文章编号：1672-8785(2026)01-0056-14

天文环境中多环芳香烃的红外辐射

张 壮 张 泳*

（中山大学物理与天文学院，广东 珠海 519082）

摘 要：自 20 世纪 70 年代起，天文学家在各类天体中普遍观测到一组特征鲜明的红外发射谱带。该谱带被广泛认为是多环芳香烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon，PAH)的标志性辐射信号。本文系统综述了此类星际 PAH 的形成与演化机制，主要涵盖氢抽取-乙炔加成机理等自下而上的分子生长路径；详细梳理了 PAH 的关键振动模式，明确 3.3 μm、6.2 μm、7.7 μm、8.6 μm、11.2 μm 以及 15～20 μm 等特征谱带的起源，重点分析了分子边缘几何结构、杂原子掺杂等因素对谱带峰位与强度的调控规律；总结了基于特征谱带比值的星际 PAH 电离度与分子尺寸诊断方法及应用现状；同时深入讨论了该红外发射谱带载体的非唯一性、远红外弱带的物理化学起源等领域内关键争议问题。最后，概述了詹姆斯•韦布空间望远镜(James Webb Space Telescope，JWST)在红外成像光谱观测方面的技术优势，及其为揭示星际 PAH 的化学本质、深化星际有机化学过程的理解所提供的全新研究视角与机遇。

关键词：天体化学；多环芳香烃；红外辐射

中图分类号：P148 **文献标志码**：A **DOI**：10.11972/j.issn.1672-8785.2026.01.005

Infrared Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Astronomical Environments

ZHANG Zhuang，ZHANG Yong*

(*School of Physics and Astronomy*，*Sun Yat-sen University*，*Zhuhai 519082*，*China*)

Abstract：Since the 1970s，astronomers have detected a set of distinct infrared emission bands across diverse astronomical environments，which are widely recognized as signature features of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH). This paper reviews the formation and evolution mechanisms of such interstellar PAHs，mainly covering bottom-up molecular growth pathways such as the hydrogen abstraction-acetylene addition mechanism. It systematically delineates the fundamental vibrational modes corresponding to the characteristic bands at 3.3 μm，6.2 μm，7.7 μm，8.6 μm，11.2 μm，and 15–20 μm，while elaborating on the effects of molecular edge geometry and heteroatom doping on the peak positions and intensities of these spectral features. Diagnostic methodologies based on band ratio analyses for inferring the ionization states and molecular sizes of PAHs are synthesized，alongside ongoing debates regarding the non-uniqueness of the spectral carriers and the physical-chemical origins of weak far-infrared bands. Finally，the unparalleled advantages of the James Webb Space Telescope (JWST) in infrared imaging spectroscopy are emphasized，providing novel perspectives for advancing

收稿日期：2026-01-13

作者简介(Biography)：张壮(1997-)，男，博士研究生，主要从事天文环境中多环芳香烃的辐射特性研究。

*__通讯作者__(Corresponding Author)：E-mail：zhangyong5@mail.sysu.edu.cn

our understanding of interstellar organic chemistry.

Key words: astrochemistry; polycyclic aromatic hydrocarbon; infrared emission

0 引言

自 20 世纪 70 年代起，天文学家在各类天体中陆续探测到一组来源不明的红外发射谱带。这类谱带被统一命名为“未辨识红外发射”(Unidentified Infrared Emission，UIE)。该系列谱带的观测研究发轫于 20 世纪 70 年代初的标志性发现：1973 年，Gillett F C 等人率先在行星状星云中捕捉到8.6 μm和 11.2 μm 的异常红外辐射信号，成为 UIE 谱带研究的开端[1]；时隔四年，Russell R W 等人于 1977 年进一步报道了 3.3 μm、6.2 μm 和 7.7 μm 等多个核心特征 UIE 谱带，初步构建起 UIE 谱带的基础观测框架[2]。随着天文观测技术的迭代升级，此类特征谱带的探测范围也实现了全域拓展，后续不仅在行星状星云，还在 H II 区、反射星云、分子云、星系中心等多种不同类型的天体环境中被广泛观测到。这一跨天体类型的普遍探测结果，直接印证 UIE 谱带载体在宇宙空间中具备极高的分布广泛性[3]。

早期关于 UIE 谱带载体的归属曾长期存在争议，学界先后提出过石墨微粒、氢化非晶碳、纳米金刚石等多种富碳物质的假说。20 世纪 70 年代末至 80 年代初，有研究首次指出这类特征谱带的辐射可能与碳质材料表面芳香族官能团的振动相关，由此该谱带也被赋予了“芳香红外带”(Aromatic Infrared Band，AIB)的别称。1984 年至 1985 年期间，Leger A、Puget J L(1984 年)与 Allamandola L J 等人(1985 年)几乎同时提出关键假说，认为 PAH 分子或为 UIE 谱带的核心载体[4-5]。在此基础上，Allamandola L J 团队通过后续系列研究开展了系统的实验验证与理论推演，证实处于高度振动激发态的 PAH 分子能够复现 3.3 μm、6.2 μm、7.7 μm、8.6 μm、11.3 μm 等 UIE 主要特征谱带，为 PAH 载体假说提供了核心支撑[5-6]。

如果 UIE 谱带的载体确实为 PAH 分子，那么据此可推断宇宙中存在相当可观比例的碳元素是以 PAH 的分子形态储存的。这一结论不仅意味着 PAH 是星际介质中至关重要的碳储库，能够调控星际碳循环的关键环节，同时独特的光学与振动性质也使其成为星际能量传递的核心中介。在吸收恒星紫外光子后，PAH 会通过振动弛豫将能量以红外辐射的形式再释放，从而实现紫外吸收与红外再辐射之间的高效能量转换，维系星际介质的能量平衡。

在过去数十年间，针对 PAH 分子红外光谱特性的研究取得了突破性进展。科研人员通过大量高精度实验室光谱测量，模拟了不同尺寸、电离态、边缘结构及杂原子掺杂的 PAH 在星际环境下的光谱响应；同时结合量子化学理论计算，系统阐释了 PAH 分子振动模式与红外谱带的对应关系。这些成果为 PAH 载体模型提供了坚实的实验与理论双重支撑。在空间观测层面，红外空间天文台(Infrared Space Observatory，ISO)与斯皮策空间望远镜(Spitzer Space Telescope，Spitzer)的升空，极大拓展了 UIE 谱带的观测维度。二者在 3～20 μm 波段的高分辨率观测，不仅验证了 3.3 μm、6.2 μm 等经典强发射带的普适性，还进一步揭示出多条此前未被发现的弱发射带，以及 6～9 μm、11～13 μm 等波段内覆盖范围较广的宽辐射平台，显著完善了 UIE 谱带的整体观测体系，为深化 PAH 模型的物理化学内涵奠定了观测基础。

然而，此类高灵敏度空间观测也同步揭示了 UIE 谱带载体的本质复杂性：不同天体环境中，UIE 谱带的轮廓形态与特征峰位会随星际辐射场强度、环境物理化学条件及天体演化阶段呈现系统性差异。这一观测现象明确暗示其载体并非单一分子物种，而更可能是由一系

