专题: 低温等离子体非平衡输运与主动调控

微重力下双分散复杂等离子体颗粒注入中的自组织*

蒙雪[1)] 杜鑫驰[1)] LIPAEV M Andrey[2)] ZOBNIN V Andrey[2)]
THOMA Markus[3)] KRETSCHMER Michael[3)] 杨唯[1)]
黄晓江[1)] 周鸿颖[1)] 杜诚然[1)†]

1) (东华大学物理学院, 上海 201620)

2) (俄罗斯科学院高温联合研究所, 莫斯科 125412, 俄罗斯)

3) (德国吉森大学实验物理研究所 I, 吉森 35392, 德国)

(2025 年 8 月 7 日收到; 2025 年 8 月 20 日收到修改稿)

复杂等离子体是由电离气体与介观颗粒组成的非平衡复杂系统. 在微重力条件下, 颗粒克服重力沉降作用, 在放电空间形成三维复杂等离子体. 在国际空间站微重力实验载荷 PK-4 直流放电中, 先后注入两种直径分别为 6.8 μm 与 3.4 μm 的球形树脂颗粒, 在电场力、离子拖拽力的作用下, 大小颗粒通常无法在同一区域混合共存, 发生相分离. 在颗粒注入过程中, 小颗粒从大颗粒云中通过, 在不同条件下产生不同的非平衡自组织结构. 当大颗粒云密度较低时, 小颗粒在汤川排斥作用下, 在放电管中心形成穿越通道; 当大颗粒云密度中等时, 大小颗粒在穿越过程中各自形成行结构; 当大颗粒云密度较大时, 由双流不稳定性产生自激发尘埃声波, 此时, 小颗粒在穿越过程中与大颗粒相互作用, 与小颗粒进入前的尘埃声波参数相比, 波峰的颗粒密度显著上升, 然而波长与频率等宏观物理参数并没有发生明显的变化. 本研究系统总结了微重力条件下双分散复杂等离子体颗粒注入中的多种自组织过程与机理.

关键词: 复杂等离子体, 自组织, 微重力

PACS: 52.27.Lw **DOI:** 10.7498/aps.74.20251065

CSTR: 32037.14.aps.74.20251065

1 引 言

复杂等离子体又被称为尘埃等离子体, 是由微纳固体颗粒、中性气体、带电离子及电子共同组成的多组分非平衡体系[1]. 复杂等离子体广泛存在于自然界中, 例如地球大气平流层[2,3]、行星际与星际尘埃云[4]等环境, 早期研究可追溯至天体物理学领域, 典型实例如土星环中的轮辐结构的观测研究[5], 其本质即为由微米及亚微米尺度尘埃颗粒与土星周围空间等离子体环境构成的复杂等离子体.

在实验室研究中, 复杂等离子体系统展现出与软物质系统的诸多相似性: 首先, 颗粒的运动遵循经典力学规律, 其实时位置与运动速度可以通过简单的显微拍摄技术在实空间中直接测量; 其次, 系统表现出显著的宏观软性特征, 如尘埃声波与表面波等波动模式[6,7], 揭示了体系内部复杂的相互作用机制; 此外, 系统可形成丰富的相态, 包括等离

* 国家自然科学基金 (批准号: 12035003)、德国宇航中心 (批准号: 50WM2044, 50WM2457) 和俄罗斯联邦科学与高等教育部 (批准号: 075-00269-25-00) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chengran.du@dhu.edu.cn

© 2025 中国物理学会 Chinese Physical Society

子体液体[8]、晶体[9]、非晶[10]、超临界流体[11]等. 基于这些特性, 复杂等离子体常被用于探索颗粒相互作用、个体与集体动力学行为、不稳定性、相变[12,13]等重要物理问题. 值得注意的是, 颗粒悬浮在气相环境中, 阻尼耗散相对较小. 电子与离子和尘埃颗粒具有不同的动力学温度, 系统远离平衡态. 此外, 复杂等离子体的结构形成与演化受电场[14,15]、磁场[16]、流场[17]、温度场[18]等外场的形式与幅度影响, 因此, 通过调控外部参数, 可实现对复杂等离子体结构及相关物性的精确操控. 综上所述, 复杂等离子体具有颗粒运动可视、低阻尼、非平衡、响应外场调控的特点, 是一种研究物质宏观与微观物理性质的重要实验模型系统[19].

地面实验中, 颗粒受限于重力作用悬浮于等离子体鞘层中, 形成二维或非均匀小尺寸三维系统. 为研究大尺寸均匀三维复杂等离子体, 研究人员利用落塔、Texus 探空火箭、抛物线飞行、载人空间站等开展微重力实验研究[20,21]. 尤其是空间站微重力实验经历了 4 代载荷的迭代, 从和平号空间站上无法主动放电的圆柱形安瓿装置 PK-1, 直流放电装置 PK-2, 发展至国际空间站上兼具手动与自动控制的射频放电装置 PKE[22], 可选择放电气体与多种实验颗粒的 PK-3Plus[23], 直至配备自清洁等多功能模块的直流放电装置 PK-4[24], 至今仍在运行. 下一代国际空间站实验载荷 COMPACT 与中国空间站实验载荷也在同步研制中[25,26].

