

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.03.01

近日小天体观测和研究现状

刘燕杰¹, 赵海斌^{1,2,3}

(1. 中国科学院 紫金山天文台 行星科学重点实验室, 南京 210023; 2. 中国科学技术大学 天文与空间科学学院, 合肥 230026; 3. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026)

摘要: 近日距小于 $0.307 \text{ AU}/66 R_{\odot}$ 的太阳系小天体被称为近日小天体, 它们所经历的极端太阳加热和高温磁化的等离子体环境能够揭示小天体自身的信息, 并有助于研究近日空间环境。太阳卫星获取了大量近日小天体的实测数据, 为不同族群近日彗星和小行星的物理特性刻画和演化历程研究, 以及极端近日彗星 (如 Kreutz 族) 与其他彗星的特性比较研究提供了机会。同时, 近日彗星彗发和彗尾结构的观测为太阳系空间磁场结构, 太阳风速度分布, 日冕电子密度、质子温度等日冕特性的研究提供了重要的参考。该文梳理了近 30 年来, SOHO、STEREO、PSP 以及 SolO 等太阳卫星在近日小天体的观测和原位探测方面取得的研究进展, 并介绍了相应的研究方法和技术手段。最后, 展望了当前和未来国内外空间和地面望远镜对近日小天体的观测研究前景和发展方向。

关键词: 太阳系小天体; 近日彗星; 活动小行星; 太阳日冕

中图分类号: P141.2 **文献标识码:** A

1 引言

近日小天体 (near-Sun small bodies) 是指可以在水星轨道近日点以内运行的太阳系小天体, 包括近日彗星 (near-Sun comet) 和近日小行星 (near-Sun asteroid)。当它们近距离飞掠太阳时, 极端太阳加热和高温磁化的等离子体环境会对其轨道和特性演化产生严重影响, 使其经历特殊的物理化学过程, 部分小天体还会表现出剧烈的活动现象, 这为我们理解和认识原始太阳系天体打开了一个新的窗口, 并有助于我们研究近日环境。

目前已经观测到超过 5000 颗近日彗星^[1], 其中近日距小于 $33 R_{\odot}$ 的近日彗星数量较多, 可以按照近日距由小到大进一步细分为潜日彗星 (Sun-divers)、掠日彗星 (Sun-grazers)

收稿日期: 2024-09-22; 修回日期: 2024-10-31

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFA1608100); 国家自然科学基金项目 (62227901); 空间碎片与近地小行星防御科研项目 (KJSP2020020204); 江苏省“双创博士”项目 (JSSCBS0318); 小行星基金会

通讯作者: 刘燕杰, liuyj@pmo.ac.cn

和太阳边缘彗星 (Sun-skirters)^[2], 而近日距在 $33 \sim 66R_{\odot}$ 之间的近日彗星数量较少。近日距小于 $1R_{\odot}$ 的潜日彗星能够深入低密度的太阳大气中, 因此其质量损失和行为由与太阳大气的流体相互作用所主导^[3]。掠日彗星定义为近日点距离小于太阳的流体洛希极限 ($d \approx 2.44 R_{\odot} \sqrt[3]{\rho_{\odot}/\rho_{\text{com}}}$, $\rho_{\odot} = 1409 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{\text{com}} = 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $3.45R_{\odot}$) 的彗星。当彗星运行至该极限距离以内时, 其彗核开始受到太阳潮汐力的破坏^[2]。近日距小于 $33R_{\odot}$ 的近日彗星则被称为太阳边缘彗星, 与掠日彗星相比, 太阳边缘彗星所经历的极端环境要少一些, 在近日点通过中幸存的概率更高。

潜日彗星在早期太阳系中较常见, 它在太阳大气深处的爆炸所产生的冲击波比太阳耀斑更容易产生太阳地震波 (Sun-quakes)。研究表明, 较大质量潜日彗星撞击时释放的动能可能超过太阳耀斑和日冕物质抛射所释放的能量^[3], 因此, 虽然现阶段潜日彗星在观测和理论中都很罕见, 但它仍然在彗星学和太阳物理学中引起了持续关注。掠日彗星的数目最多, 占所有已编目彗星的 40% 以上^[4]。与普通彗星相比, 掠日彗星在太阳大气中存活的时间足够长, 可以穿透太阳的低层日冕, 从而可以提供关于太阳大气和磁场的信息。对近日彗星的观测, 包括它们的光谱、光度和更多的形态学研究, 揭示了关于内日球层和彗核内部组成以及结构的信息, 对于研究彗星的活动、日冕的特征及其相互作用也具有重要意义。

绝大多数的近日彗星可以按照相似的轨道参数分为不同的族群, 目前已经确定的近日彗星族群包括克鲁兹族 (Kreutz)、梅耶族 (Meyer)、马斯登族 (Marsden) 和克拉赫特族 (Kracht), 其他与这些已知族群成员动态不相关的零星彗星都被归类为未分类族 (Non-group)。同一族群中的彗星被认为是由一个早期彗星经历分裂、破碎演化而来。其中 Kreutz 族彗星是唯一已知的掠日彗星族群, 其他彗星族群 (Meyer、Marsden、Kracht) 成员以及未分类族彗星都属于太阳边缘彗星。

Kreutz 族彗星在近日小天体中所占的比例最高, 大量的观测数据为对其进行深入研究提供了可能, 从而有助于我们理解近日小天体的形成和演化。起源于奥尔特云的长周期彗星是 Kreutz 族彗星的一种可能来源, 它受到恒星的扰动进入掠日轨道, 并在到达近日点时被潮汐破坏, 产生的碎片受到非引力的作用在一次或几次的旋转中将母彗星的半长轴从原始的奥尔特云值 (10^4 AU) 改变为典型的 Kreutz 值 (10^2 AU)^[2, 5, 6]。Fernández 等人^[6]通过数值模拟发现, 来自奥尔特云的母彗星直接注入掠日轨道并能产生一些 Kreutz 族彗星, 但是, 由于在母彗星灾难性解体时所受到的冲击, 这些形成 Kreutz 族彗星的碎片将倾向于获得广泛的轨道能量或周期, 这与观测结果相矛盾。而基于奥尔特云彗星首先被注入穿越地球轨道的非掠日轨道, 再通过 Lidov-Kozai 机制演化到掠日轨道的两步过程的模拟, 则不仅能够产生 Kreutz 族彗星, 并能再现 Kreutz 族彗星的近心点辐角在 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 聚集的现象^[6]。

Kreutz 对肉眼 Kreutz 族彗星 C/1882 R1 的多个彗核进行了研究, 结果表明彗核是碎裂的。Marsden 研究了彗星 C/1882 R1 和彗星 C/1965 S1 (Ikeya-Seki) 的演化历史, 揭示了它们在前一个近日点分离的可能性; 并提出 Kreutz 族彗星群的成员可能是在 $10 \sim 20$ 个近日点前由一个原始彗星分裂形成, 随后在连续的近日点通过中产生次级碎片, 这是一种级联效应^[7]。空间卫星的观测发现, Kreutz 族彗星偶尔会在较短的时间内被观测到多个目标或是成对出现, Sekanina^[8, 9]认为这些目标是在较大日心距处的二次 (或多次) 分裂的产物, 提出太

阳和日球层天文台 (Solar and Heliospheric Observatory, SOHO) 观测到的 Kreutz 族彗星的逃逸分裂发生在整个轨道上, 包括远离太阳的远日点区域 (100 ~ 200 AU), 碎片之间非常小的分离速度 (远日点附近约 5m/s) 足以在下一次的近日点通过时间中产生 9 个月的差异。随着演化的不断进行, 新产生的碎片可能会继续分裂, 因此, 现在观测到的彗星很可能与它们的来源彗星相隔几代分裂事件, 这种频繁重复的分裂导致了几乎稳定的 Kreutz 族彗星流, 这些到达的彗星流具有不同的轨道根数, 并且在大多数情况下看起来彼此无关。

在靠近太阳的地方, 特别是在约 $3.2R_{\odot}$ 的洛希极限附近, 近日彗星所受到的强烈的潮汐应力可能会使彗核产生裂缝和断裂, 并在彗核自旋离心力的作用下使彗核分裂成两个或更多部分。彗核表面昼夜及季节性的加热和冷却所受到的热应力也可能导致彗核表面的断裂^[10], 对彗星 67P 的研究结果表明, 热应力在较大的日心距上也能发挥作用^[11]。除此之外, 彗核上气体的不对称释放引起的旋转分裂也可能引起彗核的随机分裂^[12]。

目前已观测到的近日距小于 $66R_{\odot}$ 的小行星有 467 个^[4], 在较小的近日距上, 强烈的太阳加热可以挥发出比水冰更难熔的物质, 即使在无冰的小行星上, 也可能产生类似彗星的由升华驱动的活动现象。理论模型预测, 在接近太阳的轨道上应该能够发现许多的小行星, 但由于在接近太阳时受到灾难性的破坏, 它们迅速解体, 因此很少被观测到^[13]。小行星 (3200) Phaethon 是目前已知最接近太阳的小行星之一, 它在靠近太阳时频繁地表现出异常变亮, 并观测到了反太阳方向的尘尾, 属于活动小行星类的成员^[14,15]。活动小行星具有典型的小行星的轨道参数, 但同时也表现出彗发和彗尾的特征, 研究近日小行星将对活动小行星的激活机制提供确切的见解, 并有助于了解极端条件下小行星的特性。

2 近日小天体的观测

2.1 观测设备

用传统的方法观测经过太阳附近的小天体是极具挑战性的, 在 1995 年之前地基望远镜只观测到 9 颗掠日彗星 (详见第 2.2 节), 太阳卫星数据的获得为太阳附近小天体的研究提供了观测支持, 使得近日小天体的发现速度大大提升。SOHO 从地球-太阳 L1 拉格朗日点的轨道上不间断地观测太阳及其周围环境。其上搭载的大角度光谱日冕仪 (Large Angle Spectrometric Coronagraph, LASCO) 是目前为止发现掠日彗星数量最多的仪器, 它包含 3 个日冕望远镜 C1 ($1.1 \sim 3.0R_{\odot}$)、C2 ($2.0 \sim 6.4R_{\odot}$) 和 C3 ($3.7 \sim 30R_{\odot}$)。C1 望远镜 (1996—1998 年) 未观测到掠日彗星; 与 C3 望远镜相比, C2 望远镜具有更高的灵敏度和更小的像素尺寸, 因此掠日彗星的探测效率更高。

除了 LASCO, SOHO 上搭载的太阳风各向异性探测器 (Solar Wind Anisotropies, SWAN) 和紫外日冕光谱仪 (UV Coronagraph Spectrometer, UVCS) 也对掠日彗星进行观测。SWAN 通过持续监测行星际原子氢流经太阳系产生的氢 Ly- α 辐射在天空平面的分布情况, 确定太阳风纬度分布及其沿太阳周期的变化模式。由于其具有非常高的灵敏度和全天观测的能力, SWAN 已被证明是彗星水分子产生速率 (后文简称产水率) 的重要监测器, 提供了对许多长

周期彗星和木星族彗星的氢 Ly- α 的观测^[16]。

UVCS 的光谱仪狭缝长 106.7 cm, 与太阳边缘相切, 其瞬时视场可绕着指向太阳中心的轴旋转 360°, 沿径向在 1.4 ~ 10 R_{\odot} 之间移动。在 LASCO 的视场中发现目标彗星后, 首先计算出彗星的轨道, 在彗星进入 UVCS 的视场后, 沿着计算的轨迹移动狭缝, 以便进行重复观测。基于 UVCS 得到的不同时刻的 Ly- α 辐射, 研究者可以重构出目标彗星的 Ly- α 图像。这些观测不仅可以确定彗星的产水率、彗核的大小、尘埃的产生率和尘埃的组成等参数, 而且还可以确定沿彗星轨迹局部日冕的电子密度和太阳风速度等物理参数^[17]。

日地关系天文台 (Solar TERrestrial RELations Observatory, STEREO) 包含两颗几乎相同的卫星 STEREO-A 和 STEREO-B, 它们沿相反方向运动, 距离太阳约为 1 AU。不断变化的观测几何结构使其搭载的日地关系日冕和日球层观测仪 (Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation, SECCHI) 能够对近日彗星进行立体观测, SECCHI 包含一个极紫外成像仪 (EUVI, 1.7 R_{\odot})、两个白光日冕仪 (COR1, 1.4 ~ 4 R_{\odot} ; COR2, 2 ~ 15 R_{\odot}) 和两个日球层成像仪 (HI1, 4° ~ 24°; HI2, 18.7° ~ 88.7°, 太阳边缘外侧近似正方形的区域)。STEREO-B 在 2014 年 10 月后与地面联系中断, 受带通、视场以及数据传输延迟的影响, STEREO 发现的彗星数量比 SOHO 少得多^[2]。

