

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.01.01

H₂ 的中红外波段研究进展

周叶艳^{1,2}, 郝 蕾^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 近年来红外望远镜的发展使得研究人员可以利用红外光谱数据探测到 H₂ 的旋转谱线。这些谱线来源于“温”的分子气体。首先介绍关于 H₂ 辐射的研究现状以及目前的研究热点, 然后着重讨论在中红外波段观测到的 H₂ 辐射与恒星形成以及与总分子气体质量之间的关系。对使用不同方法和不同数据的工作进行数据和方法的交叉检验后发现: 在恒星形成星系中, H₂ 在中红外波段的辐射与恒星形成相关, 而在活动星系核中是由激波激发, 与恒星形成无关; 另外, 星系中的总分子气体质量可由 H₂ 在中红外波段的辐射通过建模推出。从不同类型的星系推出的总分子气体质量与 H₂ 辐射的相关性不明显, 但总分子气体表面密度与 H₂ 辐射有一定的相关性。从几个方面对这一结果进行解释。最后, 对全文进行了总结并对未来的研究做出展望。

关键词: H₂; 恒星形成; 分子气体质量; 活动星系核; 星系演化

中图分类号: P155.0 **文献标识码:** A

1 引 言

星际介质是星系中重要的组成成分, 它在恒星形成过程中起着至关重要的作用, 恒星形成成就发生在星际介质中^[1]。一个星系通常由恒星、星际气体和尘埃组成。气体和尘埃组成了弥散的星际介质 (其中气体约占 99%)。星际介质中的元素, 70% 由 H 组成, 剩余的大多为 He。在星际介质中, 致密的物质形成气体云^[2], 在这些致密的气体云中, H 大多以分子的形态存在, 所以这些形成恒星的气体云又称为分子云^[3]。这些分子云就是恒星诞生的摇篮^[3]。根据位力定理^[4], 当气体分子云的引力势能等于内部热能的两倍时, 气体压力产生的热能与引力势能达到平衡, 此时, 该气体分子云可以保持流体静力学平衡。反之, 当气体分子云质量足够大, 乃至气体压强无法抵抗引力势能, 这时, 分子云开始坍缩, 最终经过一系列复杂的过程, 形成恒星。而恒星又生存于星际介质中, 一些物质可能以星风的形式被喷射出去, 而当恒星消亡之后, 部分元素和能量又回到星际介质中。因此, 星际介质为恒星形成、演化

收稿日期: 2017-12-19; 修回日期: 2018-03-12

资助项目: 国家自然科学基金 (NSFC11473055, NSFCU1831205, NSFC11603058)

通讯作者: 周叶艳, 362535743@qq.com

和结束提供场所。对星际介质的研究对于我们研究星系演化具有重要意义。

星际介质包含从离子到分子等各种状态的粒子和尘埃, H_2 是宇宙中含量最丰富的分子。从地球大气到类星体的宿主星系, H_2 存在于不同种类的环境之中。同时, 它也是星系中分子云的最主要成分^[5]。一方面, 恒星形成于冷的分子云的收缩, H_2 可以被视作恒星形成主要的原初燃料。Kennicutt^[6] 和 Schmidt^[7] 发现恒星形成率与中性气体(包括原子 H 气体和 H_2 气体的总和)之间存在紧密的关系(简称 KS 关系), 但后续人们逐渐认识到恒星形成与分子气体更直接相关。在 KS 关系中, 如果使用分子气体表面密度, 则可得斜率为 1, 即分子云在不同星系中的恒星形成率基本相同。另一方面, 在恒星形成过程中, H_2 作为冷却剂也推动了恒星的形成^[5]。有研究表明, 在宇宙早期, H_2 在原初气体冷却的过程中起主导作用, 加快了气体的冷却^[8]。为了研究恒星形成过程以及 H_2 在整个宇宙恒星形成历史中如何变化和参与, 准确测定 H_2 的质量和分布是非常必要的。

虽然 H_2 的质量在富气体星系中能达到 $10^{10} M_{\odot}$ ^[9], 但是在冷星际介质中, H_2 不能有效地进行辐射, 因此难以被直接观测。主要原因有: (1) H_2 是同核双原子分子, 不具有永久性的电偶极矩和磁偶极矩, 因此电子基态的电、磁偶极矩的振动-旋转跃迁是禁戒的, 只发生极微弱的电四级矩跃迁; (2) H_2 的振动转动跃迁激发温度较高, 振动基态的最低能级转动跃迁的等效温度为 $510 K$ ^[8, 10], 冷气体分子云 ($T < 100 K$) 很难将分子激发到 H_2 的转动激发态^[11]。基于以上原因, 人们通过观测 CO 分子的旋转发射线等间接的方式来研究分子气体的质量^[12-15]。由于 CO 分子是星际气体分子中除了 H_2 以外含量最丰富的分子, 并且 CO 分子谱线较容易被观测到 (CO 分子具有永久性的偶极矩), CO 分子的丰度会随着金属丰度的降低而极速下降^[16, 17], 所以在低金属丰度的环境下, 利用 CO 分子间接获得 H_2 质量的方法将失去可靠性; 另外, 这种间接的追踪行为都依赖于一定的物理环境, 也就是说, 这些间接得到 H_2 质量的方法并不适用于所有环境。在一些特定的星际环境中测得的结果会存在较大偏差。因此, 找到不受环境因素影响并直接测量 H_2 质量的方法极为必要。

近年来的研究表明, 在温度较高的介质中, 人们可观测到 H_2 辐射。这些辐射主要集中在红外波段(这些辐射都来自于电四级矩跃迁)。Gautier 等人在 1976 年首次在猎户星云中观测到 H_2 的振动-旋转谱线^[18], 这一谱线 ($2.12 \mu m$) 被证明是在温度范围为 $2\ 000 \sim 3\ 000 K$ 的条件下产生的。随着大型红外望远镜的投入使用, 人们能够在中红外波段探测到越来越多 H_2 振动-旋转谱线。 H_2 在中红外波段的旋转谱线波长分布在 $5 \sim 30 \mu m$ 范围内, 温度范围在 $100 \sim 1\ 000 K$ 之间(如表 1 所示)。表 1 列出常见的中红外波段 H_2 旋转谱线的波长, 对应的转换跃迁在单位温度下的能级上限, 以及它们的辐射率系数, 对应的 H_2 谱线的名称缩写为 S(0)—S(7)。现在我们常把温度范围在 $20 \sim 50 K$ 内, 很难直接探测而只能通过 CO 分子来间接研究的 H_2 称为“冷”的 H_2 , 而对于温度在 $50 \sim 100 K$ 以上, 到几百开尔文温度的, 能在红外波段探测到的 H_2 称为“温”的 H_2 。这些“温”的 H_2 辐射能否跟踪总分子气体, 以及与恒星形成是否相关, 已逐渐成为目前 H_2 研究领域的热点。

已有学者针对这些 H_2 辐射是否直接与恒星形成区的冷分子气体相关这一问题给出不同的结果。例如, Roussel 等人^[22] 于 2007 年证实 H_2 辐射与已被公认能够表征恒星形成的多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) 辐射相关; Zakamska 等人^[23] 则于 2010 年发