微重力条件下, 尘埃颗粒被约束在等离子体体区, 空间分布相对均匀, 针对三维复杂等离子体的结构演化与相行为, 通过追踪颗粒运动轨迹获得三维构型与速度分布, 进而计算其类固振动的色散关系[14], 在电流变等离子体中, 通过改变电场占空比观测到系统从各向同性状态向具有链结构的相列状态的转变过程[15,27], 小颗粒注入穿越大颗粒云团形成的通道结构及小颗粒穿行现象[28], 三维复杂等离子体通过调控中性气体压强发生熔化与结晶[29]. 针对复杂等离子体的流体过程, 微重力实验结合等离子体流体耦合颗粒动力学模拟发现, 三维复杂等离子体的涡旋具有湍流的物理特性[30], 在双分散系统中, 激光驱动颗粒流可以在大、小颗粒云团界面处诱发涡旋[31].

除结构与流体特性研究外, 波动现象也是复杂等离子体研究的重要方向. 在地面实验室研究, 利用热泳力悬浮颗粒可以产生自激发尘埃声波[32], 其物理特性与其在颗粒云中的位置有显著关联, 尤其在等离子体鞘层与体区的过渡位置发生了明显的变化[33]. 通过抛物线飞行微重力实验发现, 强耦合复杂等离子体中的自激发尘埃声波具有空间频率类聚现象[6]. 在空间站 PK-3 Plus 载荷实验中, 通过调制外部激励频率等参数, 可改变颗粒波动模式及波的传播特性[34]; 利用函数发生器在无颗粒空洞区边缘激发的孤立波, 其从小颗粒向大颗粒云团传播过程中存在反射与耗散[35,36]. 空间站 PK-4 载荷实验在波研究方面取得了进一步进展, 实验发现离子尾流场效应可导致声波传播速度降低[37], 系统研究颗粒电荷涨落与电流变效应对低压复杂等离子体中尘埃声波特性的影响[38], 揭示了低频尘埃密度波的不同模式具有相异的相速度[39], 并在强耦合碰撞性复杂等离子体中, 研究了离子漂移对低频波模式及其不稳定性的影响, 发现强耦合会降低声速并促进离子漂移不稳定性的发展[40].

本研究基于国际空间站 PK-4 载荷开展实验研究. 在微重力条件下, 向具有不同尘埃颗粒数密度的大颗粒云团中注入小颗粒. 实验观察到不同密度的颗粒云团对注入颗粒的响应存在显著差异, 表明新注入小颗粒对原有复杂等离子体产生的扰动效应依赖于背景尘埃密度. 研究旨在通过分析外部颗粒注入激励如何增强尘埃颗粒的波动行为, 为波动现象的非线性响应与传播机制提供基于复杂等离子体物理的新视角.

2 实验装置与流程

国际空间站 PK-4 实验载荷主体为直径 30 mm 的 U 形圆柱玻璃管[24], 一端被动电极接地, 另一端主动电极加载驱动电流, 电流范围为–3.1—3.1 mA, 实现直流等离子体放电, 如图 1 所示. 装置具有极性交换功能, 即固定电流幅值, 以一定的周期与占空比切换极性, 实现主动电极正负电压交换, 当交换频率远高于尘埃颗粒的特征频率时, 颗粒不响应直流放电定向电场, 可以被约束在腔体中心区域. 此外, 通过调节占空比, 可以额外调控颗粒的输运, 补偿温度梯度产生的热泳力或定向气流产生的拖拽力. 实验装置搭载两个射频线圈, 可以实现感性耦合射频放电, 射频频率为 81.36 MHz, 峰值功率为 5 W. 装置放电气体可以选用氩气或者氖气, 工作气压范围为 10—200 Pa.

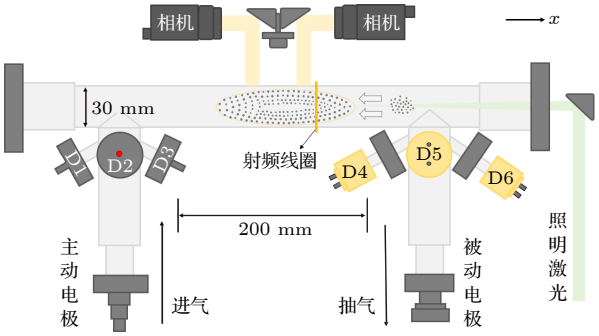

图 1 空间站 PK-4 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the PK-4 experimental setup.