STEREO 上搭载的极紫外成像仪 (Extreme Ultraviolet Imager, EUVI) 和太阳动力学天文台 (Solar Dynamics Observatory, SDO) 上搭载的太阳大气成像仪 (Atmospheric Imaging Assembly, AIA) 为掠过太阳表面的彗星的观测提供了可能, EUVI 和 AIA 都对彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 进行了极紫外观测, 此外 AIA 还观测到了彗星 C/2011 N3 (SOHO)。对于具有日面观测的彗星, 结合日冕磁场的三维重构可以了解彗星穿过区域的磁场信息^[18]。

帕克太阳探测器 (Parker Solar Probe, PSP) 和太阳轨道飞行器 (Solar Orbiter, SolO) 都将在水星的轨道内对太阳展开观测, 因此与前面提到的太阳卫星相比, PSP 和 SolO 可以提供近日小天体的原位检测。宽视场成像仪 (Wide-field Imager for Parker Solar Probe, WISPR) 是 PSP 上唯一的成像仪, 包括一对重叠的宽带白光日球成像仪, 它仅在经过近日点期间进行观测。SolO 上的 METIS 日冕仪首次在紫外波段 (121.6 \pm 10 nm) 和白光波段 (580 ~ 640 nm) 同时获得图像, 提供了一种全新类型的近日彗星观测, 可以同时研究彗星尘埃尾巴和中性氢彗发的形状, 有助于提高对彗核碎片和尘埃组成的认识。

地面望远镜也曾观测到掠日彗星, 彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 是自 1970 年以来首颗在地面上发现的掠日彗星, 它在 2011 年 11 月 27 日由 Lovejoy 发现, 是近年来观测到的最亮的掠日彗星。随后在 2012 年 9 月 21 日, 国际科学光学监测网发现了彗星 C/2012 S1 (ISON), 此时距离它经过近日点还有一年多的时间, 并且由于它是第一颗已知的动力学新彗星, 因此获得了广泛的关注, 并成为研究最为充分的掠日彗星^[19]。虽然除了这两颗较为明亮的掠日彗星, 目前利用地面观测对其他掠日彗星的搜寻并未获得成功^[20-22], 但是地面望远镜已经取得 C/2019 Y4 (ATLAS)、C/2021 O3 (PAN-STARRS)、C/2024 G3 (ATLAS) 等几颗近日距较大的近日彗星的观测数据^[23-25]。

2.2 观测历史

Kreutz 族是数量最多研究最充分的近日彗星族群, 其数量占 SOHO 发现彗星总数的 85%, 也是在 SOHO 卫星发射之前唯一已知的近日彗星族群。它最初是由 Kirkwood^[26]和 Kreutz^[27-29]根据 17 世纪到 19 世纪几颗具有相似轨道的彗星发现的。随后又有更多的 Kreutz 彗星被发现, 包括几颗有记录以来最壮观的彗星, 比如 1882 年的大彗星 (Great comet of 1882, C/1882 R1)、池谷-关彗星 (Ikeya-Seki, 1965 C/1965 S1)。至 1979 年地面观测共发现了 9 颗 Kreutz 族彗星^[7, 30-32]。

1979 年 8 月, 美国海军实验室的太阳风卫星 (SOLWIND) 上搭载的日冕仪观测到了一颗新的 Kreutz 族彗星 C/1979 Q1^[33], 这是在太空中发现的首颗彗星。同一时期运行的还有太阳极大期任务卫星 (Solar Maximum Mission, SMM), 这两颗卫星在 1979—1989 年期间共发现了 20 颗彗星^[34, 35], 但是地面望远镜都没有对应的观测, 这表明这些小天体的亮度和尺寸均小于之前地面望远镜观测到的 Kreutz 族彗星。

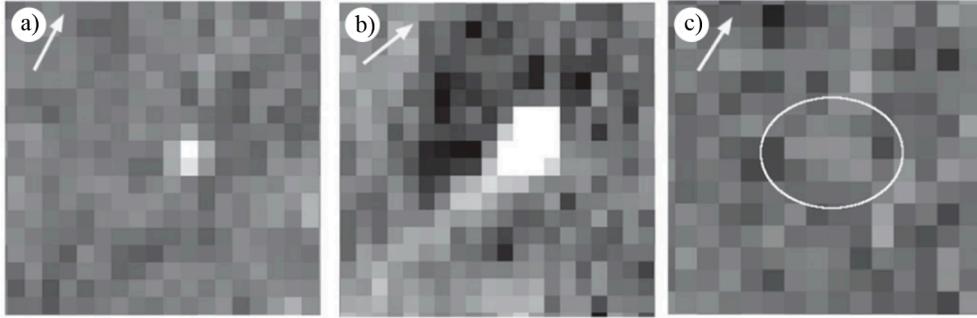
1996 年 1 月, SOHO 卫星发射升空一个月后, 其上搭载的 LASCO 的图像中新发现了一颗 Kreutz 族彗星 C 1996/Q2 (SOHO)^[36]。随着观测的进行以及 STEREO 等卫星的加入, 越来越多的 Kreutz 族小彗星被观测到, 这为细致地研究 Kreutz 族彗星提供了大量数据来源。

2002 年 6 月, Meyer 发现彗星 C/2001 X8 具有与彗星 C/1997 L2 相似的轨道根数, 并且在时间上相隔了约 4.5 a, 随后又发现进行轨道修正后的彗星 C/2001 E1、C/2001 T1、C/2000 C2、C/2000 C5 也与前面提到的两颗彗星具有相似的轨道参数, 因此他确认了由这六个成员组成的新的近日彗星群, 并命名为 Meyer 族彗星^[37]。截至目前已经观测到 Meyer 族彗星 200 颗, 使之成为继 Kreutz 族彗星之后已知数量第二多的近日彗星群。

2.3 观测特征

SOHO 和 STEREO 观测到的 Kreutz 族彗星表现出不同的形态, 按照观测特征可以分为恒星形、弥散形和拖尾形三种 (如图 1 所示)^[19]。恒星形的彗星亮度分布非常集中, 没有明显的彗尾或是弥散延伸的彗发, 尺寸较小, 只有 1 ~ 2 pixel 宽; 弥散形的彗星没有明显的中心凝结, 亮度分布宽而弥散, 尺寸范围为 0.5 ~ 5 pixel; 拖尾形的彗星可以观测到明显的彗尾, 彗尾宽度从几角分到几度, 包括没有明显彗核的窄的针状天体以及具有彗核、彗发和短彗尾等典型彗星特征的天体^[2, 19]。对掠日彗星观测形态的定性分析受到仪器分辨率的限制, 比如 LASCO C3 中的掠日彗星多为恒星形, 而在更高分辨率的 LASCO C2 的图像中三种形态的彗星都被广泛地观测到。对 Kreutz 族彗星不同形态的理解, 仍需要对其形态学进行分类研究以排除季节效应和相位角的影响^[19]。

从观测上看, Meyer 族彗星与典型的彗星有很大的不同, 它们即使在近日点也没有明显的彗发或彗尾, 在形态上表现为一致的恒星形。Meyer 族彗星具有比其他近日彗星群更陡峭的峰值亮度累积分布函数, 幂指数为 0.59, 并且连续两颗 Meyer 族彗星通过近日点的时间差的分布情况介于其他 3 个近日彗星群与非族群彗星之间。这些特征表明 Meyer 族彗星的分裂演化可能更为彻底, 其亚分裂的速度要比其他彗星群低得多^[37]。Meyer 族彗星群中大多数成员的亮度在 7.5 ~ 8.5 mag 之间, 极少数成员的亮度可以达到 6.5 mag, 因此除非运动



注: LASCO C3 观测到的 3 颗具有不同形态的 Kreutz 彗星。a) 2015 年 2 月 10 日 15:06 UT 观测到的彗星 SOHO-2871, 恒星形; b) 2015 年 1 月 26 日 14:18 UT 观测到的彗星 SOHO-2865, 拖尾形; c) 2015 年 2 月 9 日 04:30 UT 观测到的彗星 SOHO-2869, 弥散形。白色箭头指向太阳, 每个像素对应 $56''$ 。

图 1 Kreutz 彗星形态^[19]

到非常靠近地球的位置, 否则很难在 SOHO 视场之外观测到它们。最近利用地面望远镜对星等为 6.5 mag 的 Meyer 族彗星 C/2023 F2 (SOHO) 进行的搜寻, 并没有在预期的位置观测到这颗彗星^[22]。目前 Meyer 彗星的观测都来自于 LASCO C2 的观测, 所以无法给出较大日心距上彗星活动性及彗核尺寸的限制, 并且成员之间或是与地面观测到的太阳系天体之间都没有建立起动态联系。因此虽然 Meyer 彗星群的数量远高于除 Kreutz 族彗星以外的其他彗星群, 但是人们对它的了解还比较少。根据 SOHO 观测到的彗星的光度特征和轨道参数, Battams 和 Knight^[19]认为 Meyer 彗星群是动态演化的奥尔特云彗星的古老残余, 并估计母彗星的直径约为几千米。

与 Meyer 族彗星一样, Marsden 族彗星和 Kracht 族彗星在观测上通常表现为亮度集中的恒星形。大部分的非 Kreutz 族彗星亮度随着接近太阳而持续增加, 在近日点前达到峰值, 然后逐渐减弱。然而一些彗星在近日点或之后达到亮度峰值, 还有一部分彗星的光度几乎不随时间/距离发生变化^[37]。与 Meyer 族彗星不同, Marsden 族彗星和 Kracht 族彗星的到达时间并不是随机的, 而是表现为高度聚集的特征, 在时间上相近的彗星彼此轨道关系通常比其他彗星要更为密切。时间间隔和轨道的相似性表明, 许多彗星很可能是同一彗星近日点后分裂产生的碎片。虽然 SOHO 观测到的轨道弧较短, 导致轨道周期的测定存在不确定性, 但是, Sekanina 通过观测弧段与已知周期彗星的轨道弧进行匹配, 并追踪三次返回太阳的目标, 得到了 Marsden 族彗星的轨道周期可能在 5.5 ~ 6 a 之间; Kracht 族彗星可能具有相似的范围。由于轨道周期短, Marsden 族和 Kracht 族彗星的典型寿命远低于 Kreutz 族, 观测到的这两个族群的近日彗星可能是级联破碎的最终产物, 只有少数最亮的天体可能仍保留活动性^[38]。

3 近日彗星的研究进展

彗星作为太阳系原行星盘中的星子残骸, 是探索太阳系起源和演化的重要载体, 同时彗星中所含有的水和有机物是组成生命物质的必要成分, 因此研究彗星对于理解地球生命的起源也具有重要的意义。与普通彗星相比, 近日彗星在接近近日点的过程中, 为我们提供了研究那些穿越水星轨道内部的彗星的宝贵机会。对近日彗星的观测分析, 包括对它们的光度、光谱和形态学的观测及其时序变化的研究补充了我们对彗星整体的认识, 有助于我们深入理解彗星的活动及演化过程^[2]。

在更小的日心距下, 近日彗星往往表现出更为强烈的活动现象, 极端的近日环境甚至可能导致彗核的完全破坏, 对近日彗星 Ly- α 辐射强度和光谱观测结果的分析, 为我们揭示了彗星活动的强度以及彗核演化过程的重要线索。近日的高温环境会导致难熔彗星尘埃的挥发, 对近日彗星的光谱观测以及在高相位角处的偏振测量可以提供关于彗发尘埃特性的独特信息。与普通彗星相比, 具有更小近日距的近日彗星在太阳光照下存活的时间足够长, 可以穿透太阳的低层日冕, 并表现出丰富的彗尾活动现象, 对于理解彗星的活动、日冕的特征及其相互作用具有重要意义。

