

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.02.01

# 星系中分子气体与恒星形成的研究进展

高扬<sup>1,2,3</sup>, 肖婷<sup>1,4</sup>

(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;  
3. 中国科学院 紫金山天文台 射电天文重点实验室, 南京 210034; 4. 浙江大学 物理学系, 杭州 310027)

**摘要:** 星系中气体转化为恒星的过程决定了星系的结构和演化, 因此研究恒星形成最直接的原料——分子气体的含量、分子气体形成恒星的规律以及会受哪些物理机制的影响, 对于理解星系的形成和演化具有重要意义。近年来, 随着观测技术和设备 (尤其是射电望远镜) 的发展, 天文学家可以在不同尺度上探测到越来越多星系的多种分子多种能级跃迁的谱线。首先, 介绍了探测分子气体的多种方法和新的发现; 然后基于 CO 巡天数据和致密分子气体数据, 分别在统计上讨论了分子气体分布及分子气体含量与恒星形成率之间的紧密关系, 并与小尺度上的恒星形成理论进行了比较; 最后, 结合影响星系演化的物理过程, 讨论活动星系核、星系形态以及星系所处环境对分子气体的影响。

**关键词:** 星系形成和演化; 星际介质; 恒星形成; 分子气体; 星系形态

**中图分类号:** P152 **文献标识码:** A

## 1 引言

在冷暗物质 ( $\Lambda$ CDM) 标准宇宙学框架下, 宇宙的结构是自下而上形成的: 宇宙中的暗物质由于引力的不稳定性, 慢慢聚集成越来越大的暗晕<sup>[1]</sup>, 暗晕中的重子物质经过冷却后坍缩形成星系。这个过程中所产生的激波会把其中的气体加热到暗晕的位力温度<sup>[2]</sup>, 然后这些气体会通过逆康普顿散射和韧致辐射冷却并下落到星系盘上, 再形成冷气体; 冷气体在小尺度上凝聚成团 (巨分子云, GMC)<sup>[3]</sup>, 然后恒星在其中诞生, 之后恒星累积形成了星系。所以恒星在形成过程中通过释放宇宙大爆炸后残留气体中的核能, 导致了宇宙的再电离, 并决定了星系的结构和演化; 气体如何转化为恒星成为当代天体物理学的重要研究领域。

恒星之间的星际介质 (ISM) 包含了 99% 的气体和 1% 的尘埃, 而银河系中星际气体中的元素组成与整个宇宙中的基本一致: 按质量计算, 70% 为 H 元素, 28% 为 He 元素, 2%

收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2019-11-25

资助项目: 国家自然科学基金(11973030); 国家重点研发计划(2017YFA0402704)

通讯作者: 高扬, gaoyang@shao.ac.cn

为金属元素(比 He 重的元素)<sup>[4]</sup>。其中大多数星系中 H 元素主要以 HI 状态存在,而随着气体的不断积累和冷却,HI 达到饱和(饱和的表面密度  $\Sigma_{\text{HI,sat}} \approx 9 M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-2}$ )<sup>[5]</sup>,只有通过尘埃颗粒的吸附作用形成分子( $\text{H}_2$ )后,再通过原子精细结构辐射进一步冷却到  $T \approx 50 \text{ K}$ ,最后坍缩形成恒星<sup>[6]</sup>。所以恒星形成发生在只占星际介质一小部分(尤其是体积)的分子气体中,Bigiel 等人<sup>[5]</sup>基于对 7 个由  $\text{H}_2$  主导的旋涡星系的空间分辨的观测,发现恒星形成率面密度( $\Sigma_{\text{SFR}}$ )与分子气体表面密度( $\Sigma_{\text{H}_2}$ )有很好的相关性: $\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{H}_2}^{1.0 \pm 0.2}$ 。过去 20 年的大型光学成像和光谱测量已经很好地证实,恒星形成的停止是过去 8 ~ 10 Ga 星系演化的主要过程之一<sup>[7-9]</sup>。而基于一些高红移的 CO 观测<sup>[10-12]</sup>,研究表明星系内的气体含量与宇宙的平均恒星形成率和密度有很好的相关性<sup>[13-15]</sup>。

