

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2026.02.XX

主序星碎屑盘研究进展

黄卓超¹, 王舒², 陈孝铄²

(1. 北京航空航天大学 空间与地球科学学院, 北京 102206; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 主序星碎屑盘是行星系统形成与演化的“化石”遗迹, 由碰撞级联持续补给的次生尘埃所维持。综述不同光谱型主序星碎屑盘的探测率与统计规律, 重点总结 JWST 与 ALMA 在 M 型星冷暗盘中的突破与最新进展。系统归纳盘的温度与空间结构、尺寸分布、矿物学特征及次生气体观测证据, 并讨论尘埃—气体耦合效应及其动力学反馈。进一步概述碰撞动力学、辐射传输、流体与 N 体模拟在参数反演与结构解释中的应用, 并以典型系统对比不同动力学机制的演化图景。最后强调 JWST 对内盘精细结构与矿物学诊断的新能力, 并展望未来观测前景。

关键词: 恒星; 碎屑盘; 主序星; 红外超; 尘埃

中图分类号: P145.1 **文献标识码:** A

1 引 言

主序星周围的碎屑盘 (Debris Disks) 是行星系统形成与演化过程中的重要“化石”遗迹。与富含气体的原行星盘不同, 碎屑盘主要由千米级星子碰撞产生的微米至毫米级次生尘埃组成^[1-4], 这些不断发生碎裂的大型星子及其所在的区域, 被称为母体盘或母体星子带 (Parent disk)^[2]。由于母体星子通常难以被直接观测, 其空间位置和质量分布往往需要通过碰撞产生的大颗粒尘埃 (如毫米波观测) 或次生气体来间接反演。受辐射压和 P-R 拖曳效应 (Poynting-Robertson drag) 影响, 尘埃寿命远短于恒星年龄, 其持续存在依赖于活跃的碰撞级联过程^[5-7]。

作为连接原行星盘与成熟行星系统的桥梁, 碎屑盘是探索行星形成晚期动力学过程的天然实验室。盘内的非轴对称结构往往是隐匿行星的动力学指征^[8-12]; 碎屑盘的硅酸盐光谱特征则记录了星子形成与演化的热历史^[13,14], 为揭示行星系统演化与搜寻类太阳系架构提供了重要的观测线索。

在过去的几十年中, IRAS、Spitzer、Herschel 等空间望远镜以及地基 ALMA 阵列确立了碎屑盘研究的基础框架^[15-18], 描绘了从柯伊伯带尺度到其外围晕的冷尘埃分布。与此同时,

收稿日期: YYYY-MM-DD; 修回日期: YYYY-MM-DD

资助项目: 国家自然科学基金项目 (12373028)

通讯作者: 王舒, shuwang@nao.cas.cn

基于空间望远镜（如 HST）与地面极端自适应光学仪器（如 SPHERE、GPI）的高对比度直接成像技术，已在可见光与近红外波段获取了盘面尘埃的高分辨散射光图像，与热辐射观测数据形成了良好的互补^[19,20]。然而，受限于空间分辨率和灵敏度，对于靠近恒星的类地行星形成区及其暖尘埃的细节探测长期受到观测条件的限制。随着詹姆斯·韦布空间望远镜（JWST）的发射与运行，碎屑盘研究获得了新的观测窗口。中红外仪器 MIRI（Mid-Infrared Instrument）在 5-28.3 μm 波段的高灵敏度与高对比度成像能力^[21,22]，有助于解析主序星内盘的精细结构，也可对尘埃的矿物学成分进行定量光谱分析。这些观测能力的提升进一步揭示了近期星子碰撞产生的结构证据及行星引力诱发的尘埃动力学特征^[23,24]，为理解行星系统的多样性提供了高分辨率的观测依据。

本文系统梳理了主序星碎屑盘的研究历程与进展：第 2 节总结了不同光谱型主序星碎屑盘的探测率与统计特征；第 3 节深入剖析碎屑盘的物理特性、形态结构与成分特征；第 4 节介绍主要模拟方法与主流理论模型；第 5 节以典型系统作为观测基准，对比不同动力学机制主导下碎屑盘的多样化演化图景；最后，第 6 节总结全文并展望下一代空间望远镜在碎屑盘精细结构探测与宜居性研究方面的科学前景。

2 主序星碎屑盘探测率与统计特征

广义而言，主序星周围的碎屑盘可根据尘埃的温度与空间分布划分为两大类：分布于内侧的暖尘埃（类太阳系黄道光尘埃，Exo-zodiacal dust）以及分布于外围的冷尘埃（类太阳系柯伊伯带，Exo-Kuiper belts）。

主序星碎屑盘的探测率呈现出一定的光谱型依赖性，但这在很大程度上受到观测波段选择效应的影响。在早期基于 Spitzer 和 Herschel 等红外空间望远镜的统计巡天中（主要对暖尘埃和部分较热的冷尘埃敏感），探测率似乎随恒星光谱型变晚而明显下降（如图 1 所示）。在 < 1 Gyr 的年轻恒星样本中，A 型星的红外超探测率最高（约 30%），F/G/K 型类太阳恒星次之（约为 15-20%），而 M 型红矮星的探测率则长期处于 < 5% 的极低水平^[16,17,25,26]。然而，随着近年来 ALMA 在毫米波段（主要示踪外侧类柯伊伯带冷尘埃）与 JWST 在中红外波段的高灵敏度观测，晚型星的极低探测率被指出主要源于历史观测能力的局限^[27-29]，从而更新了对不同光谱型恒星碎屑盘发生率的整体认知。

2.1 早型主序星 (O/B/A 型) 与类太阳恒星 (F/G/K 型)

早型 O、B 型星碎屑盘探测样本极为稀少，主要受限于极短的主序寿命、强辐射压与恒星风导致的尘埃快速损耗，以及观测上的低动态范围^[2,30,31]。相比之下，A 型恒星是碎屑盘研究的主要样本来源，其适中的光度使得尘埃辐射较强，同时其 1 Gyr 量级的主序寿命既足以维持大规模的稳态级联碰撞，又不会因演化时间过长导致尘埃被完全耗散，因此该光谱型具有较高的尘埃可探测性，是目前探测样本最丰富、空间分辨率最高的^[16,32]。

F/G/K 型类太阳恒星红外超探测率约 15%-20%^[17,25]，其统计特征需结合其所处的演化阶段与区域进行分类讨论。在类太阳系黄道光（暖尘埃）方面，大型双筒望远镜干涉仪（LBTI）

开展的 HOSTS 巡天表明宜居带内存在暖尘埃的比例约为 18%^[33,34]。对于类太阳系柯伊伯带（外围冷尘埃），基于远红外到亚毫米波段的巡天表明，约有 20%-25% 的 F/G/K 型星周围存在冷盘^[17,26]。近期，ALMA 大型巡天 ARKS 首次在大样本中系统性约束了柯伊伯带类似体中亚结构的发生率，统计表明约有三分之一的碎屑盘展现出清晰的多重环与间隙，反映出行星对外部冷盘的动力学雕刻作用普遍存在^[35]。此外，统计结果显示 F/G/K 型星柯伊伯带类似体的发生率与宿主恒星的金属丰度缺乏明显的相关性，这表明外围冰质星子的形成门槛远低于内侧气态巨行星核吸积过程的金属丰度要求^[36]。

2.2 晚型红矮星 (M 型)

M 型红矮星是银河系中数量最多的主序星，但其碎屑盘的探测率在早期红外巡天中长期处于极低水平。早期研究认为 M 型星原行星盘质量低^[37,38]，雪线半径极小^[39]，星子形成总量不足，同时强烈的恒星风和耀发活动也会加速小颗粒尘埃的向外迁移与损耗，导致盘内尘埃快速耗散，表现为碎屑盘物理上的客观缺失^[40,41]。

然而，近年来研究发现，M 型星碎屑盘的早期低探测率主要源于观测限制而非物理缺失：M 型星周围尘埃温度低，辐射峰值位于远红外-亚毫米波段，超出早期巡天的覆盖范围与灵敏度极限^[26,28]，理论模型也表明其盘普遍具有低表面亮度、低温度的特征^[27]。

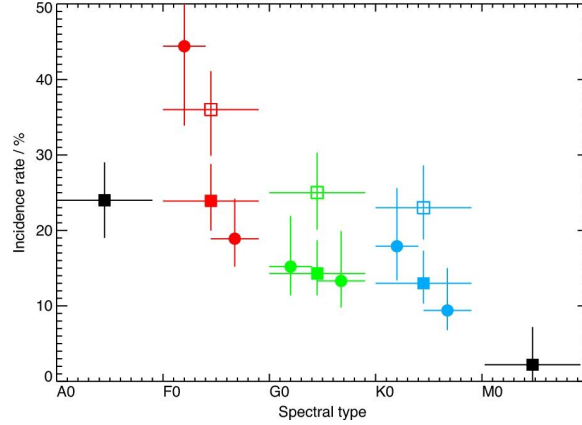
ALMA 高灵敏度（亚）毫米观测与 JWST 高分辨率红外观测改变了这一局面。针对年轻 M 型星样本的 ALMA 深度观测表明其碎屑盘在经过完备性修正后的探测率可达 23%^[29]，JWST/NIRCam 的高对比度成像则进一步突破了低光度恒星周围冷暗尘埃的探测瓶颈。例如，Lawson 等人^[42]与 Palatnick 等人^[43]分别在散射光波段（前者使用 F356W 与 F444W 滤光片，后者使用 F200W 与 F444W 滤光片）解析了 M 型星 Fomalhaut C 与 TWA 20 周围微弱的碎屑盘。特别是针对 TWA 20 系统，观测不仅得到了其盘半径（约 64.7 AU）与倾角（约 70.1°），更在距恒星 48 AU 以外的区域给出了直接成像的质量上限（约 1 M_{Jup} ），限制了该区域木星质量及以上气态巨行星的存在。这些结果显示了 JWST 在探测低表面亮度碎屑盘结构方面的优势。

3 碎屑盘的物理特性、形态结构与成分特征

3.1 物理特性：温度、尺度与质量

观测表明，碎屑盘的温度结构与恒星光谱型存在相关性。A 型主序星的红外光谱能量分布（SED）常表现为双温或多温黑体辐射叠加，对应空间独立的内外盘结构。Vega (A0V，如图 2 所示) 与 β Pictoris (A6V) 是此类结构的经典代表，其内盘暖尘埃受强辐射压作用主要保留较大尺寸颗粒，而外盘冷尘埃则由碰撞级联维持^[16,44,45]。相较之下，类太阳恒星（FGK 型）盘面多呈多带结构，典型案例包括 τ Ceti 等系统^[46-48]，其盘半径整体符合恒星光度-盘半径标度律。M 型红矮星由于原行星盘内盘固体物质早期快速耗散^[49]与强恒星风拖曳效应^[40]，多为冷尘埃主导的单温或弱双温系统，内区暖尘埃信号极度匮乏^[28]。