表 1 观测得到的 H₂ 谱线^[19]

转换能级 $\nu = 0$	H ₂ 谱线名称	静止波长 $\lambda/\mu\text{m}$	T/K	$A/10^{-11}\text{s}^{-1}$
$J = 2 \rightarrow 0$	S(0)	28.219	510	2.95
$J = 3 \rightarrow 1$	S(1)	17.035	1 015	47.6
$J = 4 \rightarrow 2$	S(2)	12.279	1 681	275.0
$J = 5 \rightarrow 3$	S(3)	9.665	2 503	980.0
$J = 6 \rightarrow 4$	S(4)	8.025	3 473	2 640.0
$J = 7 \rightarrow 5$	S(5)	6.910	4 585	5 880.0
$J = 8 \rightarrow 6$	S(6)	6.109	5 828	11 400.0
$J = 9 \rightarrow 7$	S(7)	5.511	7 196	20 000.0

注: 旋转转换的上限能级是由分子常数计算得来, 分子常数由 Huber(1979)^[20] 提供; 转换概率由 Black 和 Dalgarno (1976)^[21] 得出。

现, 中红外波段探测的 H₂ 辐射很可能来自于尘埃区之外, 因此与恒星形成活动不直接相关, 而更可能由激波引起; 2016 年, Togi 和 Smith^[19] 又发现, 通过对 H₂ 辐射反映出来的 H₂ 温度建立模型, 可以外推整体的 H₂ 质量。本文通过比较这些工作, 讨论其中是否存在矛盾之处。在第 2 章, 我们利用低光度星系样本和极亮红外星系样本, 着重讨论中红外 H₂ 发射强度与恒星形成的关系; 第 3 章介绍 H₂ 辐射与总分子气体质量之间的关系, 还根据 H₂ 在中红外波段的谱线强度推算 H₂ 总质量的方法, 并进行讨论。

2 中红外波段 H₂ 发射强度与恒星形成的关系

星系中的恒星形成与星系气体含量, 特别是与致密分子气体含量之间存在紧密的关系^[6, 7](如 KS 关系)。那么, 中红外波段探测到的“温”或“热”H₂ 谱线与星系的恒星形成有相关性吗?

最初人们认为, 观测到的 H₂ 振动-旋转辐射可能来源于年轻恒星周围的光致电离区域^[24, 25]。在这种情况下, 主要由于新形成的大质量恒星中的紫外光子激发 H₂, 促使 H₂ 直接转换到激发电离态, 或是紫外光子先加热尘埃, 而后尘埃加热气体。Roussel 等人^[22] 在 2007 年研究低光度恒星形成星系时也证实了这一观点。然而, Appleton 等人^[26] 用多波段 SPITZER IRS 光谱发现, 在无尘埃的河外天体史蒂芬五重星系 (Stephan's Quintet, SQ) 中存在罕见的高光度旋转 H₂ 辐射, 而在该天体中并未发现有很强的恒星活动。尔后, 相似的观测结果被多人证实^[27-29], 在这些天体中, 少数甚至根本没有恒星形成区域。这一实验事实说明 H₂ 谱线的激发可能存在很多种不同的物理机制。事实上, H₂ 的发射线在各种不同的环境中都可探测到, 如年轻恒星的外流^[18, 30]、光解离区域^[31, 32]、行星状星云^[33, 34]、超新星遗迹^[35, 36]、星系中心的大区域^[37, 38], 以及来源于星系碰撞时产生的激波^[2, 39, 40]。因此, 所处的环境不同, H₂ 谱线的激发机制也可能不相同。目前, 已经提出的 H₂ 激发的主要物理机制包括: (1) 与年轻恒星周围的恒星形成区域有关^[24, 25], (2) 与大尺度的激波有关。大尺度

激波来源于相对论性的喷射^[41]或者星系并合^[26, 28], 又或者是星系团间气体掉落至中心星系^[27]; (3) 在星系际介质的纤维状结构里, H_2 的激发辐射可能来自于宇宙线堆积凝结成分子气体^[42, 43]; (4) 星系团中心星系中的 H_2 可能来自于整个星系团热气体云的电子加热^[44]。

在不同的物理机制下, 中红外波段发射的 H_2 谱线是否可以用来追踪恒星形成, 人们所持观点也各不相同。目前主要几个观点为: (1) Roussel 等人^[22]于 2007 年通过研究发现, 对于低光度 (相比于极亮红外星系而言) 的星系, 在恒星形成区域占主导的这些星系中, “温” H_2 谱线是恒星形成活动的产物; 而在低电离星系核 (Low-ionization nuclear emission-line region, LINER) 和赛弗特 (Seyfert) 天体中, “温” H_2 谱线是激波的示踪者。(2) 对于极亮红外星系 (Ultra-luminous infrared galaxy, ULIRG, 其红外光度通常更高), Higdon 等人^[5]认为中红外波段观测到的 H_2 旋转谱线不受尘埃影响, Zakamska 等人^[23]证实了这一结果, 并深入研究后发现, 中红外波段的 H_2 谱线与恒星形成不直接相关而与激波有关^[44]。

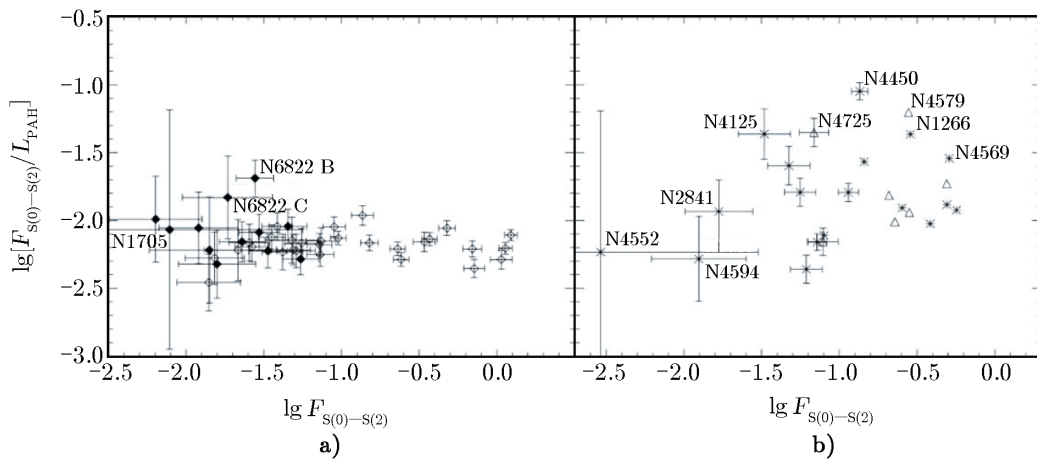
2.1 低光度星系的 H_2 研究

在 H_2 研究初期, 红外光谱技术还无法提供灵敏的较低光度星系的观测数据, 大部分观测都只关注极亮的星系, 并不具有普适意义。因此, Roussel 等人^[22]在 2007 年利用 SINGS 样本^[45] (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) 中部分正常星系的数据 (包括一组较宽区间范围红外光度的星系, 且包括不同种类的星系), 并加入其他相对较暗的天体样本, 期望在扩大研究样本的条件下得到一条适合更多普通星系的 H_2 谱线规律。