分子气体形成恒星的过程会受到如分子气体的温度和密度、星系的金属丰度、星系内部结构等因素的影响,所以对于星系系统,恒星形成过程依然还有很多需要研究的地方<sup>[16]</sup>:为什么只有一小部分分子气体形成了恒星?什么因素决定了形成恒星的质量分布(初始质量函数 IMF)?新形成恒星及 AGN 所释放的巨大辐射对分子气体的影响和对恒星形成的反馈机制是什么?另一方面,这些问题都与星系所处环境及星系之间的相互作用密切相关。因为有大量的理论<sup>[17]</sup>和观测工作<sup>[18, 19]</sup>发现,星系间的相互作用能够使星系盘上的气体坍缩,促进恒星形成,并进一步影响星系的形态。然而,对于星系间的相互作用具体影响气体形成恒星的一些细节仍不清楚。要研究这些因素是怎样促进或抑制气体形成恒星的,就需要比较不同星系的分子气体的物理状态及其中形成恒星的效率。随着近几年来一些大规模分子气体巡天(如 HRS<sup>[20]</sup>, xCOLDGASS<sup>[14]</sup>),对分子气体和恒星空间分辨观测(如 HERACLES<sup>[21]</sup>, EDGE<sup>[22]</sup>, MaNGA<sup>[23]</sup>)的完成,以及一系列基于多种发射线的星际介质性质的分析,人们对分子气体转化为恒星过程的研究有了新的进展。

在这样的背景下,我们总结了一些星系分子气体新的观测结果,并介绍了分子气体在恒星形成和星系演化中所起作用等前沿研究的现状。第 2 章简单介绍了恒星形成的规律和理论;第 3 章综述了测量星系中分子气体常用的方法和新进展;第 4 章基于近几年的观测数据,分析恒星形成与分子气体之间的统计关系,并介绍了气体形成恒星过程的研究进展;第 5 章讨论了分子气体与星系演化的关系,其中包括星系形态和所处环境等对这个关系的影响;第 6 章是对全文的总结和未来关于星系内部气体研究方向的一些展望。

## 2 恒星形成的观测性质和理论

随着巨分子云中密度分布不均匀性的增加,分子团块核心的温度和密度不断上升,达到流体静力学平衡,原恒星逐渐形成;周围气体下落使得原恒星质量增加,当中心温度达到 H 的聚变温度,恒星就进入了主序阶段。对于一般的河外星系,观测上极难分辨单个恒星,所以描述星系整体的恒星形成活动主要基于两个重要的参量:初始质量函数(IMF)和恒星形成率(SFR)。IMF 描述的是质量不同的零龄主序星的相对数目: $\Phi_0(M) = \frac{dN}{dm}$ ,一般先从观测得到当前的恒星质量函数,再基于恒星演化理论反推得到。通过特定波段或星

云复合线的光度来估计大质量恒星的质量, 再通过恒星质量函数就可以得到某些时标内的 SFR (如 FUV 光度反映 SFR 的典型时标  $\tau_{\text{FUV}} \approx 20 \text{ Ma}$ ,  $\text{H}\alpha$  发射线  $\tau_{\text{H}\alpha} \approx 10 \text{ Ma}$ )。但由于波长越短受到的尘埃消光越严重, 所以研究大样本的 SFR 有两种常用的探针: (1) 尘埃吸收大质量恒星辐射后发出的红外光度<sup>[24]</sup>; (2) 将被尘埃再辐射出的中远红外光度与直接测得的 UV 或  $\text{H}\alpha$  等光度结合起来<sup>[25, 26]</sup>。而大质量恒星演化到后期, 会通过星风或超新星爆发的形式抛射大量物质, 使星际介质的金属丰度增加, 这样又反过来对其他分子云 (新的恒星形成过程) 产生两方面的影响: 一方面, 产生的能量可以加热冷气体, 抑制之后的恒星形成, 其中超新星反馈对小质量矮星系的演化作用明显; 另一方面, 抛射的尘埃物质可以加速气体的冷却, 产生的辐射激波使分子云扰动而坍缩, 促进了恒星的形成。

