

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.01.01

外太阳系小天体探测与研究进展

徐小萌^{1,2,3}, 吴昀昭^{1,4}, 张西亮³

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 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 云南天文台, 昆明 650011; 4. 澳门科技大学 月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078)

摘要: 外太阳系小天体主要包括半人马小行星和越海王星天体, 它们蕴藏着丰富的甲烷、水冰以及氨等物质, 代表太阳系最原始的天体。研究这些小天体的性质, 不仅有助于理解太阳系的起源和演化历史, 还能揭示其与地球中水和生命的联系。目前深空探测已进入了蓬勃发展的新时代, “新视野号”将继续飞往柯伊伯带访问这些遥远的天体, 中国也正在论证太阳系边际探测任务。该文从探测历史、反照率和尺寸分布、轨道分布、色指数、光谱性质等方面介绍了外太阳系小天体的探测与研究进展; 重点介绍了其可见光、近红外和中红外的光谱特征, 并探讨了未来研究趋势, 为中国外太阳系及冰卫星探测任务提供支持。

关键词: 外太阳系; 半人马小行星; 越海王星天体; 光谱性质

中图分类号: P145.2

文献标识码: A

1 引 言

外太阳系区域是指距离太阳 5 AU 之外的区域, 包括四大巨行星系统空间、柯伊伯带 (Kuiper belt) 和奥尔特云等接近太阳系边际的空间范围, 主要的外太阳系小天体包括半人马小行星 (Centaur) 和越海王星天体 (Trans-Neptunian Object, TNO) 等^[1]。外太阳系小天体蕴含着太阳系原始星云物理和化学性质的重要信息, 对其特性的研究有助于理解太阳系的形成和演化, 因此是太阳系边际探测的重要目标之一。基于小天体中心 MPC (Minor Planet Center) 数据库, 现已发现约 1 000 颗半人马小行星和 3 000 多颗越海王星天体。

MPC 将半人马小行星定义为, 近日点距离大于木星 ($q > 5.2$ AU), 且半长轴小于海王星 ($a < 30.1$ AU) 的小天体。半人马小行星一般指轨道介于木星与海王星之间, 并围绕太阳运行的小天体, 与大行星没有平均轨道共振现象。由于行星轨道共振保护的缺失以及

收稿日期: 2024-04-05; 修回日期: 2024-07-19

资助项目: 国家自然科学基金 (12150009); 民用航天预研项目 (D020302); CSST 天体测量的科学应用研究 (CMS-CSST-2021-B10)

通讯作者: 吴昀昭, wu@pmo.ac.cn

巨行星的扰动影响, 半人马小行星的轨道动力学生命周期只有几百万年, 轨道不稳定时间尺度为 $10^6 \sim 10^7$ a^[2, 3]。随着时间推移, 部分半人马小行星被弹射到星际空间, 或被木星捕获成为木星族彗星 (Jupiter-family comet, JFC), 部分与行星或太阳发生碰撞^[4]。半人马小行星也能成为近地天体, 有研究认为约 6% 的近地天体来自柯伊伯带^[5]。1977 年 11 月 1 日, Charles Kowal^[6]发现了一颗缓慢移动的小天体, 这是首颗被定义为半人马的小行星——2060 Chiron。

半人马小行星通常由越海王星天体演化而来^[7]。越海王星天体是在海王星轨道 (约 30 AU) 之外围绕太阳转动的冰质天体。从轨道动力学的角度, 结合相对海王星的蒂塞朗参数 (T_N), 可将越海王星天体划分为^[8-10]: (1) 共振天体 (resonant object), 与海王星产生平均轨道共振运动的天体; (2) 散射盘天体 (scattering disk object, SDO), 被海王星散射的天体, 也称为近散射天体 (scattered-near object), 这类天体通常具有较高的偏心率和较大的半长轴, 其蒂塞朗参数 $T_N < 3$; (3) 经典天体 (classical belt object), 此类天体大多具有较低的轨道倾角, 其轨道偏心率 $e < 0.24$ 且 $T_N > 3$, 可将其分为内带、主带、外带天体; (4) 离散天体 (detached belt object), 远离巨行星的天体, 也称为扩展散射天体 (scattered-extended object), 近日点距离极大 ($q > 38$ AU), 轨道偏心率 $e > 0.24$ 且 $T_N > 3$; (5) 奥尔特云天体 (Oort cloud object), 半长轴 $a > 2000$ AU, 是长周期彗星的发源地。此外, 还包括除冥王星外的冥族小行星。自 1992 年发现第一颗越海王星天体 1992 QB₁ 以来, 又陆续发现 1 000 多个越海王星天体, 其大小范围为 10~1 000 km。

科学家正在搜寻更多的外太阳系小天体, 相关的研究迅速发展, 已成为当前行星科学最活跃的研究领域之一。本文重点关注半人马小行星和越海王星天体的光谱特征, 下文分别叙述其探测历史、物理性质、光谱性质, 并进行讨论及展望。