在多行星系统中，这种温度分层结构往往受行星动力学雕刻的影响，且单纯依赖红外



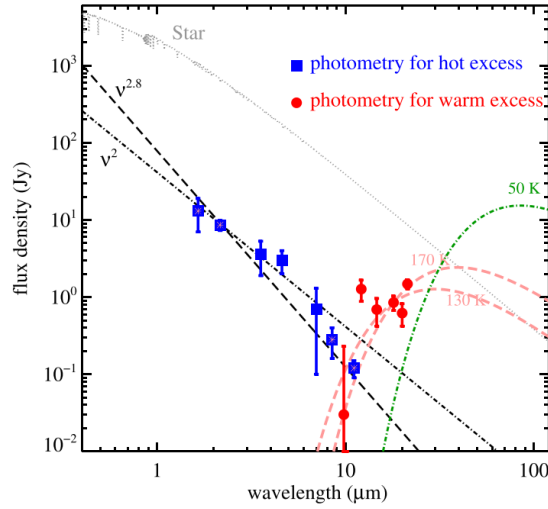
注：图中展示了从 A 型到 M 型主序星碎屑盘探测率，结果表明探测率随恒星质量减小（光谱型变晚）而下降。图中数据来自赫歇尔空间天文台 (Herschel) 开展的 DEBRIS (Disc Emission via a Bias-free Reconnaissance in the Infrared/Submillimetre) 巡天项目，主要利用 PACS 仪器在 $100\ \mu\text{m}$ 和 $160\ \mu\text{m}$ 远红外波段对太阳系近邻主序星进行了无偏成像观测。实心/空心方块分别表示原始/完备性修正后的探测率（图源：改编自 Sibthorpe 等人^[26]）。

图 1 早期 Herschel 红外巡天视角下碎屑盘探测率随恒星光谱型的变化

SED 多成分拟合容易陷入简并性局限。例如，宽轨道巨行星系统的经典基准 HR 8799 (A5V) 曾基于 SED 被认为包含内、中、外三个温带^[50]，但后续 ALMA 高分辨成像显示其中温带实为四颗大质量巨行星在内外盘之间清除的宽阔尘埃间隙 ($15\text{-}100\ \text{AU}$)^[51-53]。类似地，HD 95086 的带间隙结构同样预示着除已知巨行星 HD 95086 b 外仍存在未见行星动力学约束^[54,55]。这些案例体现了高分辨成像在打破 SED 拟合简并、反映真实物理结构中的不可替代性。

空间尺度上，统计表明碎屑盘主环的特征半径与中心恒星光度呈现一定趋势，主要受控于恒星辐射决定的原行星盘雪线位置、初始盘尺度及后续动力学演化^[57]。高光度的 A 型星拥有最延展的盘结构（主环多分布于 $50\text{-}200\ \text{AU}$ ，尘埃晕可延伸至 $1000\ \text{AU}$ 以上），强辐射压有效清除了微米级尘埃，留存的大颗粒尘埃易形成受行星摄动影响的非轴对称宽环结构^[16,58-61]。FGK 型星的盘整体结构更类似太阳系柯伊伯带，Herschel 巡天显示约 20%-25% 的晚型星盘可延伸至 $100\ \text{AU}$ 以上，部分伴有冷尘埃晕^[17,26,62]。M 型红矮星的碎屑盘最为紧凑（主环多小于 $40\ \text{AU}$ ），主要归因于极近的初始雪线位置以及强恒星风对小颗粒演化的主导作用^[29,41,63]；尽管存在个别延展的年轻特例（如 AU Mic^[64]），成熟 M 型星在毫米波段的冷尘埃探测率整体偏低。

碎屑盘的尘埃质量主要通过远红外至毫米波段 SED 拟合的热辐射法估算^[65]，并可结合高分辨率散射光成像反演微米级颗粒分布，形成粒径维度的互补约束^[49]。观测显示，尘埃质量与恒星光谱型及系统演化阶段密切相关。A 型主序星尘埃质量最高（典型值 10^{-3} 至 $10^{-1} M_{\oplus}$ ），且随系统年龄增长呈现碰撞耗散与辐射压清除趋势^[61,66]。FGK 型星尘埃质量多分布在 10^{-4} 至 $10^{-2} M_{\oplus}$ ，不仅遵循 $M_d \propto t^{-1}$ 反相关演化规律^[67,68]，且其盘发生率与宿主恒



注: 该图基于多波段红外测光数据, 展示了 Vega 系统中不同温度尘埃成分的辐射特征。蓝色方块代表近红外热尘埃超, 对应恒星 ≈ 0.2 AU 处的小尺寸难熔颗粒 (温度远高于 250 K); 红色圆点代表中红外暖尘埃超, 由 130–170 K 的内盘尘埃 (3–5 AU) 贡献; 绿色曲线为外盘冷尘埃 (≈ 50 K) 的辐射贡献 (图源 Su 等人^[56])

图 2 Vega 系统的红外光谱能量分布 (SED)

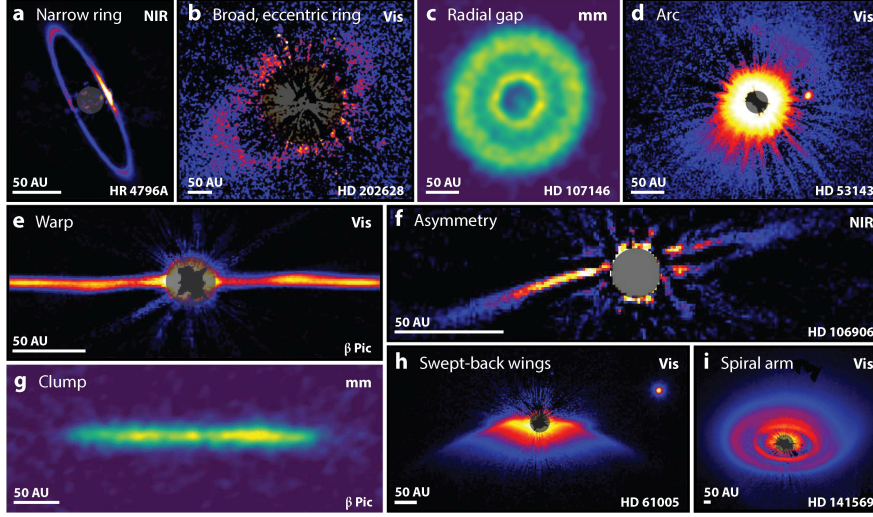
星金属丰度缺乏相关性, 表明星子形成的阈值远低于巨行星核吸积过程的金属丰度要求^[36]。M 型红矮星尘埃质量整体偏低, 尽管 ALMA 与 JWST 的高灵敏度观测已将其探测极限分别推进至 $10^{-6} M_{\oplus}$ 与极低的 $10^{-7} M_{\oplus}$ 水平, 拓展了暖尘埃与微小颗粒的探测窗口^[69,70], 但 M 型星强烈的恒星磁活动 (如耀发时变) 仍是准确提取其微弱盘信号的观测干扰^[71]。

3.2 形态结构与成分特征

3.2.1 盘的形态结构与动力学复杂度

A 型恒星的碎屑盘形态极具多样性, 涵盖窄环与宽广延展盘^[72-74], 且常伴有偏心环^[58]、螺旋臂^[75,76] 及盘面翘曲^[60,77] 等非轴对称结构。这些复杂形态的塑造由系统内动力学过程与辐射效应的耦合作用塑造。恒星强辐射压与 P-R 拖曳效应主导了尘埃的粒径截断, 而留存的大颗粒则易被行星共振束缚形成多环结构。特别地, 未被直接探测到的行星长期摄动可引发偏心盘和方位角不对称结构: 远星点处由于轨道速度降低导致数密度增强 (毫米波段增亮), 而近星点处则因尘埃温度升高形成热辐射增强 (红外波段增亮)^[18,78]。对这些动力学过程的分析依赖多波段观测的互补性 (如散射光追踪微米级尘埃晕, 毫米波分辨大颗粒母体环, 见图 3)。同时, 基于高对比度偏振成像的巡天 (如 GPIES) 的统计结果进一步显示, 近红外散射光可分辨的碎屑盘普遍展现出中心物质匮乏的环状结构。这种内盘尘埃的缺失为行星动力学清空机制或星子带空间局域化模型提供了独立于热辐射的观测约束^[20]。大样本高分辨率观测进一步确认了这些非轴对称与复杂亚结构的普遍性。其中, ALMA 大型巡天项目 ARKS 对 24 个碎屑盘的亚结构特征开展了系统的统计约束^[35]。径向结构分析表明^[79,80], 样本中相当比例的盘呈现出多重环与间隙结构, 同时普遍存在宽平滑晕与局部不

对称性。盘内亚结构的高发生率表明，行星对碎屑盘的动力学塑造具有普遍性。



注：该图展示 8 个典型碎屑盘系统的散射光与毫米波热辐射图像，直观呈现早期星碎屑盘常见的非轴对称形态多样性。图中部分数据经平滑或高通滤波处理以突出亚结构（图源 Hughes 等人^[49]）。

图 3 碎屑盘非轴对称结构的多波段观测示例

最新高分辨率观测不仅能解析行星摄动引发的微弱结构扰动，还发现了难以用经典动力学框架单独解释的极端构型，HD 53143 是其中最具代表性的案例。MacGregor 等人^[81] 基于 ALMA 观测发现该系统存在偏心率为 0.21 的偏心尘埃盘，动力学分析表明该盘呈现远星点增亮特征，即尘埃在远星点轨道速度降低引起局部数密度升高。这一现象与 Pan 等人^[82] 提出的偏心盘动力学理论及 Lovell 与 Lynch^[83] 的数值模拟结果一致。然而，Stark 等人^[84] 对该系统的深度散射光成像进一步发现，该盘存在前向散射特征缺失的异常，这不仅对尘埃颗粒性质提出了特殊约束，也与单一偏心环的经典预测不符，暗示系统可能经历过剧烈的星子碰撞或大质量伴星引发的强动力学扰动。这一案例进一步表明，主序星碎屑盘的结构演化受系统内行星-星子-尘埃之间的复杂动力学相互作用的共同调控。