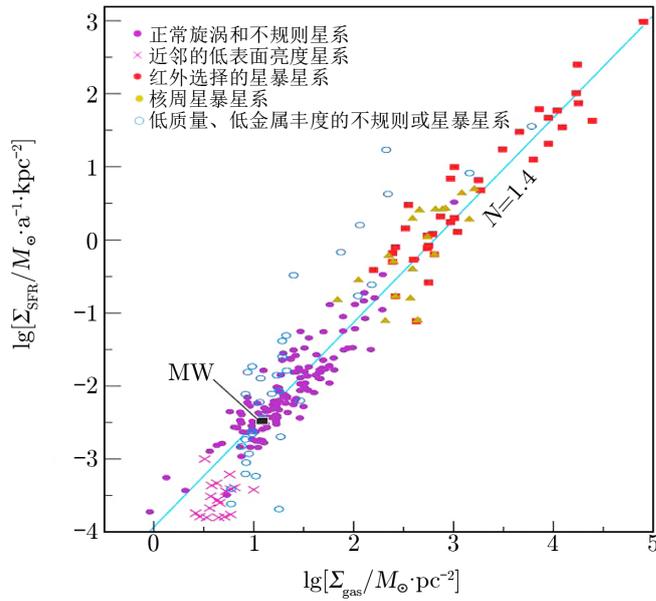
## 2.1 恒星形成定律

恒星形成是持续将气体转化为恒星的过程, 所以理论学家就提出恒星形成率面密度 ( $\Sigma_{\text{SFR}}$ ) 与冷气体面密度 ( $\Sigma_{\text{gas}}$ ) 之间的关系——恒星形成定律<sup>[27]</sup>:  $\Sigma_{\text{SFR}} = A \Sigma_{\text{gas}}^N$ 。Kennicutt<sup>[28]</sup> 分析了 97 个近邻旋涡星系和星暴星系中的总气体 ( $\text{HI} + \text{H}_2$ ) 面密度与恒星形成率面密度的关系 (Kennicutt-Schmidt, K-S 关系), 拟合得到的斜率  $N$  为  $1.4 \pm 0.15$  (如图 1 所示)。K-S 关系被广泛应用在星系形成和演化的理论研究以及数值模拟和半解析模型中<sup>[29]</sup>。而由于恒星形成发生在分子云中, SFR 与分子气体之间的相关性更强, 这已经被一些观测结果证实<sup>[30, 31]</sup>。人们还发现, 通过测量 CO 辐射所得的分子气体表面密度与恒星形成率面密度的相关性更接近线性 (斜率  $N$  接近于 1)<sup>[5]</sup>, 所以近几年的星系形成与演化的理论研究工作开始采用与分子气体有关的恒星形成定律<sup>[32, 33]</sup>。

从小尺度上看, 由于现在对河外星系的分子气体观测最好也只能分辨 100 pc 物理尺度上的平均信息, 比典型的巨分子云的尺度 (20 ~ 100 pc) 要大很多, 更不用说真正转化成恒星的中央分子核心 (小于 0.1 pc); 所以, 观测到的面密度并不是望远镜观测区域中物质的物理密度, 而是所谓的填充因子 (即在单位区域中巨分子云的数目或单个分子云尺度相对观测区域的比值)。为了更好地理解气体形成恒星的过程, 很多观测和理论研究了不同分子气体示踪物与恒星形成率的关系。过去 20 年对银河系内巨分子云<sup>[34]</sup>、河外星系<sup>[35-37]</sup>、高红移星系<sup>[38]</sup>中最致密的气体环境 ( $n(\text{H}_2) > 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ) 进行观测和分析发现, 恒星形成环境中的红外光度与表征致密气体的分子谱线光度之间存在非常强的线性相关 (如图 2 所示)。所以推测恒星只形成于最致密的分子气体中<sup>[39]</sup>, 而且形成效率几乎不受周围气体性质的影响<sup>[40]</sup>, 因此恒星形成效率的变化主要由分子气体中致密气体的含量决定。

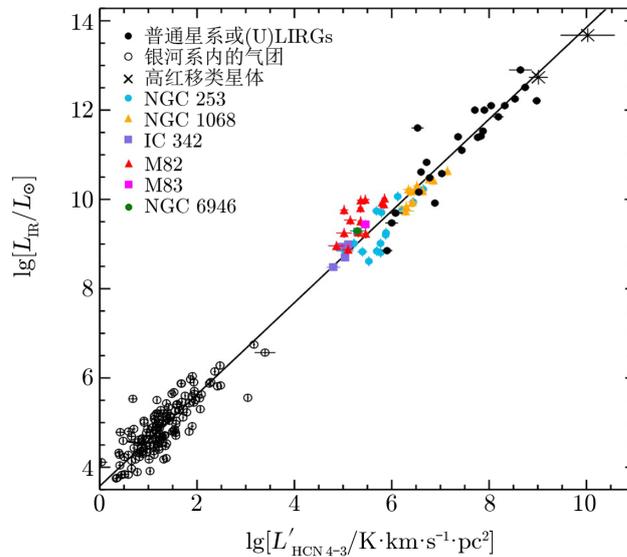
## 2.2 恒星形成理论

这些河外星系观测结果与基于银河系观测得到的超音速湍流的恒星形成理论<sup>[16]</sup>一致。弥散的 ISM 中由于重力不稳定性而形成了巨分子云, 其通过湍流和磁场等来抵抗重力坍缩, 所以巨分子云具有致密的纤维状结构<sup>[41]</sup>以及自引力束缚的核。接下来云核部分开始进行坍缩并变成光学厚的、压力支撑的原恒星, 然后原恒星通过吸积盘开始吸积周围物质而使质量增加, 同时也通过双极外向流和/或准直喷流吹出部分质量; 而大质量原恒星会在吸积停止前即开始 H 燃烧, 产生的辐射和星风会抑制或中断大质量原恒星吸积气体, 所以大质量原



注：此图是 Kennicutt(1998) 的更新版本 (增加了数据点)。红色代表的主要是亮红外星系 LIRGs 和极亮红外星系 (ultraluminous infrared galaxies, ULIRGs)，黑色方形代表银河系，浅蓝色的线表示斜率  $N$  为 1.4 的基准关系 (而不是拟合线)。