列结构多样、成分复杂的碳质分子族群共同构成。自 PAH 载体假说提出以来，针对其适用性的质疑与模型的优化修正便从未间断。2011 年，Kwok S 与 Zhang Y 对传统纯 PAH 载体假说提出了重要修正。他们指出，UIE 谱带的真正载体或许并非结构单一的纯 PAH 分子，而是一类兼具芳香环与脂肪链结构的新型有机纳米固体——混合芳香-脂肪有机纳米粒子(Mixed Aromatic-Aliphatic Organic Nanoparticles，MAON)[7]，为破解 UIE 载体的本质提供了全新视角。

本文将整合近年来星际有机化学与红外天文观测领域的前沿成果，从以下五个核心维度展开系统性评述：(1)PAH 分子在星际空间中的形成路径与多阶段演化机制；(2)PAH 的分子结构多样性及其对应的典型红外光谱标志；(3)PAH 特征谱带比值的诊断意义，及其在星际介质电离度、分子尺寸和环境物理条件反演中的天文应用；(4)PAH 载体模型所面临的核心挑战与关键争议；(5)以 JWST 为代表的新一代红外观测设备，在推动 PAH 及星际有机分子研究中的技术优势与突破性成果。通过上述内容的系统梳理与深度分析，本文旨在全面呈现当前星际 PAH 研究领域的认知进展、核心分歧以及未来发展方向，为该领域的后续探索提供综合性的学术参考框架。

1 PAH 在星际空间中的形成与演化机制

星际空间中 PAH 的起源普遍认为可归为两类核心途径：一是“自下而上”(bottom-up)的分子组装路径，即由小分子碳氢化合物逐步聚合为大尺寸芳香族分子；二是“自上而下”(top-down)的碎裂路径，即由大尺度碳质固体颗粒裂解生成 PAH 类分子。部分场景下也可能存在两类途径共同作用的混合模式。PAH 的形成效率与分子结构演化高度依赖于星际环境的物理化学条件(如温度、辐射场强度、分子丰度等)。下文将聚焦“自下而上”的反应途径展开详细阐述。

作为所有 PAH 分子的核心结构单元，苯环(C_6H_6)的星际合成过程对 PAH 的起源具有奠基性意义。ISO 首次在碳星 CRL 618 的星周包层中探测到苯及相关不饱和碳氢化合物的特征信号[8]，为星际芳香环的存在提供了直接观测证据。随后 Woods P M 等人(2002 年)结合该天体源的物理参数构建了针对性化学反应网络，不仅在其红外光谱中识别出苯分子的特征吸收峰，还证实此星周环境中的强激波与高温(大于等于 1000 K)条件可驱动小分子碳氢物种通过快速自由基反应生成苯环[9]。这一发现标志着星际碳链分子向芳香族骨架的关键转化得到有力证据支持。

苯环骨架构筑之后，PAH 的后续生长过程通常可归结为多种“氢抽提-加成-环化”自由基反应的组合作用。其中最核心的反应机制为氢抽提-乙炔加成(Hydrogen-Abstraction/a-Cetylene-Addition，HACA)机制：先由氢抽提形成活性位点，随后乙炔连续加成并发生环化，实现芳香骨架的环扩张与尺寸增长[10]。除 HACA 机制外，还存在若干兼具加速与辅助作用的反应通道：例如狄尔斯-阿尔德(Diels-Alder，DA)环加成反应可在 PAH 的特征结构位点(如湾区)介导芳香环的并环过程，该反应在高温气相条件下的贡献通常被认为十分有限，而在低温体系或表面催化等特殊条件下，更可能发挥补充性作用[11]。此外，氢抽提-乙烯基乙炔加成(Hydrogen Abstraction-Vinylacetylene Addition，HAVA)[12]和甲基加成-环化(Methyl Addition-Cyclization，MAC)路径[13]通过引入更大的加成单元或烷基自由基参与的环化耦合，可能提高增长速率并影响芳香片层的有序增长。这些路径可能在不同环境中并行竞争，其相对重要性仍有待结合观测与实验进行定量约束。

上述经典形成机制大多基于高温星周环境的研究而建立，而低温星际条件下能否形成 PAH，近年来已成为该领域的新兴研究前沿。

日本“隼鸟 2 号”探测器对小行星 Ryugu 返回样品的同位素分析显示，其内部部分小分子 PAH 的碳同位素分馏特征，与小于 10 K 的冷分子云化学环境高度吻合；基于此，Zeichner S S 等人(2023 年)提出，部分 PAH 或可直接在冷星际云中通过离子-分子反应等低温化学路径生成[14]。这一成果表明，星际 PAH 的形成大概率存在“双重来源”：一方面在炽热高能环境中通过快速自由基反应形成大尺寸 PAH，另一方面在冷分子云中缓慢合成小分子 PAH；这些冷环境起源的小分子 PAH 可随星云演化进入高能区域，进而通过 HACA、HAVA 等机制进一步增长为大尺寸芳香分子。需要强调的是，低温分子云中 PAH 原位形成的效率与普遍性仍存在争议，当前认识主要建立在理论模拟和间接观测线索之上，仍需更直接的天文观测与实验约束。

2 PAH 的结构及其红外谱特征

2.1 芳香族和脂肪族结构

PAH 分子以稠合芳香环为核心骨架，其碳原子通过 sp^2 杂化键合形成离域 π 电子共轭体系。这一结构特征赋予 PAH 极高的化学稳定性与热稳定性。芳香环结构的典型红外振动模式对应一系列特征谱带。

理论计算与实验结果表明，当 PAH 分子中引入 sp^3 杂化的脂肪族碳(如甲基、亚甲基基团)时，会呈现独特的红外振动特征，常伴随更宽的红外“发射平台”(如 8 μm、12 μm、17 μm 等波长附近)的出现。观测发现，许多天体的 UIE 谱中，3.3 μm芳香特征带常与 3.4 μm脂肪族特征带共存，强 11.2 μm 芳香 C-H面外弯曲带附近亦伴随 12 μm 宽发射平台的辐射信号。这一观测现象暗示，UIE 谱的载体可能同时包含芳香环与脂肪族结构单元，而并非结构单一的纯 PAH 分子。

基于上述观测证据与结构推断，Kwok S 和 Zhang Y(2011 年)提出，UIE 谱的载体或为一类由脂肪链连接芳香环单元的混合芳香-脂肪有机纳米颗粒(MAON)[7]。此类纳米颗粒的结构中同时存在 sp^2 杂化的芳香环碳原子与 sp^3 杂化的脂肪链碳原子；与煤相似，可同时产生芳香族与脂肪族的特征红外辐射。这在一定程度上能够解释 UIE 谱中芳香带与脂肪带共存的观测现象。图 1 为 MAON 颗粒的可能结构示意图。需要指出的是，目前 MAON 虽作为 UIE 的候选载体具备生命起源相关研究的潜在价值，但其存在仍缺乏实验室与天文观测层面的直接、排他性证据，相关适用范围与贡献占比仍有待进一步验证。