2 探测历史

1972 年 3 月 2 日发射升空的“先驱者 10 号”, 是首个穿越外太阳系的航天器, 旨在探索小行星带、木星、太阳风以及太阳系边际等。1983 年 6 月 13 日, “先驱者 10 号”飞越海王星轨道, 成为第一个离开八大行星范围的航天器。“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”分别于 1977 年 9 月和 1977 年 8 月发射升空, 旨在穿越太阳系的行星系统。目前“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”都已穿越太阳系边际接近星际空间, 然而, “旅行者号”难以提供越海王星天体的详细信息。2006 年 1 月“新视野号”发射升空, 旨在探测冥王星、冥卫一等越海王星天体, 这也是目前飞得最快的探测器。2015 年“新视野号”近距离飞越冥王星和冥卫卡戎, 获得了冥王星等大量外太阳系天体的信息; 2016 年离开冥王星及其卫星, 深入探索柯伊伯带其他天体^[11]。

除了航天器探测任务, 人们也使用地面望远镜和太空望远镜来观测外太阳系小天体。1998—2003 年, 深度黄道巡天项目使用 4-m Mayall 和 Blanco 望远镜, 共发现了 300 多颗半人马和越海王星天体^[12]。2001—2003 年, 欧洲南方天文台大型巡天计划 (European

Southern Observatory Large Programme)^[13] 使用 8.2 m 甚大望远镜 (Very Large Telescope, VLT) 和 3.5 m 新技术望远镜 (New Technology Telescope, NTT), 共获得 43 颗外太阳系小天体的可见光色指数^[14]。加拿大-法国黄道面巡天计划 (Canada-France Ecliptic Plane Survey, CFEPS) 在 2003—2007 年使用加法夏望远镜 (Canada-France-Hawaii Telescope, CFHT), 发现约 200 颗外太阳系小天体, 对其中大部分越海王星天体进行了精确定轨^[15]。2013—2018 年, 外太阳系起源巡天项目 (Outer Solar System Origins Surveys, OSSOS) 也使用加法夏望远镜对 800 多颗外太阳系小天体进行了观测^[16]。

与地基观测不同, 不受大气干扰的太空望远镜可以探索太阳系更深处天体的。哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 覆盖可见光和近红外波段, 2000 年 Noll 等人^[17] 使用 HST 的 NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) 设备测量 4 颗越海王星天体的近红外宽带反射率。同年 Kern 等人^[18] 也使用该设备观测了半人马小行星 8405 Asbolus 的近红外反射率光谱 (1~2 μm)。2003 年发射升空的斯皮策空间望远镜 (Spitzer Space Telescope) 具备中低分辨率光谱 (5.2~38 μm) 和 9 个红外宽带测光波段 (3.6~160 μm), 可以检测天体自身的热辐射, 测量遥远天体的尺寸和反照率, 并根据光谱分析天体表面成分^[19]。

新一代的天基和地基望远镜显著提升了搜寻遥远小天体的能力, 如建于 2012 年的探索频道望远镜 (Discovery Channel Telescope, DCT) 和 2021 年发射升空的韦布空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST)。韦布空间望远镜的主镜直径为 6.5 m, 具备极高的红外分辨率和灵敏度, 可以获得大量外太阳系小天体成分信息。同时, 新的航天器也为探索距太阳 30 AU 以外的小天体做好了准备。

3 物理性质

3.1 反照率和尺寸分布

越海王星天体的典型几何反照率在 6.9%~8.0% 之间, 半人马小行星的反照率总体略低于越海王星天体, 但有小部分半人马小行星的反照率高达 20%^[20]。红色半人马小行星的平均反照率为 8%~12%, 而灰色的略低于 5%~6%^[21]。KS (Kolmogorov-Smirnov) 检验表明, 尽管越海王星天体和半人马小行星的反照率存在差异, 但并不代表两者起源于不同的母体族群^[22]。

通过测量天体的亮度并建立热模型, 可以获得天体的反照率, 分析整个天体群的尺寸分布。尺寸分布可以确定柯伊伯带的质量, 理解吸积过程与碰撞侵蚀之间的相互关系。直径较大的小天体主要形成于吸积过程, 而直径小于 50~100 km 的小天体由碰撞演化产生^[23]。

Irwin 等人^[24] 首次提出用微分幂律公式对尺寸分布进行估算, 得到半径大于 R 的天体数量。幂律公式如下:

$$N(>R) \propto R^{1-q}, \quad q > 1, \quad (1)$$

其中, R 是天体半径, 与绝对星等相关, q 代表尺寸分布的斜率指数。 R 的表达式如下:

$$R = 3.1 \times 10^3 \times 10^{-0.2H_R} \left(\frac{0.03}{p_R} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中, p_R 是 R 波段的几何反照率, H_R 表示 R 波段绝对星等。

