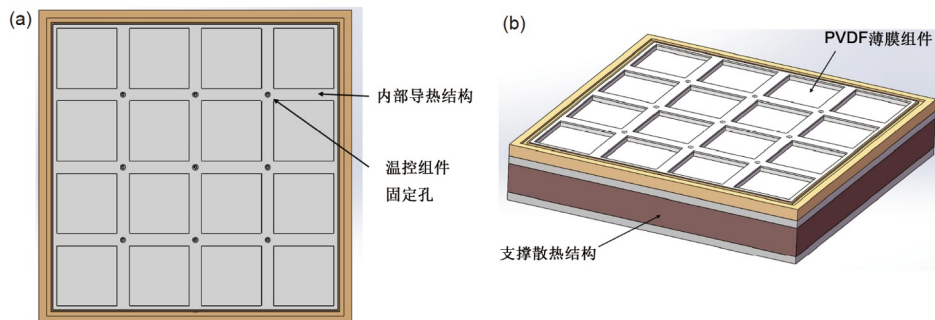


图 6 (网络版彩图) PVDF探测器模型图. (a) 俯视图, (b) 侧视图

Figure 6 (Color online) Model of PVDF detector. (a) Top view, (b) side view.

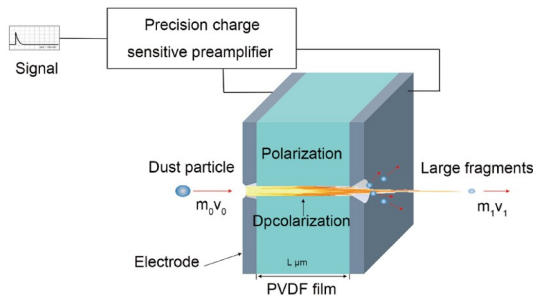


图 7 (网络版彩图) PVDF探测器测量原理

Figure 7 (Color online) Measuring principle of PVDF detector.

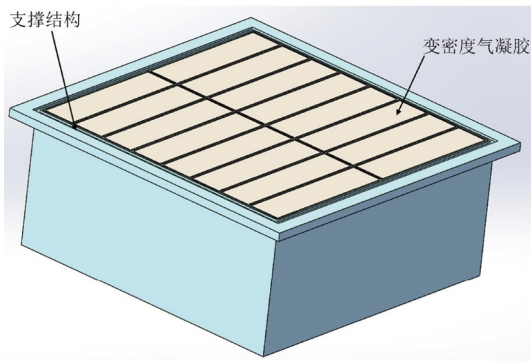


图 8 (网络版彩图)气凝胶收集器3D模型图

Figure 8 (Color online) 3D model of aerogel dust collector.

和材料学的理解, 以及对空间碎片环境的了解. 包括:

发现此前在地球上从未发现的新物质和新结构, 从而增进对太空条件下材料物理与化学的理解, 为将来的太空材料制备提供参考.

提供空间站附近碎片和尘埃环境信息, 对航天员的健康安全提供基础数据.

本项目拟解决的尘埃天文学中的关键科学问题和简要技术路线如下.

5.2.1 尘埃颗粒的动力学溯源

对于收集到的尘埃颗粒, 首先基于其尺寸(ISD尺寸较小 $<1\ \mu\text{m}$, IDP尘埃尺寸较大 $>1\ \mu\text{m}$)、结构和化学成分分析粗略地判断其起源. 然后综合考虑尘埃入射探测器时的速度大小和方向, 可进一步区分尘埃是行星际还是星际来源. 从动力学角度对尘埃颗粒进行溯源是本项目的特色之一. 动力学溯源即为基于尘埃颗粒的位置矢量($\mathbf{r}$)、速度矢量($\mathbf{\dot{r}}$)、电荷量(q)、质量(m)和辐射压截面(σ_{pr})等关键参数, 建立动力学模型, 逆推追溯尘埃颗粒的轨迹, 从而判断其可能来源. 对于动力

学溯源所需的关键输入参数, 截至目前, 国际上尚未有项目完成对全部输入参数的测量. 我们设计的尘埃探测器能得到需要的全部输入参数.