2.2 PAH 红外辐射特征

PAH 分子在各类天体观测中均呈现一组高度特征化的红外发射谱带。这一谱带组合被视为辨识星际 PAH 存在的“指纹”标志。其中最具代表性的是 3.3 μm 芳香 C-H 伸缩振动带(对应 3040 cm^{-1}左右)。该谱带在 PAH 特征带中波长最短、能量最高；紧随其后的是 6.2 μm 芳香 C=C 骨架伸缩振动带，为 PAH 骨架结构的核心标识。7.7 μm“混合带”实质上由多个邻近的振动峰叠加而成，源于芳香 C=C 伸缩与 C-H 弯曲的耦合振动，其峰位受星际环境(如辐射场强度、分子电离态)影响而存在显著差异，分布于 7.6～7.8 μm 范围；8.6 μm 带对应芳香 C-H 面内弯曲振动，其强度通常略低于 7.7 μm 混合带。

11.2 μm 带是芳香 C-H 面外弯曲振动的典型代表，主要源于苯环边缘孤立 C-H 振动。此外，在 10～15 μm波段还存在多条较弱的芳香 C-H 面外弯曲带，各自对应特定的环边氢取代模式：11.0 μm带(与11.2 μm带共存，指示“单氢”取代环边结构)、12.0 μm 带(相邻两个氢原子，即“双氢”取代边)、12.7 μm带(“三氢”取代边)、13.6 μm与 14.2 μm 带(“四氢”取代边)。这些谱带的相对强度比可作为诊断 PAH 环边结构规整性的关键指标。若“双氢”/“三氢”取代边对应的谱带占优，表明环边平滑完整；若“单氢”取代边对应谱带强度较高，则表明环边存在不规则缺口或结构缺陷。

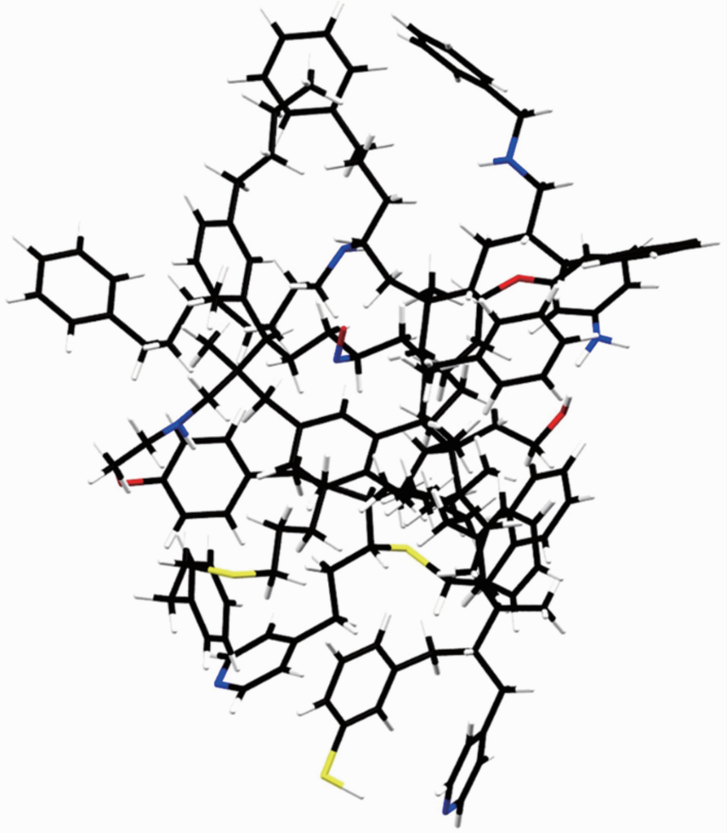

图 1 MAON 颗粒的可能结构示意图。图示 MAON 颗粒由多个芳香环单元(黑色)通过脂肪族碳链连接构成，包含氢原子(白色)，且掺杂少量氧(红色)、氮(蓝色)、硫(黄色)等杂原子。该结构兼具芳香环的平面特征与脂肪族侧链的结构，能够同时贡献 3.3 μm、6.2 μm、7.7 μm、8.6 μm、11.2 μm 等芳香族特征窄带，以及 3.4 μm、6.9 μm、7.25 μm 等脂肪族特征带与宽发射平台，从结构层面上为理解 UIE 谱带与宽发射平台辐射共存提供了一种可能解释。本图所示模型源自文献[7]及后续相关研究[15]，直观展现了 MAON 模型中芳香-脂肪混合结构的内在复杂性

与芳香族特征带相比，脂肪族 C-H 振动呈现独特的红外光谱特征：3.4 μm 波段呈现一系列精细成分峰(如 3.38 μm、3.40 μm、3.46 μm 等)，分别对应 CH_3、CH_2 等不同键合环境的 C-H 伸缩振动[16]；6.9 μm 带与 7.25 μm 带则分别归属于 CH_2 基团的剪式弯曲振动与 CH_3 基团的不对称弯曲振动。这类脂肪族谱带常作为 11～13 μm 芳香 C-H 面外弯曲带的伴生特征，在众多天体的 UIE 谱中被广泛观测到。

图 2 展示了典型星际 PAH 红外发射光谱实例及谱带分解结果。图示为行星状星云 NGC 7027 的 ISO 观测光谱，暗红色曲线代表观测光谱，谱中一系列窄特征带叠加于 6～9 μm 宽平台及平滑连续辐射之上，这种“窄带、宽平台、连续谱”辐射的总体形态为直接观测结果。彩色曲线则通过对观测谱进行参数化分解与拟合获得：黑色实线对应 3.3 μm、6.2 μm、7.7 μm、11.2 μm 等 PAH 芳香族特征窄带；蓝色曲线代表连续热尘埃辐射背景；橙色区域为 6～9 μm 与 11～13 μm 范围的宽发射平台，该区域辐射强度占红外总辐射的比例高达 36%[7]，表明即使在行星状星云这种强紫外辐射的环境下，脂肪族结构也可能大量存在。这些共存的辐射特征表明，UIE 谱的载体或具备兼具芳香性环与脂肪族支链/连接链的结构特征，其中芳香性骨架为离散窄带的成因，脂肪族支链/连接链则对应宽发射平台的形成。目前学界的主流观点认为，此类载体源于多类 PAH 族群及其