类太阳恒星光度较低，较弱的辐射压允许亚微米至微米级颗粒在盘中长期留存^[57]，其碎屑盘形态主要表现为多环系统^[47,85]、具有空洞的宽盘^[86,87] 及弥散外晕。外晕的塑造主要受恒星风与光致蒸发共同驱动：一方面，年轻恒星强烈的星风会直接将微小颗粒向外驱离；另一方面，恒星的紫外辐射会引发光致解吸效应，使盘内富冰尘埃表面的挥发性成分（如水冰、一氧化碳等）释放为次生气体，该气体产生的曳力会协同星风，将亚微米级颗粒向外输送至数百 AU 的尺度。随着恒星主序演化及磁活动减弱，这些弥散的外晕会逐渐消散^[88-90]。在多行星系统中，行星的引力摄动通常能塑造出清晰的尘埃间隙^[91,92]。近期基于 JWST 的直接成像观测为这一机制提供了直观证据，例如 Lagrange 等人^[93] 在 TWA 7 系统中探测到一颗正在塑造盘间隙的亚木星质量行星。然而，JWST 的最新观测也发现了部分拥有宽轨道

巨行星的系统, 其内盘物质并未被有效清除^[94,95], 这与远距离巨行星的引力摄动经典理论预期不符, 也暗示系统中可能存在极高的尘埃补给效率。

M 型红矮星的低光度使雪线显著内移, 其碎屑盘通常较为紧凑^[39]。目前有限的解析样本多呈现高倾角形态, 这主要源于视线方向上较高的尘埃柱密度所带来的观测选择效应。年轻且活跃的 M 型星盘常表现出极端的非稳态特征 (如 AU Mic 中高速运动的尘埃团块^[96]), 这主要源于强磁场活动与高频耀发对微小颗粒的剧烈扰动, 或是大星子灾变性碰撞后被强恒星风加速剥离的结果^[97]。相比之下, 活动性较弱的 K 型星盘则趋于稳定, 其形态结构主要受行星引力的长期雕刻。

3.2.2 尘埃粒径分布特征

在理想稳态碰撞级联模型中, 碎屑盘尘埃的粒径分布满足幂律形式 $n(a) \propto a^{-q}$, 经典 Dohnanyi 碰撞模型给出该指数的理论值为 $q \approx 3.5$ 。Marshall 等人^[98] 基于远红外至毫米波段观测, 对 133 个可空间分辨碎屑盘开展了系统性参数拟合, 得到尘埃粒径分布指数的均值为 $q = 3.49^{+0.38}_{-0.33}$, 与理论预期一致。此外, 该研究发现 q 值与盘的特征半径 R_{disc} 呈正相关趋势, 表明盘外区可能以碰撞速度相关的碎裂过程为主, 或存在大尺度尘埃颗粒生长效应。尽管存在这一整体统计趋势, 实际盘环境中恒星辐射压、恒星风等效应仍会调控尘埃粒径分布, 使特定粒径区间偏离稳态模型的幂律预测。

在探讨尘埃的动力学演化时, 辐射压吹出尺寸 blowout size (通常记为 a_{blow} 或 s_{blow}) 是一个重要物理量, 其定义为辐射压与引力之比 (即 β 因子) 等于 0.5 时对应的尘埃颗粒临界半径^[5], 该尺寸大小依赖于中心恒星的光度与质量。对于早型恒星 (如 A 型星), 较高的光度使 a_{blow} 通常在几微米到十几微米量级, 从而导致小颗粒在盘内明显缺失; 而对于低光度的 M 型星, 辐射压对应的 a_{blow} 极小 (甚至处于亚微米量级), 此时强烈的恒星风曳力往往取代辐射压成为驱散小颗粒的主导机制。

尘埃粒径分布偏离理想幂律的主要原因在于动力学过程对小颗粒的选择性清除。对于 A 型星等早型星, 辐射压所对应的 a_{blow} 基本决定了粒径分布的下限, 小于该尺寸的颗粒会被迅速吹离系统。这种小颗粒的缺失破坏了局部碰撞平衡, 使得截断附近的粒径分布出现“波浪状”振荡结构^[99]。相比之下, 在光度更低的晚型星 (如 M 型矮星) 系统中, 尽管辐射压不足以有效清除尘埃, 但其强烈的恒星风与频繁的恒星日冕物质抛射同样能高效驱逐亚微米颗粒^[40,41]。这表明亚微米颗粒的快速损耗是碎屑盘演化的普遍特征。

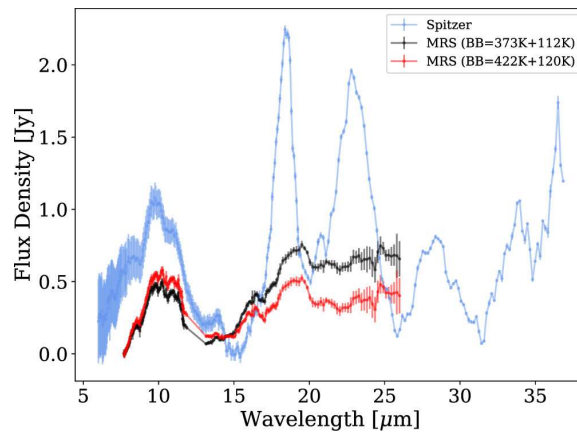
不同尺寸颗粒在受力上的差异导致盘内呈现出空间分层结构。毫米至厘米级的大颗粒由于动力学寿命较长且受辐射压/恒星风影响有限, 往往被束缚在母体星子所在的致密环结构中; 而亚微米至微米级的小颗粒在被驱离系统的过程中, 会向外形成高度延展的散射光晕。被称为“飞蛾盘”的类太阳恒星 HD 61005 (G8V) 是这一分层结构的典型案例: ALMA 高分辨率观测显示其毫米级尘埃主要集中在 $\sim 40\text{--}70$ AU 的环带内^[100]; 而 HST 可见光成像则揭示了由亚微米颗粒构成、向外延伸数百 AU 的非对称后掠晕结构^[101]。这种“大颗粒锚定源区、小颗粒示踪外延结构”的分层图景, 已成为联合 ALMA 与光学/红外高对比度成像 (如 JWST) 解析碎屑盘结构的常用框架。

3.2.3 尘埃的矿物学与成分演化：硅酸盐与水冰

硅酸盐光谱特征（如 $\sim 10\ \mu\text{m}$ 和 $\sim 18\ \mu\text{m}$ 发射峰）是研究碎屑盘尘埃热历史与矿物学演化的重要观测手段^[13,102]。盘内尘埃的晶格有序度受到恒星辐射场与星子动力学碰撞的共同调控，空间温度梯度分布以及主星质量与系统年龄的差异亦会影响其矿物学特征^[103,104]。

恒星辐射与高能碰撞过程共同调控硅酸盐的结晶机制。在原行星盘阶段，较强的恒星辐射场可延伸达到热退火温度（约 800–1000 K）的区域，触发无定形硅酸盐的热退火结晶，从而提高内盘及经径向输运物质中的结晶硅酸盐比例^[105,106]。观测亦表明，强辐射环境能够提升尘埃的整体结晶度^[107,108]。这些富结晶物质随后被并入星子，并在碎屑盘阶段通过大规模星子碰撞重新释放，从而解释了早期星碎屑盘中常见的尖锐 $10\ \mu\text{m}$ 结晶特征。星子碰撞产生的瞬态激波加热是另一种重要机制：中低速撞击（ $\sim 3\text{--}5\ \text{km/s}$ ）产生的熔融物质在缓慢冷却过程中可促进结晶，而超高速撞击则可能导致结构破坏。相较于 Spitzer 时代的观测，JWST 对 β Pictoris 的最新观测显示，其盘中结晶硅酸盐含量随近期大规模碰撞事件发生明显变化（如图4所示），为动力学事件对矿物学特征的重塑提供了直接观测证据^[109]。

系统的动力学演化也直接调控尘埃的产生与长期耗散^[2,110]。行星摄动可激发星子的轨道偏心率与倾角，从而提高其相对碰撞率^[4,111]；高速碰撞产生的激波可使硅酸盐气化，并在快速冷却（淬火）后形成无定形玻璃态物质^[112–115]。从长期演化来看，随着尘埃耗散和碰撞减弱，年老系统（ $>1\ \text{Gyr}$ ）的光谱特征呈衰减趋势^[25]。在空间分布上，碎屑盘部分继承了原行星盘的热历史。由于热退火效率随径向距离急剧下降，硅酸盐结晶度通常呈现由内向外递减的梯度^[107,116]。对于早期型星，辐射压可迅速清除亚微米级无定形颗粒，近星区域残留的大型星子通过持续碰撞释放富镁橄榄石等结晶尘埃；而外盘温度极低且尘埃常被挥发冰尘包覆^[61,117]，阻碍了原位结晶，因此多保留原始无定形状态^[115,118]。



注：对比 2004 年 Spitzer 与 2023 年 JWST 的观测数据，可见 $18\text{--}23\ \mu\text{m}$ 波段的结晶橄榄石发射特征在 20 年间几乎完全消失，为盘内近期发生的星子巨型撞击及随后的辐射清除过程提供了观测证据（图源：改编自 Chen 等人^[109]）

图4 β Pictoris 碎屑盘中红外光谱的时间演化

不同质量恒星的光度与辐射环境差异, 也导致了各类系统呈现出不同的矿物学图景。A 型星在早期具有广阔的热退火区域, 且其强辐射压在碎屑盘阶段有效清除了小颗粒无定形尘埃, 使盘内 (如 β Pictoris) 由富结晶次生碎片主导^[119-121]。FGK 型星的辐射压较弱, 无定形尘埃颗粒能够在盘中存留更长时间, 其矿物学特征更多反映了局部动力学事件的主导作用。缺乏近期剧烈碰撞的系统多由宽泛的无定形硅酸盐主导^[46], 而类似 HD 69830 这样发生过近期小行星带大规模碰撞的系统则表现出次生结晶特征^[122]。M 型矮星早期的热退火区域极其狭窄, 且主序阶段恒星风拖拽效应通常占主导。以 AU Mic 为例, 其光谱通常由多孔的无定形硅酸盐主导, 除非发生极端撞击事件, 否则难以观测到高结晶度特征^[123,124]。