对于ISD, 当颗粒尺寸很大($\sim 10\ \mu\text{m}$)时, 不确定性的力学因素(电磁力、光压)小于确定性的力学因素(引力)时, 可以较为准确地从动力学上进行溯源. 但事实上, ISD的尺寸通常较小($<1\ \mu\text{m}$), 光压的影响不可忽略. 我们模拟了仅考虑引力效应的溯源结果如图9所示, 其中曲线中间的星号表示溯源的尘埃颗粒在100AU处的入射速度方向, 不同颜色的曲线表示 $1-\sigma$ 速度测量角度误差(该算例为 5°)造成的溯源的尘埃颗粒在100AU处的入射速度方向的误差分布. 图9中还展示了不同 β 值(尘埃颗粒受到的光压斥力与日心引力之比)对应的溯源的尘埃颗粒入射方向的可能分布. 对比不同 β 值的结果, 当 $\beta=0.5$ 与 $\beta=0$ 时, 不同 β 造成的溯源方向的差别已明显大于尘埃颗粒入射速度方向不确定性造成的误差, 因此较为准确地对光压进行建模是ISD溯源工作需解决的问题. 通过对取回的尘埃颗粒进行实验室分析, 结合尘埃探测器测量获得准确的尺寸、成分、质量和散射截面信息, 能够帮助准确地对光压进行建模. 另外需提及的是, 除光压外, 尘埃颗粒通常带电, 因此行星际空间和地月空间磁场产生的洛伦茨力会进一步复杂化粒子的溯源过程.

对于IDP的溯源, 动力学手段可以一定的概率确定IDP尘埃颗粒的可能来源母体类型, 但不能确定

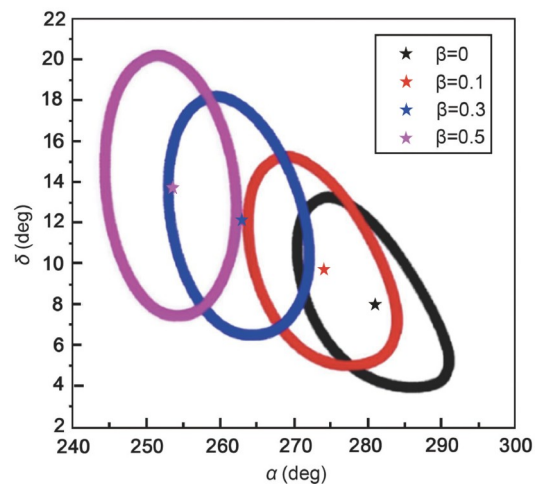


图 9 (网络版彩图)溯源的ISD尘埃颗粒在100AU处的入射速度方向分布

Figure 9 (Color online) Distribution of the traced-back ISD particle's velocity direction at 100AU.

具体母体, 因为IDP尘埃颗粒在到达地球附近的过程中经历了非常复杂的动力学过程, 无法进行精确的动力学溯源. 尽管如此, 我们仍然可以按如下的方式从动力学上按一定概率进行溯源, 过程分为两步: 第一步, 从收集尘埃颗粒时刻按一定的测量误差和力模型误差短期逆向积分尘埃颗粒的轨道至行星际空间, 给出其短期可能的来源区域分布; 第二步, 结合尘埃颗粒的演化分布模型给出的不同来源尘埃颗粒在空间中的可能分布区域, 对比上述短期逆向溯源给出来源区域的可能分布, 可从一定概率上推测其动力学来源. 整个溯源过程如图10所示.

5.2.2 星际尘埃的尺寸分布

通过测量撞击探测器的尘埃颗粒的速度、方向和质量来得到星际尘埃的尺寸. 我们的宇宙尘埃探测与捕获器由径迹探测器、PVDF探测器和气凝胶收集器三部分组成. 首先尘埃颗粒经过径迹探测器时能测量其速度矢量. 接着, 尘埃颗粒会击穿PVDF探测器的薄膜, 产生电荷脉冲信号. 该脉冲信号的强度、形状与粒子的质量和速度有直接关系, 结合径迹探测器的速度矢量测量结果, 我们能够推算出入射宇宙尘埃颗粒的质量和尺寸.

根据日球层内星际尘埃平均“流量”, 可以估计理想情况下能捕获到的星际尘埃数量. 取日球层内星际尘埃平均流量^[9]为 $1.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 那么表面积为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} = 900 \text{ cm}^2$ 的尘埃探测器放在空间站上一个 $30 \times 86400 \text{ s}$ 能够收集到 $1.5 \times 10^{-8} \times 900 \times 30 \times 86400 \approx 35$ 颗星际尘埃. 这些数据是基于Ulysses实际探测估算的理想情况下能捕获到的星际尘埃数量. 收集到有统计意义数量的尘埃样本后, 我们能得到星际尘埃的尺寸分布. 尤其是微米量级的尘埃颗粒的分布,

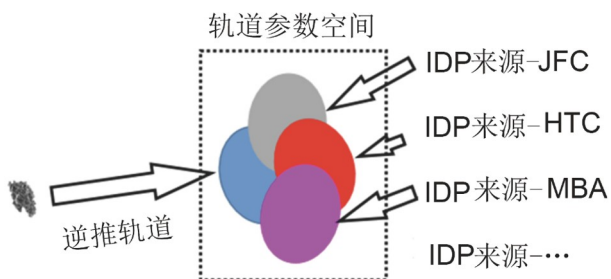


图 10 (网络版彩图) IDP动力学溯源过程示意图

Figure 10 (Color online) An illustration of tracing the source of IPD.