实验装置搭载 6 台颗粒注射器, 其中 D1—D3 为气体喷射颗粒注射器, D4—D6 为电磁振动颗粒注射器, 装填三聚氰胺甲醛树脂颗粒与聚苯乙烯颗粒, 直径范围为 1.3—15.2 μm. 颗粒注入量主要由颗粒振动频次调节, 且与气压、直流电流、射频功率等参数相关, 实验中颗粒注入量无法精确控制. 等离子体辉光观测系统采样频率为 25 Hz, 空间分辨率为 430 μm/pix, 监控工作区域的等离子体与颗粒状态. 颗粒观测系统由照明激光和两台灰度 CCD 相机组成, 照明激光波长 532 nm, 由透镜系统输出宽度约为 18 mm 的激光片, 激光厚度在聚焦位置约为 50 μm, 边缘位置约为200 μm, 相机镜头安装与照明激光对应的带通滤波片, 记录颗粒的米散射信号, 相机全画幅采样频率 35 Hz, 空间分辨率约为 14 μm/pix. 相机安装在位移平台上, 可以沿放电管移动, 选择观察区域, 也可以垂直于放电管移动, 实现三维颗粒云团的扫描, 获得颗粒的三维空间分布. 此外, 放电管同轴布置电磁线圈与加热线圈, 利用电场与温度场调控颗粒运动, 放电管一端引入高功率激光束, 利用光压产生颗粒流.

在空间站微重力实验中, 注入氖气作为放电工作气体, 设置气体流量 0.5 sccm, 启动辉光观测系统与颗粒观测系统, 设置直流放电电流 0.5 mA, 射频放电功率 0.4 W. 通过辉光观测系统可以发现, 射频线圈附近射频放电辉光强度高于直流放电辉光强度, 如图 2 所示. 利用颗粒注射器 D6 注入直径为 6.8 μm 的尘埃颗粒, 在直流放电定向电场驱动下, 颗粒沿玻璃管输运, 最终被约束在射频线圈附近的工作区域, 在微重力条件下, 颗粒不会因为沉降发生偏移, 因此可以约束在腔体中心的等离子体体区, 形成近纺锤体状稳定对称的颗粒云团. 启动颗粒注射器 D5 注入直径为 3.4 μm 的尘埃颗粒, 在离子拖拽力与电场力的共同作用下, 该小颗粒的平衡位置在大颗粒云团左侧, 颗粒穿越大颗粒云团. 大小颗粒的空间分布与运动过程由颗粒观测系统记录, 用于后期数据分析.

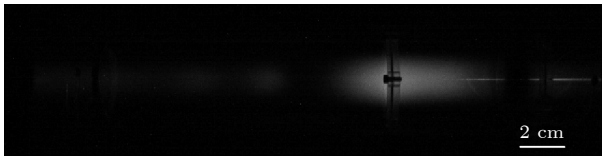

图 2 等离子体辉光与颗粒云团

Fig. 2. Glow discharge and particle cloud.

3 结果与讨论

实验研究发现, 复杂等离子体中小颗粒注入与大颗粒云团相互作用产生多种双分散自组织行为, 其动力学过程和自组织形式与实验条件具有显著关联, 下文将针对不同条件下的双分散自组织展开分别论述.

3.1 低密度复杂等离子体

相分离是双分散复杂等离子体中的一个典型的现象, 在微重力条件下, 主要由非相加性[41]、长短程汤川相互作用[42]、离子拖拽力与鞘层电场力[43]等机制促使大小颗粒形成独立的云团. 在气压为 24 Pa 的等离子体中注入少量直径 6.8 μm 的尘埃颗粒, 形成三维颗粒云团. 在实验录像中利用开源颗粒追踪工具 trackpy 进行颗粒位置定位, 获得颗粒的二维数密度, 假设激光厚度为 150 μm, 获得颗粒数密度为 (29.9±4.4) mm^{-3}. 颗粒间距大于德拜长度, 颗粒间相互作用微弱, 系统处于相对弱耦合状态, 颗粒间关联运动缺失, 集体效应弱, 颗粒围绕平衡位置微幅振动. 注入直径 3.4 μm 的小颗粒, 在电场输运下进入大颗粒云团, 由汤川排斥相互作用挤压大颗粒云团, 引发大颗粒的位移, 在云团中心形成输运通道.

实验中记录瞬时颗粒位置随时间的演化, 采用多帧叠加技术处理图像序列, 背景为黑色, 颗粒显示为白色像素团簇, 通过伪彩色编码表征不同时间点的像素信息, 时序对应颜色映射为蓝到红, 如图 3(a) 所示. 分析图像序列发现, 初始大颗粒在空间均匀分布, 当 $t = 0$ s, 小颗粒进入大颗粒云团, 由于颗粒的带电量与颗粒直径成正比[44], 排斥作用减小, 颗粒间距明显小于大颗粒云团中的颗粒间距.