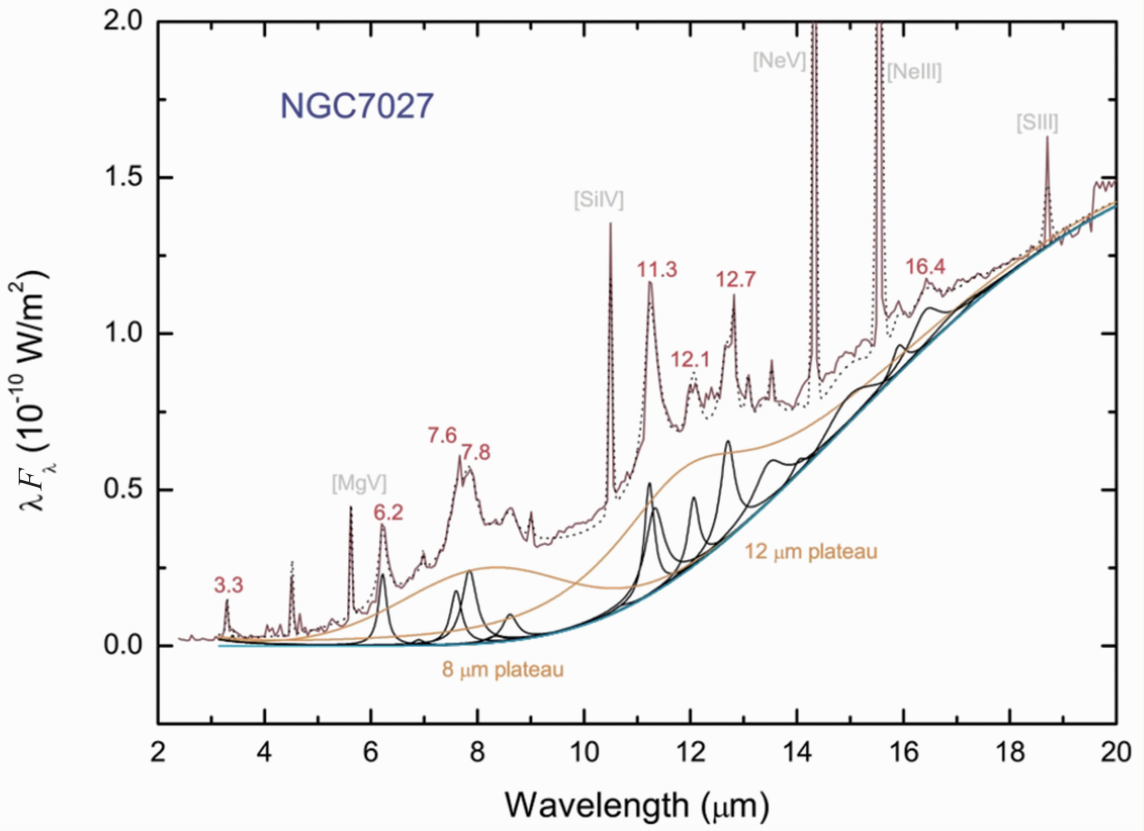

图 2 行星状星云 NGC 7027 的红外发射光谱(ISO/SWS 观测)及成分分解图。本图数据取自文献[7]：暗红色实线和黑色虚线分别为实测和拟合光谱。图中通过多色分解直观呈现光谱的组成成分：黑色实线对应 3.3 μm、6.2 μm、7.7 μm、8.6 μm、11.2 μm、12.7 μm 等一系列的芳香族 PAH 特征带，其源于芳香环 C–H 与 C=C 的特征振动；橙色曲线为宽发射“平台”或带群，主要由含少量脂肪族侧链的 PAH 分子或更复杂的有机纳米颗粒(如 MAON)的振动贡献；蓝色曲线为平滑的连续热辐射背景，来自尘埃的热辐射

结构修饰，这一结论与 MAON 相关假说存在一定共性；二者的核心差异在于，前者将 UIE 的成因归为多类分子族群的共同贡献，而后者则强调其源于结构复杂的单一分子体系。

3 PAH 光谱的诊断意义及天文应用

PAH 丰富的红外特征谱带不仅呈现出多元的天文观测现象，更构成了解码星际介质物理化学特性的“光谱指纹”。通过分析各特征谱带的相对强度、峰位偏移以及谱带比值，研究者能够推断 PAH 相关分子的关键物理化学状态，包括电离态分布、分子尺寸分布以及环边结构构型等核心参数。下文将阐述核心光谱诊断指标的物理内涵及其在星际环境特性反演中的应用价值。

3.1 电离程度诊断

PAH 的电离状态是调控其红外谱带强度分布的核心因素：PAH 阳离子(PAH^+)会显著增强芳香环 C=C 骨架振动相关谱带的相对强度，而中性 PAH 则更突出芳香 C–H 振动带的辐射贡献。具体而言，当 PAH 以电离态为主时，6.2 μm 与 7.7 μm(均对应芳香 C=C 伸缩振动)谱带的相对强度通常显著提升；而 3.3 μm芳香 C–H 伸缩带与 11.2 μm 芳香 C–H 面外弯曲带的辐射则在中性 PAH 占优的环境中更为显著。

天文观测数据为上述规律提供了直接佐证：在强电离辐射场主导的星际区域，6～8 μm波段(以 C=C 振动带为主)的相对强度通

常高于 11.2 μm 波段(C–H 振动带)，这一特征被视为 PAH 广泛电离的标志性判据；反之，在遮蔽良好、辐射场温和的中性分子云环境中，11.2 μm 与 3.3 μm 谱带占主导地位，指示 PAH 主要以中性态存在。例如，在亮星云 M17 的观测中，空间分布上呈现明显的谱带比值梯度，靠近电离前沿区域，11.2 μm/7.7 μm 比值显著偏低(反映高电离程度)；随着向分子云内部深入，该比值逐步升高，清晰刻画了 PAH 从电离态向中性态的空间演化轨迹[17]。

当前学界广泛采用的 PAH 电离态诊断指标为 11.2 μm/7.7 μm 与 11.2 μm/6.2 μm 谱带强度比：比值越高，表明中性 PAH 占比越高，系统整体电离程度越低；比值越低，则指示 PAH 阳离子占比更高，环境电离辐射场更强。这一诊断判据已通过多类观测数据得到充分验证，从 Spizter 望远镜的多源统计分析，到 JWST 对银河系核区的高空间分辨率观测结果，均表明了其可靠性。该指标也被广泛应用于恒星形成区、活动星系核等不同天体环境的辐射场强度与电离特性区分[18-19]。

3.2 分子大小诊断

PAH 红外特征谱带的相对强度分布，是揭示其分子尺寸特征的核心线索。小尺寸 PAH 在吸收同等能量后，受振动能级态密度效应影响，更易通过振动弛豫激发高能振动模式，进而在较短波长波段辐射能量；而大尺寸 PAH 则倾向于激发低能振动模式，长波长波段的辐射贡献占比更高[20]。基于这一规律，11.2 μm/3.3 μm 谱带强度比成为学界广泛采用的 PAH 平均分子尺寸诊断指标：该比值越高，表明大尺寸 PAH 占主导；比值越低，则指示小尺寸 PAH 相对富集。

反射星云 NGC 7023 的观测结果为上述诊断逻辑提供了直接佐证：在靠近紫外光源的区域，3.3 μm/11.2 μm 比值显著升高，指示小尺寸 PAH 的富集；而随距离光源渐远，该比值逐渐下降，反映大尺寸 PAH 主导红外发射[21]。这一现象与理论预期高度吻合——强紫外辐射场可引发大尺寸 PAH 的光解碎裂，生成小分子碎片。Bauschlicher Jr C W 等人(2008 年)的量子化学计算揭示，7.7 μm 复合带两个关键子峰(～7.6 μm 与～7.8 μm)的峰位差异反映了 PAH 分子的尺寸信息：含数十个碳原子的小型离子态 PAH 更倾向于在 7.6 μm 附近产生发射，而大型离子态 PAH(PAH^+)的发射则集中于 7.8 μm 附近[22]。此外，15～20 μm 远红外波段特征谱带(如 16.4 μm、17.4 μm、17.8 μm 等)的激发需依赖大尺寸 PAH 的低能振动模式，仅能在大 PAH 占优的环境中被探测到。这类谱带的成功探测，为星际大尺寸 PAH 的存在提供了直接观测证据。