光度函数 (luminosity function, LF) 计算了每平方度天区中比 R 波段视星等 m_R 更亮的 TNO 的累积数量, 函数形式通常是累积光度函数的指数形式^[25]:

$$\sum (< m_R) = 10^{\alpha(m_R - m_o)}, \quad (3)$$

其中, m_R 为 R 波段视星等, m_o 代表每平方度天区中 1 颗 TNO 的星等, α 是累积光度函数的斜率, 反映不同的微分直径分布。

通过分析 TNO 数量密度与日心距的关系, 将幂律公式的斜率指数与累积光度函数的斜率指数相关联, 最终将视星等光度函数转化为绝对星等光度函数^[26], 对应的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 如下:

$$N(\leq H) = C \times 10^{\alpha H}, \quad (4)$$

其中, N 表示外太阳系小天体的估计数量, H 表示绝对星等, C 是归一化尺度。

指数之间的关系如下:

$$\alpha = (q - 1)/5. \quad (5)$$

2008 年 Petit 等人^[25]通过计算得到, 越海王星天体群的尺寸分布的斜率 $q > 4$, 对于那些星等 m_R 亮于 25 mag 的 TNO, 其斜率 $q \approx 4.5$ 。

在没有消除观测偏差的情况下, 对半人马小行星的尺寸分布进行估计, 发现使用最大似然法^[21]与蒙特卡洛模拟^[27]得到的尺寸分布幂律值 ($\alpha \approx 0.6$) 相同。2014 年 Adams 等人^[28]使用 DES 数据, 得到消除观测偏差的半人马小行星尺寸分布, 从而推测出绝对星等在 7.5~11 mag 范围的半人马小行星的最佳幂律值是 $\alpha = 0.42 \pm 0.02$ 。2018 年 Lawler 等人^[29]使用 OSSOS 模拟, 发现尺寸分布与观测值不匹配, 在天体较小时须行讨论。

3.2 轨道分布

半人马小行星的轨道倾角分布范围较广, 覆盖低倾角至高倾角区间。基于 MPC 轨道数据库^①, 大部分半人马小行星的轨道倾角分布在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 范围, 但某些特殊的半人马天体 (如 2001 XZ₂₅₅) 具有极低的轨道倾角 ($i < 3^\circ$)^[30]; 还有部分半人马小行星具有极高轨道倾角 ($i > 60^\circ$), 如 2004 YH₃₂ 的轨道倾角为 79° 。值得注意的是, 一些运行在逆行轨道上的半人马小行星可能具有超高的轨道倾角, 如 2008 YB₃ 的轨道倾角高达 105° ^[31]。

柯伊伯带的早期模型认为由海王星引力扰动产生的倾角范围约为 1° , 但实际观测表明经典柯伊伯带天体的轨道倾角呈现双峰分布 upciteDelsantiJewitt-658。根据轨道分布把经典柯伊伯带天体分成两类: (1) 热群天体, 在 30~47 AU 内均匀分布的高倾角天体, 约占经典柯伊伯带天体总数的 65%, 其轨道向外延伸可能成为分离天体; (2) 冷群天体, 指 42~45 AU 之间低倾角、低离心率的天体, 约占经典柯伊伯带小天体群总数的 35%^[32]。

^①<https://minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html>

3.3 色指数

外太阳系小天体非常暗, 因而难以获得高分辨率光谱, 通常采取测光观测研究其表面性质。根据色指数 ($B - V$, $V - R$, $V - I$, $V - J$, $V - H$ 和 $V - K$) 可将外太阳系小天体分为四类: BB、BR、IR 和 RR。BB 类天体具有中等色指数, RR 类天体的色指数为红色 (代表最红的外太阳系天体), IR 类的红色略浅于 RR 类, BR 类的色指数介于 BB 与 IR 之间^[33]。

半人马小行星的色指数呈现双峰分布: 中性/灰色 ($B - R = 1.0$) 和极端的红色 ($B - R = 2.0$)^[34] (见图 1)。颜色不同意味着表面物质成分不同。复杂有机分子可以吸收光学短波, 因此越红的天体可能含有越多的复杂有机分子, 但不能排除其他有机化合物的影响。新的观测呈现出与色指数双峰分布不符的结果: TRC (Tegler Romanishin and Consolmagno's survey) 数据的红色色指数范围变宽, 灰色与红色群体之间的差异减小^[35]。因此, 有必要进一步观测半人马小行星的 $B - R$ 色指数分布, 深入理解相应的演化过程。越海王星天体也有类似的色指数双峰分布, 即红色 (red, R) 和非常红 (very red, VR) 的群体。该双峰分布的形成有两种解释: (1) 形成于原行星盘的不同区域, 初始物质成分不同; (2) 形成于原行星盘的同一区域, 初始物质成分相同, 但次生演化过程改变了表面特性^[37]。