此外, 除了硅酸盐矿物, 固态水冰也是碎屑盘成分演化的重要探针。近期, Xie 等人^[125]利用 JWST/NIRSpec 在 HD 181327 碎屑盘中探测到了结晶水冰的光谱特征 (如 $3\ \mu\text{m}$ 附近的吸收带及 $3.1\ \mu\text{m}$ 处的特征峰)。观测显示, 该系统雪线外水冰质量分数在 0.1%—21% 范围内变化, 表明盘内存在富冰星子库。这一结果也表明, 在频繁的星子碰撞环境中, 水冰物质会经历持续的破坏与重新补充过程, 这为理解水冰在非稳态演化阶段的输运机制提供了观测证据。

3.3 碎屑盘内的气体成分

长期以来, 碎屑盘被视为贫气系统 (原始气体在 $\lesssim 10\ \text{Myr}$ 内耗散)^[2,126]。然而, ALMA 等高灵敏度 (亚) 毫米观测在大量主序星 (如 β Pic, 49 Ceti) 中探测到冷气体 (CO, CI, OI) 信号^[49,61,127], 改变了这一认知。此外, JWST 近红外光谱开辟了探测内侧温暖气体的新窗口, 例如在 49 Ceti 中识别出紫外荧光激发的 CO 辐射, 这一结果与富 H_2 的原始气体模型不一致, 更支持气体来源于富含 CO 冰星子持续释放的次生起源^[128]。当前对碎屑盘气体来源的解释主要包括原生残留与次生起源两类^[49,129], 除极少数“混合盘” (如 HD 21997) 可能保留了富 H_2 的原生吸积气体外^[130,131], 次生起源 (由富含 CO 和 CO_2 等挥发性冰组分的星子碰撞或升华释放) 是目前解释绝大多数系统的主流机制^[132,133]。次生模型面临的核心挑战是 CO 在缺乏屏蔽时光解离时标极短 ($< 100\ \text{年}$)。对此, Matrá 和 Kral 等人^[129,132]提出中性碳屏蔽机制: CO 光解离产生的 CI 在盘中迅速积累并形成保护层, 有效阻挡恒星及外部的紫外辐射, 从而延长 CO 的存活时间。

大样本射电巡天观测 (如 ARKS) 进一步表明, CO 气体在碎屑盘中广泛存在, 且部分系统中气体的存留时标长于经典模型的预测结果^[134]。观测还显示, 这些残留气体可通过流体动力学过程调控尘埃的演化。以 HD 121617 为例, 盘中偏离开普勒运动的气体可通过气体曳力改变毫米级尘埃的运动轨迹, 推动尘埃向外迁移并形成宽阔外晕, 同时可驱动盘内非轴对称尘埃弧的形成^[135]。这些结果表明, 在富气碎屑盘中, 气体动力学过程与行星引力摄动均为塑造盘大尺度结构的重要物理机制。

次生起源假说也得到了最新观测的直接支持。HARPS 高精度光谱探测到的 Ca II 吸收线的瞬变特征, 以及 TESS 光变曲线分析发现的非对称光变信号, 表明系外彗星掠星事件在年轻主序星周围较为普遍, 从而为盘内气体通过富冰星子释放提供了观测证据^[136,137]。尽管碎屑盘气体总量通常较低, 但微量气体即可通过气体阻力改变尘埃的运动轨迹与空间分布^[138,139]。在气体密度较高的系统中, 光电不稳定性甚至可以在缺乏行星摄动的情况下产生

尘埃环或螺旋等亚结构^[140,141], 为盘结构的形成提供了一种重要的非行星动力学机制。

为便于跨样本比较, 不同光谱型主序星碎屑盘的典型观测量级与形态特征汇总于表1。总体上碎屑盘性质随恒星光谱型与光度呈现一定的分层趋势: 早型星盘更易呈现大尺度、强辐射与复杂结构, 且常伴随 CO、CI 等气体示踪; FGK 型星系统多呈现类柯伊伯带尺度的冷盘与多环结构; M 型星盘则更冷、更紧凑且红外辐射弱, 其探测更依赖 (亚) 毫米波与中红外波段的高灵敏度设备 (如 ALMA 与 JWST)。这些趋势同时受到物理机制 (辐射压、P-R 拖曳、碰撞级联) 与观测选择效应 (不同波段对不同温度与粒径成分的敏感性) 的共同影响。因此, 为全面且准确地解析碎屑盘的物理架构, 需依托跨波段的协同观测 (如结合光学/近红外散射光成像与毫米波热辐射干涉), 以降低单一观测窗口在参数反演中的简并性。

表 1 不同光谱型主序星碎屑盘典型观测特征对比

特征维度	早型星 (A/B 型)	类太阳恒星 (F/G/K 型)	晚型红矮星 (M 型)
典型代表	Vega, β Pic, Fomalhaut, HR 4796A	ϵ Eri, HD 107146, τ Ceti	AU Mic, TWA 7, TWA 20
温度结构	双温或多温结构	多带结构普遍	暖尘埃匮乏, 冷盘主导
空间尺度 (R_{disk})	延展且分层显著 (外晕可至 1000 AU)	尺度适中 (多呈类太阳系多带架构)	高度紧凑 (主盘通常 < 40 AU)
尘埃质量 (M_{dust})	$10^{-5} - 10^{-2} M_{\oplus}$	$10^{-6} - 10^{-4} M_{\oplus}$	$10^{-8} - 10^{-6} M_{\oplus}$
典型粒径	严格截断于 $\gtrsim a_{\text{blow}}$ (微米至毫米级为主)	在 a_{blow} 附近平滑过渡 (亚微米-毫米混合)	受星风主导而偏离辐射压 a_{blow} (亚微米级占比高)
结构形态	偏心环/螺旋臂/窄环	多环系统/间隙/宽带	高度不对称/瞬变团块
硅酸盐特征	尖锐发射峰 (结晶成分)	混合特征	$10 \mu\text{m}$ 宽峰 (无定形为主)
气体成分	CO/C/O 探测率较高	较少探测到	极难探测

4 主要模拟方法与模型

碎屑盘的物理性质研究高度依赖于数值模拟与理论模型的结合。随着观测精度的提升, 单一模型已难以解释复杂的多波段数据, 目前的趋势是将碰撞动力学 (描述尘埃产生)、辐射转移 (描述观测特征) 与流体/N 体动力学 (描述盘-行星及盘-气体相互作用) 相结合。此外, 机器学习算法也开始应用于海量光谱数据分类, 例如 Lu 等人^[142] 开发的无监督学习算法 CLUES, 可识别 Spitzer 目录中尘埃矿物学特征与恒星光谱类型的关联。

4.1 碰撞动力学模型

该类模型旨在通过模拟碰撞破碎、辐射压及 P-R 拖曳效应, 预测尘埃粒径分布与空间结构, 主要包括稳态碰撞级联、P-R 拖曳输运及非平衡态机制。

稳态碰撞级联模型是理解碎屑盘演化的核心物理框架, 也是该领域广泛采用的基准模型。稳态碰撞级联理论由 Dohnanyi^[6] 奠基, 并由 Williams 和 Wetherill^[143] 推广, 假设盘处于从大颗粒到小颗粒的连续碰撞平衡态, 其粒径分布遵循幂律形式 (通常 $q \approx 3.5-3.7$)。近

期观测统计支持了该理论: Marshall 等人^[98]对 133 个空间分辨碎屑盘的分析表明, 尘埃粒径分布指数 q 的均值为 $3.49^{+0.38}_{-0.33}$, 与经典模型预测一致, 同时 q 与盘半径呈正相关趋势, 为不同径向区域的稳态演化过程提供了观测约束。在低密度年轻系统中, 颗粒碰撞时标远小于径向漂移时标 ($t_{\text{coll}} \ll t_{\text{PR}}$), 尘埃的空间分布主要反映了母体星子的位置。然而, 在低光深或演化后期的系统中, P-R 拖曳的输运机制占主导 ($t_{\text{coll}} > t_{\text{PR}}$) 时, 尘埃将不再被局限于母体带内。Wyatt^[144]指出, 脱离诞生区的尘埃会向内螺旋迁移填充空腔, 导致光学深度径向分布趋于平坦 ($\tau \sim r^0$), 这与碰撞级联主导时的陡降特征 ($\tau \sim r^{-1.5}$) 截然不同, 是理解系外黄道光来源与分布的重要机制。

针对特定光变事件或极端低密度环境, Grigorieva 等人^[145]进一步提出了非平衡态“雪崩”机制: 单次大星子碎裂可触发连锁反应, 产生短暂的尘埃爆发。近期, Swan 等人^[146]利用 JWST 对经历过大型碰撞爆发的白矮星碎屑盘 WD 0145+234 进行光谱监测发现, 其整体热辐射虽逐渐衰减, 但 9–12 μm 的硅酸盐发射特征却保持高度稳定, 表明爆发产生的尘埃云能够在较短时间内重建稳态碰撞级联, 为约束“雪崩”等非平衡态事件的后续演化时标与物理机制提供了观测依据。

4.2 辐射转移与多波段参数反演

辐射转移模型是连接物理参数与观测信号的桥梁。不同于动力学模型关注物质的运动, 该类模型 (如 RADMC-3D^[147], MCFOST^[148,149]) 专注于计算尘埃对恒星辐射的吸收、散射及热再辐射, 从而生成可与观测直接对比的 SED 或合成图像。为减弱单一波段建模中的参数简并, 现代研究通常将辐射转移模型与 MCMC 算法结合, 进行多波段联合拟合。例如, Su 等人^[74]联合多波段数据约束了 Vega 冷盘的质量 ($\sim 0.01M_{\oplus}$) 与粒径分布 ($q \approx 3.7$); Hales 等人^[150]对 HD 110058 的 ALMA 数据建模结果显示, 其 CO 气体分布较以毫米级颗粒为主的大颗粒尘埃更为紧凑, 表明气体更可能由局部持续释放所维持, 该特征支持碎屑盘气体来源于富冰星子的碰撞次生起源假说。

散射光观测数据分析中, 需要对尘埃的散射方向性进行定量描述。除了经典的 Mie 散射理论外, 基于 Henyey-Greenstein (HG) 经验相函数的散射模型也常应用于碎屑盘研究^[151]。该模型采用非对称因子 g ($-1 \leq g \leq 1$) 来表征尘埃的前向或后向散射特征。通过拟合不同散射角下的亮度分布, 可对尘埃颗粒的平均粒径与结构参数进行约束。特别是在处理如 AU Mic 等侧向盘的散射光轮廓时, 相比于假设尘埃为球形颗粒的经典 Mie 散射模型, HG 相函数模型参数更灵活, 能通过调节非对称因子 g 再现观测到的前向散射特征^[124,152,153]。此外, 地面高对比度偏振差分成像技术 (PDI) 通过抑制未偏振的恒星晕光, 能够提取盘面尘埃的偏振相函数与偏振度分布。这些多维度的散射光观测数据可降低单一总光强拟合中的参数简并, 为定量反演尘埃颗粒的孔隙率、反照率及散射角分布提供了额外的物理约束^[20]。