图 1 K-S 关系<sup>[29]</sup>



注：彩色符号是近邻星系空间分辨 (亚千秒差距尺度) 的观测结果。数据点的相关性系数为 0.94，最佳拟合为  $\lg L_{\text{IR}} = 1.03(\pm 0.01)\lg L'_{\text{HCN } 4-3} + 3.58$  (实线)。

图 2 示踪致密气体的 HCN 4-3 与红外光度之间的关系<sup>[40]</sup>

恒星的吸积模型还没有统一的理论<sup>[42]</sup>。最后, 恒星形成区中的环境会被星风、外向流、紫外辐射, 以及最终的超新星爆发等反馈瓦解, 而存留在分子云遗迹中的一般是 OB 型大质量恒星团或者星协, 以及相伴的一系列小质量恒星。其中大质量恒星一般成团形成于比较密集的区域, 使得同一云核内的不同成员星之间的相互作用在大质量恒星的演化历史中产生比较重要的影响, 所以能看到在同一个星系内致密气体形成恒星的效率会受恒星形成的影响<sup>[40]</sup>。而湍流的作用是复杂的, 既可以在 ULIRGs 中增加气体密度导致致密气体比例增加<sup>[43]</sup>, 也可以在普通星系中驱动气体小尺度上坍缩成致密气体的同时, 抑制巨分子云在大尺度上的坍缩<sup>[44]</sup>。所以为了充分了解星系内部的恒星形成过程, 需要研究从星系整体到单个分子云的各种尺度上星际物质的分布与运动 (如银河系星际介质距离可分辨的速度场<sup>[45]</sup>), 虽然受到了观测数据和观测方法的限制, 研究仍比较初步, 但越来越多的研究者在做不同的尝试<sup>[46-49]</sup>。

### 3 星系中的分子气体

冷的分子气体在小尺度上分布高度不规则, 主要以巨分子云的形式存在; 在这些分子云中心 (分子核心), 人们通过天文观测已经发现了约 200 种气体和尘埃分子 (如  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ , 多环芳香烃 PAH 和  $\text{C}_2\text{H}$  等)<sup>[4, 50]</sup>。虽然这些分子种类众多, 但所占质量很少, 一般计算分子气体总质量时只需要基于  $\text{H}_2$  的质量修正 He 的部分 (修正因子为 1.36)。虽然  $\text{H}_2$  在星际分子中丰度最大, 但由于  $\text{H}_2$  是对称分子, 没有偶极矩, 同时由于质量小, 它的转动跃迁也需要非常高的温度才能激发; 所以  $\text{H}_2$  在射电和光学窗口都没有可直接观测的谱线, 而在红外波段的转动能级谱线是禁线, 不能用来示踪冷的分子气体。而通过观测吸收线 (在紫外波段) 来研究  $\text{H}_2$  则需要依赖于一些物理上的近似, 且观测困难, 一般只用来观测银河系内的云团。不过很多其他分子的发射线也主要是由  $\text{H}_2$  热运动碰撞所激发, 因此可通过观测这些气体或尘埃分子的某些发射线来研究  $\text{H}_2$  云的质量和物理状态。以下将介绍这些方法在观测上的应用以及发展。

#### 3.1 CO 低阶跃迁作为总分子气体质量的示踪剂

对于河外星系, 探测冷分子气体最常用的是 CO 的 (亚) 毫米波发射线, CO 是丰度仅次于  $\text{H}_2$  和 He 的分子, 并且偶极矩也比较低, 因而自发的转动跃迁几率比较低, 主要是与  $\text{H}_2$  分子碰撞所激发。而且 CO 分子的第一转动激发态只比基态高 5 K, CO  $J = 1-0$  的跃迁在分子气体平均密度大于  $3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$  (临界密度) 的环境中就容易发生<sup>[51]</sup>, 所以现在大样本的分子气体观测主要是基于这种方法: Boselli 等人<sup>[20]</sup>对一个基于 K 波段选源, 限制大小 ( $15 \lesssim D \lesssim 25 \text{ Mpc}$ ) 的 HRS 中 59 个近邻晚型星系进行了  $^{12}\text{CO} 1-0$  的观测; xCOLDGASS 项目中<sup>[14]</sup>使用毫米波射电 (IRAM) 30 m 望远镜, 完成了对 532 个星系的 CO 1-0 和其中部分 (68%) 星系的 CO 2-1 的探测; Yamashita 等人<sup>[52]</sup>使用 Nobeyama 45 m 射电望远镜对处于亮红外或极亮红外系统中的 79 个近邻星系进行了 CO 1-0 的探测。同时也有一些较大规模的空间分辨观测: HERACLES 给出了 18 个近邻星系 CO 2-1 发射图像<sup>[21]</sup>; EMPIRE 巡