微米尘埃颗粒的尺寸分布是否与亚微米尘埃的尺寸分布连续? 是否如Wang等人^[7]所预测的那样? 空间站尘埃探测将收集一批亚微米到微米量级的尘埃颗粒, 帮助解决关于微米尘埃分布的谜团. 也为后续构建尘埃模型, 完善尘埃形成与演化理论提供观测限制.

5.2.3 尘埃颗粒的化学组分

利用X射线显微镜以及X射线三维重构对尘埃样品的三维形貌及内部孔洞结构进行微米至纳米尺度的三维无损分析; 并结合扫描电镜成像、背散射电子衍射分析、EDS元素分析, 对同一尘埃颗粒的表面形貌、化学成分分布以及矿物晶相的鉴别和分析; 针对微米尺度的特征形貌, 利用聚焦离子束显微镜(FIB)定点切割制备电子束透明的透射电镜样品, 进而利用球差校正(扫描)透射电镜(STEM)的电子衍射、成像、谱学分析等在纳米至原子尺度对样品的化学成分、晶相、原子结构等进行高精度分析, 分析其中硅酸盐颗粒的晶体结构及化学组成、金属元素的原子尺度分布、星际环境造成的尘埃颗粒内部孔洞及可能存在的氦泡、探寻新的碳同素异形体、碳同位素的分布(通过基于单色仪球差校正电镜的晶格振动谱进行分析)等, 并通过电子能量损失谱对特征区域的吸收谱进行纳米尺度测量. 最终获得尘埃颗粒化学成分的信息.

5.2.4 黄道云的红外辐射模型, 微流星体工程模型

对于红外巡天项目而言, 黄道云的红外辐射是无法忽略的前景辐射, 需要被准确模拟并加以扣除. 在“宇宙背景探测器”(COBE)项目中, Kelsall等人^[73]首先建立起IDP的物理模型, 接着通过拟合黄道云的红外辐射的季节性变化来确定模型参数, 并最终构建出黄道云的红外辐射天图. 但是, Kelsall等人^[73]在模型中仅考虑了尘埃云、三条小行星尘埃带和1AU附近的尘埃环三种结构, 而实际上COBE发现黄道云的结构比事先预期的更为复杂. 我们将通过研究IDP的动力学演化过程建立更详细的黄道云的结构模型, 并在此基础上结合实验室对IDP的化学组分、结构和尺寸分布的测量, 构建更精细的黄道云的红外辐射模型.

为了更好地了解空间环境, 近十几年来, 美国宇航局(NASA)和欧洲航天局(ESA)分别开发了新的微流星体工程模型, 即MEM模型和IMEM模型. 这些模型被广泛应用于航天器设计、任务规划和风险评估, 帮助

预测空间环境中的微小颗粒对航天器可能造成的威胁。然而,我国目前缺乏一个完善的微流星体工程模型^[111,112]。基于我们宇宙尘埃探测器获取的颗粒成分、大小、数量、速度、方向等信息,结合月球与深空探测任务所得的数据,可以建立起自主的微流星体工程模型,这将有助于更准确地确保航天器的安全。

5.2.5 空间碎片领域中的科学问题

通过探测设备实际捕获的人造的空间碎片,对其成分、大小、数量、速度进行分类,这将有助于完善现有空间碎片分布模型,特别是对于空间站轨道高度的亚毫米级碎片分布。这些数据对航天员的安全保障有重要价值。

6 总结及展望

60余年来,人们一直试图利用探空火箭、航天

器、空间站、卫星、深空探测器等进行宇宙尘埃物质的研究^[113],但目前还没有一个项目能把尘埃物质的准确溯源和样本返回成功结合。宇宙尘埃探测项目(“凌霄探尘”)计划将第一次准确判断返回的尘埃颗粒是来自恒星际还是行星际,并对溯源的尘埃颗粒在实验室进行详细理化分析和研究。这不仅对天文学和材料学具有深远的影响,还将提供空间站附近碎片和尘埃环境信息,对航天员的健康安全提供基础数据。