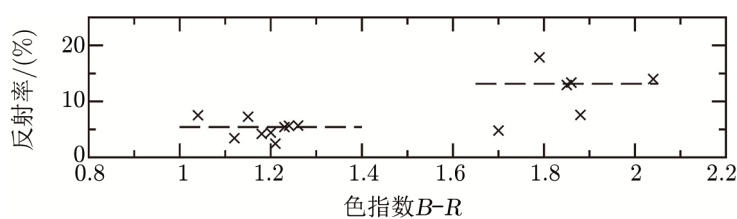
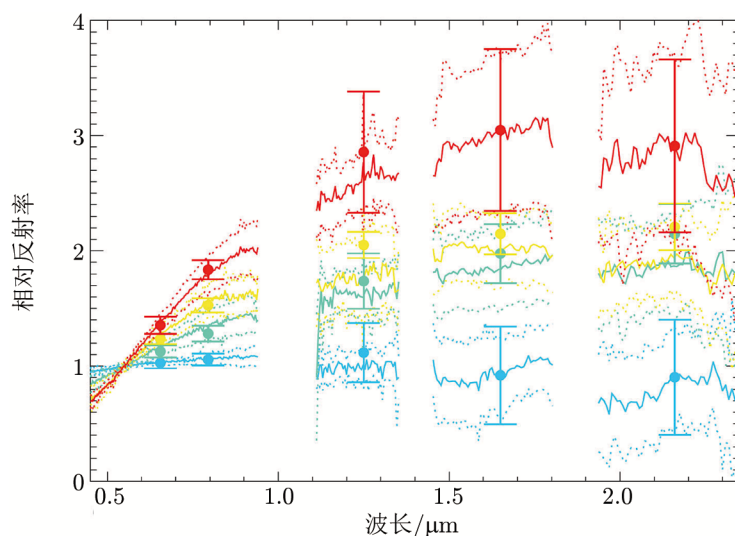


图 1 15 颗半人马小行星的 $B - R$ 色指数与反照率的分布^[36]

关于外太阳系小天体色指数多样性的解释非常复杂, 尚无统一的结论。最初认为, 多样性的成因是宇宙线轰击或紫外线光解导致的色指数变化与表面重新覆盖之间的相互作用, 如撞击或类彗星活动^[38]。另一种可能的原因是 H_2S 雪线的影响, 此类挥发性冰的存在会导致光谱变红^[37]。进一步的研究工作将分析色指数多样性的成因, 到底是演化形成 (如辐射变红、碰撞和升华) 还是原始的温度引起的成分梯度。

4 光谱性质

色指数只能解释天体表面的一般性质, 仍需反射光谱来全面分析。2017 年 Merlin 等人^[39]按照色指数类型分别计算 43 个外太阳系小天体光谱, 然后分析 BB、BR、IR 和 RR 这四种类型的平均光谱 (波长范围为 $0.45 \sim 2.40 \mu m$, 如图 2 所示); 结论证实了 Barucci 等人^[40]的观点, 即从 IR、BR、RR 到 BB 类型水冰的含量逐渐增加。其中, RR 与 IR 类的平均光谱表现出 $2.3 \mu m$ 吸收特征, 可能存在碳氢化合物或甲醇。



注：从下到上依次为 BB、BR、IR 和 RR 类，分别用蓝色、绿色、黄色和红色表示，虚线显示误差在 $\pm 1\sigma$ 水平。

图 2 在 $0.55 \mu\text{m}$ 处归一化的四种类型的平均光谱^[39]

4.1 可见光光谱特征

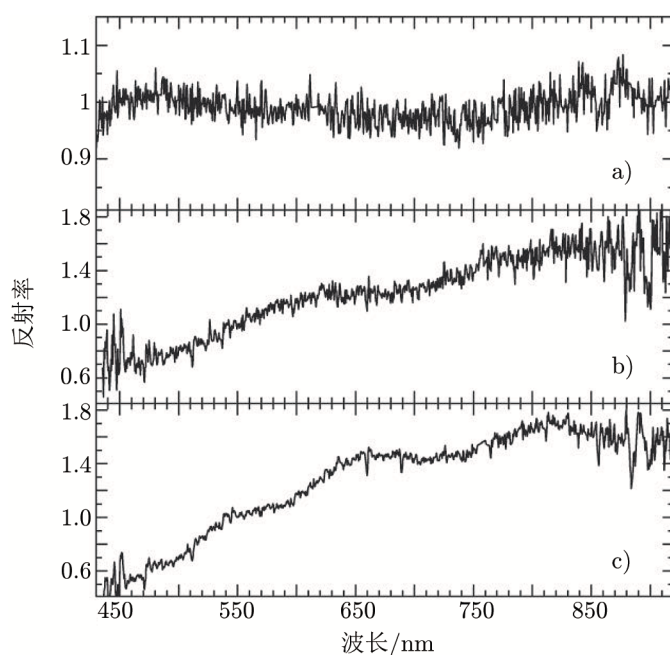
利用可见光光谱能检测到层状硅酸盐等水蚀变矿物以及 CH_4 的微弱特征，但这些特征的证认往往受到光谱质量影响。外太阳系小天体的可见光光谱 ($400\sim 700 \text{ nm}$) 通常无明显的吸收特征，这些光谱具有较大斜率差异，每 $10^3 \text{ \AA}$ 反射率范围为 $-1\% \sim 55\%$ 。红色的光谱斜率可能由特定化合物导致，也可能与有机物或辐照作用相关。