我们选取了 SINGS 项目中的 57 个星系作为样本。样本中的每个星系都至少含有 4 条 H_2 S(0)—S(3) 的最低能量旋转谱线观测数据, 且其中有极少数星系可观测到能级 S(7)。该样本包括大质量星系、矮星系、低电离星系核、赛弗特星系, 以及恒星形成星系和漩涡星系等多种类型。因此, 得到的结果更具有普遍适用的意义。样本中, $17\ \mu\text{m}$ S(1) 线在恒星质量超过 $10^{9.5} M_\odot$ 的星系中均有探测到。谱线测量的覆盖区域平均达到 0.9 kpc, 覆盖了大部分的恒星形成区。

文章推导出的单个星系中的“温” H_2 (占据 1% ~ 30% 的总 H_2 质量), 在千秒差距尺度上的柱密度平均值与单个恒星形成区的光解离区域的值一致。而作为恒星形成追踪者 (被星际尘埃所遮蔽) 的 PAH 发射线, 被认为主要来源于光解离区域。Roussel 等人的主要结论如图 1 a) 所示。在恒星形成星系样本中, H_2 谱线强度与 PAH 发射线强度有紧密的相关性, S(0)—S(2) 的总谱线强度积分与 PAH 发射线强度的比值不随 H_2 总谱线强度的增加而增加, 而是在一个平均值上下浮动, 这表明两种谱线的来源相同。由于 PAH 发射线已经被证实来源于恒星形成区, 所以 H_2 在恒星形成星系样本中的激发来源也可能是由恒星形成引起的。而样本中的 25 个低电离星系核/赛弗特星系与恒星形成星系样本则有着不同的结果, 与样本中的其他星系相比, 它们有更多更“温”的 H_2 旋转谱线强度。我们假设 L_{H_2}/L_{PAH} 的比值存在一个阈值, 这个值可以作为识别低光度活动星系核 (active galactic nucleus, AGN) 的标志。对于这部分特殊的星系, 激波加热可以用来解释它们的特殊结果。

根据 Roussel 等人的结论可知, 大部分的恒星在星系中形成, H_2 的激发机制由恒星形成区引起。而在活跃的活动星系核中, H_2 的激发由激波的加热导致。



注: a) 中性氢核的星系 (恒星形成星系); b) AGN 核 (包括 LINER 低电离核区和赛弗特星系)。

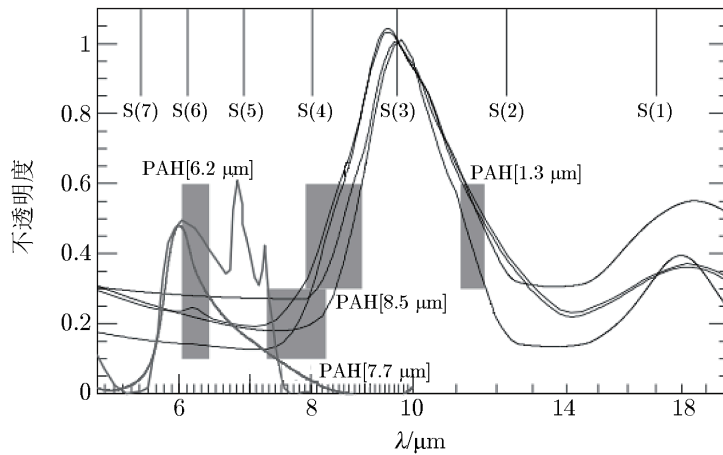
图 1 恒星形成星系和活动星系核中 H₂ 与 PAH 发射线的关系 [22]

2.2 ULIRG 的 H₂ 研究

ULIRG 是邻近宇宙中整体光度最大的天体, 这些天体被认为是由富气体尘埃的盘星系合并而成 [23, 46]。Higdon 等人 在 2006 年利用 Spitzer 红外望远镜的数据研究 ULIRG 时发现, 由 9.7 μm 硅酸盐吸收线光深得到的高消光在观测 H₂ 的视线中并未探测到, 从而推测中红外波段观测到的 H₂ 旋转谱线不受尘埃的影响 [5]。与 Roussel 等人 [22] 的研究类似, Zakamska 等人 [23] 同样用 PAH 谱线作为恒星形成的示踪者, 于 2010 年也验证了这一结论。如果 PAH 与 H₂ 的辐射都由恒星形成激发, 那么这些谱线都应该受到尘埃的消光影响。由于消光强度在很大程度上取决于波长, 不同谱线受消光的影响程度也会不同 (如图 2)。而落在 9.7 μm 硅酸盐吸收线的不透明度峰值之内的谱线应该会受消光影响最严重。基于这个事实, 人们利用吸收谱的峰之内与之外的谱线流量的比值, 就能够测试出谱线激发区域相对于不透明度源的位置。通过判断 H₂ 的辐射与不透明度的辐射区域是否一致, 可以判断 H₂ 所在的区域。即使 ULIRG 在中红外波段也是光学厚的 [23], 这就意味着这种不透明度的影响效应会非常强, 所以对于 ULIRG 而言, 这种判断 H₂ 所在区域的方法是可行的。

Zakamska 等人 [23] 研究发现, PAH 谱线的比值与吸收线的强度相关 (见图 3), 这也证实了 PAH 受尘埃的影响, 即 PAH 的发射区域是在硅酸盐与水冰的位置之间; 与之相反, H₂ 的流量和比值与硅酸盐不透明度之间没有显示出任何的相关关系。即使是离不透明度峰值最近的 S(3), 本应该被严重影响, 也没有显示出 H₂ 的所在区域, 即 H₂ 不受吸收线的影响。因此, 他们得到结论: 恒星形成区域隐藏在光学厚的气体尘埃云内, 而 H₂ 的分子旋转谱线强度是基于恒星形成率而得到值的 3 倍多。因此, H₂ 与恒星形成区不在同一空间位置上, 而是位于尘埃区以外。故尘埃消光影响了恒星形成示踪者 PAH 但不影响 H₂ 旋转谱线, 这一结果与传统上认为 H₂ 谱线与恒星形成活动直接相关的结论相矛盾。

在 2014 年, Hill 和 Zakamska 等人 [44] 又进一步研究了极亮红外星系中旋转 H₂ 谱线的起源。在这些星系中, 他们发现温的 H₂ 都与 [Fe II] 谱线显著相关 (见图 4)。而在之前的研



注：如果发射区域包裹在尘埃或冰下，那些发射特征谱线中距离不透明度峰值最近的谱线将受消光影响最严重。

图 2 ULIRG 光谱和代表性的不透明度曲线中的特征谱线波长^[22]