4.3 气体-尘埃相互作用与流体模拟

Lyra 和 Kuchner^[154]提出的光电不稳定性模型指出, 恒星远紫外光子加热气体产生的压力梯度与拖曳力, 能在无行星摄动的情况下驱动尘埃自发聚集成窄环结构^[141]。气体对尘埃动力学的影响还体现在压力梯度的塑造上, Lynch 等人^[155]的理论工作指出, 在高密度区域

中尘埃流体的压力效应不可忽略,并可影响盘的形态。在行星与富气碎屑盘的相互作用中,气体的存在会改变行星开辟间隙的效率与结构,从而弥补纯引力模型在解释年轻富气碎屑盘结构方面的不足^[156]。此外,流体动力学模拟(如光滑粒子流体动力学,SPH)表明,气体阻力可降低微米级尘埃的轨道高度并引发垂直沉降,从而可通过气尘标高差异限定盘内气体丰度^[138]。

4.4 行星摄动与 N 体模拟

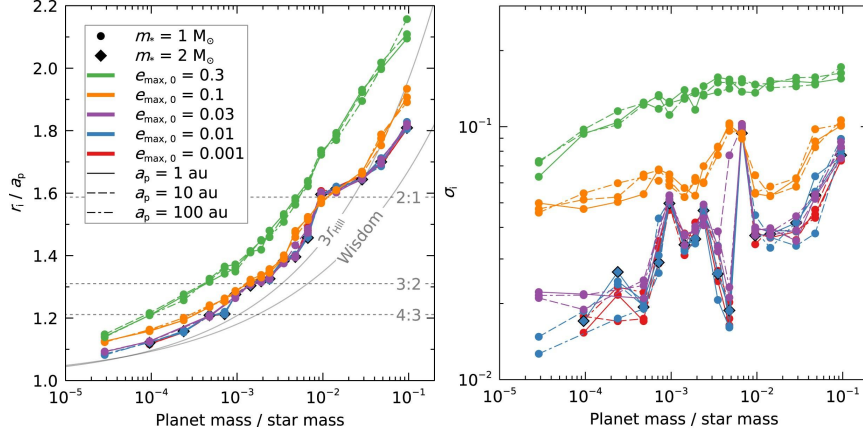
在行星-盘相互作用研究中,动力学模拟可用于分析碎屑盘结构的多样性特征。早期解析模型在多项简化假设下,可评估行星质量与轨道参数对盘边缘截断及偏心率激发的作用,例如 Sefilian 等人^[157,158]采用的半解析方法,在长时标轨道久期扰动的计算中具备较高计算效率。但受到初始条件与线性化假设限制,此类模型结果多只用于定性描述系统演化趋势。N 体数值模拟的发展弥补了这一不足,通过追踪大量测试粒子的轨道演化,可更真实地反演复杂的三维结构。以 β Pictoris 系统的盘翘曲结构为例,早期解析模型已从理论上指出该结构起源于行星摄动^[8],而后续 N 体模拟才可进一步约束系统内行星的动力学参数,并成功复现观测到的盘的小尺度非对称结构^[159,160]。

对于贫气盘,N 体模拟工具(如 REBOUND^[161]或 Mercury^[162])常用于解释偏心环、旋臂等非轴对称结构。结合高分辨率观测,这类模型可对未探测行星作出定量约束。例如, Pearce 等人^[163]建立了盘内边缘陡峭度与行星-恒星质量比的关系(如图5所示);其对 ALMA 样本的分析显示,大多数盘的内边缘相较于理论预测更为平缓,这不仅降低了潜在摄动行星的质量上限,也说明这些边缘难以由单一的无迁移动力学过程(如静态大质量圆轨道行星)单独塑造。在行星轨道动态演化方面, Friebe 等人^[164]的模拟表明,向外迁移的行星不仅能雕刻出比静态行星更宽阔的尘埃间隙,还会将颗粒捕获于平运动共振带中,形成随行星同步外移的不对称尘埃环,这为推断行星系统的早期迁移历史提供了具体的观测判据。

Fomalhaut 系统中偏心且边缘锐利的尘埃环长期被认为是内侧偏心行星摄动的结果^[165]。尽管原摄动源候选体 Fomalhaut b 已在哈勃最新观测中被确认为星子灾难性碰撞产生的瞬态尘埃云^[166,167],依赖未探测行星的动力学雕刻仍然是解释该不对称环的主要机制。此外,N 体模拟在排除假说方面同样重要。例如,对 AU Mic 高速拱状结构的高分辨成像排除了引力束缚起源^[96,168],支持其由强烈恒星风或耀斑驱散尘埃所致^[97,169]; τ Ceti 系统中缺乏剧烈动力学扰动特征的模拟结果暗示不存在木星质量行星,为其潜在宜居性提供了动力学约束^[46]。

5 典型系统与观测基准

尽管目前已探测到的碎屑盘数量众多,但少数距离较近、结构清晰的系统始终是检验理论模型的重要基准。A 型星 Vega、 β Pictoris、Fomalhaut, K 型星 ϵ Eridani 以及 M 型星 AU Mic 具备详尽的多波段观测数据,分别代表碎屑盘演化中不同的物理图景。



注: 图中展示了 N 体模拟得到的盘内边缘属性随行星-恒星质量比的变化关系。(a) 内边缘位置 (r_i): 纵轴为以行星半长轴 (a_p) 归一化的边缘半径。(b) 内边缘陡峭度 (σ_i): 纵轴为边缘宽度的拟合参数 σ_i , 数值越小表示边缘越陡峭。模拟结果表明, 质量越大的行星倾向于塑造出距离更远且更陡峭的内边缘 (图片改编自 Pearce 等人^[163])

图 5 行星质量对碎屑盘内边缘形态特征的动力学塑造

5.1 Vega: 辐射驱动下的宁静演化

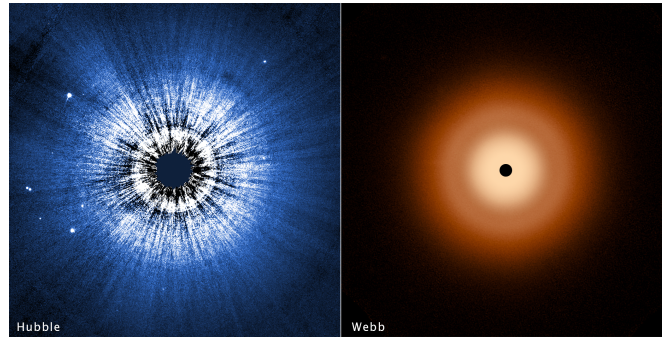
作为首个被发现存在红外超的恒星, Vega (A0V) 是冷碎屑盘的经典原型。早期的双组分模型 (内环加大尺度微米级尘埃外晕) 确立了其基本架构^[74]。相比于 ALMA 的干涉观测, Marshall 等人^[170] 利用大型毫米波望远镜 (LMT) 的单天线观测在 150 AU 范围内探测到了延展发射。尽管 LMT 的低信噪比与分辨率不足以完全确定外盘真实结构, 但其初步数据倾向于外盘具有比 ALMA 拟合结果更为陡峭的边缘截断。

进入 JWST 时代, 研究焦点转向内盘。Su 等人^[56] 利用 MIRI 首次在 P-R 拖曳的物理框架下解释了内盘尘埃分布, 并在 60 AU 处发现流量凹陷。动力学分析表明, 该凹陷并非由大质量行星雕刻, 而是尘埃向内迁移受升华或星子扰动所致。结合 Wolff 等人^[59] 利用 HST 探测到的极微弱散射光尘埃晕, 这些高灵敏度观测共同描绘了一个缺乏巨行星剧烈扰动、主要由恒星辐射驱动尘埃迁移的“宁静”演化图像 (如图6所示)。

5.2 β Pictoris: 年轻系统的剧烈撞击与非稳态特征

与 Vega 相对稳定的演化状态不同, 年轻的 β Pictoris (~ 23 Myr, A6V) 展现出高度活跃的动力学环境。偏振成像显示其内盘与已知行星 β Pic b 的轨道存在 $\sim 4^\circ$ 的倾角差异, 暗示系统中可能存在未探测到的行星或复杂动力学过程^[171]。

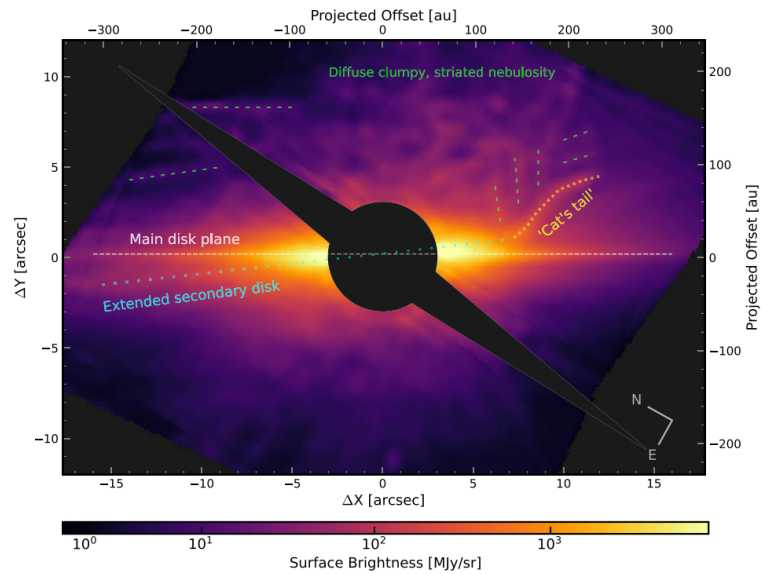
近期 JWST 的观测为其“灾变性”演化提供了直接证据: Rebolledo 等人^[24] 在 MIRI 图像中发现了从盘主体延伸出的“猫尾”结构 (如图7所示), 这被认为是近期发生的一次尘埃产生事件的遗迹。Chen 等人^[109] 对比近 20 年间的中红外光谱发现, 盘中 $18 \mu\text{m}$ 和 $23 \mu\text{m}$ 的晶质镁橄榄石特征几乎完全消失。计算表明这极可能源于一次间歇性巨型撞击, 产生的大量微米尘埃在辐射压下快速外迁导致光谱特征剧变。尽管 Avsar 等人^[172] 对 HST/STIS 跨