随着时间的演化, 大量小颗粒进入研究区域, 小颗粒输运通道变宽, 如图 3(b) 所示. 研究发现, 小颗粒轨迹呈直线状, 显示颗粒的定向输运, 通过计算轨迹长度, 可以估算颗粒运动速度约为 10 mm/s.

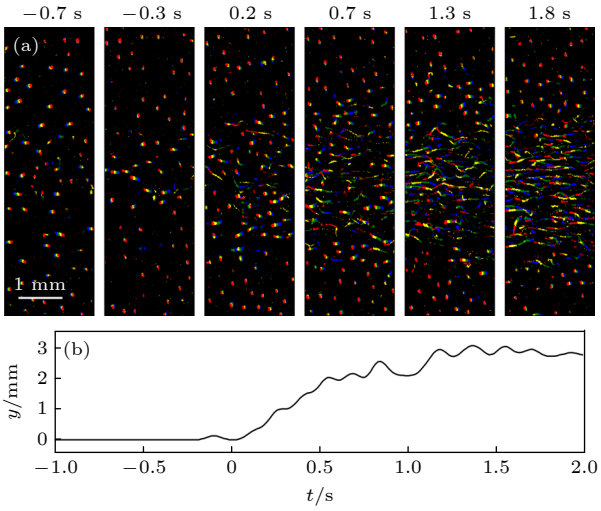

图 3 颗粒云团分布演化与小颗粒输运通道宽度

Fig. 3. Evolution of the particle distribution and width of the channel.

在低阻尼与低颗粒密度条件下, 复杂等离子体处于弱耦合状态, 小颗粒的注入未引发集体运动, 在电场力、离子拖拽力的作用下大小颗粒以相分离的形式进行输运, 在对称轴位置产生输运通道.

3.2 中密度复杂等离子体

行结构的形成是一个重要的非平衡自组织过程[45], 在国际空间站 PK-3 Plus 射频等离子体实验载荷中, 大颗粒在等离子体体区形成三维空心复杂等离子体云团, 当小颗粒从云团外穿越大颗粒进入云团内部时, 自组织产生行结构[28,46]. 在 PK-4 实验载荷中, 在气压为 45 Pa 的等离子体中注入一定数量直径 6.8 μm 的尘埃颗粒, 颗粒数密度为 (39.4±1.3) mm^{-3}, 颗粒间相互作用呈现中等强度, 耦合强度小于熔化临界强度, 系统呈现液体状态, 不存在规则结构.

采用与 3.1 节中类似的小颗粒注射器设置, 注入直径为 3.4 μm 的小颗粒时, 大颗粒云团受到鞘层边缘电场约束, 径向有限膨胀, 小颗粒进入大颗粒云团, 触发显著的空间重构现象, 其中大颗粒自组织排列形成准一维行状结构, 见图 4, 行结构长度一般大于 4 个颗粒, 部分行结构可以达到 10 个颗粒长度. 值得注意的是, 实验在直流叠加感性耦合射频放电等离子体中开展, 由于未开启极性交换功能, 在小颗粒注入前大颗粒云团不具有类似行的链状结构. 研究发现, 该非平衡自组织由双分散系统的非相加性与能量最小化触发, 行结构在大小颗粒相分离后很快消失. 参考数值模拟研究, 大小颗粒的非相加性参数对于行结构的形成具有一定的影响, 然而, 相较于大颗粒云团初始位型、小颗粒注入量、驱动电场强度等全局参数, 非相加性参数等对于行的具体结构影响不大[47].

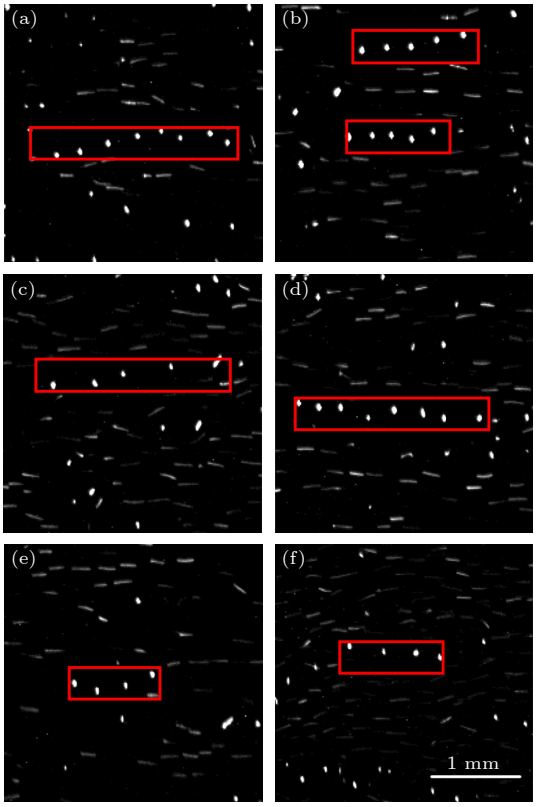

图 4 行结构形成

Fig. 4. Formation of lane structure.