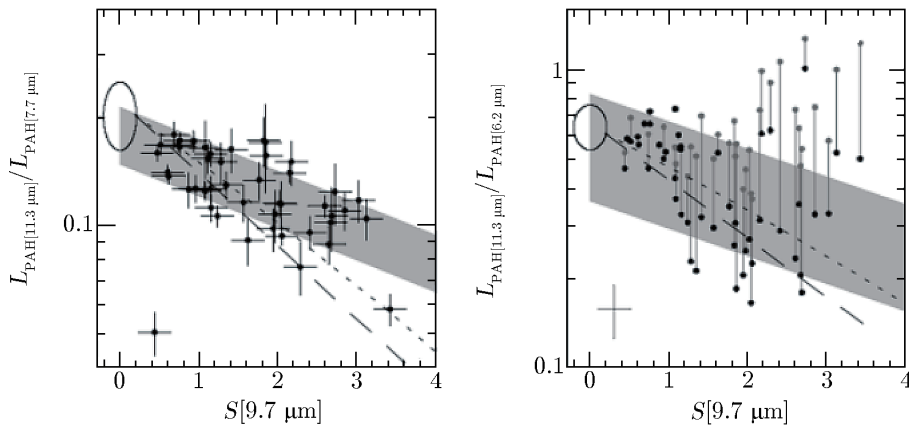
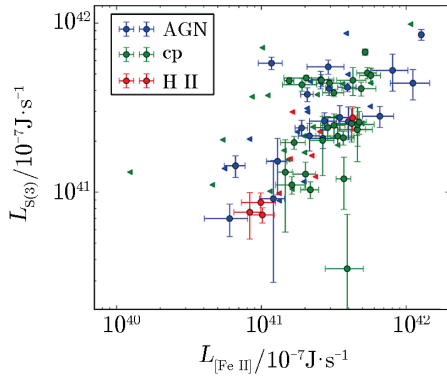
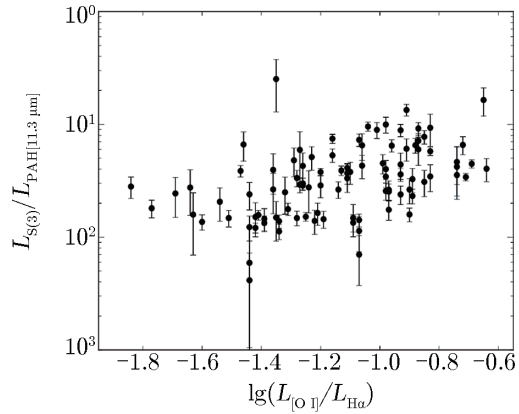


图 3 PAH 特征谱线与尘埃消光的相关性^[23]

究中，强 [Fe II] 发射线通常会与激波有很强相关性。在激波破坏尘埃粒子的过程中，Fe 元素会变为中性介质，在碰撞激发下进一步变成 [Fe II]^[47]。同样的观点还被 H₂ 与激波的光学谱线比值之间的关系所证实。由于 [O I] λ6 300 Å/Hα 已经被证明与激波有很强的相关性，而如图 5 所示，随着这一光学谱线比值的增加（激波的贡献比重也对应增大），L_{H₂}/L_{PAH} 也随之增大。这一结果也同样证实 H₂ 与激波的相关性。恒星形成星系和活动星系核主导星系里都有类似 H₂ 与 [Fe II] 的关系。这一超强的 H₂ 发射现象被解释为来自超新星和活动星系核外流进入 ULIRGs 的中性星际介质激发。

这些天体中的 H₂ 谱线可以用来追踪周围环境中的那些依次被星系与邻近星系相互作用而激发的激波，那些大规模的强激波通过 H₂ 辐射冷却的现象可能比之前更加普遍。在早期的宇宙中，这一过程中 H₂ 辐射的增加可以加速物质的冷却，最后它收缩形成第一代恒星和星系，因此超强的 H₂ 辐射有助于第一代恒星和星系的形成。

图 4 $F_{S(3)}$ 和 $F_{[Fe II] \lambda 5.34 \mu m}$ 的光度关系^[44]图 5 L_{H_2}/L_{PAH} 与光学谱线强度比值之间的关系^[44]

2.3 讨论

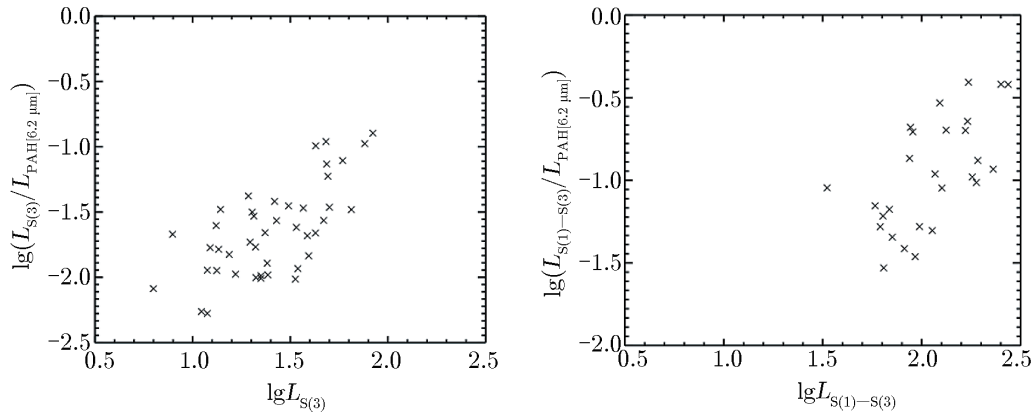
根据上述针对低光度星系和极亮红外天体中 H_2 在中红外波段的辐射是否由恒星形成激发的研究, 人们得到不尽相同的结论。Roussel 等人^[22] 认为, 对于低光度的正常星系, 在电离氢区占主导的这些星系中, 温 H_2 谱线是恒星形成过程的产物; 而在低电离核发射星系 LINERs 和赛弗特星系中, 温 H_2 谱线是激波的示踪者; 而 Zakamska 等人^[23] 认为, 在 ULIRG 中, 中红外波段的 H_2 谱线与激波有关, 而与恒星形成不直接相关。上述两个工作选取的样本不同, 使用的方法也不完全相同。为了理解他们之间的关系, 检验这两个工作是否一致, 我们尝试利用 Zakamska 的样本去重复 Roussel 等人的研究。

在 Roussel 等人的工作中, 他们利用 PAH 发射线作为恒星形成的示踪者, 且用 S(0)—S(2) 谱线强度的和代表 H_2 。由于 Zakamska 等人的样本中没有 S(0) 的数据, 因此我们利用数据较多的 S(3) 以及 S(1)—S(3) 总光度的和来代替 Roussel 等人工作中的 H_2 谱线强度和, 试图寻找 Zakamska 等人的样本星系中 H_2 辐射与恒星形成的关系。结果如图 6 所示, 在 Zakamska 等人的样本中, H_2 谱线与 PAH 发射线之间并没有强烈的相关性 (随着 H_2 谱线强度的增加, H_2 谱线光度与 PAH 发射线光度的比值并不是稳定不变的)。