观测数据表明，PAH 的平均分子尺寸与电离状态存在显著的协同关联：在强辐射场环境中，残存的小尺寸 PAH 多以中性态存在，而大尺寸 PAH 则更易被电离为阳离子。JWST 对多个星系中上千个 H II 区的统计分析显示，PAH 丰度与环境电离参数呈显著负相关：电离参数越高，PAH 的相对丰度越低[40]。

为系统表征 PAH 分子电离状态与尺寸分布的协同演化特征，研究者提出用谱带比诊断网格方法进行综合诊断(见图 3)。该方法通常选取一组对电离更敏感的谱带比(如 $I_{11.2}/I_{7.7}$)与一组对平均尺寸更敏感的谱带比(如 $I_{11.2}/I_{3.3}$)构成二维平面：在模型计算/谱库预期中，随着正电荷比例升高，7.7 μm(以 C=C 振动为主)相对增强而 11.2 μm(以中性态 C–H 面外弯曲为主)相对减弱，使 $I_{11.2}/I_{7.7}$ 整体降低；而在给定激发条件下，大尺寸 PAH 往往表现为 $I_{11.2}/I_{3.3}$ 偏高。图中的网格与轨迹主要代表在一套既定光谱模型假设下的模型预期。将观测得到的谱带比点位投影到该网格上，则可在模型框架内对 PAH 族群的电离度与平均尺寸给出半定量约束。

需要指出的是，该诊断网格的适用范围主要是以 UIE 发射为主，信噪比与光谱分辨率足以可靠分离 3.3 μm、7.7 μm 与11.2 μm 谱带的情形(例如光致离解区、反射星云以及部分

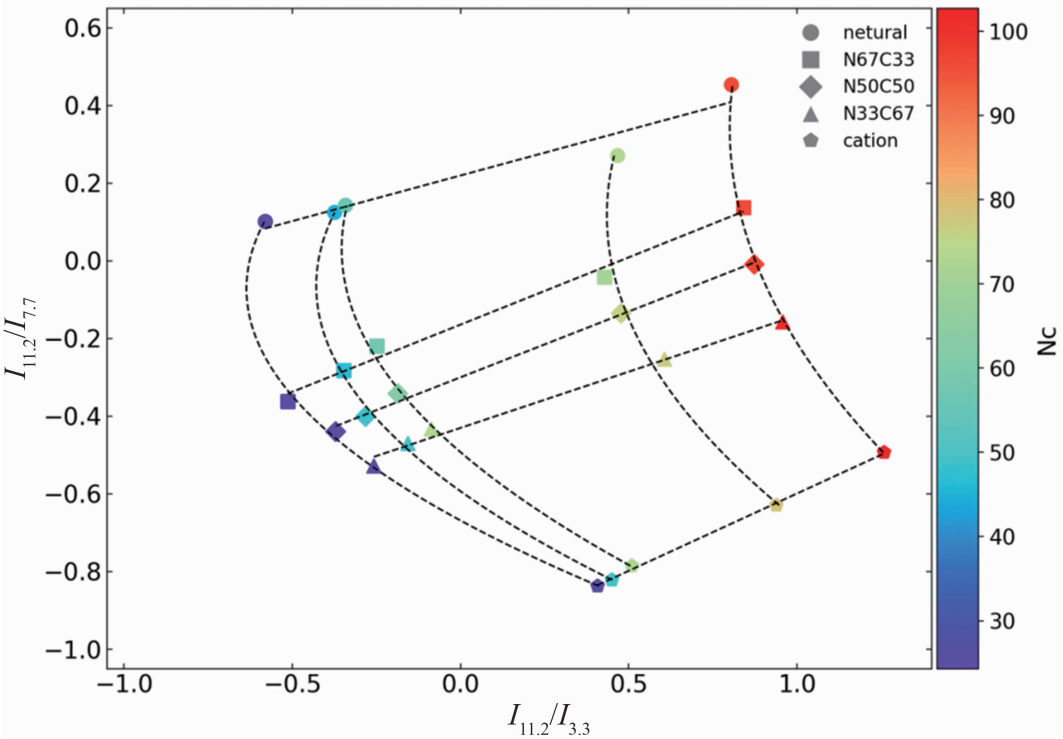

图 3 谱带比 PAH 分子大小–电离诊断网格示意图。横轴为 $I_{11.2}/I_{3.3}$（分子尺寸指标），纵轴为 $I_{11.2}/I_{7.7}$（电离度指标）。不同符号代表不同电离程度的 PAH 样本（neutral 表示 100%中性，N67C33 表示 67%中性和 33%阳离子、N50C50 表示 50%中性和 50%阳离子、N33C67 表示 33%中性和 67%阳离子，cation 表示 100%阳离子），颜色刻度表示碳原子数的变化。曲线网格连接碳原子数相近的点，曲线连接相同电离状态的点，展示了分子尺寸与电离程度的协同变化规律。整体趋势表明：沿水平方向（$I_{11.2}/I_{3.3}$增加）PAH 分子尺寸逐渐增大；沿竖直方向（$I_{11.2}/I_{7.7}$降低）PAH 电离程度增强。中性 PAH（圆点）集中在比值较高区域，而阳离子 PAH（五边形）主要分布于低比值区域，显示出谱带比对分子电离度和尺寸的敏感响应

星系盘区域）。其潜在局限在于：除受电离与尺寸影响外，谱带比还会受到激发能量分布、氢化程度与边缘结构、杂原子掺杂、连续谱扣除与消光校正、以及视线积分导致的多相混合等因素的共同调制，因此该方法更适用于比较不同区域/不同源的相对趋势与演化轨迹，而不宜据此给出过于精确且唯一的物理参数判定。

与传统基于少数诊断比值的二维网格方法相比，近年来机器学习开始被用于处理更高维的 PAH 光谱信息，以缓解“结构–谱带”映射的多解性问题。王昭团队基于 PAH 理论光谱库与分子描述符建立模型，实现了 PAH 红外谱的快速预测，并通过可解释的相关性分析定量识别影响谱带关联的关键因素（如分子尺寸、荷电状态与边缘氢构型等），从而为由观测多谱带信息反推 PAH 族群结构提供了新的定量框架[23-24]。

3.3　结构形态诊断

PAH 分子的环边几何构型会在红外光谱中留下特征性的光谱印记，其中最具诊断价值的是芳香环 C–H 键的面外弯曲振动带，其谱带的相对强度与峰位可用于在一定程度上揭示环边氢原子的空间排布模式。已有研究证实，环边氢的邻接状态与特征谱带存在较为稳定的经验对应关系，但二者并非严格的一一对应关系：(1)当 PAH 边缘存在孤立单氢（“solo-H”）时，会激发 11.0～11.3 μm区间的特征谱带组；(2)若为相邻双氢（“duo-H”），常在～12.0 μm 附近形成特征发射带；(3)连续三氢（“trio-H”）常