注：左图为 HST 拍摄的伪彩色图像，主要探测了盘外围晕轮中微米级尘埃颗粒的可见光反射光^[59]；右图为 JWST 获取的中红外热辐射图像，可分辨近恒星区域暖尘埃的分布，并显示内盘区域存在流量凹陷结构^[56]。两幅图像均显示盘面极其平滑，没有大质量行星嵌入的明显结构特征（图像来源：NASA, ESA, CSA, STScI）。

图 6 Vega 碎屑盘的最新高分辨率观测图像

度 26 年的时间序列分析未探测到可见光波段明显的亮度变化，但这可解释为 STIS 敏感的亚微米级尘埃会被辐射压快速吹出系统。整体而言，该系统展现出行星形成晚期的混沌与非稳态特征。



注：JWST/MIRI 的日冕仪成像观测到一条从主盘延伸出的弯曲尘埃流（“猫尾”结构），该结构被认为是近期盘内一次大型星子撞击事件的产物（图源：改编自 Rebollido 等人^[24]）

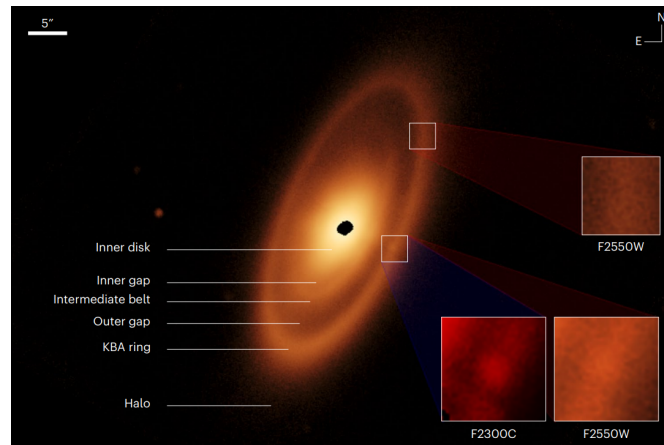
图 7 β Pictoris 的“猫尾”结构

5.3 Fomalhaut: 类太阳系的复杂架构与气体起源

Fomalhaut (A3V) 著名的偏心环结构被视为行星系动力学雕刻的经典范例^[58,165]。MacGregor 等人^[18]的 ALMA 观测通过探测远心辉光确立了外环 0.12 的偏心率, 暗示了偏心行星的引力束缚作用。Matra 等人^[132]还在该盘中探测到了 CO 及其同位素发射线, 支持盘中气体源自富冰星子(类彗星天体)相互碰撞释放的次生起源假说。

JWST 的最新观测成果更新了对该系统的认知。Gaspar 等人^[23]利用 MIRI 首次解析发现 Fomalhaut 的三层嵌套式构型(图8所示): 除已被广泛认知的外环外, 在系统内侧探测到与外环之间存在大尺度间隙的宽阔类小行星带。这种“内盘-间隙-中间带-间隙-外环”的复杂构型与太阳系的结构具有高度相似性, 表明 Fomalhaut 或已形成完整且动力学成熟的行星系统架构。尽管目前尚未直接成像探测到该系统中的行星体, 但其行星引力作用所留下的动力学特征已清晰可辨。

Fomalhaut 系统不仅在空间结构上具有代表性, 其时域上的动力学演化亦表现出显著活跃性。Kalas 等人^[167]基于 HST 观测进一步确认了该系统内发生的第二例星子灾变性碰撞事件(cs2), 表明此前识别的 Fomalhaut b (即 cs1) 并非孤立事件。在约 20 年的观测跨度内连续捕捉到两次大规模碰撞的余波, 指示该系统可能处于非稳态、频繁碰撞主导的演化阶段。这一发现为研究行星形成末期大规模星子碰撞对盘结构的重塑作用提供了重要的观测证据。



注: Fomalhaut 碎屑盘的 JWST/MIRI 中红外成像。图像呈现出系统内部的三层嵌套结构: 延伸的外部尘埃环、新发现的中间小行星带以及内部暖盘, 体现了类太阳系系统架构的复杂性(图源: 改编自 Gaspar 等人^[23])

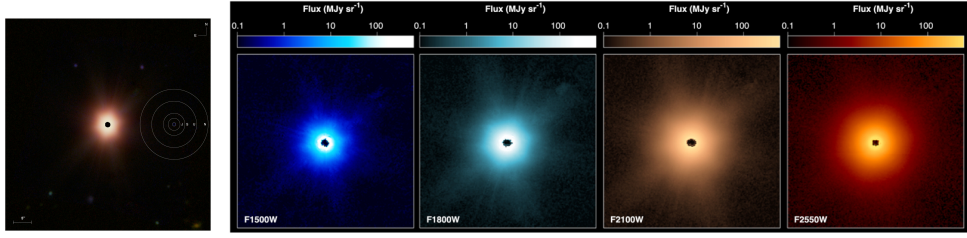
图 8 Fomalhaut 的三重带结构

5.4 ϵ Eridani: 类太阳系的“平静”多环架构

距离仅 3.22 pc 的 ϵ Eridani (K2V) 常被视为年轻太阳系的参照。早期观测认为其存在清晰的空间分层: 类柯伊伯带的外冷盘与类小行星带的内暖盘, 且 ALMA 观测暗示外盘可能存在受行星共振俘获的团块^[85,173]。

然而, 最新的 JWST 观测更新了这一认识, Wolff 等人^[174]利用 MIRI 观测到一个从

~ 3 AU 延伸至 ~ 40 AU 的平滑、连续的温热尘埃盘（如图9所示）。与 Fomalhaut 不同， ϵ Eridani 在中间区域并未表现出巨行星摄动导致的间隙或不对称。由于属于晚型星且具强恒星风，系统内尘埃输运由恒星风拖曳主导。极其平滑的盘面表明微米级尘埃在向内迁移时未受大质量行星散射，这在内冷盘之间设定了行星质量的上限，排除了木星质量以上行星的存在^[174,175]，为搜寻类地行星提供了相对稳定的动力学环境。



注：左图为 JWST/MIRI 对 ϵ Eridani 碎屑盘的高分辨率伪彩色合成图像，白色圆圈标示了太阳系四颗巨行星的轨道尺度作为对比。右图为 JWST 四个中红外波段（分别为 15、18、21 和 $25.5 \mu\text{m}$ ）的直接成像观测结果（图源：改编自 Wolf 等人^[174]）。

图 9 ϵ Eridani 碎屑盘的 JWST/MIRI 中红外成像结果

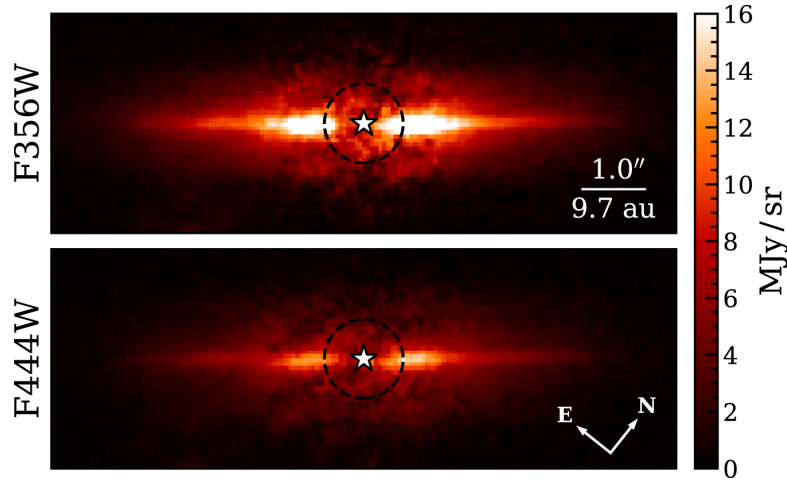
5.5 AU Mic：恒星活动驱动的极端动力学

作为唯一的 M 型星基准，AU Mic 凸显了红矮星强烈活动对碎屑盘演化的深刻影响。Boccaletti 等人^[168] 利用 SPHERE 与 HST 确认盘东南侧存在以 4–12 km/s 高速向外运动的拱状结构，该速度已超越当地逃逸速度，传统引力模型难以解释。目前主流认为这一现象由恒星耀斑或星风爆发驱动的尘埃抛射所致，反映出低质量恒星周围的动力学环境特征。

在结构稳定性与行星约束方面，Lawson 等人^[153] 利用 JWST/NIRCam 首次在 $3\text{--}5 \mu\text{m}$ 波段对该盘进行了高对比度成像（如图10所示）。借助先进的模型约束参考星差分成像（MCRDI）技术，研究不仅确认了盘极其“薄”的垂直结构，更在 20 AU 以外的区域达到了探测 ~ 0.1 木星质量的极高敏感度，由质量上限可以得出外盘不存在大质量气态行星，支持系统内侧已知行星（b/c）并未经历过剧烈动力学散射的假说。这进一步印证了在低质量恒星周围，恒星风与强烈磁活动对盘演化的驱动作用可能远超纯粹的引力摄动。

6 总结与展望

JWST 与 ALMA 的多波段协同观测正将主序星碎屑盘研究推进至精细结构解析与动态演化刻画的新阶段，不仅突破了 M 型恒星冷暗盘的探测瓶颈，也刻画了从微米级暖尘埃到毫米级大颗粒的多尺度物理图景，通过对 β Pictoris 等典型系统的时域监测，观测显示星子大规模碰撞可在短时间尺度内引发矿物学性质的显著变化，进一步表明碎屑盘是持续演化的活跃系统。当前，JWST 正通过多轮 GO 项目在更大样本上系统检验“突发碰撞-尘埃云生成-快速演化”的时域演化序列。同时，次生气体的广泛探测也推动碎屑盘理论模型由传统



注: 图中展示了 AU Mic 系统在 F356W ($3.56 \mu\text{m}$, 上图) 和 F444W ($4.42 \mu\text{m}$, 下图) 两个近红外波段经过星光减除后的首张日冕仪图像, 图像清晰反映了该 M 型红矮星周围碎屑盘高度倾斜的侧向几何形态以及极薄的垂直结构 (图源: 改编自 Lawson 等人^[153])