为进一步研究 H_2 谱线与 PAH 发射线之间的关系, 我们给出 S(3) 以及 S(1)—S(3) 的总光度和与 PAH 发射线光度之间的关系 (见图 7)。与图 6 类似, H_2 谱线与 PAH 发射线光度之间没有明显的相关性, 此结果与 Roussel 等人的赛弗特星系/LINERs 样本结果类似, 也与 Zakamska 等人得出的 H_2 谱线与恒星形成不直接相关而与激波有关的结论一致。

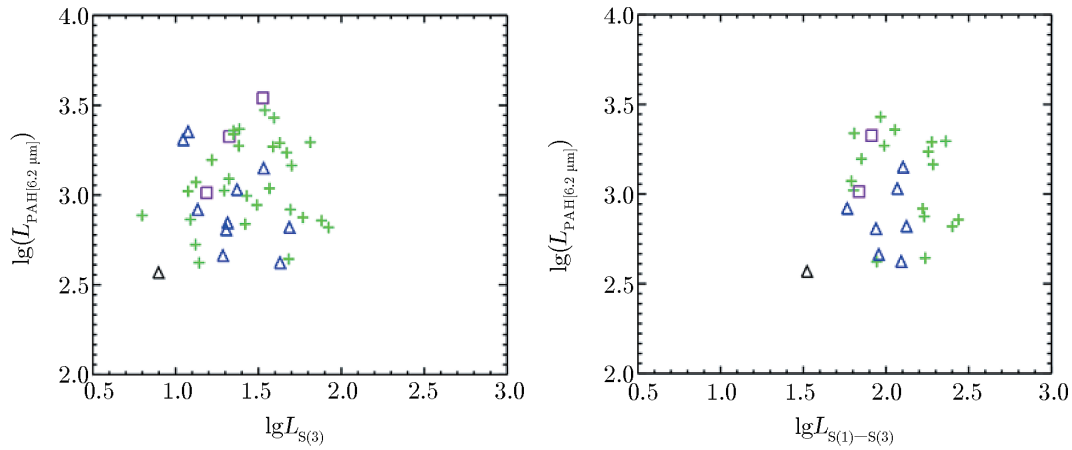
因为 ULIRG 作为一个类别, 可能包括活动星系核, 也可能包括恒星形成星系。因此, 我们进一步探索 Zakamska 等人的样本中每一个星系的类型。从图 7 可以看出, 在 Zakamska 等人的样本中, 星系类型大多为 AGN 和复合星系, 极少数为恒星形成的星系。因此 Zakamska 等人的样本更接近 Roussel 等人的 AGN 样本。虽然这两个工作针对不同光度的样本, 但基本结论是一致的。

综合以上研究结果, 我们可以发现: 在恒星形成的星系中, 中红外波段的 H_2 谱线主要



注：图中左右部分分别表示 H_2 谱线 S(3) 与 H_2 谱线 S(1)—S(3) 的强度和与 PAH 发射线之间的关系。

图 6 Zakamska 样本中 H_2 谱线与 PAH 发射线强度之间的关系



注：蓝色三角形表示 Type-2 AGN，黑色三角形表示 LINER，正方形表示恒星形成星系，加号表示复合星系。

图 7 H_2 谱线与 PAH 发射线强度之间的关系

由恒星形成激发，因此这些 H_2 谱线应该可以成为恒星形成的示踪者；而在非恒星形成主导的星系中， H_2 谱线激发极有可能来源于激波。

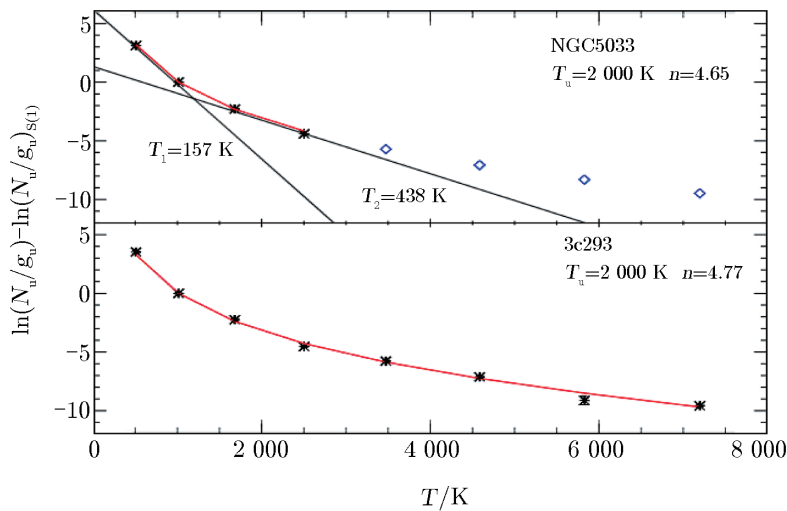
3 中红外波段 H_2 谱线与总分子气体质量的研究

长期以来，人们认为由中红外波段的 H_2 辐射反映的温热分子气体只占总分子气体的一小部分，而与恒星形成直接相关的冷分子气体占总分子气体的大多数^[5]。因此，中红外波段观测的 H_2 辐射并不能很好地反映总分子气体质量。同时，因为 H_2 在冷分子气体环境中不能进行有效的辐射，在很长的时间里，我们无法通过 H_2 来获得总分子气体的质量。人们通常

先使用 CO 的分子旋转谱线得到 CO 的分子质量, 然后再推算出星际介质中分子气体的总质量^[12, 13]。然而, 近年来, 随着越来越多的星际气体被观测到, 这一观点正在逐渐受到挑战。我们知道 CO 存在于最冷的分子气体里, 但现在很多研究发现, 有大部分 H₂ (可能超过一半) 存在于温度更亮的气体 (50~100 K) 中。在这种温度下, CO 将被光致解离为 C 或 C⁺, 因此这些气体是“CO 暗”的, 即这部分 H₂ 的质量无法通过 CO 的方法获得^[8, 16, 47, 50-53]。在这样的情况下, 利用中红外波段观测的 H₂ 辐射 (约 100 K) 通过一定的插值外推可得到分子气体的总质量。这些进展有助于人们直接利用中红外波段探测到的 H₂ 辐射来推测总分子气体质量, 特别是对那些利用传统 CO 来示踪总分子气体可能会具有很大偏差的星系, 如低金属丰度星系。

3.1 模型和测量方法

Togi 和 Smith 于 2016 年通过中红外探测的多条 H₂ 辐射建立了 H₂ 的温度分布模型, 并利用这一模型外推到低温 (约 50 K) 来获取总 H₂ 质量^[19]。他们认为 H₂ 的温度分布可以用一条平滑的幂律谱来拟合 (见图 8)。假设 $dN = mT - ndT$, 用一条连续的幂律温度分布拟合 H₂ 的旋转谱线, 这里 dN 是激发温度在 T 和 $T + dT$ 之间的 H₂ 柱密度, n 是幂律指数, 与气体的加热机制有关 (如气体加热来源可能为激波、光电效应和紫外光子等)。 m 是一个常数。在已知幂律指数 n 的情况下, 对 H₂ 的温度分布模型做积分。设定上限温度 T_u 和外推的下限温度 T_l , 即可得到总的分子气体质量。根据 Togi 和 Smith 的研究结果, 我们设定上限温度为 $T_u = 2000$ K, 而另外两个参数 T_l 和 n 可以根据 Levenberg-Marquardt 优化训练^[52] 来匹配, 整个训练样本的平均外推温度为 $T_l^* = (49 \pm 9)$ K。