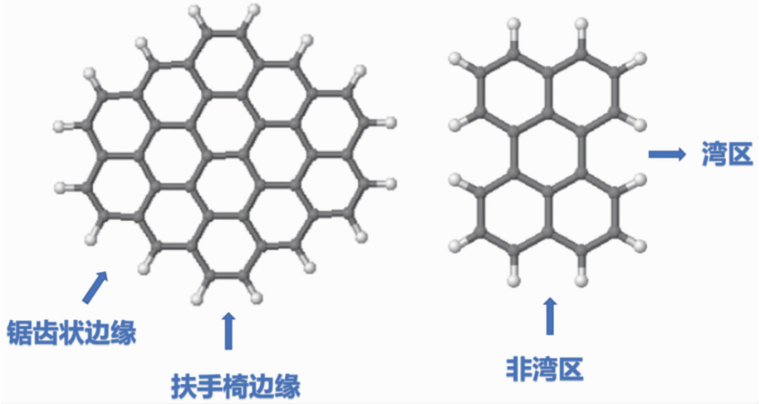

图 4 PAH 分子的结构示意图。左边为 $C_{42}H_{16}$，外缘同时包含锯齿(“zigzag”)与扶手椅(“armchair”)段；右边为 $C_{20}H_{12}$，示意带有典型湾区(“bay”)与非湾区(“non-bay”)的边界。蓝色箭头标注对应的边缘结构。不同边缘结构及湾区的存在会改变外围 C-H 的邻接类型(solo/duo/trio)，从而影响 10～15 μm 区 CH 面外弯曲带的峰位与强度

与～12.7 μm附近的谱带相关；(4)连续四氢(“quartet-H”)的振动则在～13.5 μm处产生发射，且其谱带可延伸至～14.2 μm的长波区域[25]。因此，不同 PAH 分子会因环边氢的邻接组态差异，呈现出上述 C-H 面外弯曲振动带的差异化强度配比。

如图 4 所示，PAH 分子的外缘几何构型在很大程度上影响了其外围 C-H 基团的邻接类型，进而主导 10～15 μm 波段 C-H 面外弯曲振动的发射特征。具体而言，具有长程平直锯齿型(“zigzag”)边缘的 PAH，其环边易形成 solo-H 位点，因而 11.2 μm 谱带的辐射强度占优；与之相对，带有扶手椅型(“armchair”)边缘或“湾区”(“bay region”)等不规则边角的 PAH，更易产生 duo-H 与 trio-H 位点，从而显著增强 12.0～12.7 μm 复合谱带的辐射贡献[3]。

观测层面的证据进一步验证了上述结构-光谱的对应关系：在反射星云 NGC 7023 的近恒星区域，PAH 红外谱的12.7 μm/11.2 μm特征强度比显著降低，这一现象可能表明环边 solo-H 的占比显著上升[26]。其物理本质为强紫外辐射对 PAH 分子的光化学侵蚀作用，高能光子会削蚀 PAH 的规整边角，使其边缘结构趋于碎片化、不完整；而在远离恒星、辐射场较弱的区域，该比值明显升高，说明 PAH 环边保留了更高的结构规整度，duo-H 与 trio-H 位点占比更高。由此可见，通过解析 C-H 面外弯曲振动谱带强度比的空间分布差异，可实现对 PAH 分子在不同辐射环境下结构演化过程的追踪：强辐射场驱动分子边角剥离、孤立 C-H (solo-H)占比提升；而在低温、高密度且辐射遮蔽良好的星际环境中，PAH 则可维系更多多氢邻接的规整边缘(duo-H/trio-H 谱带占优)。

除环边氢组态与分子尺寸、电离态的调控作用外，PAH 分子骨架中杂原子的掺入也会引发红外特征谱带的细微峰位偏移，其中以氮原子掺杂形成的氮杂多环芳香烃(Polycyclic Aromatic Nitrogen Hydrocarbons，PANHs)的光谱响应最为典型。已有理论与实验研究证实，氮杂环的引入会改变芳香环 C=C 键的电子云分布，进而导致 6.2 μm 芳香 C=C 伸缩振动特征峰发生可识别的位移：依据氮原子在芳香环中的取代位点与掺杂比例，该谱带既可能向短波方向蓝移至～6.0 μm，也可能向长波方向红移至 6.3～6.4 μm 区间。在天文观测中，部分行星状星云的 6.2 μm 谱带呈现出异常宽化的轮廓。这一现象被认为可能与 PAH 分子中 PANHs 成分的混合贡献相关，为星际氮杂芳香烃的存在提供了间接观测线索[27]。除 PANHs 外，含硫的杂芳香烃(Polycyclic Aro-

matic Sulfur Hydrocarbons，PASHs）近年也被提出或为星际介质“缺失硫”问题的物质归宿之一。相关理论研究已定量评估典型含硫 PAH 的 C-S 振动带强度及关键波段特征，为利用 JWST/MIRI 等高灵敏度中红外光谱检验 PASHs 的存在与贡献，提供了可进一步验证的观测判据[28]。需要说明的是，杂原子掺杂导致的峰位偏移与谱带宽化通常并非排他性谱学指纹，仍需结合其他谱带特征、丰度约束与天体环境信息进行综合判别。

此外，当 PAH 分子骨架中嵌入五元环单元（包括纯碳五元环或含杂原子的五元杂环）时，其红外光谱还可能激发出6.0 μm或6.6 μm等非典型弱发射带。此类谱带的产生与五元环独特的环张力及振动模式可能相关[29-30]。不过需要指出的是，杂原子掺杂与五元环嵌入引发的光谱偏移及弱带发射效应通常幅度微弱，且易被强芳香特征带的辐射所掩盖；目前相关结论主要依托量子化学计算与实验室模拟光谱的理论推演，尚未获得直接且具有排他性的天文观测证据，其在星际 PAH 族群中的实际占比与光谱贡献仍有待更高分辨率红外观测的验证。五元环的形成可能与富勒烯的起源相关，这一关联近年来备受学界关注。

4 PAH 模型面临的挑战与争议

尽管 PAH 模型在阐释星际红外发射现象上取得了显著成效，但其理论框架仍存在若干悬而未决的核心问题，长期引发学界的持续争议与深入探讨。

PAH 并非 UIE 谱带的唯一合理解释，MAON 兼具芳香环骨架与脂肪族侧链，典型尺寸为数十个原子量级，可同时复现 3.3 μm 的芳香族窄发射带与 12 μm 附近的脂肪族宽发射平台[31]。这表明，过去通过上百种 PAH 混合物拟合 UIE 谱带的成功案例，无法直接佐证载体必然为游离 PAH 分子。UIE 的载体很可能是一类结构多样的碳质分子族群，PAH 是其中的核心组分，但同时可能伴随脂肪链、杂环等附加结构。由于仅依靠红外谱形无法有效区分纯 PAH 与其他芳香族碳质材料，PAH 假说至今仍缺乏独特且排他性的光谱验证证据。同样需要指出的是，对于 MAON 等替代性模型，目前尚未在天文观测中发现可对其形成排他性验证的特征谱学指纹。从游离 PAH，到带有脂肪族侧链、经超氢化或取代修饰的 PAH，再到结构更为复杂的固态有机分子（如 HAC/MAON），此类星际有机分子或构成连续的演化谱系，或在天文环境中普遍存在且存在演化关联。