天给出 9 个近邻旋涡星系整个盘上 (分辨率达到 1.5 kpc)  $^{13}\text{CO}$  1-0 图像<sup>[53]</sup>; EDGE<sup>[22]</sup> 使用毫米波阵列干涉仪 (CARMA), 对 126 个有空间分辨光学光谱 (CALIFA<sup>[54]</sup>) 数据的星系进行了高空间分辨率 (约 1.4 kpc) 的 CO 观测。

基于 CO 转动跃迁谱的积分强度 ( $I(\text{CO}) = \int T dv$ ) 可以推算出  $\text{H}_2$  的柱密度,  $N(\text{H}_2) = X(\text{CO})I(\text{CO})$ <sup>[30]</sup>; 同样基于 CO 光度能得到分子气体质量,  $M_{\text{H}_2} = \alpha_{\text{CO}}L(\text{CO})$ <sup>[55]</sup>。不过本质上由于 CO 分子的转动跃迁在很多情况下不是光学薄的, CO 分子谱线只探测了分子云表面的情况, 但理论上基于两个假设: (1) CO 辐射是多个独立的分子云发射的总和, 并且相互不遮挡; (2) 分子云处于位力平衡, 可以证明在大尺度上转化因子是常数, 而这也被银河系及近邻星系内分子云位力质量的测量所证实<sup>[56]</sup>, 所以一般在观测中取  $X(\text{CO}) = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} \cdot (\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ , 即  $\alpha_{\text{CO}} = 4.3 M_{\odot} \cdot (\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{pc}^2)^{-1}$ <sup>[55]</sup> (包括对 He 的质量修正)。对于星暴星系和极亮红外星系而言, 由于很大一部分 CO 辐射可能来自密度较低的非位力平衡的云际介质, 所以采用银河系中的标准转换因子会使得这些星系中总的分子气体质量被高估 3 ~ 5 倍<sup>[57, 58]</sup>。而且越来越多的观测表明, 转化因子会受 UV 辐射和金属丰度的影响 (在第 3.4 节中进一步讨论)。此外, CO 需要一定的密度来激发, 所以可能会低估一些极低密度分子气体中的气体质量; 同时由于是碰撞激发所致, 气体的密度和温度也会影响转化因子, 具体的影响还在研究中<sup>[59]</sup>。尽管存在这些问题, CO 低阶转动跃迁依然是最好的推算总分子气体密度或质量的方法, 尤其对于河外星系, 其他示踪物的观测仍然比较困难<sup>[29]</sup>。

### 3.2 致密分子气体示踪剂: 多种分子谱线

如第 2.1 节中所述, 恒星形成的速率强烈依赖于致密气体的质量<sup>[35]</sup>, 由此推测这些致密分子云团可能是恒星形成的基本单元。越来越多的研究者尝试使用临界密度更高的分子探针 (CS, HCN,  $\text{HCO}^+$  的发射线以及 CO 的高阶发射线<sup>[12, 60-63]</sup>) 对更致密的气体进行观测。

不同致密分子气体探针及不同跃迁, 对应的临界密度不同, 各自的化学性质也有所不同, 所以有各自不同的优势, 并可以用来分析物理和化学性质。如作为星际分子云中丰度最高的硫化分子之一的 CS 及其同位素分子, 其多条转动谱线都落在亚毫米波段且容易被观测到, 而且光深不大, 有利于进行模型分析<sup>[64]</sup>。一般测量的 HCN 是  $\text{HCN } J = 1-0 F = 1-1$  (88.630 GHz),  $\text{HCN } J = 1-0 F = 2-1$  (88.632 GHz),  $\text{HCN } J = 1-0 F = 0-1$  (88.634 GHz) 的 3 条超精细结构线流量和, 在星系中是仅次于 CO 的最强星际分子谱线之一; HCN  $J = 1-0$  的临界密度要比 CO  $J = 1-0$  高 3 个量级, 两者之间的光度比可以示踪星暴活动, 在 ULIRGs 中  $\text{HCN}/\text{CO}$  为  $1/8 \sim 1/4$ , 而在正常恒星形成星系中为  $1/40 \sim 1/25$ <sup>[62]</sup>。作为一个线性离子分子,  $\text{HCO}^+$  的存在证明了离子-分子反应的重要性; 此外, 在分子云核的最深层,  $\text{HCO}^+$  可能是主要的电离态示踪器, 因此它可以提供关于电离程度的信息; 同时在冲击波区域, 由于分子气相增丰使得  $\text{HCO}^+$  丰度增加, 所以可以通过观测它的谱线来研究这些冲击波区域的物理和化学性质<sup>[65]</sup>。需要注意的是, 虽然这些分子能很好地示踪高密度的气体, 但其中一些也更容易被光子破坏, 所以也需要考虑金属丰度的影响。