3.1 轨道特性

3.1.1 Kreutz 族彗星

Kreutz 族彗星受到广泛关注的一个原因是其数量众多, 另一个原因则是它们在近日点时非常接近太阳, 大多数 Kreutz 族彗星的近日点距离小于 $2 R_{\odot}$ 。在 19 世纪中期, Hubbard^[39-43] 首先证明了 1843 年大彗星 (C/1843 D1) 的轨道周期在 500 ~ 800 a 之间, 随后的研究得出相似的结论, 即 Kreutz 族彗星的轨道周期为 500 ~ 1000 a。由于 Kreutz 族彗星的动力学年龄还很小, 轨道还没有时间随机化, 所以它们的轨道根数紧密地聚集在它们的平均值附近^[6]。

Marsden^[7] 使用地面望远镜的观测数据确定了每颗 Kreutz 族彗星的轨道根数, 考虑行星 (尤其是木星) 摄动对彗星轨道的影响, 通过数值积分模拟了彗星在行星引力作用下的轨道变化。结果表明, Kreutz 族彗星群的所有成员都在逆行轨道上围绕太阳运动, 轨道倾角在 $130^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 之间, 轨道的偏心率 (e) 接近 1, 这意味着它们的轨道非常接近抛物线, 是极端的椭圆形^[7]。根据轨道已知的 Kreutz 族彗星的轨道根数, Marsden 将 Kreutz 族彗星分为两个子群, 子群 I 包括彗星 C/1843 D1、C/1880 C1、C/1963 R1, 子群 II 包括彗星 C/1882 R1、C/1945 X1、C/1965 S1, 两个子群的彗星在升交点经度上存在显著差异 (见表 1)^[7]。随后被观测到的在 Kreutz 族轨道上运行的彗星 C/1970 K1 (White-Ortiz-Bolelli) 与彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 又分别为该族群引入了子群 IIa 和子群 III^[44-46]。

地面望远镜观测到的较亮的 Kreutz 族彗星都满足由标准近日点经度 ($L_{\pi} = 282.8^{\circ} \pm 0.2^{\circ}$) 和标准近日点纬度 ($B_{\pi} = +35.2^{\circ} \pm 0.1^{\circ}$) 定义的参考拱线条件^①, 这一条件被认为是定义 Kreutz 族彗星成员的最重要条件^[47-49]。对 1 600 颗 Kreutz 族彗星的轨道根数间关系的统

^①由地面望远镜观测到的 Kreutz 族彗星近日点经度的平均值为 $L_{\pi} = 282.8^{\circ}$, 误差范围为 $\pm 0.2^{\circ}$; 近日点纬度的平均值为 $B_{\pi} = +35.2^{\circ}$, 误差范围为 $\pm 0.1^{\circ}$, 这个带误差范围的平均值被定义为 Kreutz 族彗星的标准近日点经度/纬度。基于此值得到的轨道倾角 i 与升交点经度 Ω 之间的关系 $\cot i = \cot B_{\pi} \sin(L_{\pi} - \Omega)$ 所对应的曲线被称为参考拱线。

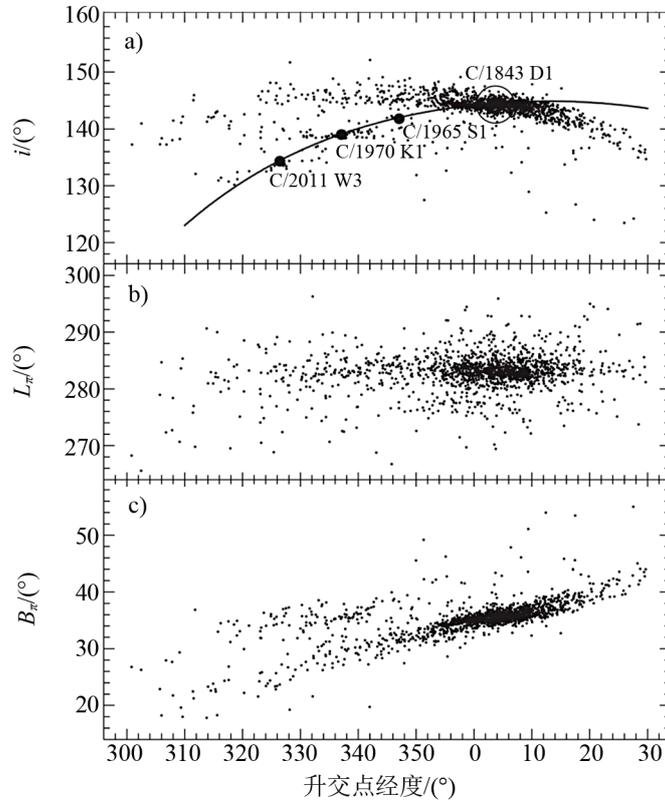
表 1 地面望远镜观测到的 Kreutz 族彗星的轨道信息^[6]

彗星	$q/(\text{au})$	$i/(\text{°})$	$\omega/(\text{°})$	$\Omega/(\text{°})$
C/1843 D1	0.005 53	144.4	82.6	3.5
C/1880 C1	0.005 49	144.7	86.2	7.8
C/1882 R1	0.007 75	142.0	69.6	347.7
C/1887 B1	0.004 83	144.4	83.5	4.6
C/1945 X1	0.007 52	141.9	72.1	351.2
C/1963 R1	0.005 06	144.6	86.2	2.9
C/1965 S1	0.007 78	141.9	69.0	347.0
C/1970 K1	0.008 88	139.1	61.3	337.0
C/2011 W3	0.005 58	134.6	53.9	326.9

注: q 为近日距, i 为轨道倾角, ω 为近日点幅角, Ω 为升交点经度。

计研究表明, 在轨道倾角 i 与升交点经度 Ω 的关系中, 地面观测到的明亮的 Kreutz 族彗星都位于由标准近日点经度和纬度描述的参考拱线上; SOHO 观测到的 Kreutz 族彗星则沿一条与参考拱线成 15° 角的曲线分布, 且 SOHO 观测到的 Kreutz 族彗星的近日点纬度随 Ω 增加, 而近日点经度则保持不变 (见图 2)^[48]。分析表明, SOHO 观测到的 Kreutz 族彗星的近日点纬度的变化是由垂直于轨道平面的非引力加速度驱动, 这种加速度很可能是彗核在接近太阳时因强烈侵蚀而产生的。由于这些彗星的质量损失严重, 它们的运动不能仅用引力定律来拟合, 还需要考虑非引力效应^[48]。对 LASCO C2 观测到的 193 颗彗星进行非引力效应校正后, Sekanina^[49, 50] 将 Kreutz 彗星扩展为五个主要子群 (I、Ia、II、IIa、III) 和四个边缘子群 (Pre-I、Pe、IIIa、IV)。每个子群通过不同的升交点经度的范围来描述, 相邻子群由平均 $9^\circ \sim 10^\circ$ 的间隔分隔开, 而所有子群的升交点经度总范围为 66° ^[49]。在区分了不同的子群之后, Sekanina^[46] 构建了每个子群在 2000—2009 年期间每年发现数量的直方图, 结果表明各子群被观测到的数量均随时间显著变化。

最早由 Marsden 提出的子群 I 和子群 II 仍然是 Kreutz 族彗星群的基本分界, 这两个子群中的最亮成员具有不同的光变特征。基于新的观测数据和对彗星子群的分类方式, Sekanina^[51] 提出了新模型来解释 Kreutz 族彗星的轨道演化和级联分裂过程。该模型假设 Kreutz 族彗星群来自一颗亚里士多德时期的彗星, 这颗彗星是一个巨大的接触双星, 由两个叶状体 (Lobe I 和 Lobe II) 和一个连接颈部组成。这颗彗星在远日点附近的初始分裂中分裂为两个叶状体; 随后在远日点区域发生次级分裂产生了第一代碎片, 第一代碎片在到达近日点后受到太阳的潮汐力作用从而进一步分裂。在解体瞬间, 以给定轨道速度运动的母星及其质量中心突然分裂为多个碎片, 每个碎片都有自己的质量中心, 但两者/所有碎片仍以原始星体的轨道速度运动。母体和每个碎片的质量中心与太阳的距离差异导致后者进入了一个轨道周期不同的新轨道。质量中心距离太阳比母体远的碎片最终会进入周期更长的轨道, 反之亦然, 因此随着时间的推移, 子碎片的轨道周期和近日点距离可能会因为从上一代碎片分离时的不同速度而发生变化。SOHO 观测到的 Kreutz 族彗星是分裂过程中的最终产物, 除了彗星 C/2011 W3 (Lovejoy), 其余的彗星都没有在通过近日点时存活。



注: Kreutz 族彗星的轨道根数间关系: a) 轨道倾角 i 与升交点经度 Ω 的关系图, 地面观测到的 Kreutz 族彗星 C/1843 D1、C/1965 S1、C/1970 K1、C/2011 W3 也在图中标出, 其中黑色实线为参考拱线; b) 近日点经度与升交点经度 Ω 的关系图; c) 近日点纬度与升交点经度 Ω 的关系图。

图 2 Kreutz 彗星轨道根数分布^[48]

3.1.2 非 Kreutz 族彗星

Meyer 族彗星的一个显著特征是它们具有高轨道倾角 $i = 72.5^\circ$, 近日点距离在 $6.6 \sim 8.7 R_\odot$ 之间。与 SOHO 观测到的其他近日彗星不同, Meyer 族彗星没有表现出强烈的聚集或成对出现的特征, 这表明该彗星群具有相当大的远日点距离^[38]。Marsden 族彗星和 Kracht 族彗星分别由 Marsden 和 Kracht 根据 SOHO 观测到的具有相似路径的彗星 C/1999 J6、C/1999 U2、C/2000 C3、C/2000 C3 和彗星 C/1999 M3、C/1999 N6、C/2000 O3、C/2000 Q7 而确认。虽然 Marsden 族彗星与 Kracht 族彗星的轨道根数有所差别 ($\Delta i \approx 13^\circ$, $\Delta \omega \approx 35^\circ$, $\Delta \Omega \approx 35^\circ$), 但是 Kracht 族最初发现的成员就被认为与 Marsden 族存在联系, 随后动力学外推 (dynamical integrations) 表明这两个彗星族群与 96P/Machholz 1、白昼白羊座流星雨 (Daytime Arietids)、南宝瓶座 δ 流星雨 (Southern δ Aquarids) 一起组成更大的 Machholz Complex^[52]。Machholz Complex 的各个组成部分在约公元 950 年之前就从其母彗星分离出来, 随后与木星的近距离接触导致了轨道的偏离, 木星引力引起的彗星轨道参数随时间的变化是非线性的, 与彗

星的初始轨道参数和彗星与木星近距离接触的频率和强度有关^[38]。

3.2 光度特性

大量观测数据的获得使得统计分析近日彗星以了解彗星的光度特性成为可能。Biesecker 等人^[53]对 SOHO 在 1996—1998 年观测到的 141 颗 Kreutz 族彗星的光变特性开展统计研究,他们发现在这一时期,每年发现的 Kreutz 族彗星成员的数量是恒定的。在接近太阳的过程中,彗星逐渐变亮,在 $11.2 R_{\odot}$ 或 $12.3 R_{\odot}$ 处达到亮度峰值,然后随着靠近太阳亮度逐渐减弱。这两个不同的亮度峰值距离可能反映了彗星尘埃性质的不同,可能分别对应于结晶橄榄石的蓬松聚集体(亮度峰值距离为 $11.2 R_{\odot}$)和非晶橄榄石的蓬松聚集体(亮度峰值距离为 $12.3 R_{\odot}$)^[54]。然而基于更大样本的观测结果的分析, Knight 等人^[20]发现亮度峰值距离并不局限于两个狭窄的范围内,而是在一个相当大的范围内变化。Kreutz 族彗星的光变曲线接近于以 $12 R_{\odot}$ 为中心的高斯分布,在近日点前的 $10.5 \sim 14 R_{\odot}$ 之间达到亮度峰值。他们认为 Kreutz 族彗星可以看作一组成分相似的彗星,但是由于它们独特的破碎历史、形状、自转的多样性,导致不同彗星达到亮度峰值的距离不同。

到达亮度峰值后, Kreutz 族彗星的亮度逐渐减弱,暗淡的彗星往往会迅速消失;少部分明亮的彗星会在日心距约 $7 R_{\odot}$ 内,亮度趋于平稳或再次变亮^[20,53]。结晶和无定形的辉石一般会在约 $5 R_{\odot}$ 处开始升华,产生对应光变曲线在 $4 \sim 6 R_{\odot}$ 处的峰值^[54],同时 UVCS 的观测表明彗核大约在 $3 R_{\odot}$ 处完全消失^[10,55,56],因此少部分 Kreutz 族彗星在 $7 R_{\odot}$ 内再次变亮可能是由于彗核的最终破坏以及辉石的升华所引起^[20]。