项目团队多年来致力于星际尘埃的研究,在尘埃天体物理、尘埃天体动力学、样本理化分析等方面有着丰富的研究经验和工作积累。在工程技术方面,项目团队拥有丰富的空间载荷研制经验和尘埃探测相关技术积累。目前,团队已经积极开展了尘埃颗粒捕获与溯源的方法研究,包括:空间站上搭载宇宙尘埃探测与捕获载荷的技术方案研究,宇宙尘埃颗粒的溯源方法研究,捕获尘埃样本的地面精细理化分析方法研究等。团队已为申请空间站搭载试验项目做好了准备。

参考文献

- Li A. Optical properties of dust. In: Mann I, Nakamura A, Mukai T, eds. *Small Bodies in Planetary Systems*. Berlin: Springer, 2009, 758
- Altobelli N, Postberg F, Fiege K, et al. Flux and composition of interstellar dust at Saturn from Cassini's Cosmic Dust Analyzer. *Science*, 2016, 352: 312–318
- Sterken V J, Westphal A J, Altobelli N, et al. Stardust Interstellar Preliminary Examination X: Impact speeds and directions of interstellar grains on the Stardust dust collector. *Meteorit Planet Sci*, 2014, 49: 1680–1697
- Zhan H. The wide-field multiband imaging and slitless spectroscopy survey to be carried out by the Survey Space Telescope of China Manned Space Program (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 1290–1298 [詹虎. 载人航天工程巡天空间望远镜大视场多色成像与无缝光谱巡天. 科学通报, 2021, 66: 1290–1298]
- Zhang X M, Su M, Li H, et al. The origin of the universe and the Ali primordial gravitational waves detection (in Chinese). *Physics*, 2016, 45: 320–326 [张新民, 苏萌, 李虹, 等. 宇宙起源与阿里原初引力波探测. 物理, 2016, 45: 320–326]
- Li A. Interaction of nanoparticles with radiation. In: *Proceedings of A Comprehensive International Symposium on Cosmic Dust: Astrophysics of Dust 2003*. San Francisco. 2004. 417
- Wang S, Li A, Jiang B W. Very large interstellar grains as evidenced by the mid-infrared extinction. *Astrophys J*, 2015, 811: 38–44
- Clayton D D, Nittler L R. Astrophysics with Presolar Stardust. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2004, 42: 39–78
- Grün E, Gustafson B. Interstellar dust in the heliosphere. *Astron Astrophys*, 1994, 286: 915–924
- Krüger H, Landgraf M, Altobelli N, et al. Interstellar dust in the solar system. *Space Sci Rev*, 2007, 130: 401–408
- Sterken V J, Strub P, Krüger H, et al. Sixteen years of *Ulysses* interstellar dust measurements in the solar system. III. Simulations and data unveil new insights into local interstellar dust. *Astrophys J*, 2015, 812: 141
- Taylor A D, Baggaley W J, Steel D I. Discovery of interstellar dust entering the Earth's atmosphere. *Nature*, 1996, 380: 323–325
- Baggaley W J. Advanced Meteor Orbit Radar observations of interstellar meteoroids. *J Geophys Res*, 2000, 105: 10353–10361
- Weingartner J C, Draine B T. Dust grain-size distributions and extinction in the Milky Way, Large Magellanic Cloud, and Small Magellanic Cloud. *Astrophys J*, 2001, 548: 296–309
- Draine B T. Perspectives on interstellar dust inside and outside of the heliosphere. *Space Sci Rev*, 2009, 143: 333–345
- Landgraf M, Baggaley W J, Grün E, et al. Aspects of the mass distribution of interstellar dust grains in the solar system from in situ