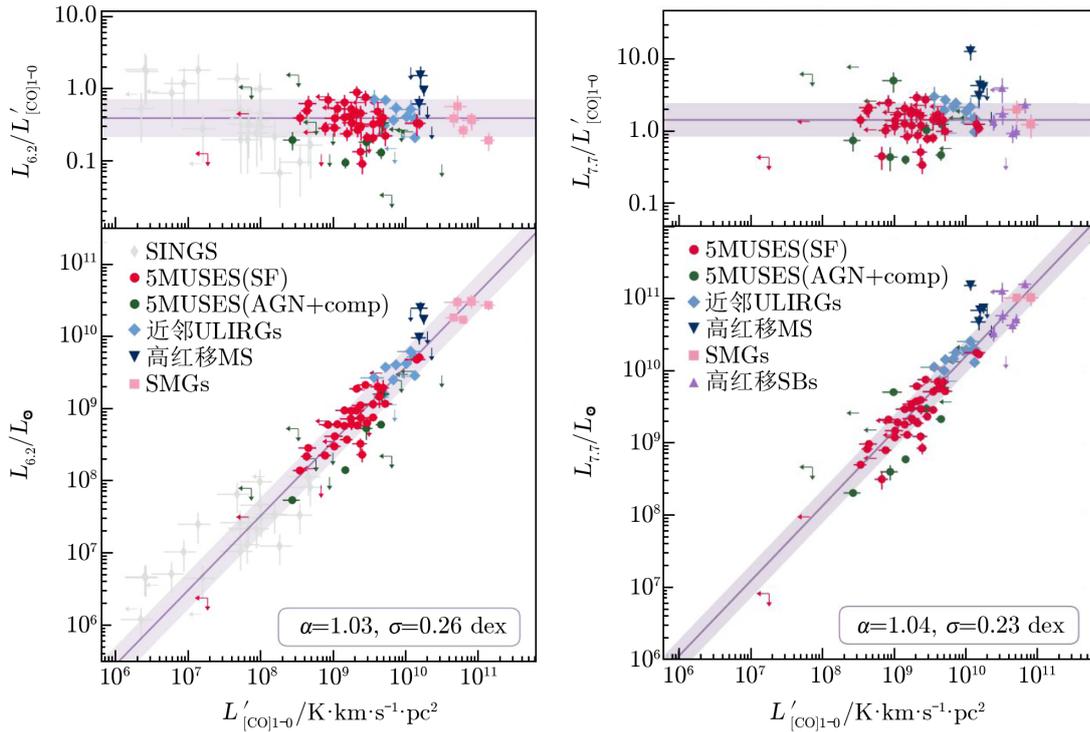
### 3.3 其他估计分子气体质量的方法

虽然一些高红移星系中致密分子谱线被观测到<sup>[12]</sup>, 但是这些致密分子谱线不能用来探测分子气体的总质量; 因为在此情况下, CO 低阶转动跃迁的测量会由于大气透过率和宇宙微波背景 (CMB) 的原因变得困难, 同时 CMB 等宇宙射线对分子气体的加热也会影响  $\alpha_{\text{CO}}$ <sup>[66]</sup>。所以找到一些替代低阶 CO 发射线示踪分子气体的方法就变得十分重要和紧迫。

由于分子气体主要形成于尘埃表面, 而且尘埃能保护分子不被辐射电离, 所以可以通过研究尘埃的性质来推算分子气体的质量。Leroy 等人<sup>[67]</sup>提出基于气尘比利用尘埃质量来估计总气体质量的方法, 即  $\delta_{\text{GDR}} \Sigma_{\text{dust}} = \Sigma_{\text{H}_2} + \Sigma_{\text{HI}}$ , 其中,  $\Sigma_{\text{dust}}$ ,  $\Sigma_{\text{H}_2}$ ,  $\Sigma_{\text{HI}}$  分别为尘埃、 $\text{H}_2$ 、HI 的质量面密度,  $\delta_{\text{GDR}}$  为转化因子, 可通过金属丰度估计:  $\lg \delta_{\text{GDR}} = (9.4 \pm 1.1) - (0.85 \pm 0.13)[12 + \lg(\text{O}/\text{H})]$ 。虽然这种方法不能用来研究分子气体的运动学性质和物理状态, 但由于尘埃辐射的红外数据远多于气体的, 大大节省了观测时间, 并且可以测量 CO 探测不到的气体云外壳上的分子气体 (第 3.4 节), 而且在极端贫金属星系中  $\delta_{\text{GDR}}$  比  $\alpha_{\text{CO}}$  变化更小<sup>[68]</sup>。Bertemes 等人<sup>[69]</sup>将基于尘埃质量估计的气体质量与 CO 探测的分子气体质量进行比较, 发现两者有很强的线性相关 (弥散为 0.17 dex), 但基于尘埃估计的质量会高 0.05 dex, 而且残差与金属丰度有弱的负相关。之后 Bertemes 等人继续通过比较模型推测: 尘埃不仅示踪了  $\text{H}_2$ , 还示踪了  $\text{H}_2$  主导的分子气体盘上的 HI<sup>[69]</sup>。