图 10 AU Mic 碎屑盘的 JWST/NIRCam 近红外高对比度成像

纯引力 N 体模拟拓展至包含气体-尘埃耦合效应的流体动力学体系。

展望未来, 新一代空间观测设备将进一步推动碎屑盘与行星系统的联合研究。**中国空间站巡天空间望远镜 (CSST)** 搭载的系外行星成像星冕仪 (**CPI-C**) 具备约 10^{-8} 量级的成像对比度与高空间分辨率, 可在可见光与近红外波段开展碎屑盘散射光直接成像^[176]。**CPI-C** 有望探测近邻主序星 **0.5-5 AU** 范围内碎屑盘, 并对其中海王星至木星质量级别的冷行星进行直接成像^[177]。在此基础上, 预计于 2027 年发射的罗曼空间望远镜 (**Roman**) 搭载的高对比度日冕仪 (**CGI**), 将有望填补内侧系外黄道光区域 (即内行星区碎屑盘) 的探测空白。正在规划中的下一代空间旗舰任务宜居世界天文台 (**HWO**), 将把解析碎屑盘中精细结构作为搜寻宜居带类地行星的核心前置科学目标。这一发展趋势表明, 碎屑盘研究正由早期的冷盘统计普查与物理性质解析, 迈向以时域演化与多物理过程耦合为核心, 并为行星系统形成与宜居性研究提供核心动力学约束的新纪元。

参考文献:

- [1] Backman D E, Paresce F, Levy E H, Lunine J I, eds. *Protostars and Planets III*. 1993: 1253
- [2] Wyatt M C. *ARA&A*, 2008, 46: 339
- [3] Williams J P, Cieza L A. *ARA&A*, 2011, 49: 67
- [4] Kenyon S J, Bromley B C. *AJ*, 2004, 128: 1916
- [5] Burns J A, Lamy P L, Soter S. *Icarus*, 1979, 40: 1
- [6] Dohnanyi J S. *J Geophys Res*, 1969, 74: 2531
- [7] Wyatt M C, Smith R, Su K Y L, et al. *ApJ*, 2007, 663: 365
- [8] Mouillet D, Larwood J D, Papaloizou J C B, et al. *MNRAS*, 1997, 292: 896

-
- [9] Liou J C, Zook H A. *AJ*, 1999, 118: 580
- [10] Lee E J, Chiang E. *ApJ*, 2016, 827: 125
- [11] Malhotra R. *AJ*, 1995, 110: 420
- [12] Moro-Martín A, Sun Y S, Ferraz-Mello S, Zhou J L, eds. *IAU Symposium: Vol. 249 Exoplanets: Detection, Formation and Dynamics*. 2008: 347
- [13] Chen C H, Sargent B A, Bohac C, et al. *ApJS*, 2006, 166: 351
- [14] Li D, Telesco C M, Wright C M. *ApJ*, 2012, 759: 81
- [15] Aumann H H, Gillett F C, Beichman C A, et al. *ApJL*, 1984, 278: L23
- [16] Su K Y L, Rieke G H, Stansberry J A, et al. *ApJ*, 2006, 653: 675
- [17] Eiroa C, Marshall J P, Mora A, et al. *A&A*, 2013, 555: A11
- [18] MacGregor M A, Matrà L, Kalas P, et al. *ApJ*, 2017, 842: 8
- [19] Schneider G, Grady C A, Hines D C, et al. *AJ*, 2014, 148: 59
- [20] Esposito T M, Kalas P, Fitzgerald M P, et al. *AJ*, 2020, 160: 24
- [21] Gardner J P, Mather J C, Clampin M, et al. *Space Sci Rev*, 2006, 123: 485
- [22] Rieke G H, Wright G S, Böker T, et al. *PASP*, 2015, 127: 584
- [23] Gáspár A, Wolff S G, Rieke G H, et al. *Nature Astronomy*, 2023, 7: 790
- [24] Rebollido I, Stark C C, Kammerer J, et al. *AJ*, 2024, 167: 69
- [25] Trilling D E, Bryden G, Beichman C A, et al. *ApJ*, 2008, 674: 1086
- [26] Sibthorpe B, Kennedy G M, Wyatt M C, et al. *MNRAS*, 2018, 475: 3046
- [27] Morey É, Lestrade J F. *A&A*, 2014, 565: A58
- [28] Luppe P, Krivov A V, Booth M, et al. *MNRAS*, 2020, 499: 3932
- [29] Cronin-Coltsmann P F, Kennedy G M, Kral Q, et al. *MNRAS*, 2023, 526: 5401
- [30] Rieke G H, Su K Y L, Stansberry J A, et al. *ApJ*, 2005, 620: 1010
- [31] Thureau N D, Greaves J S, Matthews B C, et al. *MNRAS*, 2014, 445: 2558
- [32] Matthews B C, Krivov A V, Wyatt M C, et al. Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al., eds. *Protostars and Planets VI*. 2014: 521
- [33] Ertel S, Defrère D, Hinz P, et al. *AJ*, 2018, 155: 194
- [34] Ertel S, Defrère D, Hinz P, et al. *AJ*, 2020, 159: 177
- [35] Marino S, Matrà L, Hughes A M, et al. *A&A*, 2026, 705: A195
- [36] Greaves J S, Fischer D A, Wyatt M C. *MNRAS*, 2006, 366: 283
- [37] Andrews S M, Rosenfeld K A, Kraus A L, et al. *ApJ*, 2013, 771: 129
- [38] Pascucci I, Testi L, Herczeg G J, et al. *ApJ*, 2016, 831: 125
- [39] Kennedy G M, Kenyon S J. *ApJ*, 2008, 673: 502
- [40] Plavchan P, Jura M, Lipsy S J. *ApJ*, 2005, 631: 1161
- [41] Schüppler C, Löhne T, Krivov A V, et al. *A&A*, 2015, 581: A97
- [42] Lawson K, Schlieder J E, Leisenring J M, et al. *ApJL*, 2024, 967: L8
- [43] Palatnick S, Millar-Blanchaer M A, Zhang J, et al. *ApJ*, 2025, 995: 149
- [44] Su K Y L, Rieke G H, Malhotra R, et al. *ApJ*, 2013, 763: 118
- [45] Morales F Y, Rieke G H, Werner M W, et al. *ApJL*, 2011, 730: L29
- [46] Lawler S M, Di Francesco J, Kennedy G M, et al. *MNRAS*, 2014, 444: 2665
- [47] Backman D, Marengo M, Stapelfeldt K, et al. *ApJ*, 2009, 690: 1522
- [48] Greaves J S, Holland W S, Moriarty-Schieven G, et al. *ApJL*, 1998, 506: L133
- [49] Hughes A M, Duchêne G, Matthews B C. *ARA&A*, 2018, 56: 541
- [50] Su K Y L, Rieke G H, Stapelfeldt K R, et al. *ApJ*, 2009, 705: 314
- [51] Matthews B, Kennedy G, Sibthorpe B, et al. *ApJ*, 2014, 780: 97
- [52] Marois C, Macintosh B, Barman T, et al. *Science*, 2008, 322: 1348
- [53] Marois C, Zuckerman B, Konopacky Q M, et al. *Nature*, 2010, 468: 1080
- [54] Rameau J, Chauvin G, Lagrange A M, et al. *ApJL*, 2013, 772: L15
- [55] Su K Y L, Morrison S, Malhotra R, et al. *ApJ*, 2015, 799: 146

- [56] Su K Y L, Gáspár A, Rieke G H, et al. *ApJ*, 2024, 977: 277
- [57] Pawellek N, Krivov A V, Marshall J P, et al. *ApJ*, 2014, 792: 65
- [58] Kalas P, Graham J R, Clampin M. *Nature*, 2005, 435: 1067
- [59] Wolff S G, Gáspár A, Rieke G H, et al. *AJ*, 2024, 168: 236
- [60] Golimowski D A, Ardila D R, Krist J E, et al. *AJ*, 2006, 131: 3109
- [61] Dent W R F, Wyatt M C, Roberge A, et al. *Science*, 2014, 343: 1490
- [62] Marino S, Carpenter J, Wyatt M C, et al. *MNRAS*, 2018, 479: 5423
- [63] Lestrade J F, Wyatt M C, Bertoldi F, et al. *A&A*, 2006, 460: 733
- [64] Matthews B C, Kennedy G, Sibthorpe B, et al. *ApJ*, 2015, 811: 100
- [65] Hildebrand R H. *QJRAS*, 1983, 24: 267
- [66] Hughes A M, Wilner D J, Mason B, et al. *ApJ*, 2012, 750: 82
- [67] Kennedy G M, Wyatt M C. *MNRAS*, 2013, 433: 2334
- [68] MacGregor M A, Wilner D J, Andrews S M, et al. *ApJ*, 2015, 809: 47
- [69] MacGregor M A, Wilner D J, Rosenfeld K A, et al. *ApJL*, 2013, 762: L21
- [70] Anglada G, Amado P J, Ortiz J L, et al. *ApJL*, 2017, 850: L6
- [71] MacGregor M A, Weinberger A J, Wilner D J, et al. *ApJL*, 2018, 855: L2
- [72] Schneider G, Weinberger A J, Becklin E E, et al. *AJ*, 2009, 137: 53
- [73] Milli J, Vigan A, Mouillet D, et al. *A&A*, 2017, 599: A108
- [74] Su K Y L, Rieke G H, Misselt K A, et al. *ApJ*, 2005, 628: 487
- [75] Clampin M, Krist J E, Ardila D R, et al. *AJ*, 2003, 126: 385
- [76] Konishi M, Grady C A, Schneider G, et al. *ApJL*, 2016, 818: L23
- [77] Heap S R, Lindler D J, Lanz T M, et al. *ApJ*, 2000, 539: 435
- [78] Kalas P, Graham J R, Fitzgerald M P, et al. *ApJ*, 2013, 775: 56
- [79] Han Y, Mansell E, Jennings J, et al. *A&A*, 2026, 705: A196
- [80] Lovell J B, Hales A S, Kennedy G M, et al. *A&A*, 2026, 705: A200
- [81] MacGregor M A, Hurt S A, Stark C C, et al. *ApJL*, 2022, 933: L1
- [82] Pan M, Nesvold E R, Kuchner M J. *ApJ*, 2016, 832: 81
- [83] Lovell J B, Lynch E M. *MNRAS*, 2023, 525: L36
- [84] Stark C C, Ren B, MacGregor M A, et al. *ApJ*, 2023, 945: 131
- [85] Booth M, Dent W R F, Jordán A, et al. *MNRAS*, 2017, 469: 3200
- [86] Williams J P, Najita J, Liu M C, et al. *ApJ*, 2004, 604: 414
- [87] Ricci L, Carpenter J M, Fu B, et al. *ApJ*, 2015, 798: 124
- [88] Krist J E, Stapelfeldt K R, Bryden G, et al. *AJ*, 2010, 140: 1051
- [89] Strubbe L E, Chiang E I. *ApJ*, 2006, 648: 652
- [90] Kral Q, Wyatt M, Carswell R F, et al. *MNRAS*, 2016, 461: 845
- [91] Lazzoni C, Bendahan-West R, Marino S, et al. *A&A*, 2025, 704: A176
- [92] Marino S, Yelverton B, Booth M, et al. *MNRAS*, 2019, 484: 1257
- [93] Lagrange A M, Wilkinson C, Mâlin M, et al. *Nature*, 2025, 642: 905
- [94] Rouan D, Boccaletti A, Perrot C, et al. *A&A*, 2025, 698: A113
- [95] Bailey V, Meshkat T, Reiter M, et al. *ApJL*, 2014, 780: L4
- [96] Boccaletti A, Thalmann C, Lagrange A M, et al. *Nature*, 2015, 526: 230
- [97] Chiang E, Fung J. *ApJ*, 2017, 848: 4
- [98] Marshall J P, Hengst S, Young R, et al. *MNRAS*, 2026, 545: staf2221
- [99] Thébault P, Augereau J C. *A&A*, 2007, 472: 169
- [100] MacGregor M A, Weinberger A J, Hughes A M, et al. *ApJ*, 2018, 869: 75
- [101] Hines D C, Schneider G, Hollenbach D, et al. *ApJL*, 2007, 671: L165
- [102] Lisse C M, Beichman C A, Bryden G, et al. *ApJ*, 2007, 658: 584
- [103] Henning T. *ARA&A*, 2010, 48: 21
- [104] Mittal T, Chen C H, Jang-Condell H, et al. *ApJ*, 2015, 798: 87