- p>measurements.
- J Geophys Res*
- , 2000, 105: 10343–10352
- 17 Li A, Draine B T. On ultrasmall silicate grains in the diffuse interstellar medium. *Astrophys J*, 2001, 550: L213–L217
 - 18 Kemper F, Vriend W J, Tielens A G G M. The absence of crystalline silicates in the diffuse interstellar medium. *Astrophys J*, 2004, 609: 826–837
 - 19 Li M P, Zhao G, Li A. On the crystallinity of silicate dust in the interstellar medium. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2007, 382: L26–L29
 - 20 Henning T. Cosmic silicates. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2010, 48: 21–46
 - 21 Jiang B W, Zhang K, Li A, et al. Crystalline silicates in evolved stars. I. *Spitzer*/infrared spectrograph spectroscopy of IRAS 16456–3542, 18354–0638, AND 23239+5754. *Astrophys J*, 2013, 765: 72–78
 - 22 Bowey J E, Adamson A J. A mineralogy of extrasolar silicate dust from 10- μ m spectra. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 334: 94–106
 - 23 Draine B T. Interstellar dust models and evolutionary implications. In: Henning T, Grün E, Steinacker J, eds. *Cosmic Dust - Near and Far ASP Conference Series*. Heidelberg. 2009. 414
 - 24 Kimura H, Postberg F, Altabelli N, et al. Organic matter in interstellar dust lost at the approach to the heliosphere. *Astron Astrophys*, 2020, 643: A50
 - 25 Kimura H. High radiation pressure on interstellar dust computed by light-scattering simulation on fluffy agglomerates of magnesium-silicate grains with metallic-iron inclusions. *Astrophys J Letters*, 2017, 839: L23
 - 26 Silsbee K, Draine B T. Radiation pressure on fluffy submicron-sized grains. *Astrophys J*, 2016, 818: 133–142
 - 27 Jenkins E B. A unified representation of gas-phase element depletions in the interstellar medium. *Astrophys J*, 2009, 700: 1299–1348
 - 28 Poteet C A, Whittet D C B, Draine B T. The composition of interstellar grains toward ζ ophiuchi: Constraining the elemental budget near the diffuse-dense cloud transition. *Astrophys J*, 2015, 801: 110–121
 - 29 Draine B T, Hensley B. Magnetic nanoparticles in the interstellar medium: Emission spectrum and polarization. *Astrophys J*, 2013, 765: 159–181
 - 30 Dwek E. IRON: A key element for understanding the origin and evolution of interstellar dust. *Astrophys J*, 2016, 825: 136–141
 - 31 Hensley B S, Draine B T. Thermodynamics and charging of interstellar iron nanoparticles. *Astrophys J*, 2017, 834: 134
 - 32 Draine B T, Lazarian A. Diffuse galactic emission from spinning dust grains. *Astrophys J*, 1999, 494: L19–L22
 - 33 Mathis J S, Rumpl W, Nordsieck K H. The size distribution of interstellar grains. *Astrophys J*, 1977, 217: 425–433
 - 34 Li A, Draine B T. Infrared emission from interstellar dust. II. The diffuse interstellar medium. *Astrophys J*, 2001, 554: 778–802
 - 35 Greenberg J M. Interstellar dust. In: *Cosmic Dust*. Sussex, Berlin: Wiley-Interscience, 1978. 187
 - 36 Li A, Greenberg J M. A unified model of interstellar dust. *Astron Astrophys*, 1997, 323: 566–584
 - 37 Wright E L. Long-wavelength absorption by fractal dust grains. *Astrophys J*, 1987, 320: 818–824
 - 38 Mathis J S, Whiffen G. Composite interstellar grains. *Astrophys J*, 1989, 341: 808–822
 - 39 Snow T P, Witt A N. Interstellar depletions updated: Where all the atoms went. *Astrophys J*, 1996, 468: L65–L68
 - 40 Mathis J S. Dust models with tight abundance constraints. *Astrophys J*, 1996, 472: 643–655
 - 41 Li A. Interstellar grains—The 75th anniversary. *J Phys-Conf Ser*, 2005, 6: 229–248
 - 42 Zubko V, Dwek E, Arendt R G. Interstellar dust models consistent with extinction, emission, and abundance constraints. *Astrophys J Suppl S*, 2003, 152: 211–249
 - 43 Li Q, Liang S L, Li A. Spectropolarimetric constraints on the nature of interstellar grains. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2014, 440: L56–L60
 - 44 Soja R H, Grün E, Strub P, et al. IMEM2: A meteoroid environment model for the inner solar system. *Astron Astrophys*, 2019, 628: A109
 - 45 Koschny D, Soja R H, Engrand C, et al. Interplanetary dust, meteoroids, meteors and meteorites. *Space Sci Rev*, 2019, 215: 34–95
 - 46 Murray C D, Dermott S F. *Solar System Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
 - 47 Opik E J. Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter. *Proc R Irish Acad*, 1951, 54: 165–199
 - 48 Berg O E, Grün E. Evidence of hyperbolic cosmic dust particles. *Space Res XIII*, 1973, 2: 1047–1055
 - 49 Grün E, Zook H A, Fechtig H, et al. Collisional balance of the meteoritic complex. *Icarus*, 1985, 62: 244–272
 - 50 Dermott S F, Kehoe T J J, Grogan K, et al. Orbital evolution of interplanetary dust. In: Grün E, Gustafson B Å S, Dermott S, et al., eds. *Interplanetary Dust. Astronomy and Astrophysics Library*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. 569–639
 - 51 Vokrouhlický D, Bottke W F, Chesley S R, et al. The Yarkovsky and YORP effects. *Asteroids IV*. Tucson: University of Arizona Press, 2015. 509–531