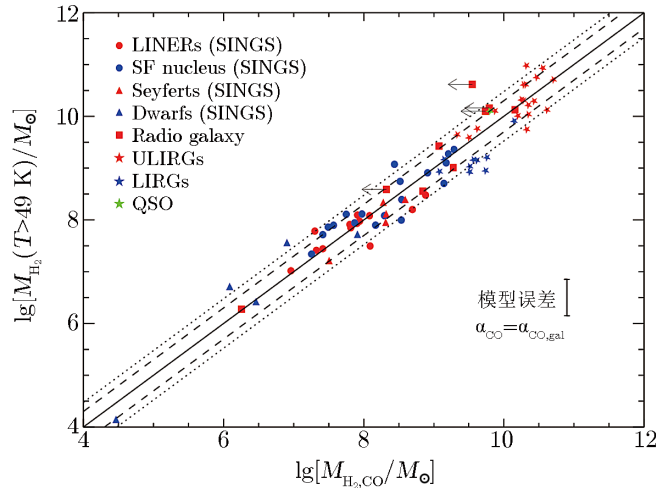


注: T_u 为上限温度, T_l 为外推的下限温度, n 为幂律指数。

图 8 NGC 5033 和 3c 293 的激发图^[19]

这个模型拟合的结果需要一个可靠的样本 (已知分子气体质量) 进行修正。修正以后, 它将与任何一种间接的分子气体示踪者 (如 CO) 无关。下限温度设定为 $T_* = 49$ K, 把拟合得

到的样本中所有星系分子气体总质量与利用可信 CO 示踪得到的分子气体总质量相比较, 结果如图 9 所示。可以看出, 两种方法得到的总分子气体质量值比较接近, 从而很好地验证了 Togi 和 Smith 研究方法的有效性。图 9 中列出的天体均为利用 CO 示踪可以得到总分子气体质量的星系。而如前面提到的, CO 示踪方法在低金属丰度或其他一些极端环境下将失效。Togi 和 Smith 对于此类极端环境的星系也做了验证, 结果证明他们的方法也同样有效。



注: 实线表示模型拟合得到的分子气体总质量与 CO 示踪方法得到的分子气体总质量值完全重合, 虚线和点线分别表示分子气体总质量与 CO 示踪方法得到的分子气体总质量比值为 2:1 和 3:1。

图 9 模型拟合得到的分子气体总质量与 CO 示踪方法得到的分子气体总质量对比^[19]

Togi 和 Smith 认为该方法的适用性与星系类型无关。他们的样本包括了恒星形成星系、活动星系核、低电离星系核、矮星系、射电星系、极亮红外星系和亮红外星系等多种电离机制可能完全不同的星系, 他们发现该方法都可以适用。推导出的总分子气体质量与 CO 推导出的分子气体质量都有很好的相关性。

3.2 结果与分析

Togi 和 Smith 于 2016 年提出了利用中红外波段的 H_2 谱线强度推导总分子气体质量的方法, 该方法适用于任何类型的星系, 也说明星系(无论类型)中总分子气体质量与 H_2 谱线强度相关。如前所述, 中红外 H_2 辐射可能由激波激发, 与恒星形成的关系不大。人们通常认为恒星形成的强弱与分子气体质量面密度紧密相关^[6], 而对这些星系, 观测得到的中红外 H_2 谱线强度却与总分子气体质量面密度关系不大。这是否与 Togi 等人的结果相矛盾呢?

为探讨这一问题, 我们首先研究 Togi 和 Smith 的模型, 验证作为模型输入量的 H_2 发射线辐射强度与作为模型输出量的总分子气体质量是否具有相关性。我们试图研究样本中 H_2 (S(0)—S(3)) 谱线强度与分子气体总质量 $M(H_2)$ 之间的关系, 见图 10 a)。由于 S(0)—S(3) 都有测量值的星系数量较少, 而同时有 S(1) 和 S(2) 的星系数量较多, 我们也试图用 S(1)+S(2) 的谱线强度和来代表 H_2 的谱线辐射寻找 H_2 辐射与分子气体总质量之间的关系(见图 10 b))。整体上无论图 10 a) 还是图 10 b), 均没有显示出 H_2 辐射与分子气体总质量有明显的关系。

但是单独分不同星系类型来看, 如单独看紫色方框 (恒星形成星系), 可以看到整体呈现出一定的正相关趋势, 对此, 还需要进一步研究。同时, 由 ULIRG, LIRG 等得出的总分子气体质量要比恒星形成星系和 AGN 高。Togi 和 Smith 的模型虽然利用 H_2 辐射作为输入量, 但对一个包括多种不同类型星系的样本而言, 得出的总分子气体质量已经与输入量没有明显的相关性。那么模型中的哪些参量可导致模型的输入量与输出量之间弱相关?

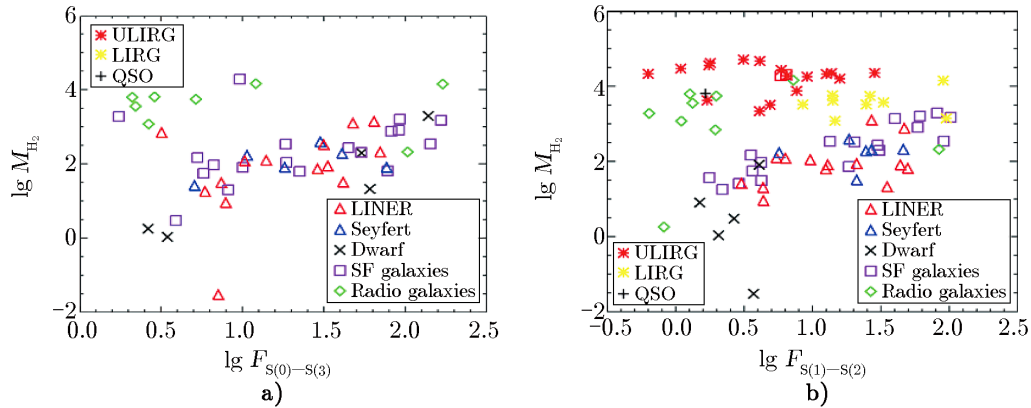
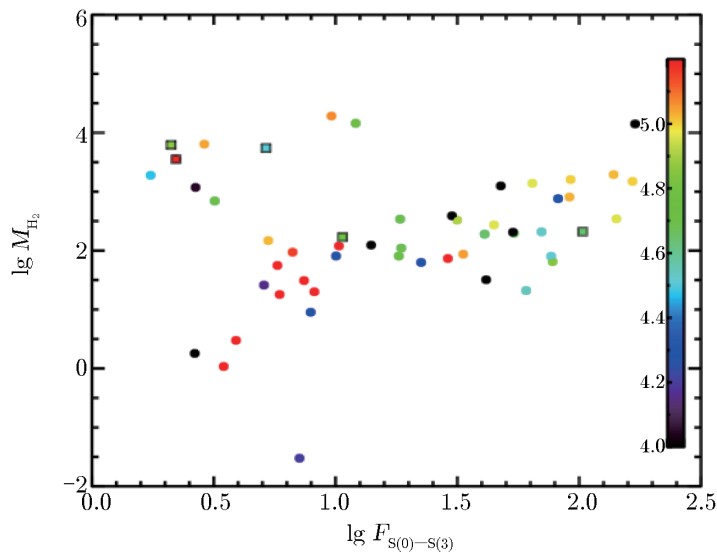