3.3 高密度复杂等离子体

尘埃声波是一种肉眼可见的纵波, 由定向离子流与颗粒相互作用产生的双流不稳定性诱发. 在重力条件下, PK-4 载荷中双分散复杂等离子体发生分层现象, 尘埃声波被限制在局部位置[48]. 在微重力条件下, 注入直径 6.8 μm 的尘埃颗粒, 约束在感性耦合射频等离子体区, 颗粒数密度为 (64.6±3.2) mm^{-3}, 此时, 颗粒数密度超越阈值, 全局产生尘埃声波, 如图 5(a) 所示. 与图 3 类似, 采用多帧叠加技术, 颗粒初始位置显示为蓝色, 最终位置显示为红色, 背景为黑色, 由图所示, 颗粒密度

与运动自组织产生周期性结构. 注入直径 3.4 μm 的小颗粒, 与前文类似, 颗粒在电场力和离子拖拽力的作用下进入大颗粒云团, 颗粒密度急剧升高, 尘埃声波自组织结构更加明显, 如图 5(b) 所示.

取垂直于尘埃声波传播方向进行平均, 获得波峰波谷结构的瞬时空间分布, 考虑整个实验过程中的波动演化, 分别获得小颗粒进入大颗粒云团前

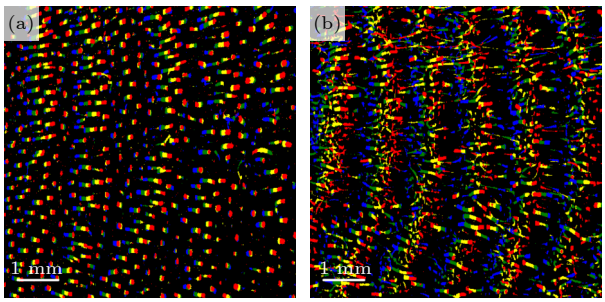

图 5 (a) 单分散自激发波; (b) 双分散自激发波

Fig. 5. Diagram of dust acoustic waves in monodisperse (a) and binary (b) complex plasma.

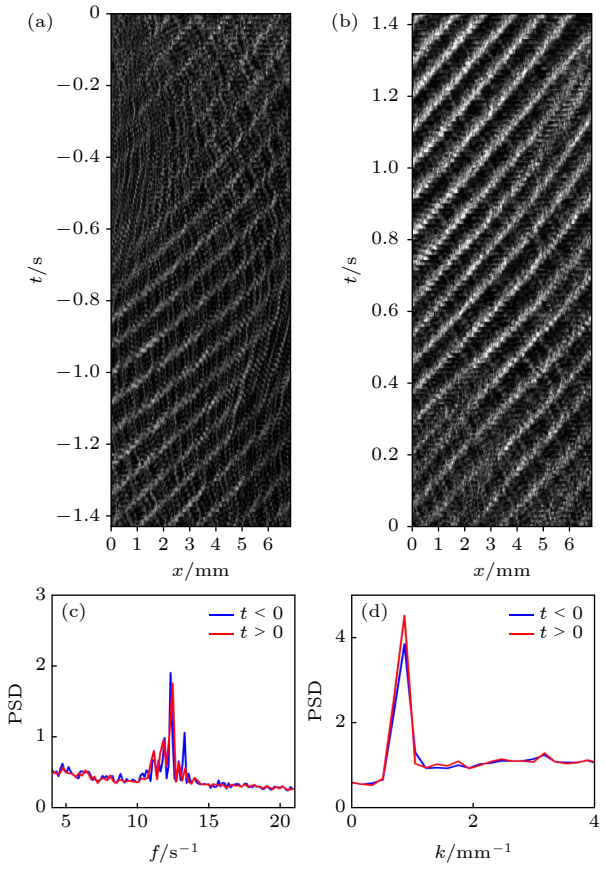

图 6 小颗粒注入前 (a) 与注入后 (b) 尘埃声波的时空演化图以及傅里叶分析获得的频率 (c) 与波数 (d)

Fig. 6. Periodgram of dust acoustic waves before (a) and after (b) the injections of small particles with frequencies (c) and wave numbers (d) from Fourier analysis.

1.4 s 与后 1.4 s 的尘埃声波时空演化图. 如图 6(a), (b) 所示, 尘埃声波沿 x 正向传播, 传播过程中, 部分颗粒从前一个波峰迁移到后一个波峰. 小颗粒注入后, 尘埃声波的传播方向与注入前一致. 对尘埃声波时空演化进行傅里叶变换分析发现, 双分散复杂等离子体的波动频率与大小颗粒混合前一致, 都为 13 Hz, 波长也没有发生变化, 近似为 1 mm, 分析结果见图 6(c), (d).