此外, 还有一些工作尝试利用其他分子 (原子) 气体发射来示踪总分子气体质量, 如多环芳香烃 (PAH) 和碳原子 (CI)。PAH 是在宇宙中非常常见的分子, 通常认为处于光致离解区 (PDRs, 在 H II 区外围  $\text{H}_2$  离解为 HI 的区域), 主导着中性气体的光电加热速率和分子云内的电离平衡过程<sup>[70]</sup>; 它会被来自新形成的恒星的紫外 (UV) 光子加热引起 C=C 和 C-H 键的伸缩和弯曲振动<sup>[71]</sup>, 再辐射到中红外波段, 所以有 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3, 12.7, 17  $\mu\text{m}$  这些发射线<sup>[72]</sup>。十几年来, 越来越多的观测发现, 小尺度与星系尺度上 PAH 辐射与 CO 辐射有很好的关系 (见图 3), 而且 PAH 与冷尘埃辐射也存在相关性。这些发射线中 3.3, 7.7, 8.6, 11.3  $\mu\text{m}$  四条已经被全天红外巡天 WISE (the Wide-field Infrared Survey Explorer<sup>[73]</sup>) 的 1, 3 波段所覆盖, 即将要发射的詹姆斯·韦伯太空望远镜 (JWST) 可以对红移小于 3.5 的星系的 PAH 发射线进行空间分辨的观测<sup>[74]</sup>。

现在越来越多的观测表明, 碳原子与 CO 在气体内部共存并具有非常恒定的柱密度比  $(N(\text{CI})/N(\text{CO}))$ <sup>[75-77]</sup>, 所以  $[\text{CI}]^3 P_1 - ^3 P_0$  ( $[\text{CI}]$  1-0, 492.16 GHz) 和  $[\text{CI}]^3 P_2 - ^3 P_1$  ( $[\text{CI}]$  2-1, 809.34 GHz) 精细结构跃迁线可作为潜在的总分子气体示踪剂, 近年来越来越受到关注。大样本观测数据的统计研究证实, CI 的跃迁线可以很好地示踪近邻 (U)LIRGs<sup>[78]</sup>、高红移亚毫米波星系 (SMG)<sup>[79]</sup>、恒星形成星系<sup>[80]</sup> 和星暴星系<sup>[81]</sup> 中的分子气体质量。Jiao 等人<sup>[82]</sup>通过分析近邻的 1 个 H II 星系、6 个低电离核星系 (LINER)、3 个赛弗特星系和 5 个星暴星系, 发现在亚千秒差距尺度  $[\text{CI}]$  1-0、 $[\text{CI}]$  2-1 光度与 CO 1-0 的光度也有很好的相关。而且理论模型表明, 即使在 (高红移的) 贫金属<sup>[83, 84]</sup>、高宇宙线辐射的情况下<sup>[85]</sup>, CI 的跃迁线也是良好的分子气体示踪剂。



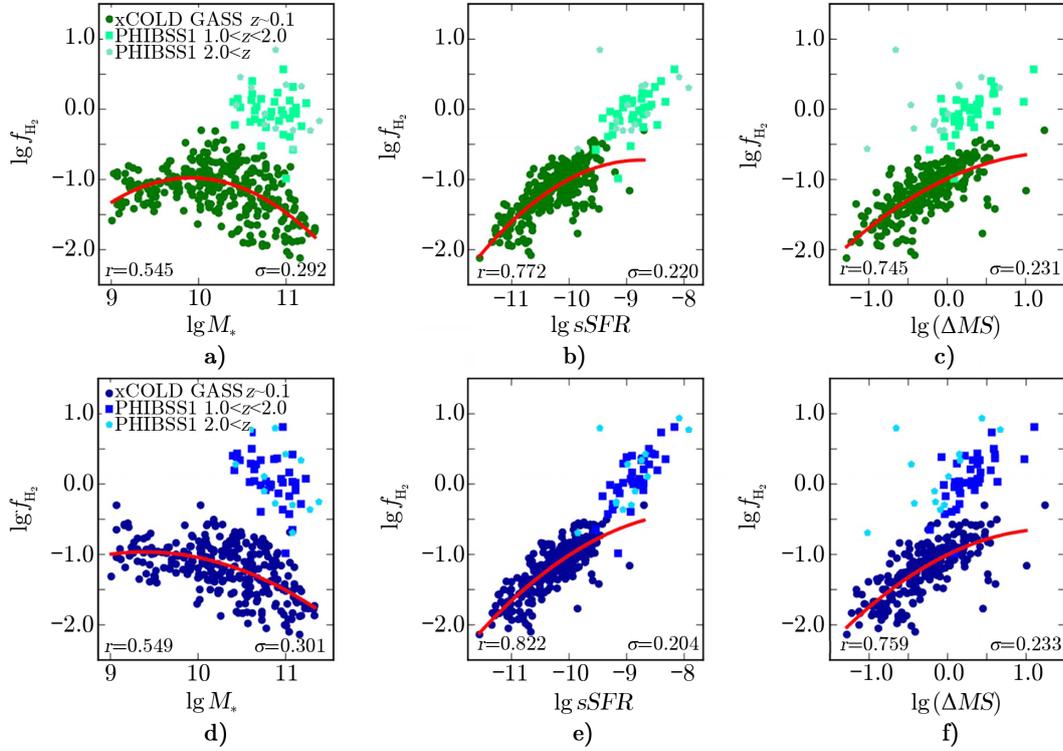
注：上图是 PAH 与 CO 光度的比值随 CO 光度的变化，即假定斜率为 1 时的观测弥散。下图中的紫线和阴影区表示了最佳拟合和弥散。