图 10 分子气体的总质量与 H_2 辐射强度和的关系图

H_2 温度分布的幂律指数 n 是 Togi 和 Smith 的模型中主要的可变参量。在图 11 中, 我们用颜色指示 n 的大小, 再次展示图 10 a) 的结果, 发现幂律指数 n 并未在任何方向上表现出趋势性, 所以模型中输入量与输出量之间的弱相关不是由星系中 H_2 温度的分布导致的。



注: 不同颜色表示幂律指数 n 的数值, 颜色与数值的匹配值对应图右侧的色标。

图 11 分子气体的总质量与 H_2 辐射 (S(0)—S(3)) 强度之和的关系

在图 10 b) 中, 我们发现 ULIRG 中分子气体的总质量明显比恒星形成星系和活动星系核偏高, 因此我们必须考虑模型中的另一个重要参数: 星系的距离 d 。在研究辐射的总光度时, 该参数以 d^2 的形式引入到模型中。因此, 在图 12 中, 我们把总分子气体质量除以 d^2 , 研究与观测得到的 H_2 辐射的关系。如果不考虑不同星系角大小的差别, 该物理量基本等同于分子气体的质量面密度, 我们就称其为分子气体的质量面密度。我们发现图 12 显示较强的相关性 (整个样本的相关性为 0.83)。

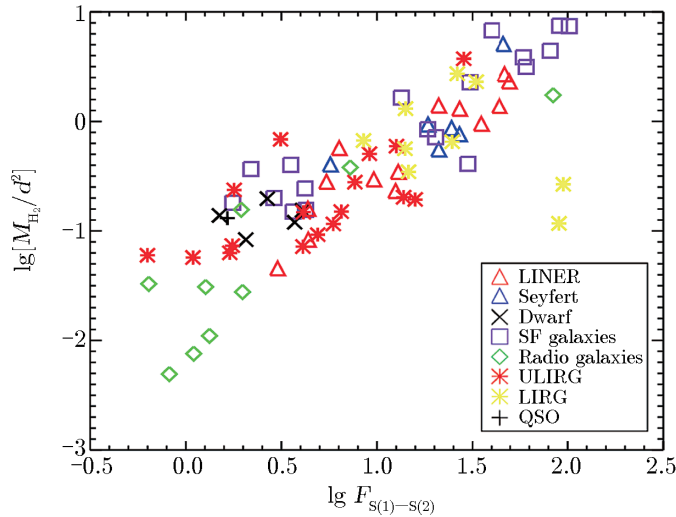


图 12 分子气体的表面密度与 H_2 辐射强度和的关系图

如果图 12 展示的相关性是真实的, 而且 Togi 和 Smith 的方法是可行的, 那么我们可以推断中红外波段观测得到的 H_2 辐射强度与总分子气体的表面密度是相关的, 而且这种相关性与星系类型无关。假定总分子气体的表面密度是与恒星形成紧密相关, 那么就会与 AGN (包括高光度 AGN 主导的 ULIRG) 中 H_2 辐射主要由激波激发而与恒星形成关系不大相矛盾。可以从以下几个方面解释这种矛盾: (1) 传统观点认为分子气体面密度与恒星形成紧密相关源于对致密分子云的探索。这些分子气体温度都比较冷, 与恒星从致密冷的分子云中产生的传统观点相一致。近期人们发现越来越多的分子气体可能大部分在温度更高 (约 50 K) 的区域内^[8, 16, 47, 50-53]。总的分子气体面密度与恒星形成的相关性如何, 特别是对 AGN 这样的特殊星系, 需重新进行研究, 也许不能笼统地认为它们相关。(2) 在第 2 章的讨论中, AGN 中的恒星形成强弱多用 PAH 来表征。虽然通常人们认为 PAH 是恒星形成强度的表征, 但在 AGN 中, PAH 会不会因为受到 AGN 辐射的影响而不能准确地表征恒星形成的强弱? 该问题并没有被系统地探索和验证过。(3) 图 12 中的相关性在 H_2 面密度方向还有一定的弥散性, 最大可达一个数量级。第 2 章中样本都比较小, 为更深入地探索这一问题, 需要一个更大的样本, 该样本应具有统一测量的多条 H_2 辐射、PAH 辐射、硅酸盐吸收强度等, 并最好同时具有用其他手段测量的 H_2 质量和面密度, 以及其他表征恒星形成的物理量。这样的样本收集和分析工作目前还在进行中, 我们将在今后的工作中进一步探讨这一问题。

4 总结与展望

本文介绍了近 20 年来在中红外波段对 H_2 的研究进展。重点讨论了两个关键问题: (1) H_2 辐射与恒星形成的相关性; (2) 针对 H_2 辐射能否跟踪总分子气体质量。同时, 我们还介绍了能够通过中红外 H_2 谱线直接得到总分子气体质量的最新方法。具体总结如下。

(1) 截至目前, H_2 的中红外旋转谱线已经在年轻恒星的外流、光解离区域、行星状星云、超新星遗迹, 以及星系中心的大区域等多种环境中被探测到。不同环境中探测到的 H_2 谱线的激发机制也不同, 因此关于中红外波段发射的 H_2 谱线是否可以用来追踪恒星形成的观点也不同。一般认为在恒星形成星系中, 中红外波段的 H_2 谱线来源于恒星形成, 因此可以为恒星形成的示踪者; 而在非恒星形成主导的星系中, H_2 谱线激发大多来源于激波。

(2) 之前人们认为绝大部分 H_2 存在于极低 ($10 \sim 20 \text{ K}$) 的温度下, 无法进行有效的辐射。因此一般使用 CO 分子的旋转谱线来间接追踪分子气体的总质量。然而, 在很多极端星际环境下, 这种间接的方法将会失效。第 3 章介绍从 Togi 和 Smith 提出的模型推得分子气体总质量的方法, 结果说明中红外波段观测得到的 H_2 辐射可以追踪总分子气体质量, 这一拟合结果独立于其他的间接示踪方法, 并且不依赖于星系的类型。

(3) 虽然第 3 章列出利用 H_2 辐射强度推得总分子气体质量的方法, 但 H_2 辐射与总分子气体质量并不直接相关。在寻找 H_2 的表面密度与 H_2 的辐射强度的关系时, 可以看到各类星系均表现出相同的关系 (H_2 的表面密度与 H_2 的辐射强度正相关)。