- [105] Hallenbeck S L, Nuth J A, Daukantas P L. *Icarus*, 1998, 131: 198
- [106] Gail H P. *A&A*, 2001, 378: 192
- [107] van Boekel R, Min M, Leinert C, et al. *Nature*, 2004, 432: 479
- [108] Juhász A, Bouwman J, Henning T, et al. *ApJ*, 2010, 721: 431
- [109] Chen C H, Lu C X, Worthen K, et al. *ApJ*, 2024, 973: 139
- [110] Krivov A V. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2010, 10: 383
- [111] Mustill A J, Wyatt M C. *MNRAS*, 2009, 399: 1403
- [112] Melosh H J. *Impact cratering : a geologic process*. 1989
- [113] Leinhardt Z M, Stewart S T. *ApJ*, 2012, 745: 79
- [114] Apai D, Schneider G, Grady C A, et al. *ApJ*, 2015, 800: 136
- [115] Lisse C M, Chen C H, Wyatt M C, et al. *ApJ*, 2009, 701: 2019
- [116] Kessler-Silacci J, Augereau J C, Dullemond C P, et al. *ApJ*, 2006, 639: 275
- [117] Vandenbussche B, Sibthorpe B, Acke B, et al. *A&A*, 2010, 518: L133
- [118] Donaldson J K, Lebreton J, Roberge A, et al. *ApJ*, 2013, 772: 17
- [119] Chen C H, Li A, Bohac C, et al. *ApJ*, 2007, 666: 466
- [120] Knacke R F, Fajardo-Acosta S B, Telesco C M, et al. *ApJ*, 1993, 418: 440
- [121] de Vries B L, Acke B, Blommaert J A D L, et al. *Nature*, 2012, 490: 74
- [122] Beichman C A, Bryden G, Gautier T N, et al. *ApJ*, 2005, 626: 1061
- [123] Fitzgerald M P, Kalas P G, Duchêne G, et al. *ApJ*, 2007, 670: 536
- [124] Graham J R, Kalas P G, Matthews B C. *ApJ*, 2007, 654: 595
- [125] Xie C, Chen C H, Lisse C M, et al. *Nature*, 2025, 641: 608
- [126] Alexander R, Pascucci I, Andrews S, et al. Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al., eds. *Protostars and Planets VI*. 2014: 475
- [127] Moór A, Henning T, Juhász A, et al. *ApJ*, 2015, 814: 42
- [128] Worthen K, Chen C H, Brittain S D, et al. *Nature Astronomy*, 2025, 9: 1680
- [129] Kral Q, Matrà L, Wyatt M C, et al. *MNRAS*, 2017, 469: 521
- [130] Moór A, Ábrahám P, Juhász A, et al. *ApJL*, 2011, 740: L7
- [131] Kóspál Á, Moór A, Juhász A, et al. *ApJ*, 2013, 776: 77
- [132] Matrà L, MacGregor M A, Kalas P, et al. *ApJ*, 2017, 842: 9
- [133] Matrà L, Wyatt M C, Wilner D J, et al. *AJ*, 2019, 157: 135
- [134] Mac Manamon S, Matrà L, Marino S, et al. *A&A*, 2026, 705: A198
- [135] Weber P, Pérez S, Baruteau C, et al. *A&A*, 2026, 705: A203
- [136] Bendahan-West R, Kennedy G M, Brown D J A, et al. *MNRAS*, 2025, 537: 229
- [137] Norazman A, Kennedy G M, Cody A M, et al. *MNRAS*, 2025, 542: 1486
- [138] Olofsson J, Thébault P, Kral Q, et al. *MNRAS*, 2022, 513: 713
- [139] Takeuchi T, Artymowicz P. *ApJ*, 2001, 557: 990
- [140] Lyra W, Kuchner M. *Nature*, 2013, 499: 184
- [141] Richert A J W, Lyra W, Kuchner M J. *ApJ*, 2018, 856: 41
- [142] Lu C X, Mittal T, Chen C H, et al. *ApJS*, 2025, 276: 65
- [143] Williams D R, Wetherill G W. *Icarus*, 1994, 107: 117
- [144] Wyatt M C. *A&A*, 2005, 433: 1007
- [145] Grigorieva A, Artymowicz P, Thébault P. *A&A*, 2007, 461: 537
- [146] Swan A, Farihi J, Su K Y L, et al. *MNRAS*, 2024, 529: L41
- [147] Dullemond C P, Juhász A, Pohl A, et al., 2012
- [148] Pinte C, Ménard F, Duchêne G, et al. *A&A*, 2006, 459: 797
- [149] Pinte C, Harries T J, Min M, et al. *A&A*, 2009, 498: 967
- [150] Hales A S, Marino S, Sheehan P D, et al. *ApJ*, 2022, 940: 161
- [151] Henyey L G, Greenstein J L. *ApJ*, 1941, 93: 70
- [152] Krist J E, Ardila D R, Golimowski D A, et al. *AJ*, 2005, 129: 1008
- [153] Lawson K, Schlieder J E, Leisenring J M, et al. *AJ*, 2023, 166: 150

- [154] Lyra W, Kuchner M. *Nature*, 2013, 499: 184
- [155] Lynch E M, Lovell J B, Sefilian A A. *MNRAS*, 2024, 529: L147
- [156] Bergez-Casalou C, Kral Q. *A&A*, 2024, 692: A156
- [157] Sefilian A A, Rafikov R R, Wyatt M C. *ApJ*, 2021, 910: 13
- [158] Sefilian A A, Rafikov R R, Wyatt M C. *ApJ*, 2023, 954: 100
- [159] Dawson R I, Murray-Clay R A, Fabrycky D C. *ApJL*, 2011, 743: L17
- [160] Nesvold E R, Kuchner M J, Rein H, et al. *ApJ*, 2013, 777: 144
- [161] Rein H, Liu S F. *A&A*, 2012, 537: A128
- [162] Chambers J E. *MNRAS*, 1999, 304: 793
- [163] Pearce T D, Krivov A V, Sefilian A A, et al. *MNRAS*, 2024, 527: 3876
- [164] Friebe M F, Pearce T D, Löhne T. *MNRAS*, 2022, 512: 4441
- [165] Quillen A C. *MNRAS*, 2006, 372: L14
- [166] Gaspar A, Rieke G. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2020, 117: 9712
- [167] Kalas P, Wang J J, Millar-Blanchaer M A, et al. *Science*, 2026, 391: 371
- [168] Boccaletti A, Sezestre E, Lagrange A M, et al. *A&A*, 2018, 614: A52
- [169] Sezestre É, Augereau J C, Boccaletti A, et al. *A&A*, 2017, 607: A65
- [170] Marshall J P, Chavez-Dagostino M, Sanchez-Arguelles D, et al. *MNRAS*, 2022, 514: 3815
- [171] Millar-Blanchaer M A, Graham J R, Pueyo L, et al. *ApJ*, 2015, 811: 18
- [172] Avsar A M, Wagner K, Apai D, et al. *ApJ*, 2024, 975: 40
- [173] Su K Y L, De Buizer J M, Rieke G H, et al. *AJ*, 2017, 153: 226
- [174] Wolff S G, Gáspár A, Rieke G, et al. *AJ*, 2025, 170: 244
- [175] Mawet D, Hirsch L, Lee E J, et al. *AJ*, 2019, 157: 33
- [176] Dou J P, Zhang X, Zhao G, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2026, 26: 055021
- [177] Zhu Y M, Zhao G, Dou J P, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2026, 26: 024011

Research Progress on Debris Disks Around Main-Sequence Stars

HUANG Zhuochao¹, WANG Shu², CHEN Xiaodian²

(1. *School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing 102206, China;* 2. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*)

Abstract: Debris disks around main-sequence stars serve as fossil records of the formation and evolution of planetary systems, sustained by secondary dust that is continuously replenished through collisional cascades. This paper reviews the detection rates and statistical trends of debris disks across different stellar spectral types, with a particular focus on the recent advancements enabled by JWST and ALMA in observing cold, faint disks around M-dwarfs. It systematically summarizes the temperature and spatial structures, grain size distributions, mineralogical characteristics, and observational evidence of secondary gas within these disks, further discussing dust-gas coupling effects and their dynamical feedback. Additionally, the applications of collisional dynamics, radiative transfer modeling, as well as hydrodynamical and N-body simulations in parameter retrieval and structural interpretation are outlined. The evolutionary scenarios driven by various dynamical mechanisms are also compared through representative systems.

Finally, we highlight the enhanced capabilities of JWST in resolving the fine structures and performing mineralogical diagnostics of inner disks, and provide an outlook on future observational prospects.

Key words: stars; debris disks; main-sequence stars; infrared excess; dust