在可见光波段，2003 AZ₈₄、47932 GN₁₇₁ 和 38628 Huya 这 3 颗越海王星天体具有宽吸收特征（见图 3）。该特征与一些主带小行星、不规则卫星以及陨石水蚀变矿物的光谱特征非常相似，均由层状硅酸盐中 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ 的电荷转移所导致^[41]。在半人马小行星 16375 1999 DE₉ 的光谱中也检测到层状硅酸盐，但这些特征都非常微弱，需要更高精度的观测进行验证^[42]。

目前，低温环境下外太阳系小天体如何发生水蚀变作用仍不清楚。大型 TNO 可能发生显著的放射性加热^[43]，但热量是否足以产生水蚀变作用尚不确定。另一种加热方式是撞击，这需要充足的热量和持续时间，才能推动水蚀变过程。此外，也存在早期太阳星云中直接形成充足的水合矿物的可能性。新的研究表明，早期太阳星云中水直接进入原行星盘，随后并入冰质天体（如彗星）中^[45]。

4.2 近红外光谱特征

一些外太阳系小天体的近红外光谱平坦无特征，而另一些表现出水冰吸收特征，少部分天体还具有碳氢化合物的近红外吸收特征。水冰的吸收特征主要位于 1.5 、 1.65 和 $2.0 \mu\text{m}$ ，甲烷冰 CH_4 的吸收峰位于 $1.7 \mu\text{m}$ 和 $2.3 \mu\text{m}$ ，甲醇冰 CH_3OH 的吸收峰位于 $2.27 \mu\text{m}$ ，氨冰



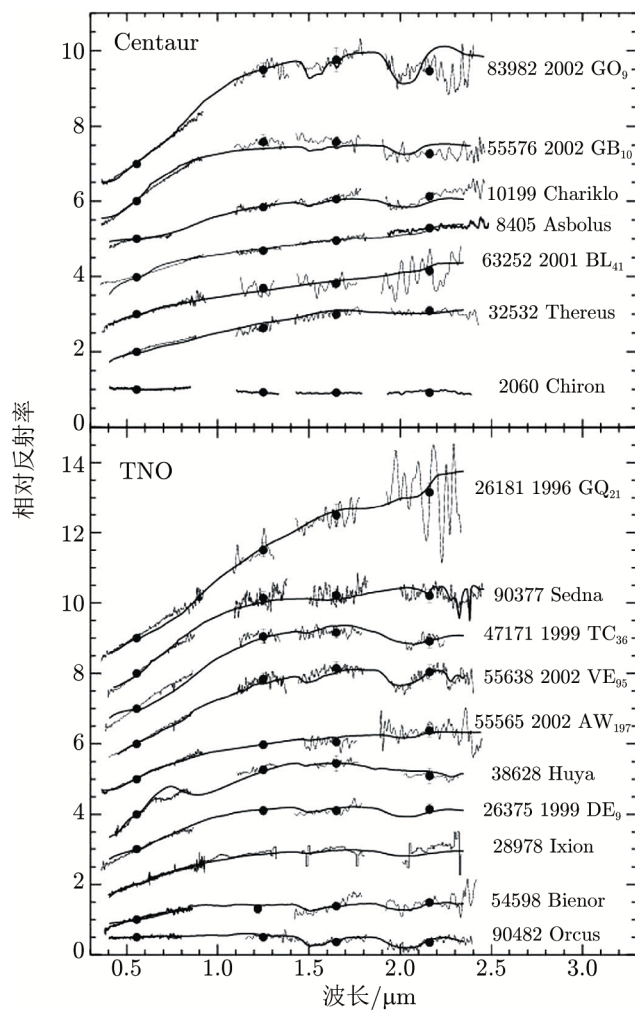
注: a) 显示 2003 AZ₈₄ 的波段吸收中心位于约 700 nm 处^[47]; b) 显示 47932 GN₁₇₁ 的波段吸收中心约在 725 nm 处; c) 表明 38628 Huya 的光谱有两处吸收波段, 分别位于 600 nm 和 730 nm 附近^[44]。

图 3 3 颗 TNO 的可见光光谱^[40]

NH₃ 的吸收峰则位于 2.0 μm 和 2.25 μm , 固态 C-N 化合物的吸收峰位于 2.2 μm 。因此近红外光谱 (1~2.5 μm) 常用于判断各种冰的存在。

VLT 望远镜观测到几颗半人马小行星 (2002 GO₉、2002 GB₁₀、10199 Chariklo、8405 Asbolus、2001 BL₄₁、32532 Thereus 和 2060 Chiron) 和越海王星天体 (1996 GQ₂₁、90377 Sedna、1999 TC₃₆、2002 VE₉₅、2002 AW₁₉₇、38628 Huya、1999 DE₉、28978 Ixion、54598 Bienor 和 90482 Orcus) 的可见光和近红外光谱^[46], 如图 4 所示。90377 Sedna 是最红的外太阳系小天体之一, 其光谱在不同相位处表现不同, 表面已检测到 N₂ 冰, 这意味着 Sedna 可能存在薄的大气层。2002 VE₉₅ 在 1.5、2.0 和 2.27 μm 处有明显吸收, 说明含有 H₂O 和 CH₃OH。对 90482 Orcus 的光谱模型拟合结果表明, 其可能含有类干酪根物质、无定形碳和水冰^[47]。半人马小行星 Pholus 在 2.04 μm 和 2.27 μm 处有强吸收特征。Cruikshank 等人^[48]通过拟合 Pholus 的光谱, 得出其表面成分主要有硅酸盐橄榄石、托林、水冰、甲醇和碳, 从而推测 Pholus 可能是原始天体。