未来的研究中, 我们期望在以下几个方面取得进展。

(1) 现有的数据都是以小样本为基础的, 我们急需一个更大的能够包含大部分普遍及特殊星系的, 且具有一定的精度的样本, 去做大数据的中红外 H_2 与恒星形成之间的关系研究。在恒星形成示踪者的选择上可以采用多样化的示踪者 (适用于不同类型的星系), 以期望得到能够普遍适用的方法。

(2) Togi 和 Smith 的模型还有待进一步的改正, 可以利用这一模型得到大样本 (包括各种各样的星系类型) 星系中的分子气体总质量与利用其他方法间接得到的分子气体总质量对比, 验证模型的有效性。

参考文献:

- [1] Stahler S W, Palla F. The Formation of Stars, Weinheim: Wiley-VCH, 2004: 14
- [2] O'Dell C R. Nebula. US: Wiley publication, 2005
- [3] Prialnik D. An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 212
- [4] Kwok S. Physics and Chemistry of the Interstellar Medium. US: University Science, 2006: 435
- [5] Higdon S J U, Armus L, Higdon J L, et al. ApJ, 2006, 648: 323
- [6] Kennicutt R C. ARA&A, 1998, 36: 189
- [7] Schmidt M. APJ, 1959, 129: 243
- [8] Dabrowski I. Canadian Journal of Physics, 1984, 62: 1639
- [9] Solomon P M, Downes D, Radford S J E, et al. ApJ, 1997, 478: 144

-
- [10] van Dishoeck E F, Black J H. *ApJS*, 1986, 62: 109
- [11] Draine B T. *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium*. Princeton: Princeton University Press, 2011
- [12] Solomon P M, Rivolo A R, Barrett J, et al. *ApJ*, 1987, 319: 730
- [13] Scoville N Z, Yun M S, Sanders D B, et al. *ApJS*, 1987, 63: 821
- [14] Strong A W, Mattox J R. *A&A*, 1996, 308: L21
- [15] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. *ApJ*, 2010, 710: 133
- [16] Wolfire M G, David H, Christopher F M. *ApJ*, 2010, 716: 1191
- [17] Bolatto A D, Wolfire M, Leroy A K. *ARA&A*, 2013, 51: 207
- [18] Gautier T N, Fink U, Treffers R R, Larson H P. *ApJ*, 1976, 207: L129
- [19] Togi A, Smith J D T. *ApJ*, 2016, 830: 18
- [20] Huber K P, Herzberg G. *Constants of Diatomic Molecules*. New York: Van Nostrand, 1979
- [21] Black J H, Dalgarno A. *ApJ*, 1976, 203: 132
- [22] Roussel H, et al. *ApJ*, 2007, 669: 959
- [23] Zakamska N L. *Nature*, 2010, 465: 60
- [24] Shull J M, Beckwith S. *ARA&A*, 1982, 20: 163
- [25] Hollenbach D J, Tielens A G G M. *ARA&A*, 1997, 35: 179
- [26] Appleton P N, et al. *ApJ*, 2006, 639: L51
- [27] Egami E, et al. *ApJ*, 2006, 647: 922
- [28] Ogle P, Antonucci R, Appleton P N, et al. *ApJ*, 2007, 668: 699
- [29] Johnstone R M, Hatch N A, Ferland G J, et al. *MNRAS*, 2007, 382: 1246
- [30] Bally J, Lane A P. *ApJ*, 1982, 257: 612
- [31] Gatley I, et al. *ApJ*, 1987, 318: L73
- [32] Tanaka M, Hasegawa T, Hayashi S S, et al. *ApJ*, 1989, 336: 207
- [33] Treffers R R, Fink U, Larson H P, et al. *ApJ*, 1976, 209: 793
- [34] Beckwith S, Gatley I, Persson S E. *ApJ*, 1978, 219: L33
- [35] Treffers R R. *ApJ*, 1979, 233: L17
- [36] Burton M G, Brand P W, Geballe T R, et al. *MNRAS*, 1989, 236: 409
- [37] Thompson R I, Lebofsky M J, Rieke G H. *ApJ*, 1978, 222: L49
- [38] Gatley I, Beattie D H, Lee T J, et al. *MNRAS*, 1984, 210: 565
- [39] Herbst T M, Graham J R, Tsutsui K, et al. *AJ*, 1990, 99: 1773
- [40] Sugai H, Malkan M A, Ward M J, et al. *ApJ*, 1997, 481: 186
- [41] Ogle P, Boulanger F, Guillard P, et al. *ApJ*, 2010, 724: 1193
- [42] Johnstone R M, Hatch N A, Ferland G J, et al. *MNRAS*, 2007, 382: 1246
- [43] Ferland G J, Fabian A C, Hatch N A, et al. *MNRAS*, 2008, 386: L72
- [44] Hill M J, Zakamska N L. *MNRAS*, 2014, 439: 2701
- [45] Sanders D B, Mirabel I F. *ARA&A*, 1996, 34: 749
- [46] Kennicutt R C Jr, et al. *PASP*, 2003, 115: 928
- [47] Mouri H, Kawara K, Taniguchi Y. *ApJ*, 2000, 528: 186
- [48] Moorwood A F M. *Space Sci Rev*, 1996, 77: 303
- [49] Sanders D B, Soifer B T, Elias J H, et al. *ApJ*, 1988, 325: 74
- [50] Field G B, Somerville W B, Dressler K. *ARA&A*, 1966, 4: 207
- [51] Tielens A G G M. *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium*. UK: Cambridge University Press, 2005
- [52] Pineda J L, Langer W D, Velusamy T, et al. *A&A*, 2013, 554: A103
- [53] Velusamy T, Langer W D. *A&A*, 2014, 572: A45
- [54] Markwardt C B. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII*, 2009, 411: 251

Studies of Molecular Hydrogen in Mid-infrared

ZHOU Ye-yan^{1,2}, HAO Lei^{1,2}

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Stars form in the contraction of cold gas cloud, and molecular hydrogen H_2 is the main composition of molecular cloud, so H_2 can be regarded as the main initial fuel reserves of star formation. Access to the knowledge of the molecular gas can help us understand the star-forming in galaxies better. Although H_2 is very rich in starburst, but in the cold interstellar medium, H_2 can't be observed directly because it can not radiate effectively. Until recently, the development of infrared telescopes allows researchers to detect molecular hydrogen rotational lines through infrared spectroscopy. Firstly, we introduce the recent observational results of molecular hydrogen and the present situation. Then we focus on the relevance between molecular hydrogen in mid-infrared and star formation as well as the relationship between H_2 radiation and the total quality of molecular gas. We crosscheck the previous work of different method and data, and then we find: H_2 emission in mid-infrared is relevant to star formation in star-forming galaxies but not in AGNs; H_2 emission in mid-infrared correlates with surface density of total molecular gas and we also give our explanations from several aspect. Finally, we summarize the results and discuss prospect for the future studies.

Key words: molecular hydrogen; star formation; molecular gas mass; active galactic nuclei; galactic evolution