在极高密度尘埃声波中, 颗粒高速运动, 不再适用颗粒轨迹追踪分析. 可以通过统计实验录像中的白色像素占总像素百分比 P 估计颗粒密度, 见图 7. 研究发现, 小颗粒注入后, 颗粒的密度近似于翻倍, 然而尘埃声波的频率与波长并没有发生变化.

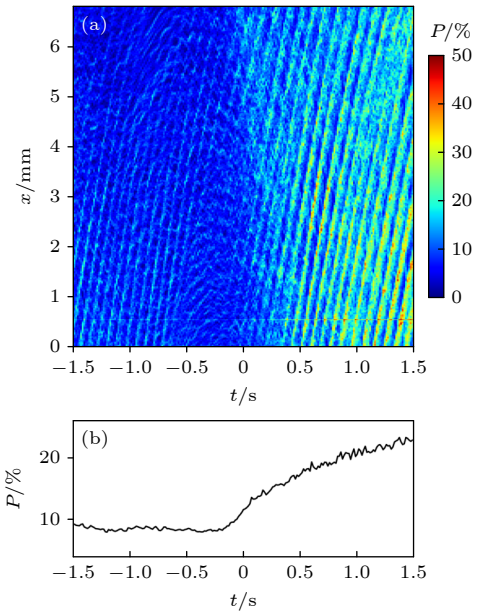

图 7 尘埃声波中颗粒密度演化

Fig. 7. Evolution of particle number density in dust acoustic waves.

4 结 论

国际空间站 PK-4 实验载荷为开展微重力条件下三维复杂等离子体的结构与动力学过程提供了一个重要的实验平台. 同时采用直流与射频等离子体放电, 可以在航天员不参与的情况下, 实现尘埃颗粒注入与定向输运, 并最终约束在放电管中心工作区域. 在双分散复杂等离子体实验中, 大小颗粒自发相分离, 其平衡位置由电场力与离子拖拽力的平衡位置决定, 一般实验参数下, 小颗粒平衡于大颗粒左侧. 实验中由 U 形管右侧颗粒注射器先注入大颗粒, 在工作区域形成三维颗粒云团, 再注

入小颗粒. 当大颗粒云团中颗粒密度较低时, 小颗粒在大颗粒云团中心形成输运通道, 实现颗粒穿越; 当颗粒密度中等时, 小颗粒穿过大颗粒云团, 大颗粒自组织形成行结构; 当大颗粒密度较高时, 由双流不稳定性产生尘埃声波, 小颗粒注入后尘埃声波中颗粒密度显著上升, 然而, 波长与频率等动态自组织结构的宏观物理性质并没有发生显著变化. 研究定性系统分析了空间站微重力条件下双分散复杂等离子体相分离过程中的多种非平衡自组织行为, 为进一步的理论与数值模拟研究提供了实验基础.

感谢欧洲宇航局 (ESA) 与俄罗斯联邦航天局 (Roscosmos) 对国际空间站在轨 Plasmakristall-4 微重力实验的支持.

参考文献

[1] Melzer A 2019 *Physics of Dusty Plasmas: An Introduction* (Heidelberg: Springer Nature Switzerland AG)

[2] Shukla P K 2001 *Phys. Plasmas* **8** 1791

[3] Klumov B A, Morfill G E, Popel S I 2005 *J. Exp. Theor. Phys.* **100** 152

[4] Rosenberg M 1993 *Planet. Space Sci.* **41** 229

[5] Goertz C K 1989 *Rev. Geophys.* **27** 271

[6] Menzel K O, Arp O, Piel A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 235002

[7] Heidemann R, Zhdanov S, Sütterlin R, Thomas H M, Morfill G E 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 135002

[8] Chan C L, Lai Y J, Woon W Y, Chu H Y, Lin I 2004 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** A273

[9] Steinmuller B, Dietz C, Kretschmer M, Thoma M H 2017 *Phys. Plasmas* **24** 033705

[10] Du C R, Nosenko V, Thomas H M, Lin Y F, Morfill G E, Ivlev A V 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 185002

[11] Huang D, Baggioli M, Lu S Y, Ma Z, Feng Y 2023 *Phys. Rev. Res.* **5** 013149

[12] Annaratone B M, Antonova T, Arnas C, et al. 2010 *Plasma Sources Sci. Technol.* **19** 065026

[13] Sütterlin K R, Wysocki A, Räth C, et al. 2010 *Plasma Phys. Control. Fusion* **52** 124042

[14] Lipaev A M, Naumkin V N, Khrapak S A, Usachev A D, Petrov O F, Thoma M H, Kretschmer, Du C R, Kononenko O D, Zobnin A V 2025 *Phys. Rev. E* **111** 015209