2023 年 De Prá 等人^[49]依据 0.65~5.1 μm 的光谱特征和 3 μm 吸收波段的结构, 将 TNO 的光谱分成四种类型, 分别为 Bowl、Bowl-n、Double-Dip 和 Cliff 类型。其中, Bowl 和 Bowl-n 类型只有非常微弱的 CO₂ 基频特征, Double-Dip 和 Cliff 类型具有 CO₂ 倍频、¹³CO₃ 同位素和 CO 基频特征。同年 Licandro 等人^[50]分析了 JWST/NIRSpec 光谱仪所获得的 5 颗半人马小行星的近红外光谱, 提出半人马小行星族群包含两种不同的类型: 富水



注：光谱在 $0.55 \mu\text{m}$ 处归一化。

图 4 VLT 观测到的半人马小行星和越海王星天体的可见光和近红外光谱^[46]

天体 (Bowl 类型) 和富碳天体 (Cliff 类型)。

4.3 中红外光谱特征

中红外光谱 ($5\sim 38 \mu\text{m}$) 非常适合研究外太阳系小天体的表面成分和结构。该光谱区域包含 Si-O 键伸缩振动和弯曲振动基频带, 能用于诊断硅酸盐矿物^[51] 以及冰 (如 CO_2 、 H_2O 和 CH_3OH) 等成分, 从而研究影响颗粒大小的因素。

斯皮策空间望远镜具有高灵敏度红外探测能力, 为遥远天体的观测提供了更多支持。图 5 展示了 6 个外太阳系小天体 (Hektor、Asbolus、Elatus、1999 TD₁₀、Pholus 和 1999 RG₃₃) 的发射率光谱。其中, 半人马天体 Asbolus 发射率谱的对比鲜明, 与 3 颗特洛伊小行星的发射率谱相似^[52]。Asbolus 在 $10 \mu\text{m}$ 附近表现出高发射率, 从 $18\sim 28 \mu\text{m}$ 波段抬升,

在 $19\ \mu\text{m}$ 和 $24\ \mu\text{m}$ 处存在明显的双峰, 这些双峰均由细粒硅酸盐产生。Elatus 的热发射光谱与 Asbolus 相似, 在 $17\sim 27\ \mu\text{m}$ 波段也有宽的高发射率, 但两者的双峰分布位置不同。1999 TD₁₀ 和 1999 RG₃₃ 在 $26\ \mu\text{m}$ 附近均呈现低发射率, 可能是硅酸盐矿物或冰的诊断特征。Pholus 的发射率谱缺乏诊断性光谱特征。

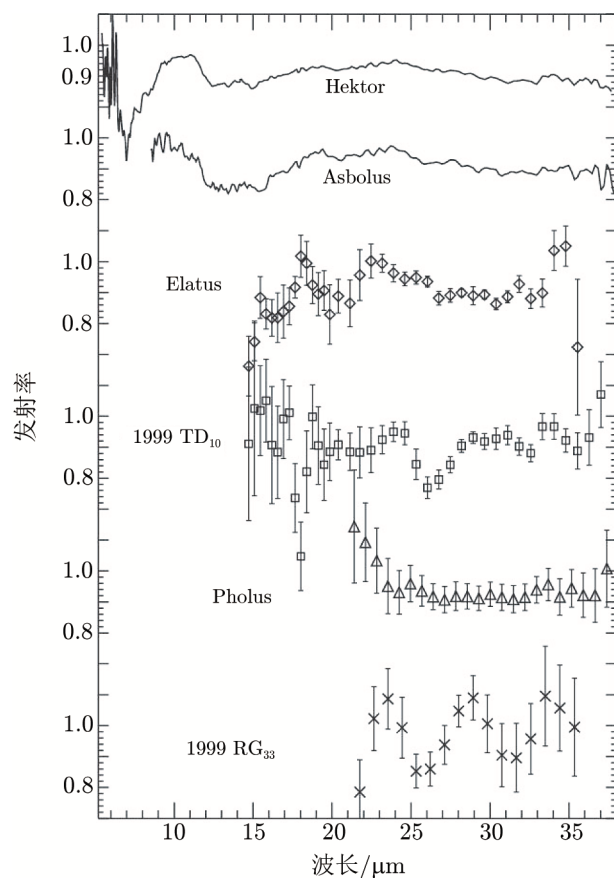


图 5 斯皮策空间望远镜得到的小天体发射率光谱^[52]