截至目前，学界尚未在星际空间中确证任何一种能够还原 UIE 谱的特定 PAH 分子的存在。与之形成对比的是，部分小分子芳香族衍生物（如含氰基的多环芳烃）已通过射电旋转谱在冷分子云中实现探测；而大尺寸 PAH 因分子对称性高、偶极矩近乎为零，其旋转跃迁信号强度极弱，导致直接观测难度极大。此前针对碗状 PAH（如 $C_{20}H_{10}$）的多次深度射电谱搜寻均无实质性成果，仅能给出这类 PAH 星际丰度的严格上限[32-33]。近期利用中国 FAST 望远镜对碳原子数超过 130 的大尺寸 PAH 开展的搜索，也未观测到预期的大 PAH “梳状”特征谱线，其推导的丰度上限甚至低于理论模型预测值[34]。这一结果或暗示大型 PAH 在星际介质中的实际丰度不及模型预期，但由于观测分析仍依赖系列简化假设，该结论的普适性尚需审慎评估。

PAH 模型的这些挑战成为推动领域发展的核心动力：当前研究应当积极探索 PAH 的专属观测判据，例如红外偏振信号、远红外或射电波段的特征跃迁谱线等。一旦在天体中捕获到 PAH 分子独有的谱学指纹，将为 PAH 模型提供决定性支撑；在此之前，学界仍需秉持开放研究态度，依托更高灵敏度的观测设备与实验室模拟，持续检验并完善这一经典理论框架。

5 新一代观测设备对 PAH 研究的推动

随着新一代红外观测设备投入运行，尤其是 JWST 的升空，星际 PAH 研究在谱学

分辨率与探测灵敏度上获得关键提升。JWST/MIRI 的高光谱分辨率使此前相互混杂的特征带得以进一步分解：3.3 μm芳香 C-H 伸缩振动带呈现更复杂的精细结构；3.4 μm 脂肪族侧链相关发射也显示为叠加在宽平台上的多条窄峰，指向 CH_3、CH_2 等不同键合环境的贡献[35]。同时，JWST 的高灵敏度扩展了弱谱带的可检出性(如 5.25 μm与 5.70 μm 微弱发射)，并在 4.4 μm附近探测到疑似与 PAH 官能团相关的特征信号。尽管芳香 C-D 伸缩振动所对应的 4.36～4.43 μm 信号仍未确证，但 JWST 已显著丰富了可用于载体约束的谱线信息[36]。杨雪娟等人通过计算指出，芳香 C-D(约 4.4 μm)与脂肪族 C-D(约 4.6～4.7 μm)在适宜的激发与丰度条件下具有潜在可探测性。这为约束星际“氘缺失”的物质去向、研究 PAH 同位素化学提供了重要观测途径[37-38]。在 1～5 μm近红外波段，JWST/NIRSpec 开始触及 PAH 泛频与组合频率振动的可能迹象(如 3.29 μm 主峰对应的～1.68 μm 倍频信号)，但其仍需进一步验证[36]；在 15～20 μm区间，MIRI 对弱谱带的探测能力明显增强，在 Orion Bar 中检测到极弱的16.4 μm发射峰，并在17.4 μm附近报告疑似 C_{60} 富勒烯信号[35]。高灵敏度中远红外观测将为探索 PAH 骨架振动(如鼓面振动)提供更直接的窗口。

在空间分布与演化特征研究方面，JWST 的高空间分辨率成像能力实现了对 PAH 发射精细结构的直接解析与刻画。依托 NIRCam 和 MIRI 的窄带观测手段，研究者可获取 3.3 μm、11.3 μm 等特征谱带的二维空间分布图(分辨率约为 0.1″～0.3″)，进而在星系及星际介质尺度上精准追踪 PAH 的空间分布演化规律。PHANGS-JWST 巡天项目对近邻星系的观测结果表明，3.3 μm PAH 发射辐射更集中于星暴环及分子云边缘区域，而在 H II 区内部则显著减弱甚至近乎消失。这一观测特征印证了强紫外辐射对 PAH 的解离破坏效应[39]。在银河系典型光致离解区(如 Orion Bar)，JWST 还清晰分辨出 PAH 特征谱线轮廓随电离前沿距离的系统性演化规律：靠近电离源的一侧，谱线呈现受强辐射作用的特征形态，而向分子区延伸的过程中，谱线形态逐步向弱辐射环境下的稳定特征过渡，典型表现为 3.3 μm主发射带展宽并红移、11.2 μm 谱带的轮廓与峰位发生显著偏移；同时 3.4 μm/3.3 μm 的强度比在辐射层内呈现明显梯度分布。这一特征表明，随着电离辐射强度由强至弱变化，PAH 分子族群可能经历了光化学演化过程，从含脂肪族侧链(或富氢取代基)的组分，逐步向芳香骨架更稳定的纯芳香族组分主导的状态转变[35]。总体而言，JWST 在谱学去混叠、弱发射带探测以及空间分辨追踪方面，为相关研究提供了更为严格的观测约束，也让 UIE 载体的识别与演化机制的探讨，推进至可检验的精细化研究阶段。

我国也在积极推进新一代空间天文观测平台的研发与建设。例如，中国空间站工程巡天望远镜(China Space Station Telescope，CSST)的任务书[40]明确指出，该设备搭载高性能太赫兹光谱仪，观测波段覆盖近红外至太赫兹波段(含远红外、亚毫米波延伸段)，能够为目标天区提供大视场、大面积的光谱观测与物理约束。其大视场巡天的观测能力与 JWST 的中红外高分辨谱学观测形成了良好的波段与观测尺度互补，二者的协同观测将为星际 PAH 化学演化、星际同位素分布、太赫兹波段星际分子谱线探测等天体化学前沿研究方向，提供更全面的观测数据与科学研究支撑。

6 结束语

作为 UIE 的主要候选载体，PAH 的系统性研究为解析星际有机化学的复杂图景提供了关键支撑：在形成机制方面，“自下而上”的 HACA 机制可能主导高温星周环境的 PAH 合成，而“自上而下”的碳质颗粒碎裂途径与低

温分子云的离子-分子反应拓展了其起源的环境多样性；在光谱特征层面，PAH 红外辐射呈现显著的“结构-光谱”关联性，基于特征谱带比值的诊断体系在反演 PAH 电离态分布、分子尺寸梯度以及环边结构形态等关键属性方面展现出强大的天文应用价值。PAH 作为 UIE 载体的争议以及大尺寸 PAH 直接观测证据的缺失，仍是制约该领域理论完善的主要瓶颈。

JWST 的升空为该领域注入了突破性动力，其高分辨率光谱成功解析了 3.3 μm 芳香 C-H 伸缩带的多组分精细结构，实现了 16.4 μm等远红外弱发射带的有效探测；高空间分辨率成像还清晰揭示了 PAH 在星系尺度下的空间分布与演化规律，为 PAH 辐射场响应机制提供了直接观测佐证。展望未来，研究应聚焦 UIE 载体身份的排他性光谱证据这一核心难题，通过更高灵敏度的远红外或射电观测明确 PAH 是否为其主导载体；同时需厘清 PAH 与恒星形成、星系演化的多尺度耦合机制，并推动理论模型与机器学习驱动的光谱解析深度融合，进而深化人类对宇宙碳循环演化及生命前驱物星际起源的认知。

参考文献

[1] Gillett F C, Forrest W J, Merrill K M. 8-13 μm spectra of NGC 7027, BD+30°3639, and NGC 6572 [J]. *Astrophysical Journal*, 1973, **183**: 87-93.

[2] Russell R W, Soifer B T, Willner S P. The 4-8 μm spectrum of NGC 7027 [J]. *Astrophysical Journal*, 1977, **217**(2): L149-L153.