[15] Dietz C, Budak J, Kamprich T, Kretschmer M, Thoma M H 2021 *Contrib. Plasma Phys.* **61** e202100079

[16] Ludwig P, Jung H, Kaehlert H, Joost J P, Greiner F, Moldabekov Z, Carstensen J, Sundar S, Bonitz M, Piel A 2018 *Eur. Phys. J. D* **72** 82

[17] Liu B, Goree J, Pustylnik M Y, et al. 2021 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **49** 2972

[18] Rothermel H, Hagl T, Morfill G E, Thoma M H, Thomas H M 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 175001

[19] Morfill G E, Ivlev A V 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1353

[20] Schmitz A S, Hanstein L, Klein M, Kretschmer M, Lotz C, Shemakhin A, Thoma M H 2025 *Microgravity Sci. Technol.* **37** 7

[21] Morfill G E, Thomas H M, Konopka U M, et al. 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 1598

[22] Nefedov A P, Morfill G E, Fortov V E, et al. 2003 *New J. Phys.* **5** 33

[23] Thomas H M, Morfill G E, Fortov V E, et al. 2008 *New J. Phys.* **10** 033036

[24] Fortov V, Morfill G, Petrov O, Thoma M, Usachev A, Hoefner H 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** B537

[25] Knapek C A, Couedel L, Dove A, Goree J, Konopka U, Melzer A, Ratynskaia S, Thoma M H, Thomas H M 2022 *Plasma Phys. Control. Fusion* **64** 124006

[26] Yang W, Wang Y N, Liang Y Y, Huang X J, Zhou H Y, Guo Y, Zhang J, Feng Y, Wang X G, Zhang L X, Du C R 2025 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **55** 105206 (in Chinese) [杨唯, 王垚楠, 梁颖悦, 黄晓江, 周鸿颖, 郭颖, 张菁, 冯岩, 王晓钢, 张立宪, 杜诚然 2025 中国科学: 物理学 力学 天文学 **55** 105206]

[27] Block D, Melzer A 2019 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **52** 063001

[28] Sütterlin K R, Wysocki A, Ivlev A V, et al. 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 085003

[29] Khrapak S A, Klumov B A, Huber P, et al. 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 205001

[30] Schwabe M, Zhdanov S, Räth C, Graves D B, Thomas H M, Morfill G E 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 115002

[31] Pan S, Yang W, Lipaev A M, Zobnin A V, Li D H, Chang S, Shkaplerov A, Prokopyev S V, Thoma M, Du C R 2024 *EPL* **147** 44001

[32] Schwabe M, Rubin-Zuzic M, Zhdanov S, Thomas H M, Morfill G E 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 095002

[33] Bajaj P, Khrapak S, Yaroshenko V, Schwabe M 2022 *Phys. Rev. E* **105** 025202

[34] Schwabe M, Zhdanov S K, Thomas H M, et al. 2008 *New J. Phys.* **10** 033037

[35] Sun W, Schwabe M, Thomas H M, Lipaev A M, Molotkov V I, Fortov V E, Feng Y, Lin Y F, Zhang J, Guo Y, Du C R 2018 *EPL* **122** 55001

[36] Hong X, Sun W, Schwabe M, Du C R, Duan W S 2021 *Phys. Rev. E* **104** 025206

[37] Schwabe M, Khrapak S A, Zhdanov S K, et al. 2020 *New J. Phys.* **22** 083079

[38] Wimmer L, Dormagen N, Klein M, Kretschmer M, Lipaev A M, Schwarz M, Usachev A D, Petrov O F, Zobnin A, Thoma M H 2025 *New J. Phys.* **27** 033001

[39] Yaroshenko V V, Khrapak S A, Pustylnik M Y, Thomas H M, Jaiswal S, Lipaev A M, Usachev A D, Petrov O F, Fortov V E 2019 *Phys. Plasmas* **26** 053702

[40] Khrapak S, Yaroshenko V 2020 *Plasma Phys. Control. Fusion* **62** 105006

[41] Ivlev A V, Zhdanov S K, Thomas H M, Morfill G E 2009 *EPL* **85** 45001

[42] Wysocki A, Räth C, Ivlev A V, et al. 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 045001

[43] Killer C, Bockwoldt T, Schütt S, Himpel M, Melzer A, Piel A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 115002

[44] Fortov V E, Ivlev A V, Khrapak S A, Khrapak A G, Morfill G E 2005 *Phys. Rep.* **421** 1

[45] Chakrabarti J, Dzubiella J, Löwen H 2004 *Phys. Rev. E* **70** 012401

[46] Du C R, Sütterlin K R, Jiang K, et al. 2012 *New J. Phys.* **14** 073058

[47] Jiang K, Du C R, Sütterlin K R, Ivlev A V, Morfill G E 2010 *EPL* **92** 65002

[48] Kretschmer M, Antonova T, Zhdanov S, Thoma M 2016 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **44** 458