- 52 Horanyi M. Charged dust dynamics in the solar system. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1996, 34: 383–418
- 53 Morfill G E, Grün E. The motion of charged dust particles in interplanetary space—I. The zodiacal dust cloud. *Planet Space Sci*, 1979, 27: 1269–1282
- 54 Dohnanyi J S. Collisional model of asteroids and their debris. *J Geophys Res*, 1969, 74: 2531–2554
- 55 Bradley J P. Early solar nebula grains—Interplanetary dust particles. *Meteorit Cosmochim Acta*, 2014, 1: 287–308
- 56 Love S G, Joswiak D J, Brownlee D E. Densities of stratospheric micrometeorites. *Icarus*, 1994, 111: 227–236
- 57 Zolensky M E. Reports refractory interplanetary dust particles. *Science*, 1987, 237: 1466–1468
- 58 Fraundorf P, Patel R I, Shirck J, et al. Optical spectroscopy of interplanetary dust collected in the Earth’s stratosphere. *Nature*, 1980, 286: 866–868
- 59 Sandford S A, Walker R M. Laboratory infrared transmission spectra of individual interplanetary dust particles from 2.5 to 25 microns. *Astrophys J*, 1985, 291: 838–851
- 60 Bradley J P, Humecki H J, Germani M S. Combined infrared and analytical electron microscope studies of interplanetary dust particles. *Astrophys J*, 1992, 394: 643–651
- 61 Germani M S, Bradley J P, Brownlee D E. Automated thin-film analyses of hydrated interplanetary dust particles in the analytical electron microscope. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 101: 162–179
- 62 Brearley A J, Jones R H. Chondritic meteorites. *Rev Mineral Geochem* 1998, 36: 3-01–3-398
- 63 Bradley J P, Brownlee D E, Veblen D R. Pyroxene whiskers and platelets in interplanetary dust: Evidence of vapour phase growth. *Nature*, 1983, 301: 473–477
- 64 Bradley J P, Brownlee D E, Fraundorf P. Discovery of nuclear tracks in interplanetary dust. *Science*, 1984, 226: 1432–1434
- 65 Bradley J P. Chemically anomalous, preaccretionally irradiated grains in interplanetary dust from comets. *Science*, 1994, 265: 925–929
- 66 Bradley J P, Keller L P, Snow T P, et al. An infrared spectral match between GEMS and interstellar grains. *Science*, 1999, 285: 1716–1718
- 67 Flynn G, Keller L, Jacobsen C, et al. Organic carbon in interplanetary dust particles. In: *Bioastronomy 99: A New Era in the Search for Life*. 2000, 213: 191
- 68 Clemett S J, Maechling C R, Zare R N, et al. Identification of complex aromatic molecules in individual interplanetary dust particles. *Science*, 1993, 262: 721–725
- 69 Leinert C, Richter I, Pitz E, et al. The zodiacal light from 1.0 to 0.3 AU as observed by Helios space probes. *Astron Astrophys*, 1981, 103: 177–188
- 70 Leinert C, Grün E. Interplanetary dust. In: Schwenn R, Marsch E, eds. *Physics of the Inner Heliosphere I. Physics and Chemistry in Space, Space and Solar Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990. 207–275
- 71 Hanner M S, Weinberg J L. Gegenschein observations from Pioneer 10. *Sky Telesc*, 1973, 45: 217–218
- 72 Sykes M V, Lebofsky L A, Hunten D M, et al. The discovery of dust trails in the orbits of periodic comets. *Science*, 1986, 232: 1115–1117
- 73 Kelsall T, Weiland J L, Franz B A, et al. The *COBE* diffuse infrared background experiment search for the cosmic infrared background. II. Model of the interplanetary dust cloud. *Astrophys J*, 1998, 508: 44–73
- 74 Ueda T, Kobayashi H, Takeuchi T, et al. Size dependence of dust distribution around the Earth Orbit. *Astron J*, 2017, 153: 232–242
- 75 Cour-Palais B G. Meteoroid environment model—1969 [near earth to lunar surface]. 1969, NASA-SP-8013
- 76 Divine N. Five populations of interplanetary meteoroids. *J Geophys Res*, 1993, 98: 17029–17048
- 77 Staubach P, Grün E, Jehn R. The meteoroid environment near Earth. *Adv Space Res*, 1997, 19: 301–308
- 78 Jones J. Meteoroid engineering model—Final report. 2004, SEE/CR, 2004-400
- 79 Moorhead A V. NASA meteoroid engineering model (MEM) version 3. 2020, NASA/TM, 2020-220555
- 80 Dikarev V, Grün E, Baggaley J, et al. Modeling the sporadic meteoroid background cloud. *Earth Moon Planet*, 2004, 95: 109–122
- 81 Soja R H, Grün E, Strub P, et al. IMEM2: a meteoroid environment model for the inner solar system. *Astron Astrophys*, 2019, 628: A109
- 82 Nesvorný D, Janches D, Vokrouhlický D, et al. Dynamical model for the zodiacal cloud and sporadic meteors. *Astrophys J*, 2011, 743: 129–144
- 83 Friedrich H, Gled G, Zolensky M, et al. Optical analysis of impact features in aerogel from the orbital debris collection experiment on the MIR Station. 1999, NASA/TM, 1999-209372
- 84 Hörz F. Impact features and projectile residues in aerogel exposed on Mir. *Icarus*, 2000, 147: 559–579
- 85 Kimoto Y, Ishizawa J, Shimamura H. Passive space environment effect measurement on JEM/MPAC&SEED. In: *Protection of Materials and*