[3] Tielens A G G M. Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbon molecules [J]. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2008, **46**(1): 289-337.

[4] Leger A, Puget J L. Identification of the Unidentified Infrared Emission Features of Interstellar Dust [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1984, **137**(1): L5-L8.

[5] Allamandola L J, Tielens A G G M, Barker J R. Polycyclic aromatic hydrocarbons and the unidentified infrared emission bands: Auto exhaust along the Milky Way [J]. *Astrophysical Journal*, 1985, **290**(2): L25-L28.

[6] Allamandola L J, Tielens A G G M, Barker J R. Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons: The infrared emission bands, the excitation/emission mechanism, and the astrophysical implications [J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 1989, **71**(4): 733-775.

[7] Kwok S, Zhang Y. Mixed aromatic-aliphatic organic nanoparticles as carriers of unidentified infrared emission features [J]. *Nature*, 2011, **479**(7371): 80-83.

[8] Cernicharo J, Heras A M, Tielens A, et al. Infrared space observatory's discovery of C_4H_2, C_6H_2, and benzene in CRL 618 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2001, **546**(2): L123.

[9] Woods P M, Millar T J, Zijlstra A A, et al. The synthesis of benzene in the proto-planetary nebula CRL 618 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2002, **574**(2): L167.

[10] Parker D S N, Kaiser R I, Troy T P, et al. Hydrogen abstraction/acetylene addition revealed [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, **53**(30): 7740-7744.

[11] Kurpanik A, Matussek M, Lodowski P, et al. Diels-Alder cycloaddition to the bay region of perylene and its derivatives as an attractive strategy for PAH core expansion: theoretical and practical aspects [J]. *Molecules*, 2020, **25**(22): 5373.

[12] Shukla B, Koshi M. A novel route for PAH growth in HACA based mechanisms [J]. *Combustion and Flame*, 2012, **159**(12): 3589-3596.

[13] Shukla B, Miyoshi A, Koshi M. Role of methyl radicals in the growth of PAHs [J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2010, **21**(4): 534-544.

[14] Zeichner S S, Aponte J C, Bhattacharjee S, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in samples of Ryugu formed in the interstellar medium [J]. *Science*, 2023, **382**(6677): 1411-1416.

[15] Kwok S, Sadjadi S A, Zhang Y. Mixed Aromatic

Aliphatic Organic Nanoparticles (MAON) as Carriers of Unidentified Infrared Emission Bands [J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2018, **14**(A30): 401–402.

[16] Pasquini S, Peeters E, Schefter B, et al. PDRs4All. VI. Probing the photochemical evolution of PAHs in the Orion Bar using machine learning techniques [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2024, **685**: A77.

[17] Yamagishi M, Kaneda H, Ishihara D, et al. Spatial variations of PAH properties in M17SW revealed by Spitzer/IRS spectral mapping [J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **833**(2): 163.

[18] García-Bernete I, Rigopoulou D, Alonso-Herrero A, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Seyfert and star-forming galaxies [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, **509**(3): 4256–4275.

[19] Almeida C R, García-Bernete I, Pereira-Santaella M, et al. JWST MIRI reveals the diversity of nuclear mid-infrared spectra of nearby type 2 quasars [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, **698**: A194.

[20] Mackie C J, Candian A, Lee T J, et al. Modeling the infrared cascade spectra of small PAHs: the 11.2 μm band [J]. *Theoretical Chemistry Accounts*, 2021, **140**(9): 124.

[21] Croiset B A, Candian A, Berné O, et al. Mapping PAH sizes in NGC 7023 with SOFIA [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, **590**: A26.

[22] Bauschlicher Jr C W, Peeters E, Allamandola L J. The infrared spectra of very large, compact, highly symmetric, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **678**(1): 316.

[23] Kovács P, Zhu X, Carrete J, et al. Machine-learning prediction of infrared spectra of interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **902**(2): 100.

[24] Meng Z, Zhu X, Kovács P, et al. Machine-learning interpretation of the correlation between infrared emission features of interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **922**(2): 101.

[25] Hony S, Van Kerckhoven C, Peeters E, et al. The CH out-of-plane bending modes of PAH molecules in astrophysical environments [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2001, **370**(3): 1030–1043.

[26] Boersma C, Bregman J D, Allamandola L J. Properties of polycyclic aromatic hydrocarbons in the northwest photon dominated region of NGC 7023. I. PAH size, charge, composition, and structure distribution [J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **769**(2): 117.

[27] Hudgins D M, Bauschlicher Jr C W, Allamandola L J. Variations in the peak position of the 6.2 μm interstellar emission feature: A tracer of N in the interstellar polycyclic aromatic hydrocarbon population [J]. *The Astrophysical Journal*, 2005, **632**(1): 316.

[28] Yang X J, Hua L, Li A. Where Have All the Sulfur Atoms Gone? Polycyclic Aromatic Hydrocarbon as a Possible Sink for the Missing Sulfur in the Interstellar Medium. I. The C–S Band Strengths [J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **974**(1): 30.

[29] Bouwman J, Boersma C, Bulak M, et al. Gas-phase infrared spectroscopy of the rubicene cation ($C_{26}H_{14}^{+}$): A case study for interstellar pentagons [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **636**: A57.

[30] Li K, Li A, Yang X J, et al. Infrared emission of specific polycyclic aromatic hydrocarbon molecules: Indene [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, **529**(4): 4425–4432.

[31] Zhang Y, Kwok S. On the viability of the PAH model as an explanation of the unidentified infrared emission features [J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **798**(1): 37.

[32] Pilleri P, Herberth D, Giesen T F, et al. Search for corannulene ($C_{20}H_{10}$) in the Red Rectangle [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, **397**(2): 1053–1060.

[33] Koo E, Candian A, Hogerheijde M, et al. Searching for corannulene with ALMA: observations of

the Red Rectangle Nebula [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2025, **544**(4): 4234–4245.

[34] Shao Y, Zhang Y, Ouyang X J, et al. The missing giant: do FAST spectroscopic observations reveal a scarcity of large polycyclic aromatic hydrocarbons in astronomical environments [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2025, **542**(3): 2639–2645.

[35] Chown R, Sidhu A, Peeters E, et al. PDRs4All-IV. An embarrassment of riches: Aromatic infrared bands in the Orion Bar [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2024, **685**: A75.

[36] Boersma C, Allamandola L J, Esposito V J, et al. JWST: Deuterated PAHs, PAH nitriles, and PAH overtone and combination bands. I. Program description and first look [J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **959**(2): 74.

[37] Yang X J, Li A, Glaser R. Deuterated polycyclic aromatic hydrocarbons in the interstellar medium: the C–D band strengths of monodeuterated species [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2020, **251**(1): 12.

[38] Yang X J, Li A. Deuterated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Interstellar Medium: The Aliphatic C–D Band Strengths [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2023, **268**(1): 12.

[39] Egorov O V, Kreckel K, Sandstrom K M, et al. PHANGS-JWST First Results: Destruction of the PAH Molecules in H II Regions Probed by JWST and MUSE [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, **944**(2): L16.

[40] Gong Y, Miao H, Zhan H, et al. Introduction to the Chinese Space Station Survey Telescope (CSST) [J]. *arXiv*: 2507.04618, 2025.