地面望远镜观测到的 Kreutz 族彗星的光变曲线的变化率在 $r^{-3.2} \sim r^{-4.5}$ 之间,这与典型彗星由水升华引起的光变曲线变化率 r^{-4} 接近。而 SOHO 观测到的大多数 Kreutz 族彗星在首次被观测到时(日心距约 $30 \sim 35 R_{\odot}$),彗星的变亮速率非常快, $r^{-7.3 \pm 2.0}$;在 $20 \sim 30 R_{\odot}$ 处,迅速过渡到 $r^{-3.8 \pm 0.7}$,接近标准速率^[20]。在进入 SOHO 视场初期的迅速变亮,表明这些彗星的活动并不是由水升华引起的,可能是由于随着日心距的减小使得难熔有机物等不易挥发的物质开始活动引起的。受观测视场的限制,无法确定 Kreutz 族彗星亮度以 $r^{-7.3}$ 迅速增加的具体起始位置。但是基于对 Ikeya-Seki 彗星的研究分析, Knight 等人^[20]认为起始位置的日心距不会超过 $50 R_{\odot}$ 。为研究更大日心距离处 Kreutz 族彗星的光变特性,地面望远镜被用来搜索可能观测到的 SOHO 彗星的对应目标,但均没有在预期的位置观测到彗星,这表明这些彗星可能以更快的速度变亮,或是在更早的阶段开始变亮^[20,21]。

3.3 彗星参数估计

在彗星的紫外光谱中, Ly- α 线是最亮的一条谱线,彗星中的水与 OH 分子光解产生的一代中性 H 原子,它们通过碰撞激发产生 Ly- α 光子,并散射来自太阳的 Ly- α 光子,从而形成巨大的 Ly- α 云。但由于一代中性 H 原子随彗核以 $8 \sim 24 \text{ km/s}$ 的速度朝向太阳移动,其散射截面轮廓偏离了太阳辐射线轮廓,导致 Ly- α 辐射会出现明显的多普勒变暗现象 (swings effect, 摇摆效应)。因此在掠日彗星中, Ly- α 辐射主要来自通过与日冕质子电荷交换形成的二代中性 H 原子,因为电荷交换过程中几乎没有动量传递,所以二代中性 H 原子具有与日冕质子相似的速度分布^[57]。它们受摇摆效应的影响较弱,形成了一个细长的 Ly- α 彗尾^[17]。

彗尾中的二代中性 H 原子会随着时间指数衰减, 其寿命与电荷交换时间成正比, 与局部电子密度成反比; 因此通过拟合沿彗尾观察到的 Ly- α 强度衰减, 可以确定彗星的中性 H 原子的产生速率 (后文中简称为“H 原子产率”)。将得到的彗星的 H 原子产率与水升华所需的能量相乘, 使其等于彗核吸收的太阳辐射能量, 即可估算出彗核的大小^[2, 17]。在 1996—2013 年的观测期间, UVCS 探测到 12 颗掠日彗星的 Ly- α 光谱, 基于 UVCS 的观测结果得到的掠日彗星的 H 原子产率和彗核大小见表 2。

表 2 UVCS 观测到的掠日彗星在不同日心距离处的 H 原子产率和彗核半径^[2]

彗星	日心距/ R_{\odot}	H 原子产率/ s^{-1}	彗核半径/m	数据来源
C/1996 Y1	6.8	0.13	3.4	[55]
C/2000 C6	3.88	0.71	3.0	[56]
	4.68	1.35	5.7	
	5.88	0.33	3.4	
	6.47	0.13	2.5	
	6.47	0.13	2.5	
C/2001 C2	0.59	0.59	7.8	[10]
	4.98	0.29	5.4	
	3.60	8.20	20.3	
C/2002 S2	5.99	1.12	9.0	[58]
	6.97	0.89	9.4	
C/2003 K7	3.37	40 ~ 70	30 ~ 60	[59]

在 UVCS 停止工作约 10 年后, SolO/Metis 带来了掠日彗星的新紫外观测图像, 同时提供白光波段的同步观测。利用多台仪器 (STEREO/COR2 和 SolO/Metis) 不同角度白光观测结果, Bemporad 等人^[60] 实现了对彗星 SOHO-4341 轨迹及彗尾的三维重构, 获得了比其他大多数 SOHO 观测到的 Kreutz 族彗星更高精度的轨道参数。利用 syndyne 曲线拟合重构的三维彗尾, 得到最佳拟合的 β (辐射压力和引力的比值, 即 $\beta = F_{\text{rad}}/F_{\text{grav}} = CQ_{\text{pr}}/\rho_{\text{d}}a$, 其中 $C = 5.76 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, Q_{pr} 为尘埃的散射效率, 可以取 1, ρ_{d} 和 a 分别为尘埃颗粒的密度和直径), 假设尘埃密度为 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 则可得到尘埃颗粒直径的估计值。并利用基于彗尾 Ly- α 辐射测得的彗星周围日冕等离子体参数信息, 他们计算出彗星半径和产水率, 这两个参数成功再现观测到的总辐射。

水是彗核中最丰富的挥发性物质, 当彗星与太阳的距离小于 3 AU 时, 水的升华控制着彗发的丰度和活动。水光解产生的中性氢是彗星大气中最丰富的物质, 它可以被空间中的 Ly- α 光度计观测到。通过测量彗发中 H 的丰度和分布, 并建立适当的模型, 可以得到彗星产水率及其随时间的变化。准确的产水率可以为彗星中的其他成分信息提供参考, 同时产水率随时间的变化, 特别是随日心距离的变化, 可以提供有关彗核组成和结构的信息, 并能对彗核的尺寸作出限制^[61, 62]。在利用空间 Ly- α 光度计的观测结果计算彗星的产水率时, 通常采用时间分辨率模型 (TRM), TRM 方法基于混合流体/动力学模型参数化计算, 首先得到与以水为主的彗发碰撞而热化的 H 原子比例, 进而算出 H 原子离开内部彗发的速度分布^[16, 63-65]。当彗星足够亮时, 通过对时间序列图像进行综合分析, 该方法还可以获得彗星产

水率的长期变化趋势。

对彗星产水率的长期观测研究有助于增加我们对彗星活动及彗星演化过程的认识,Combi 等人^[16]计算了 SOHO-SWAN 在 1996—2016 年期间观测到的 61 颗彗星的产水率,并用幂律函数拟合了部分彗星在近日点前后产水率随日心距的变化情况,结果表明,在长周期和短周期彗星中,都可以看到彗核演变的证据。两颗分别由地面巡天设备发现的太阳边缘彗星 C/2019 Y4 (ATLAS) 和 C/2021 O3 (Pan-STARRS) 的近日距分别为 0.253 AU 和 0.287 AU,它们都在到达近日点前的几周内开始分解,彗星 C/2019 Y4 (ATLAS) 的产水率在彗核开始分裂后保持相对稳定,且产水率的变化在近日点前后表现出不对称性^[66],而彗星 C/2021 O3 (Pan-STARRS) 的产水率则在开始分解后的两周内下降了近 $9/10$ ^[67]。

3.4 彗星尘埃

原位检测和远程光谱观测结果表明,彗星尘埃由两种成分组成。一种为岩石成分,富含 Mg、Fe 和 Si,其中镁硅酸盐超过铁硅酸盐占主导地位,常见的化合物有复辉石 (Mg_2SiO_4)、烷辉石 ($MgSiO_3$) 和橄榄石 ($(Mg, Fe)_2SiO_4$); 另一种成分为有机耐火材料,即富含 C、H、O 和 N 的分子。彗星的红外光谱表现为两类不同的硅酸盐特征,具有强硅酸盐特征的彗星具有更多孔的尘埃成分,而具有弱硅酸盐特征的彗星具有更紧凑的尘埃成分^[68],然而尘埃的组成(特别是硅碳的比例)仍存在很大的不确定性。

在掠日彗星的光谱观测中,首次探测到了彗星尘埃中的 Si III 线^[10],在明亮的 Kreutz 族彗星 C/2003 K7 (SOHO) 的光谱观测中,除了主要的 Ly- α 辐射,UVCS 还同时探测到 Si III 和 C III 线,证明了尘埃升华的发生。利用谱线强度测量结果,得到 Si III 与 C III 的比值范围为 8 ~ 12,这表明彗星尘埃中硅酸盐的丰度高于有机耐火材料^[59]。

结合 AIA、XRT 以及 UVCS 等卫星的观测结果,得到了彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 的各元素的丰度比 H : C : N : O : Si : Fe = 1 : 0.005 : 0.005 : 0.86 : 0.18 : 0.04, C 和 N 的丰度非常低,这表明只有一小部分挥发性元素在彗星形成的过程中融入了彗星,或者挥发物在之前的回归周期或在到达近日点前流失了^[69,70]。通过比较 LASCO 的可见光亮度与 UVCS 测得的 Si III 强度, Raymond^[70]得到彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 彗尾处硅酸盐尘埃的升华率介于橄榄石与辉石之间,这表明该彗星的尘埃颗粒由这些矿物的混合物组成。

对彗星尘埃的偏振光的观测和分析,可以为研究尘埃粒子的组成和粒径分布带来更多的限制,通过测量彗星彗发的偏振度随相位角和波长的变化,有助于理解彗星的偏振行为^[71,72]。迄今为止,大多数彗星的偏振分析都是针对地球以外的彗星进行,并且都是从地球上观测的,这限制了最大可观测相位角 $\phi < 90^\circ$,而太阳卫星对近日彗星在近日点附近的观测则摆脱了这种限制,并为研究近日环境对彗星尘埃偏振特性的影响提供了观测数据^[73]。彗星 C/2010 E6 (STEREO) 在通过近日点期间完全解体,在彗星解体之前,位于高相位角的 STEREO-B 观测到彗核的偏振度突然下降至接近 0,而位于低相位角的 STEREO-A 则观测到负的偏振,这一偏振变化可能是由于彗核的破裂使得富含 Mg 的硅酸盐颗粒的增加导致。彗尾的偏振度随着与彗核距离的增加而显著增加,随着彗星接近太阳,这种趋势逐渐减弱,这可能与难熔有机质的升华或非晶态碳的存在有关^[73]。这一研究结果表明,偏振观测是分析彗星在极端

近日环境下行为的有用工具, 能够提供关于彗核碎片化和尘埃粒子结构变化的有用见解。而 SoLO 上搭载的 METIS 日冕仪也将定期开展高时间分辨率的偏振观测, 从而为近日彗星的偏振矢量提供新视角下的观测结果^[17]。通过拟合 METIS 日冕仪观测到的偏振数据和亮度数据, Bemporad 等人^[60]计算出彗星 SOHO-4341 彗尾尘埃颗粒的大小为 $7.7 \times 10^{-5} \sim 23 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 。