SPECIAL TOPIC—Non-equilibrium transport and active control strategy in low-temperature plasmas

Self-organization during the particle injections in binary complex plasmas under microgravity*

MENG Xue [1)] DU Xinchi [1)] LIPAEV M Andrey [2)] ZOBNIN V Andrey [2)]
THOMA Markus [3)] KRETSCHMER Michael [3)] YANG Wei [1)]
HUANG Xiaojiang [1)] ZHOU Hongying [1)] DU Chengran [1)†]

1) (*College of Physics, Donghua University, Shanghai* 201620, *China*)

2) (*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow* 125412, *Russia*)

3) (*Institute of Experimental Physics I, Justus Liebig University Gießen, Gießen* 35392, *Germany*)

(Received 7 August 2025; revised manuscript received 20 August 2025)

Abstract

Complex plasmas are composed of ionized gases and mesoscopic particles, representing a typical non-equilibrium complex system. The particles are negatively charged due to the higher thermal velocity of the electrons and interact with each other via Yukawa interactions. Due to the easy recording of the individual particles' motion through video microscopy, the generic processes in liquids and solids can be studied at a kinetic level in complex plasmas. Under microgravity conditions, the particles are confined in the bulk plasma and form a three-dimensional cloud. In the PK-4 Laboratory on the International Space Station, melamine formaldehyde particles with diameters of 6.8 μm and 3.4 μm are consecutively injected into the plasma discharge. Due to the electrostatic force and ion drag force, usually, the particles cannot be mixed in the same region, thereby leading to a phase separation. During the particle injections, small particles penetrate into the big particle clouds and self-organize in different ways under different conditions. When the number density of the big particles is low, small particles form a channel in the center of the discharge tube due to the Yukawa repulsion, where the big particle cloud is weakly confined. When the number density of the big particles is moderate, lanes are formed during the penetration of the small particles, representing a typical nonequilibrium self-organization. When the number density of the big particles is high, dust acoustic waves are self-excited due to the two-stream instability. As the small and big particles interact with each other, the number density of particles in the wave crests sharply increases. However, the wave numbers and frequencies remain unchanged. This investigation offers insights into the different self-organizations during the particle injections in three-dimensional binary complex plasmas under microgravity conditions.

Keywords: complex plasma, self-organization, microgravity

PACS: 52.27.Lw **DOI:** 10.7498/aps.74.20251065

CSTR: 32037.14.aps.74.20251065

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12035003), the German Aerospace Agency (Grant Nos. 50WM2044, 50WM2457), and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant No. 075-00269-25-00).

† Corresponding author. E-mail: chengran.du@dhu.edu.cn

物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

微重力下双分散复杂等离子体颗粒注入中的自组织

蒙雪 杜鑫驰 LIPAEVM Andrey ZOBNINV Andrey THOMAMarkus KRETSCHMERMichael 杨唯 黄晓江 周鸿颖 杜诚然

Self-organization during the particle injections in binary complex plasmas under microgravity

MENG Xue DU Xinchi LIPAEV M Andrey ZOBNIN V Andrey THOMA Markus KRETSCHMER Michael YANG Wei HUANG Xiaojiang ZHOU Hongying DU Chengran

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 74, 205203 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251065
CSTR: 32037.14.aps.74.20251065
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.74.20251065
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微重力条件下复杂等离子体中激光诱导马赫锥的三维模拟
Three-dimensional simulation of laser-induced Mach cones in complex plasmas under microgravity conditions
物理学报. 2024, 73(8): 085202 https://doi.org/10.7498/aps.73.20231849

含有非热电子和陷俘离子的复杂等离子体中非线性尘埃声波的传播特征
Propagation characteristics of nonlinear dust acoustic solitary waves in complex plasma with nonthermal electrons and trapped ions
物理学报. 2024, 73(7): 075201 https://doi.org/10.7498/aps.73.20231967

微观组织对叠片结构钨基面向等离子体材料的热疲劳效应的影响
Influence of microstructure on thermal fatigue effect of laminated tungsten based plasma-facing material
物理学报. 2024, 73(11): 112801 https://doi.org/10.7498/aps.73.20240007

尘埃等离子体棘轮中颗粒分离的三维模拟
Three-dimensional numerical simulation of particle separation using a dusty plasma ratchet
物理学报. 2024, 73(11): 115201 https://doi.org/10.7498/aps.73.20240319

高气压氩气辉光放电条纹等离子体的形成和演化
Formation and evolution of striation plasma in high-pressure argon glow discharge
物理学报. 2022, 71(14): 145201 https://doi.org/10.7498/aps.71.20212394

激光入射双层等离子体靶产生的表面等离子体波及应用
Surface plasma wave excited by laser pulse obliquely incident on a double-layer plasma target and ts application
物理学报. 2023, 72(4): 045201 https://doi.org/10.7498/aps.72.20221305