5 总结与展望

越海王星天体与半人马小行星的光谱都表现出丰富的特性, 这说明它们的表面成分具有多样性。越海王星天体的光谱与半人马小行星的存在差异, 表明两者的表面成分有所不同。考虑到同一天体表面成分可能存在的异质性, 新的研究应在不同相位观测这些天体, 并结合可见光与近红外等多波段光谱数据, 以更全面、详细地分析其表面信息。

未来的巡天项目有望观测到更多的外太阳系小天体, 并获得其物质成分、反照率、形状大小和自转周期等信息。如关于色指数的外太阳系起源巡天项目 (Colours of the Outer

Solar System Origins Survey, COL-OSSOSA) 计划使用 Gemini-North 望远镜进行观测, 获得 $m_V < 23.6$ mag 的外太阳系小天体的可见光和近红外色指数^[53]。中国科学院云南天文台依托丽江 2.4 m 望远镜, 开展了对外太阳系小天体的观测研究工作^[54]。由中国科学技术大学和中国科学院紫金山天文台共建的 2.5 m 墨子巡天望远镜的极限星等达 23 mag, 可在外太阳系小天体的发现和探测方面发挥重要作用^[55]。我国自主研发的载人空间站工程巡天空间望远镜 (Chinese Survey Space Telescope, CSST) 将对 17 500 平方度的大天区进行巡天观测, 巡天模块可获得至少 7 色的测光数据, 光谱涵盖近紫外、可见光及红外等波段, 极限星等可达 26 mag, 是探测和研究外太阳系小天体的利器^[56]。同时, 我国计划中的 10 m 级大型光学红外望远镜, 有望弥补国内外太阳系小天体在红外波段观测数据的匮乏。

随着更多观测设备的投入使用和观测能力的提高, 在外太阳系小天体研究领域有望取得以下进展。

(1) 冰质天体特性。目前仍有大量外太阳系小天体尚未被发现, 随着望远镜持续稳定的观测和航天器飞往深空的探测, 我们将获得更多冰质天体的性质。

(2) 原始物质储库。大部分外太阳系小天体代表太阳系原始星云的遗迹物质, 可能是蚀变最少的原始天体。相关研究有助于理解星际介质、太阳星云和太阳系物质组成之间的关系, 探索外太阳系原始物质储库。

(3) 太阳系起源和演化过程。通过获得外太阳系小天体的轨道特征、物理性质、化学成分和尺寸分布等信息, 促进对早期太阳星云及行星系统形成和演化的认识。

(4) 前生命化学。外太阳系小天体包含有机物和水冰等物质, 有助于理解生命起源。

参考文献:

- [1] Encrenaz T. EDP Sciences, 2009, 1: 249
- [2] Gladman B J, Marsden B G, Vanlaerhoven C. The Solar System Beyond Neptune. Tucson: University Arizona Press, 2008: 43
- [3] Tiscareno M S, Malhotra R. AJ, 2003, 126: 3122
- [4] Delsanti A, Jewitt D. Solar System Update. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 267
- [5] Morbidelli A Jr W, Michel P. Asteroids III. Tucson: University of Arizona Press, 2002: 409
- [6] Kowal C T, Liller W, Marsden B G. Dynamics of the Solar System. Dordrecht: Reidel, 1979: 245
- [7] Di Sisto R P, Brunini A. Icar, 2007, 190: 224
- [8] Lykawka P S, Mukai T. Icar, 2007, 189: 213
- [9] Khain T, Becker J C, Lin H W, et al. AJ, 2020, 159: 133
- [10] Tan H J. Dissertation. Taiwan: Taiwan Central University, 2021
- [11] 郑永春, 胡国平. 深空探测学报(中英文), 2015, 2: 3
- [12] Elliot J L, Kern S D, Clancy K B, et al. AJ, 2005, 129: 1117
- [13] Boehnhardt H, Delsanti A, Barucci A, et al. A&A, 2002, 395: 297
- [14] Peixinho N, Boehnhardt H, Belskaya I, et al. Icar, 2004, 170: 153
- [15] Petit J M, Kavelaars J J, Gladman B J, et al. AJ, 2011, 142: 131
- [16] Bannister M T, Gladman B J, Kavelaars J J, et al. ApJS, 2018, 236: 18
- [17] Noll K S, Luu J, Gilmore D. AJ, 2000, 119: 970