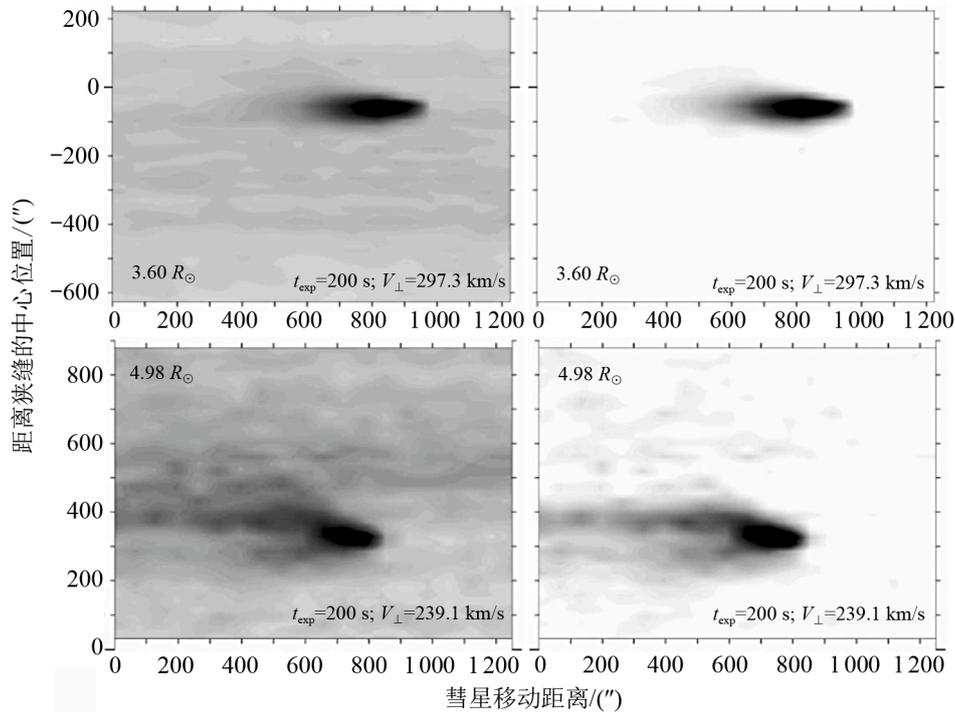
3.5 彗核

SMM 观测到的最亮的彗星在升华开始前的半径约为 16 m ^[34]; 基于 UVCS 获得的 Ly- α 流量, 计算出 Kreutz 族彗星彗核半径在 $2.5 \sim 60 \text{ m}$ 之间 (见表 2)^[2]; 通过分析 LASCO 观测到的彗星的光度特性, 得出彗核半径可以达到 50 m ^[20]; 除了 C/2011 W3 (Lovejoy), 其他被 SOHO 观测到的 Kreutz 族彗星都在近日点前消失, 据此估计 SOHO 观测到的 Kreutz 族彗星的初始半径小于 100 m ; 根据地面望远镜观测数据, Kreutz 族彗星在近日点前后均成功被观测到, 其彗核半径在 $0.6 \sim 30 \text{ km}$ 之间; 根据彗星形成的二维模型预测, 彗星大小约 100 m ^[74]。地面和空间观测到的 Kreutz 族彗星之间大小的差距可能反映了它们分别为由 $1 \sim 100 \text{ m}$ 组成的大型天体以及组成部分本身^[20]。基于日冕仪获得的近日彗星的光度特征的统计分析, 半径大于 5 m 的 Kreutz 族彗星彗核的累积尺寸分布为 $N(> R) \propto R^{-2.2}$ ^[20]。

天文学家采用多种方法对彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 的彗核尺寸进行了计算, Gundlach 等人^[75]通过将其视觉亮度与日心距离为 $12 R_{\odot}$ 的其他彗星的视觉亮度进行比较, 估计 C/2011 W3 (Lovejoy) 直径的上限为 1 km 。McCauley 等人^[69]利用 AIA 对彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 经过近日点后观测到的氧气的总损失量, 估算出在其相对明亮的时候直径为 363 m 。Sekanina 和 Chodas^[45]基于尘埃尾的形态和尘埃粒子的辐射压力参数, 估计彗星在近日点后 1.6 d 解体时的直径为 $150 \sim 200 \text{ m}$ 。Raymond 等人^[70]基于 H 原子产率得到的彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 的彗核直径的估计值与 McCauley 等人的结果相当。这几种方法计算结果的差异表明, 目前对近日彗星彗核尺寸的测定仍然受物理模型和观测条件的限制, 需要进一步发展理论模型并结合不同的观测数据, 才能得到更精确的结果。

彗星 H 原子产率的变化通常源于彗核碎裂的发生。当彗星 C/2000 C6 (SOHO) 从距离太阳 $5.88 R_{\odot}$ 运动到 $4.68 R_{\odot}$ 处时, 其 H 原子产率比之前的明显增加 (见表 2)。Uzzo 等人^[56]认为这可能是彗核发生了破碎, 使得其暴露在太阳下的总面积增加, 进而增加了 H 原子产率, 但也不能排除局部电子密度突然增加以及气体和尘埃爆发的可能性; 这是首次通过观测数据推断出彗核的碎裂。随后在 UVCS 观测到的不同日心距处 Ly- α 重构图像中, 彗星 C/2001 C2 (SOHO) 彗尾表现出明显差异: 在较大的日心距离 ($4.98 R_{\odot}$) 处, 彗星的 Ly- α 图像中有两条彗尾, 而在较小的日心距离 ($3.60 R_{\odot}$) 处则只有一条彗尾 (见图 3), 并且在 $4.98 R_{\odot}$ 处主彗尾的强度随时间/距离下降的速度要比 $3.60 R_{\odot}$ 处更慢^[10]。Bemporad 等人^[10]认为这两条彗尾是 LASCO 图像中无法分辨的两个碎片, 其中一个碎片在距离太阳 $3.60 R_{\odot}$ 以外升华, 两个碎片的组成不同引起了彗核的分裂; $4.98 R_{\odot}$ 日心距离处 Ly- α 强度随时间的缓慢衰减, 表明日冕质子与辉石尘埃颗粒升华产物进行电荷交换产生了额外 H 原子。

UVCS 观测到的最亮彗星 C/2003 K7 (SOHO) 在距离太阳 $3.37 R_{\odot}$ 处的 H 原子产率比 UVCS 探测到的其他掠日彗星高一个数量级, 如此高的 H 原子产率表明该彗星是由可以覆盖更大面积的小碎片组成。地面望远镜测得的彗星 C/2012 S1 (ISON) 的 H 原子产率在近日



注: 在 $3.60 R_{\odot}$ 和 $4.98 R_{\odot}$ 处观测到的彗星 C/2001 C2 (SOHO) 合成 Ly- α 图像。左侧和右侧分别为减去背景 Ly- α 之前和之后的图像。纵轴上的 0 标出了 UVCS 狭缝中心位置, 纵轴正向为北。

图 3 不同日心距处彗星 C/2001 C2 (SOHO) 的彗尾^[10]

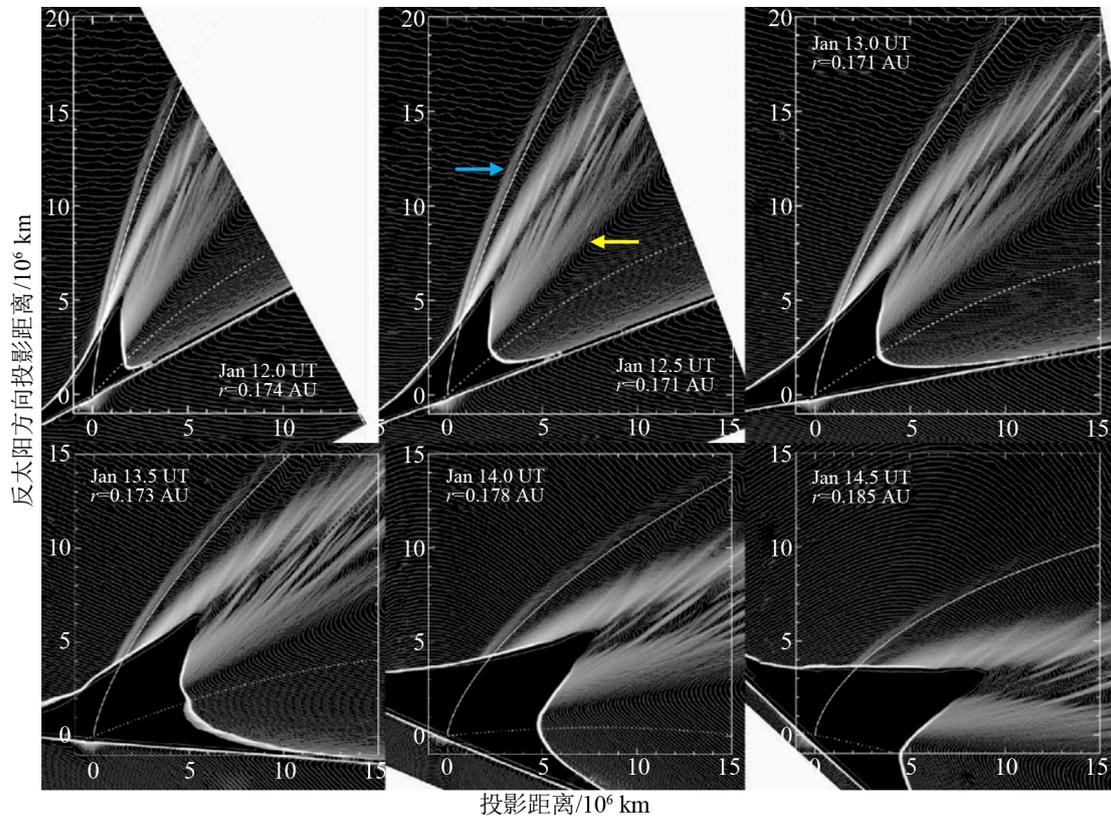
点前持续增加, 日冕仪观测到彗星在近日点前持续变亮且斜率明显变陡的过程, 同时中心凝结的增亮在近日点前消失, 这些光度和形态变化表明彗核在近日点前被破坏^[76]。

在可见光与紫外波段观测到的彗星的光变曲线可能存在差异。以彗星 C/2002 S2 (SOHO) 为例, 当其光学亮度下降一个数量级时, 其紫外亮度仍然快速增加, 这表明彗星的 H 原子产率仍在快速上升^[58]。SolO 观测到的彗星 SOHO-4341 的紫外辐射则比可见光更早变弱, 其原因为: 彗核发生分解而大的尘埃颗粒继续向内流动, 分解显著增加了反射尘埃和升华冰的横截面面积, 由于冰的寿命可能比尘埃颗粒离开光学孔径的时间更短, 因此产生的光变曲线在紫外波段比在可见光波段衰减得更快^[60]。彗星 C/2011 N3 (SOHO) 是第一个在极紫外波段被观测到的 Kreutz 族彗星, SDO/AIA 观测到它在低日冕中的破碎过程。该彗星在 AIA 图像中可见期间的质量损失率和总质量损失分别为 $10^6 \sim 10^8 \text{ g/s}$ 和 $6 \times 10^8 \sim 6 \times 10^{10} \text{ g}$, 这一质量损失表明彗星的彗核已经碎裂为多个碎片, 从而加速了升华过程^[18]。

3.6 彗尾

明亮的彗星表现出条纹状的尘埃彗尾。与更远的天体相比, 近日彗星的轨道速度更大, 因此其尘埃彗尾的扩散范围更大, 从而使其中的子结构更加突出^[2]。彗星 C/2006 P1 (McNaught) 在 2007 年 1 月通过近日点时被观测到了壮观的高度结构化的彗尾, 其尘埃彗尾中有许多条

纹, 并且在主彗尾靠近反太阳方向的一侧还观测到了与主彗尾分开的延伸 3×10^7 km 的一个拱形尾巴 (如图 4 所示)^[77]。通过分析拱形尾巴的亮度衰减和宽度, 并结合理论模型的拟合, Fulle 等人^[77]认为 McNaught 彗星的拱形彗尾由中性 Fe 原子组成, 并推测 Fe 原子可能来自彗星表面的特洛伊矿 (troolite, FeS) 蒸发, 而非金属铁的直接升华。这是首次发现由中性 Fe 原子组成的彗尾。除了 STEREO 卫星的成像观测, Ulysses 航天器还提供了 McNaught 彗星离子的测量结果, 并在 McNaught 彗星的离子彗尾中首次检测到了 O^{3+} 离子^[78]。PSP 和 SoLo 为彗尾的原位检测提供了机会, 在彗星 C/2019 Y4 (ATLAS) 第一次经过近日点期间, SoLo 飞越彗星尾巴, 通过分析仪器的测量结果, 识别出一个与彗尾相关的磁场结构, 动力学分析表明, 彗星 C/2019 Y4 (ATLAS) 的彗尾来自不同的彗核碎片, 形成了复杂的太阳风相互作用区域^[79]。