- Structures From the Space Environment. *Astrophysics and Space Science Proceedings*. Berlin: Springer, 2013. 73–82
- 86 Waki M, Kimoto Y. Passive measurement of dust particles on JEM/MPAC&SEED—Experiment summary, particle fluxes. In: *Protection of Materials and Structures From the Space Environment. Astrophysics and Space Science Proceedings*. Berlin: Springer, 2013, 499–512
- 87 Noguchi T, Nakamura T, Ushikubo T, et al. A chondrule-like object captured by space-exposed aerogel on the international space station. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 309: 198–206
- 88 Tuzzolino A, McKibben R B, Simpson J, et al. *In-situ* detections of a satellite breakup by the SPADUS instrument. *Space Sci Rev*, 2001, 1: 203–210
- 89 Love S G, Brownlee D E. A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust. *Science*, 1993, 262: 550–553
- 90 Poppe A, James D, Horányi M. Measurements of the terrestrial dust influx variability by the Cosmic Dust Experiment. *Planet Space Sci*, 2011, 59: 319–326
- 91 Meyer-Vernet N, Maksimovic M, Czechowski A, et al. Dust detection by the wave instrument on STEREO: Nanoparticles picked up by the solar wind? *Sol Phys*, 2009, 256: 463–474
- 92 Kellogg P J, Goetz K, Monson S J. Sign of the dust impact-antenna coupling cloud. *JGR Space Phys*, 2018, 123: 3273–3276
- 93 Zaslavsky A, Meyer-Vernet N, Mann I, et al. Interplanetary dust detection by radio antennas: Mass calibration and fluxes measured by STEREO/WAVES. *J Geophys Res*, 2012, 117: 2011JA017480
- 94 Malaspina D M, Gosling J T. Two spacecraft observations of magnetic discontinuities in the solar wind with STEREO. *J Geophys Res*, 2012, 117: 2011JA017375
- 95 Hirai T, Yano H, Fujii M, et al. Data screening and reduction in interplanetary dust measurement by IKAROS-ALADDIN. *Adv Space Res*, 2017, 59: 1450–1459
- 96 Grün E, Zook H A, Baguhl M, et al. Discovery of Jovian dust streams and interstellar grains by the Ulysses spacecraft. *Nature*, 1993, 362: 428–430
- 97 Grün E, Fechtig H, Giese H R, et al. The Ulysses dust experiment. *Astron Astrophys*, 1992, 92: 411–423
- 98 Grün E, Fechtig H, Hanner M S, et al. The Galileo dust detector. *Space Sci Rev*, 1992, 60: 317–340
- 99 Krüger H, Strub P, Grün E, et al. Sixteen years of *Ulysses* interstellar dust measurements in the solar system. I. Mass distribution and gas-to-dust mass ratio. *Astrophys J*, 2015, 812: 139
- 100 Mathis J S. Properties of interstellar dust. *J Geophys Res*, 2000, 105: 10269–10277
- 101 Draine B T. Interstellar dust grains. *Astron Astrophys*, 2003, 41: 241–289
- 102 Zook H A, Grün E, Baguhl M, et al. Solar wind magnetic field bending of Jovian Dust Trajectories. *Science*, 1996, 274: 1501–1503
- 103 Altobelli N, Kempf S, Krüger H, et al. Interstellar dust flux measurements by the Galileo dust instrument between the orbits of Venus and Mars. *J Geophys Res*, 2005, 110: A07102
- 104 Landgraf M, Grün E. *In situ* measurements of interstellar dust. In: Breitschwerdt D, Freyberg M, Trümper J, eds. *The Local Bubble and Beyond Lyman-Spitzer-Colloquium. Lecture Notes in Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. 381–384
- 105 Srama R, Ahrens T J, Altobelli N, et al. The Cassini cosmic dust analyzer. *Space Sci Rev*, 2004, 114: 465–518
- 106 Westphal A J, Stroud R M, Bechtel H A, et al. Evidence for interstellar origin of seven dust particles collected by the Stardust spacecraft. *Science*, 2014, 345: 786–791
- 107 Stern S A. The New Horizons Pluto Kuiper belt mission: An overview with historical context. *Space Sci Rev*, 2008, 140: 3–21
- 108 Horányi M, Hoxie V, James D, et al. The student dust counter on the New Horizons mission. *Space Sci Rev*, 2008, 140: 387–402
- 109 Poppe A, James D, Jacobsmeyer B, et al. First results from the Venetia Burney student dust counter on the New Horizons mission. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L11101
- 110 Piquette M, Poppe A R, Bernardoni E, et al. Student dust counter: Status report at 38 AU. *Icarus*, 2019, 321: 116–125
- 111 Run J, Han Z Y. Modeling of micrometeoroid environments in near-Earth space (in Chinese). *Spacecraft Eng*, 2005, 14: 23–30 [闰军, 韩增尧. 近地空间微流星体环境模型研究. *航天器工程*, 2005, 14: 23–30]
- 112 Jiang Y, Jiang C S, Li H N. Summary of meteoroids and space debris model (in Chinese). *J Dyn Contr*, 2022, 20: 32–39 [姜宇, 姜春生, 李恒年. 流星体与空间碎片模型综述. *动力学与控制学报*, 2022, 20: 32–39]
- 113 Wang Y J, Zhao C X, Li D T, et al. Progress and development proposals of space dust detection (in Chinese). *Sci Technol Foresight*, 2022, 1: 38–50 [王永军, 赵呈选, 李得天, 等. 空间尘埃探测进展与发展建议. *前瞻科技*, 2022, 1: 38–50]