-
- [18] Kern S D, McCarthy D W, Buie M W, et al. *ApJ*, 2000, 542: L155
- [19] Werner M, Roellig T, Low F, et al. *ApJS*, 2008, 154: 1
- [20] Braga-Ribas F, Sicardy B, Ortiz J L, et al. *Nature*, 2014, 508: 72
- [21] Bauer J M, Grav T, Blauvelt E, et al. *ApJ*, 2013, 773: 22
- [22] Stansberry J A, Grundy W, Brown M, et al. *The Solar System Beyond Neptune*. Tucson: University Arizona Press, 2008: 161
- [23] Davis D R, Farinella P. *Icar*, 1997, 125: 50
- [24] Irwin M, Tremaine S, Zytlow A N. *AJ*, 1995, 110: 3082
- [25] Petit J M, Kavelaars J J, Gladman B, et al. *The Solar System Beyond Neptune*. Tucson: University Arizona Press, 2008: 71
- [26] Irwin M, Tremaine S, Zytlow A N. *AJ*, 1995, 110: 3082
- [27] Sheppard S S, Jewitt D C, Trujillo C A, et al. *AJ*, 2000, 120: 2687
- [28] Adams E R, Gulbis A, Elliot J L, et al. *AJ*, 2014, 148: 55
- [29] Lawler S M, Kavelaars J J, Alexandersen M, et al. *FrASS*, 2018, 5: 14
- [30] Masaki Y, Kinoshita H. *Over the resonance, 35th Symposium on Celestial Mechanics*. Japan: National Astronomical Observatory, 2003: 255
- [31] de la Fuente Marcos C, de la Fuente Marcos R. *Ap&SS*, 2014, 352: 409
- [32] Kavelaars J J, Jones L, Gladman B, et al. *The Solar System Beyond Neptune*. Tucson: University Arizona Press, 2008: 59
- [33] Barucci M A, Belskaya I N, Fulchignoni M, et al. *AJ*, 2005, 130: 1291
- [34] Peixinho N, Delsanti A, Guilbert-Lepoutre A, et al. *A&A*, 2012, 546: A86
- [35] Tegler S C, Romanishin W, Consolmagno S J G J. *AJ*, 2016, 152: 210
- [36] Tegler S C, Bauer J M, Romanishin W, et al. *The Solar System Beyond Neptune*. Tucson: University Arizona Press, 2008: 105
- [37] Wong I, Brown M E. *AJ*, 2017, 153: 145
- [38] Luu J X, Jewitt D C. *AJ*, 1996, 112: 2310
- [39] Merlin F, Hromakina T, Perna D, et al. *A&A*, 2017, 604: A86
- [40] Barucci M A, Brown M E, Emery J P, et al. *The Solar System Beyond Neptune*. Tucson: University Arizona Press, 2008: 143
- [41] Vilas F, Gaffey M J. *Science*, 1989, 246: 790
- [42] Jewitt D C, Luu J X. *AJ*, 2001, 122: 2099
- [43] Luu J X, Jewitt D C. *AREPS*, 2002, 40: 63
- [44] Lazzarin M, Barucci M A, Boehnhardt H, et al. *AJ*, 2003, 125: 1554
- [45] Tobin J J, van T Hoff M L R, Leemker M, et al. *Nature*, 2023, 615: 227
- [46] Barucci M A, Peixinho N. *Asteroids, Comets, Meteors*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 171
- [47] Fornasier S, Doressoundiram A, Tozzi G P, et al. *A&A*, 2004, 421: 353
- [48] Cruikshank D P, Roush T L, Bartholomew M J, et al. *Icar*, 1998, 135: 389
- [49] De Prá M N, Hénault E, Pinilla-Alonso N, et al. *NatAs*, 2023, 9(2): 252
- [50] Licandro J, Pinilla-Alonso N, Holler B, et al. *Nature Astronomy*, 2024, 9: 245
- [51] Cooper B L, Salisbury J W, Killen R M, et al. *JGRE*, 2002, 107: 1
- [52] Dotto E, Emery J P, Barucci M A, et al. *The Solar System Beyond Neptune*. Tucson: University Arizona Press, 2008: 383
- [53] Schwamb M E, Fraser W C, Bannister M T, et al. *ApJS*, 2019, 243: 12
- [54] Zhang X, Jewitt D, Hui M. *MNRAS*, 2019, 487: 2919
- [55] Zheng L, Ming L, Dazhi Y, et al. *Proc SPIE*, 2016, 54: 101542A
- [56] Cao Y, Gong Y, Zheng Z Y, et al. *RAA*, 2022, 22: 025019

The Exploration and Research Advance of Small Bodies in the Outer Solar System

XU Xiaomeng^{1,2,3}, WU Yunzhao^{1,4}, ZHANG Xiliang³

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Science, Nanjing 210033, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China; 4. State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China)

Abstract: The small bodies in the outer solar system mainly include Centaurs and trans-Neptunian objects, which contain methane, water ice, ammonia and so on, representing the most primitive bodies of the solar system. Studying the properties of small objects can help understand the origin and evolutionary history of the solar system and reveal their relationship with water and life on Earth. Currently, deep space exploration has entered a new era of vigorous development. The New Horizons spacecraft will continue to fly to the Kuiper Belt to visit these distant objects. China is also carrying out science missions to explore the boundary of the Solar System. This paper introduces the exploration and research advance of small bodies in the outer solar system from the aspects of detection history, albedo and size distribution, orbital distribution, color index, spectral properties, etc., with a focus on their visible light, near-infrared and mid-infrared spectral properties. Future research trends will be discussed to provide support for China's missions to explore the outer solar system and icy moons.

Key words: outer solar system; Centaurs; trans-Neptunian objects; spectroscopy