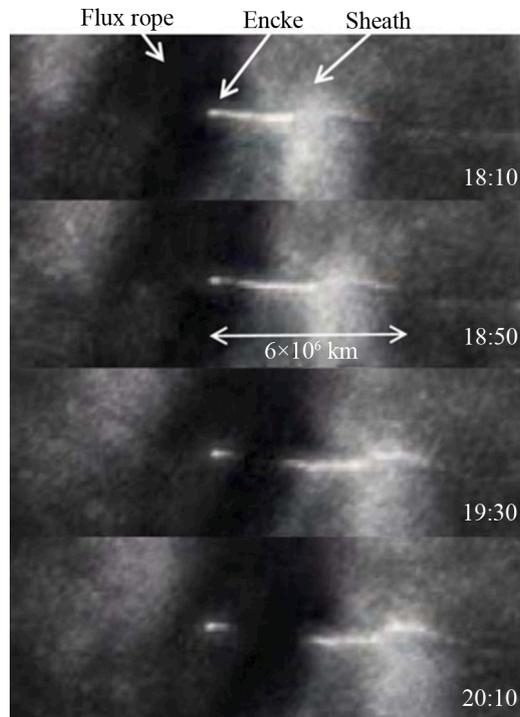


注: STEREO HI-1A 在 6 个不同时刻拍摄的 McNaught 彗星的图像, 可以看到条纹状的主尘埃尾 (黄色箭头标出) 以及与其分离的拱形彗尾 (蓝色箭头标出)。点线为彗星轨迹, 实线为理论计算得到的由中性 Fe 原子组成的彗尾, 纵轴指向反太阳的方向。

图 4 STEREO 观测到的彗星 McNaught 的彗尾^[77]

除了壮观的静态彗尾, 在低层日冕的不同区域, 掠日彗星还表现出包括扭结、漂移、断尾、多尾等在内的丰富的彗尾活动现象, 这些动态演化揭示了太阳风-彗星相互作用的重

要特征^[80]。其中彗星断尾是指彗尾发生断裂后向反太阳方向传播的现象，在不同的日心距，不同的日球纬度都有可能发生，压力效应和磁重联是引起彗星断尾的主要原因^[81-84]。2007年，彗星 2P/Encke 的一系列 STEREO HI 的观测结果，提供了日冕物质抛射 (corona mass ejection, CME) 与彗星相互作用引起彗星尾巴断裂事件的首次直接成像 (如图 5 所示)，彗星在与 CME 接触前彗尾逐渐变亮，并在 CME 扫过时开始断开，最终在 CME 前沿的带动下完全断开。初步分析表明，该过程是彗尾处 CME 前端的磁场和覆盖在彗星周围的行星际磁场之间的磁重联驱动的，而不是由压力效应引起的^[85]。随后，Jia 等人^[86]通过磁流体力学 (magnetohydrodynamic, MHD) 模拟重现了 CME 与 Encke 彗星的相互作用过程，模拟结果指出，彗星断尾是 CME 中的磁通量绳结构与周围太阳风磁场发生磁重联以及磁场方向的剧烈变化引起的。



注：STEREO HI 在不同时刻拍摄的 CME 与 Encke 彗星相互作用的图像，如箭头所示，明亮的云表示 CME 的鞘层，黑色的区域代表磁通量绳。

图 5 STEREO 观测到的 CME 与 Encke 彗星的相互作用过程^[85, 86]

更大日心距的彗星彗尾的动态过程也被太阳卫星观测到，长周期彗星 C/2020 S3 (Erasmus) 在 2020 年 12 月到达近日点附近 (近日点距离为 0.398 AU)，STEREO 和 SOHO 分别在两个不同的时间段观测到这颗彗星，在两次观测期间 Erasmus 彗星的离子尾的位置角都发生了显著变化。Li 等人^[87]分析认为，这两次位置角的变化分别由共转相互作用区和 CME 引起，并基于像差角 (太阳-彗星连线与彗尾轴线之间的角度) 和观测到的离子尾的位置角计算

出太阳风径向速度。

3.7 彗星与日冕磁场相互作用

由前文可知, 掠日彗星可以作为日冕探针, 对观测结果的分析可以获得彗星所经过区域的日冕的电子密度、太阳风速度等参数的估计值, 除此之外, 掠日彗星还可以提供日冕磁场的信息。彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 在经过近日点时同时被 AIA、STEREO-A 和 STEREO-B 的极紫外成像仪观测到。不同角度的极紫外观测图像对比发现, 彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 彗尾的方向、强度、大小和持续时间均发生了明显的改变。结合日冕磁流体动力学模型和嵌入等离子体中的彗尾离子的运动模型的分析表明, 观测到的彗尾运动揭示了日冕磁场的非均匀性, 证实了可以用掠日彗星来探测低日冕的等离子体特性和磁场结构^[88]。

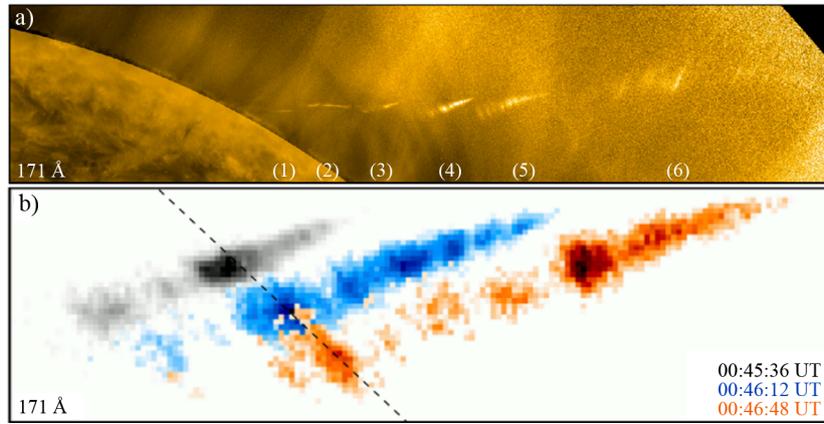
太阳风和彗星之间的相互作用研究也有助于理解彗星离子尾的稳定性以及彗尾区域的磁场结构。Liu 等人^[89]利用数学模型研究了彗星离子尾的稳定性, 分析发现, 彗星离子尾的中性区域内的小扰动有可能引起靠近彗星头部附近的彗尾局部磁场结构的变化。而当一个与彗星一起移动的中性粒子在日冕磁场中被电离时, 它的行为就像一个拾取离子, 它的速度分量与磁场平行, 产生沿磁场的流动, 而垂直分量则成为绕磁场的回旋速度流^[90]。前面提到的一代或二代中性 H 原子电离产生的拾取离子进一步发生电荷转移可以产生三代中性 H 原子, 它们以太阳风速度的投影分量 v_{\parallel} 平行于当地磁场移动, 导致观测到的 Ly- α 辐射中出现特殊的多普勒移动和发射特征^[58]。

当彗星中的水光解产生的中性 O 原子在低日冕中被电离时, 产生的拾取离子沿着局部磁场移动, 当它达到 O III 至 O VI 电离态时, 则可以在 AIA 的极紫外波段图像中被观测到。O 离子沿磁场的运动形成了一系列与彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 轨道成角度的条纹, 每个条纹的强度峰值都远离彗星的路径, 并在几分钟内扩散开来 (如图 6 所示)^[69]。从彗核中释放后, 拾取离子主要沿磁力线运动, 并伴有垂直漂移运动, 拾取离子的运动方向由彗星速度和磁场方向决定, 因此彗尾的畸变反映了磁场方向的变化。彗星 C/2011 W3 (Lovejoy) 条纹状的彗尾是拾取离子沿磁力线运动的结果, 通过观测掠日彗星彗尾的形态演变可以研究局部日冕的磁场拓扑结构。离子的垂直漂移运动主要以电场漂移为主, 且漂移速度与太阳风源区的横向速度相似^[91]。

4 近日小行星

与近日彗星相比, 近日小行星的数量要少得多, 虽然理论模型预测在近日轨道上应该能够发现许多小行星, 但现实中近日小行星很少被观测到, 这可能是由于小行星在接近太阳时受到太阳辐射的强烈加热引起其内部的物理变化, 从而受到灾难性的破坏并最终导致其解体^[13]。Granvik 等人^[13]分析指出, 小行星的破坏距离与其物理尺寸成反比, 且低反照率的小行星比高反照率的小行星更容易在接近太阳时被破坏。

利用 NASA 的斯皮策空间望远镜 (Spitzer Space Telescope, SST) 上的红外光谱仪 (Infrared Spectrograph, IRS), Campins 等人^[92]测量了 19 颗 (2 颗 $q < 0.15$ AU, 17 颗 $0.15 < q < 0.35$ AU)



注: a) 六个不同时刻 ((1) 00:41:36 UT, (2) 00:43:00 UT, (3) 00:44:12 UT, (4) 00:46:12 UT, (5) 00:48:12 UT, (6) 00:56:00 UT) 的 AIA 171 Å 图像的合成图; b) 间隔 36 s 的三张连续的 AIA 171 Å 图像分别以黑色、蓝色和橙色显示, 对应的时间见图像右下角, 虚线代表磁场局部的方向, 条纹沿着磁场方向排列的同时沿着平行于磁场的方向扩散。

图 6 AIA 观测到的与彗星 Lovejoy 相关的条纹^[69]

近日点距离小于 0.35 AU 的小行星的 7 ~ 14 μm 热辐射光谱, 并用热连续体模型进行拟合, 得到了这些小行星的有效直径、几何反照率以及光束参数 (热模型参数, 用于调整模型的温度分布, 使其与小行星的表观温度一致) 的信息, 结果表明, 近日小行星具有与其他近地小天体不同的热行为, 即随着太阳相位角的增加, 光束参数呈现增加的趋势。Holt 等人^[93] 利用 4 m 级的望远镜对 22 颗近日点距离小于 0.15 AU 的近日小行星展开观测研究, 获得了它们的光学颜色、光谱斜率以及其中 3 颗近日小行星旋转周期的测量结果。研究表明, 尽管近日小行星与近地小行星的颜色分布存在较大的重叠, 但是近日小行星整体上呈现出更蓝的颜色, 光谱斜率也更浅。这些小行星在到达它们的近日点时都在 SOHO 的视场范围内, 但是都没有被探测到, 这可能是由于它们不够活跃。小行星 (3200)Phaethon 是唯一已知的确定活跃的近日小行星, 它的尺寸较大 (直径约为 5 km), 轨道周期较短 (约为 1.43 a), 几乎每次出现时都可以进行观测, 且观测历史较长, 积累了丰富的观测数据, 这使得它成为被研究得最多的近日小行星。

4.1 (3200)Phaethon

(3200)Phaethon 被认为是双子座流星体流的母体^[94], 另外两颗小行星, (155140) 2005 UD^[95] 和 (225416) 1999 YC^[96], 可能是其分裂产生的碎片; 三者共同构成了法厄同双子座复合体 (Phaethon-Geminid Complex, PGC)^[95, 96]。在 2009 年通过近日点期间, STEREO HI 观测到其亮度意外地增加约两倍, 这是 Phaethon 的首次近日点观测, 也是其质量持续损失的首次观测。Jewitt 和 Li^[14] 认为这种变亮现象是由小行星表面尘埃颗粒的脉冲喷射所导致。随后的观测表明, 这种增亮现象具有周期性, 在每次轨道运动中以几乎相同的时间和幅度重复出现^[97, 98]。对 STEREO HI 图像的细致分析, 进一步揭示了在近日点附近时从 Phaethon 延伸出一条指向反太阳方向的尘尾, 再次证实了其活动性的存在^[15, 98]。在 Phaethon 异常增亮期

间出现的尘埃尾, 被认为是热破裂产生的微米级的尘埃粒子在太阳辐射压的作用下喷射形成的^[15]。

水星偶尔也会在 HI 的图像中被观测到类似的反太阳方向的尾巴, 且 Na I 尾巴的亮度比 HI 预期的要亮得多^[99], 这表明 HI 的滤光片在运行期间有所退化, 导致其不能有效地阻拦 Na I D 共振线^[100]。最近的研究表明, 在太阳辐射下, Na 原子的预期荧光效率和加速度可以很好地再现 HI 自 1997 年以来的多次早期观测, 以及 LASCO 在 2022 年首次观测到的 Phaethon 的光度和形态特征^[101]。这意味着某些近日小天体尤其是 Phaethon 的大部分活动可能是在缺乏更易挥发的物质 (如 H₂O 等) 的情况下由 Na 的发射驱动的^[102], 这一观点得到了双子座流星体中明显缺乏 Na 的支持^[103]。对同一近日点 STEREO COR2 的图像进行叠加处理也观测到了 Phaethon, 观测结果的分析同样支持 Phaethon 的活动现象与 Fe I 和 Na D 气体排放有关, 与尘埃粒子无关^[104]。为了充分了解 Phaethon 的近日点活动, 需要在较小的日心距上对其进行更多的观测。PSP 观测到了与 Phaethon 相关的尘埃轨迹, 且观测结果表明, 航天器接近 Phaethon 轨道 0.027 AU 以内, 对 2018 年 10 月—2021 年 8 月期间的 9 次尘埃轨迹的分析表明, 尘埃轨迹并不完全沿着 Phaethon 的轨道路径, 而是略有偏离 (约 1°), 并随着真近点角的增加而增加^[105, 106]。以往对与 Phaethon 相关的双子座流星群的了解主要来自地面的观测结果, 最近基于 PSP 的测量结果表明, 双子座流星群的核心物质分布在近日点附近或外部, 这意味着其可能源自 Phaethon 的一次剧烈灾难性物质释放^[107]。