Capture and tracing interstellar and interplanetary dust particles through the China Space Station

WANG Shu¹, LI AiGen^{5*}, GAO Jian³, HOU XiYun⁴, BAI YongLin², WANG Shen¹,
JIANG BiWei³, ZHENG JinKun², ZHAO RuiNing¹, ZHANG LingLi¹, TAN Pan⁴ &
LIU JiFeng^{1,5*}

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

³ School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

⁴ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

⁵ School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

*Corresponding authors (LI AiGen, email: lia@missouri.edu; LIU JiFeng, email: jfliu@nao.cas.cn)

Matter serves as the foundation of the universe, and its composition is crucial for understanding the universe. Interstellar and interplanetary dust particles (ISD and IDP) carry rich information on the formation and evolution of stars, galaxies, and the solar system. Currently, our understanding of ISD and IDP is mainly derived from indirect information (e.g., extinction and thermal emission detections), making it challenging to accurately determine their key characteristics such as chemical composition, structural morphology, size distribution, and origin. Over the past 60 years, continuous efforts have been made to explore cosmic dust more directly, utilizing sounding rockets, space shuttles, space stations, satellites, and deep space probes. Data obtained mainly from in-situ detection or sample return have been used for statistical studies and material composition analysis, however, very few tracing studies have been conducted. This review summarizes the state-of-the-art indirect studies on the properties of ISD and IDP, and the current status of the existing in-situ detection projects. We propose to utilize the China Space Station platform for the first time to capture and trace cosmic dust particles. We aim to accurately determine whether the returned dust particles are of interstellar or interplanetary origin and to conduct detailed experimental physicochemical analyses of the returned and traced dust particles.

interstellar dust particles, interplanetary dust particles, China Space Station

PACS: 98.58.Ca, 96.50.Dj, 96.30.Vb

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0209](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0209)