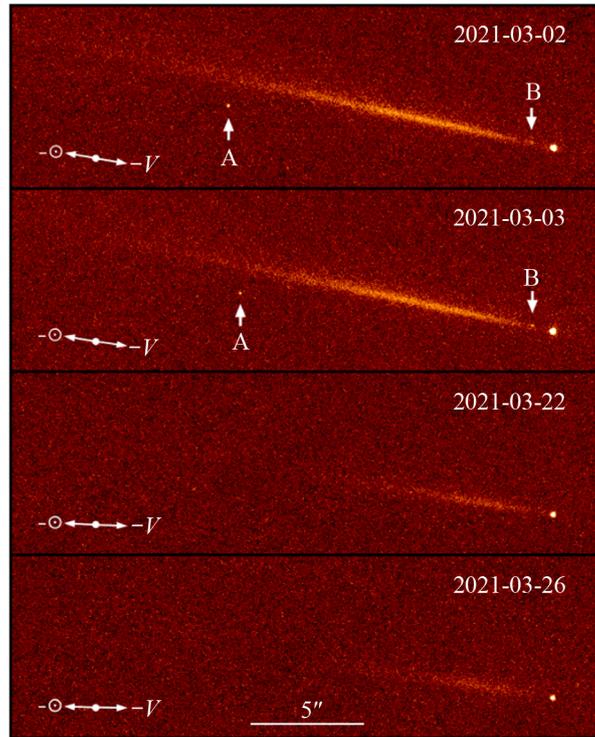
4.2 322P/SOHO 和 323P/SOHO

部分被 SOHO 观测到的太阳边缘彗星, 如 322P/SOHO 和 323P/SOHO, 虽然它们具有彗星的轨道特征并在近日点附近表现出活动现象^[37], 但是地面望远镜的观测表明, 在距太阳大于 1 AU 处它们是不活跃的, 而在这个距离处由水冰升华驱动的经典彗星则具有明显的活动性^[108, 109]。与典型彗星相比, 322P/SOHO 和 323P/SOHO 的体积更小, 颜色更蓝, 反照率更高^[93], 并且像 Phaethon 一样, 它们在活动时表现出强烈的橙色光度颜色, 且没有相位角依赖性, 这表明存在 Na I D 共振线的发射, 但缺少通常活跃彗星的微米级尘埃颗粒^[101]。因此, 虽然 322P/SOHO 和 323P/SOHO 被称为“彗星”, 但是它们现在的观测特征更接近于小行星, 其内部水冰等易挥发的物质可能已经消耗殆尽, 在较小的日心距处由 Na 等物质的发射驱动了其活动现象。

在搜寻星历表时, He 等人^[110]发现 322P 在 2019 年 9 月 2 日以最近 0.025 AU 的距离与 PSP 相遇, 他们模拟了从 322P 释放的尘埃粒子的动力学, 发现这些粒子形成了一条弯曲的尘埃尾。通过将模拟的 PSP 内日球路径上采样的等离子体和磁场的状态与 PSP 的现场测量结果进行对比, 得到的 322P 的尘埃释放率小于 2×10^3 kg/s, 这表明 322P 正在变成一颗岩石彗星 (rock comet)。

同时, 利用地面望远镜 (Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT), Gemini North (GN), Lowell Discovery Telescope (LDT), Subaru) 和空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 在 2020 年 12 月—2021 年 3 月期间对 323P 进行观测发现, 该彗星在近日点前 (2020 年 12 月) 没有表现出彗星的特征, 在近日点后 (2021 年 2 月) 则观测到一条长而窄的彗尾, 在 2021 年 3 月 HST 还观测到了两个半径约为 20 m (假设几何反照率为 0.15) 的碎片 (如图 7 所示)。对这一

时间段内的观测结果进行分析表明, 323P 可能不再是典型的太阳系彗星, 因为它的质量损失不能通过挥发性物质的升华来解释, 而更可能是由旋转不稳定性加上近日点附近彗核内部巨大的温度梯度引起的热应力触发的^[109]。



注: 2021 年 3 月期间 HST/WFC3 拍摄的三张 323P/SOHO 的中值合成图像, 上面两幅图像中的箭头指出了观测到的两个碎片分别标记为 A 和 B。赤道 J2000 坐标系的上方是北, 左侧是东。

图 7 HST 观测到的 323P/SOHO 的碎片图像^[109]

5 总结与展望

5.1 总结

近日小天体作为太阳系小天体的一个特殊群体, 也是太阳系演化早期的产物, 为我们理解太阳系的形成和演化提供了宝贵的线索。在更小的日心距下所经历的太阳的引力、热应力以及太阳大气与小天体的相互作用会对近日小天体产生严重影响, 使其表现出与地面上观测到的小天体不同的行为。包括太阳观测卫星等观测设备的投入使用为我们了解近日小天体提供了数据来源, 对 these 小天体的观测研究, 为我们提供了理解极端条件下小天体特性的机会, 并补充了我们对太阳系小天体整体以及近日环境的认识。

近日彗星占已知近日小天体中的大多数, 按照相似的轨道参数已经确定了克鲁兹族

(Kreutz)、梅耶族 (Meyer)、马斯登族 (Marsden) 和克拉赫特族 (Kracht) 共 4 个近日彗星族群。同一族群中的掠日彗星被认为是由一个早期彗星经历分裂、碎裂演化而来。Kreutz 族是在 SOHO 卫星发射之前唯一已知的近日彗星族群, 也是成员数量最多的族群, 其光变特性、轨道特性和尺寸质量分布已经得到了充分的研究。与普通彗星不同的是, 较小日心距处不易挥发物质的升华引起了 SOHO 观测到的 Kreutz 族彗星的光度迅速变亮, 但是目前还不能确定这种现象开始的具体位置。

对彗星的紫外光谱中最亮的 Ly- α 谱线的观测分析, 获得了近日彗星的 H 原子产率和彗核大小的估计值, 而基于空间中的 Ly- α 光度计测得的彗发中 H 的丰度和分布, 得到的彗星产水率及其随时间的变化, 增加了我们对彗星活动及彗星演化过程的认识。对彗星尘埃的光谱和偏振的观测分析, 确定了彗星尘埃粒子的结构和组成。彗星壮观的静态彗尾和彗尾丰富的动态演化都已被观测到, 对这些观测结果的分析为理解彗星的尘埃特性以及彗星与太阳风和日冕磁场的相互作用提供了重要信息。

在接近太阳的过程中所受到的灾难性破坏可能是实际观测到的近日小行星数目远少于理论模型预测的原因。与其他的近地小行星相比, 近日小行星具有不同的热行为, 且整体的光学颜色更蓝, 光谱斜率更小。基于不同仪器的观测结果的分析为理解近日小行星的活动带来了更为深入的认识, 增加了我们对极端环境中小行星特性的理解。

5.2 展望

自 1996 年发射升空以来, SOHO 和 STEREO 卫星已经观测到 5 000 多颗近日彗星^[1], 其中 Kreutz 族彗星在近日彗星中所占的比例最高, 积累的观测数据最多。在观测中 Kreutz 族彗星也表现出其他族群彗星所不具有的多种形态与特征, 但目前还没有对 Kreutz 族彗星形态进行分类的统计研究, 虽然任务量大、耗时长, 但是开展这类研究可以过滤掉季节性和相位角的影响, 从而更好地理解 Kreutz 族彗星的不同外观形态^[19]。Sekanina^[111] 使用蒙特卡罗方法对 Kreutz 族彗星的模拟结果表明, Kreutz 族彗星的活动将持续 200 a (1950–2150 年), 在 2010 年左右到达高峰时期, 与观测相符; 并且预测, 在 2050 年或 2060 年会有一个主要的碎片到达近日点, 如果被成功观测到, 它将为提供 Kreutz 族母彗星的重要信息。

对 SOHO 观测到的掠日彗星的统计结果指出, 目前仪器的观测能力已到极限, 因此急需新观测设备, 以带来更多的观测数据^[19]。中国首颗综合性太阳探测专用卫星——先进天基太阳天文台卫星 (ASO-S, 简称夸父一号) 上搭载的莱曼阿尔法太阳望远镜 (Ly- α Solar Telescope, LST), 在 Ly- α 和白光波段对全日面对 1.1 ~ 2.5 R_{\odot} 的内日冕进行成像观测。SOHO 和 SoHO 的成功观测证明了 LST 观测掠日彗星的可能性, 同时结合其他卫星实现连续观测, 有助于深入研究掠日彗星的演化过程。中国 2.5 m 墨子巡天望远镜 (Wide Field Survey Telescope, WFST) 每年系统性搜索和普查检测 2×10^4 颗以上太阳系天体, 并扩充主带和长周期彗星样本, 揭示不同日心距彗星活动性的驱动机制^[112]。此外, 中国即将发射的空间巡天望远镜 (China Space Station Telescope, CSST) 也将开展太阳系小天体的观测研究, 包括主带彗星的搜寻及其形态特征的获取, 以及彗星物理参数数据库的建立。将 WFST 和 CSST 的观测结果与近日彗星的研究相结合, 分析不同距离尺度下彗星的活动和物理特性差异, 有助于我们更好地理解太阳系的形成和演化理论。

位于美国夏威夷毛伊岛 4 m 口径的 DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope) 望远镜, 其高分辨率成像和高灵敏度探测能力将有望为彗星在靠近太阳时的破碎过程提供观测证据, 红外观测将允许测量彗星尘埃的温度和尘埃升华率, 同时基于 DKIST 的光谱分析能够揭示彗核的化学组成^[113]。迄今为止最大的空间望远镜 JWST (James Webb Space Telescope) 的近红外和中红外仪器能够详细观测彗星的气体和尘埃成分, 高分辨率成像能力可以用来研究彗核的组成和结构^[114, 115]。此外, JWST 能够对彗星进行长时间的观测, 覆盖从接近太阳到远离太阳的整个轨道, 这种宽范围的观测有助于了解彗星活动随距离和时间的变化, 从而提供关于彗星演化的全面信息^[116, 117]。与现有的地基望远镜相比, 即将到来的大型综合巡天望远镜 (Large Synoptic Survey Telescope, LSST) 的巡天能力显著提高, 使其能开展更为广泛的科学研究, 包括更多的近日小行星的发现以及更远距离上近日彗星 (如 1 AU 处的 Kreutz 族彗星) 的提前探测, 有助于将掠日彗星与彗星整体联系起来^[118]。计划将于 2027 年 9 月发射的近地天体勘测任务 (Near-Earth Object Surveyor Mission, NEO Surveyor) 将比 NEOWISE (Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer) 和 SST (Space Surveillance Telescoper) 更接近太阳, 从而能够搜索近太阳活动现象, 发现更多的近日小天体, 并提供其反照率等信息, 有助于我们了解这些小天体的表面温度以及空间风化对其表面的影响。此外, 将地面与空间观测结果相结合, 可以更精确地计算出近日小天体尺寸。

参考文献:

- [1] <https://sungrazer.nrl.navy.mil>, 2024
- [2] Jones G H, Knight M M, Battams K, et al. *Space Sci Rev*, 2018, 214(1): 20
- [3] Brown J C, Carlson R W, Toner M P. *ApJ*, 2015, 807(2): 165
- [4] <https://www.minorplanetcenter.net/>, 2024
- [5] Weissman P R. *AJ*, 1979, 84: 580
- [6] Fernández J A, Lemos P, Gallardo T. *MNRAS*, 2021, 508(1): 789
- [7] Marsden B G. *AJ*, 1967, 72: 1170
- [8] Sekanina Z. *ApJ*, 2000, 542(2): L147
- [9] Sekanina Z. *ApJ*, 2002, 576(2): 1085
- [10] Bemporad A, Poletto G, Raymond J C, et al. *ApJ*, 2005, 620(1): 523
- [11] Vincent J B, A'Hearn M F, Lin Z Y, et al. *MNRAS*, 2016, 462: S184
- [12] Samarasinha N H, Mueller B E A. *ApJ*, 2013, 775(1): L10
- [13] Granvik M, Morbidelli A, Jedicke R, et al. *Nature*, 2016, 530(7590): 303
- [14] Jewitt D, Li J. *AJ*, 2010, 140(5): 1519
- [15] Jewitt D, Li J, Agarwal J. *ApJ*, 2013, 771(2): L36
- [16] Combi M R, Mäkinen T T, Bertaux J L, et al. *Icarus*, 2019, 317: 610
- [17] Bemporad A, Giordano S, Raymond J C, et al. *Advances in Space Research*, 2015, 56(10): 2288
- [18] Schrijver C J, Brown J C, Battams K, et al. *Science*, 2012, 335(6066): 324
- [19] Battams K, Knight M M. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 2017, 375(2097): 20160257
- [20] Knight M M, A'Hearn M F, Biesecker D A, et al. *AJ*, 2010, 139(3): 926
- [21] Ye Q Z, Hui M T, Kracht R, et al. *ApJ*, 2014, 796(2): 83
- [22] Ye Q Z, Zhang Q C, Guíñez C, et al. *Research Notes of the American Astronomical Society*, 2023, 7(6): 112
- [23] Sonka A B, Birlan M, Nedelcu D A. *Romanian Astronomical Journal*, 2020, 30(2): 153
- [24] Zhang Q C, Ye Q Z, Farnham T L, et al. *The Astronomer's Telegram*, 2022, 15358: 1

- [25] Tonry J, Fitzsimmons A, Erasmus N, et al. <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K24/K24H22.html>, 2024
- [26] Kirkwood D. *The Observatory*, 1880, 3: 590
- [27] Kreutz H. *Publication der Koeniglichen Sternwarte in Kiel*, 1888, 3: 111
- [28] Kreutz H. *Publication der Koeniglichen Sternwarte in Kiel*, 1891, 6: 67
- [29] Kreutz H. *Astronomische Nachrichten*, 1901, 155: 63
- [30] Kresák L. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 1966, 17: 188
- [31] Sekanina Z. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 1967, 18: 198
- [32] Sekanina Z. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 1967, 18: 229
- [33] Howard R, Koomen N, Michels D J, et al. *IAU Circ*, 1981, 3640: 1
- [34] MacQueen R M, St. Cyr O C. *Icarus*, 1991, 90(1): 96
- [35] Sheeley N R Jr, Howard R A, Koomen M J, et al. *Nature*, 1982, 300(5889): 239
- [36] St. Cyr C, Williams G V, Stezelberger S, et al. *IAU Circ*, 1997, 6653: 1
- [37] Lamy P, Faury G, Llebaria A, et al. *Icarus*, 2013, 226(2): 1350
- [38] Sekanina Z, Chodas P W. *ApJS*, 2005, 161(2): 551
- [39] Hubbard J S. *AJ*, 1849, 1: 10
- [40] Hubbard J S. *AJ*, 1850, 1: 24
- [41] Hubbard J S. *AJ*, 1851, 2: 46
- [42] Hubbard J S. *AJ*, 1851, 2: 57
- [43] Hubbard J S. *AJ*, 1852, 2: 153
- [44] Marsden B G. *AJ*, 1989, 98: 2306
- [45] Sekanina Z, Chodas P W. *ApJ*, 2012, 757(2): 127
- [46] Sekanina Z. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024arXiv240100845S>, 2024
- [47] Marsden B G. *Annual Review of A&A*, 2005, 43(1): 75
- [48] Sekanina Z, Kracht R. *ApJ*, 2015, 801(2): 135
- [49] Sekanina Z. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021arXiv210901297S>, 2021
- [50] Sekanina Z. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022arXiv221211919S>, 2022
- [51] Sekanina Z. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022arXiv221103271S>, 2022
- [52] Knight M M. PhD thesis, Maryland: University of Maryland, College Park, 2008: 207
- [53] Biesecker D A, Lamy P, St. Cyr O C, et al. *Icarus*, 2002, 157(2): 323
- [54] Kimura H, Mann I, Biesecker D A, et al. *Icarus*, 2002, 159(2): 529
- [55] Raymond J C, Fineschi S, Smith P L, et al. *ApJ*, 1998, 508(1): 410
- [56] Uzzo M, Raymond J C, Biesecker D, et al. *ApJ*, 2001, 558(1): 403
- [57] McClure G W. *Physical Review*, 1966, 148(1): 47
- [58] Giordano S, Raymond J C, Lamy P, et al. *ApJ*, 2015, 798(1): 47
- [59] Ciaravella A, Raymond J C, Giordano S. *ApJ*, 2010, 713(1): L69
- [60] Bemporad A, Pennella S, Battams K, et al. *A&A*, 2023, 680: A90
- [61] Combi M R, Fougere N, Mäkinen J T T, et al. *ApJ*, 2014, 788(1): L7
- [62] Combi M R, Mäkinen J T T, Henry N J, et al. *AJ*, 2008, 135(4): 1533
- [63] Combi M R, Smyth W H. *ApJ*, 1988, 327: 1026
- [64] Combi M R, Smyth W H. *ApJ*, 1988, 327: 1044
- [65] Combi M R, Reinard A A, Bertaux J L, et al. *Icarus*, 2000, 144(1): 191
- [66] Combi M R, Shou Y, Mäkinen T, et al. *Icarus*, 2021, 365: 114509
- [67] Combi M R, Mäkinen T, Bertaux J L, et al. *Icarus*, 2023, 398: 115543
- [68] Kolokolova L, Kimura H, Kiselev N, et al. *A&A*, 2007, 463(3): 1189
- [69] McCauley P I, Saar S H, Raymond J C, et al. *ApJ*, 2013, 768(2): 161
- [70] Raymond J C, Downs C, Knight M M, et al. *ApJ*, 2018, 858(1): 19
- [71] Kolokolova L, Hough J, Levasseur-Regourd A C. *Polarimetry of Stars and Planetary Systems*, Cambridge: Cambridge University Press, 2015: 503
- [72] Halder P, Ganesh S. *MNRAS*, 2021, 501(2): 1766

- [73] Nežić R, Bagnulo S, Jones G H, et al. *MNRAS*, 2022, 513(2): 2226
- [74] Festou M C, Keller H U, Weaver H A. *Comets II*, USA: University of Arizona Press, 2004: 1
- [75] Gundlach B, Blum J, Skorov Y V, et al. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012arXiv1203.1808G>, 2012
- [76] Knight M M, Battams K. *ApJ*, 2014, 782(2): L37
- [77] Fulle M, Leblanc F, Harrison R A, et al. *ApJ*, 2007, 661(1): L93
- [78] Neugebauer M, Gloeckler G, Gosling J T, et al. *ApJ*, 2007, 667(2): 1262
- [79] Matteini L, Laker R, Horbury T, et al. *A&A*, 2021, 656: A39
- [80] Jia Y D, Russell C T, Liu W, et al. *ApJ*, 2014, 796(1): 42
- [81] Niedner M B Jr, Brandt J C. *ApJ*, 1979, 234: 723
- [82] Ip W H. *ApJ*, 1980, 238: 388
- [83] Voelzke M R. *Earth Moon and Planets*, 2004, 97(3-4): 399
- [84] 史建春, 林启生, 胡中为, 等. *天文学报*, 2011, 52(2): 9
- [85] Vourlidas A, Davis C J, Eyles C J, et al. *ApJ*, 2007, 668(1): L79
- [86] Jia Y D, Russell C T, Jian L K, et al. *ApJ*, 2009, 696(1): L56
- [87] Li J, Kim Y, Jewitt D. *AJ*, 2023, 166(6): 270
- [88] Downs C, Linker J A, Mikić Z, et al. *Science*, 2013, 340(6137): 1196
- [89] Liu L Z, Ma Y H, Shi J C. *Research in A&A*, 2011, 11(5): 617
- [90] Williams L L, Zank G P. *J Geophys Res*, 1994, 99(A10): 19229
- [91] Hou C P, He J S, Zhang L, et al. *Earth and Planetary Physics*, 2021, 5(3): 232
- [92] Campins H, Kelley M S, Fernández Y, et al. *Earth Moon and Planets*, 2009, 105(2-4): 159
- [93] Holt C E, Knight M M, Kelley M S P, et al. *The Planetary Science Journal*, 2022, 3(8): 187
- [94] Williams I P, Wu Z. *MNRAS*, 1993, 262(1): 231
- [95] Ohtsuka K, Sekiguchi T, Kinoshita D, et al. *A&A*, 2006, 450(3): L25
- [96] Ohtsuka K, Arakida H, Ito T, et al. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 2008, 43: 5055
- [97] Li J, Jewitt D. *AJ*, 2013, 145(6): 154
- [98] Hui M T, Li J. *AJ*, 2017, 153(1): 23
- [99] Schmidt C, Baumgardner J, Mendillo M, et al. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting*, 2010, 42: 21.05
- [100] Schmidt C A. PhD thesis, Massachusetts: Boston University, 2013: 174
- [101] Zhang Q, Battams K, Ye Q, et al. *The Planetary Science Journal*, 2023, 4(4): 70
- [102] Masiero J R, Davidsson B J R, Liu Y, et al. *The Planetary Science Journal*, 2021, 2(4): 165
- [103] Abe S, Ogawa T, Maeda K, et al. *Planet Space Sci*, 2020, 194: 105040
- [104] Hui M T. *AJ*, 2023, 165(3): 94
- [105] Battams K, Knight M M, Kelley M S P, et al. *ApJS*, 2020, 246(2): 64
- [106] Battams K, Gutarra-Leon A J, Gallagher B M, et al. *ApJ*, 2022, 936(1): 81
- [107] Cukier W Z, Szalay J R. *The Planetary Science Journal*, 2023, 4(6): 109
- [108] Knight M M, Fitzsimmons A, Kelley M S P, et al. *ApJ*, 2016, 823(1): L6
- [109] Hui M T, Tholen D J, Kracht R, et al. *AJ*, 2022, 164(1): 1
- [110] He J S, Cui B, Yang L P, et al. *ApJ*, 2021, 910(1): 7
- [111] Sekanina Z. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024arXiv240400887S>, 2024
- [112] Wang T G, Liu G L, Cai Z Y, et al. *Science China: Physics, Mechanics, and Astronomy*, 2023, 66(10): 109512
- [113] Rast M P, Bello González N, Bellot Rubio L, et al. *Sol Phys*, 2021, 296(4): 70
- [114] Woodward C E, Bockelee-Morvan D, Harker D E, et al. *American Astronomical Society Meeting*, 2023, 241: 136.06
- [115] Kelley M S P, Hsieh H H, Bodewits D, et al. *Nature*, 2023, 619(7971): 720
- [116] Kelley M S P, Woodward C E, Bodewits D, et al. *PASP*, 2016, 128(959): 018009
- [117] Snodgrass C, Guilbert-Lepoutre A, Holt C, et al. *JWST Proposal*, 2024, 3: 6742
- [118] Seaman R, Abell P, Christensen E, et al. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018arXiv181200466S>, 2018

Current Status of Observation and Research of Near-Sun Small Bodies

LIU Yanjie¹, ZHAO Haibin^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China)

Abstract: Small solar system bodies with perihelion distances less than $0.307 \text{ AU}/66 R_{\odot}$ are known as near-Sun small bodies, and the extreme solar heating and high-temperature magnetized plasma environments they experience can reveal information about the small bodies themselves and contribute to the understanding of the near-solar space environment. Solar satellites have obtained a large amount of measured data of near-Sun small bodies, which provide opportunities for the study of the physical characterization and evolutionary history of different groups of near-Sun comets and asteroids, as well as the comparative study of the characteristics of extreme near-Sun comets (e.g., the Kreutz group) with those of other comets. Meanwhile, the observation of the coma and tail structure of near-Sun comets provides important references for the study of coronal properties such as the magnetic field structure of the solar system space, the velocity distribution of the solar wind, the coronal electron density, and the proton temperature. This article reviews the research progress made in the observation and in-situ exploration of near-Sun small bodies by solar satellites such as SOHO, STEREO, PSP, and SoI over the past 30 years, and introduces the corresponding research methods and technical means. Finally, the article looks forward to the prospects and development directions of current and future domestic and international space and ground-based telescope observations of near-Sun small bodies.

Key words: small solar system bodies; near-Sun comets; active asteroids; solar corona