图 3 CO 光度与 PAH 6.2  $\mu\text{m}$ 、7.7  $\mu\text{m}$  光度之间的相关性<sup>[74]</sup>

### 3.4 转化因子 $\alpha_{\text{CO}}$ 的修正

观测中发现，在金属丰度低 ( $Z/Z_{\odot} \lesssim 0.1$ ) 的星系中很难探测到 CO<sup>[21, 86, 87]</sup>。与此同时大量的研究表明，CO 依赖于尘埃的遮蔽来避免紫外辐射导致的光致离解，所以在低金属丰度的云中，来自大质量恒星的紫外辐射将破坏大部分的 CO 气体<sup>[88]</sup>，而 H<sub>2</sub> 能够自屏蔽而不被破坏。因此，在低金属丰度的恒星形成星系中存在着大量无法通过 CO 来追踪的 H<sub>2</sub>。这部分被称为暗气体<sup>[55, 89]</sup>，处在气体云的外围，气体中的 CO 被光致分离为 C<sup>+</sup> 和 O<sup>[90-93]</sup>，所以 C<sup>+</sup> 在 158  $\mu\text{m}$  的精细结构跃迁 ([C II]  $^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$ ) 辐射可以用来探测这些暗气体。而且 C II 激发的临界密度只有 CO 的几十分之一，所以 [C II] 能探测到中低密度的分子气体；[C II] 辐射作为 ISM 最强的冷却机制之一，可以贡献一个星系远红外光度总量的百分之几<sup>[94]</sup>，所以用 [C II] 来研究高红移星系中的分子气体也是可行的<sup>[95]</sup>。由于 CI 的电离能只有 11.3 eV，比 HI 的 (13.6 eV) 低，C II 可以由原子气体、分子气体、电离气体中的 CI 电离产生。一般基于星系的性质 (主要是比恒星形成率  $sSFR$ ) 来估算分子气体中 (PDRs) 的 C II 占总 C II 辐射的比例<sup>[96]</sup>，再结合 PDRs 中的 C II 和 CO 的测量，研究一个星系中总的 H<sub>2</sub> 含量。Accurso 等人<sup>[96]</sup> 基于对 30 个星系 C II 和 CO 的观测数据，完全参数化地给出了  $L_{[\text{C II}]} / L_{\text{CO}}$  的估计公式，再基于云团模拟<sup>[97]</sup> 的结果量化了转化因子 ( $\alpha_{\text{CO}}$ ) 对环境 (UV 辐射强度和金属

丰度) 的依赖:  $\lg \alpha_{\text{CO}} (\pm 0.165 \text{ dex}) = 14.752 - 1.623[12 + \lg(O/H)] + 0.062 \lg \Delta(MS)$ 。图 4 和图 5 展示了  $\alpha_{\text{CO}}$  的修正对之前基于 CO 观测的一些标度关系的影响, 我们会在第 4 章结合恒星形成过程进行说明。



注: a), b), c) 基于银河系内的  $\alpha_{\text{CO}}$ , d), e), f) 是用修正后的  $\alpha_{\text{CO}}$  估计的。红色曲线是对 xCOLD GASS 样本的最佳二次拟合, 各图都给出了相关性系数和离散。

图 4 星系的分子气体恒星质量比例( $f_{\text{H}_2}$ )与恒星质量 $M_*$ 、比恒星形成率 $sSFR$  和 $\Delta(MS)$ 之间的标度关系<sup>[96]</sup>

## 4 分子气体和恒星形成

基于 HERACLES 的数据, Leroy 等人发现 CO 2–1 辐射与 SFR 的分布一致, 都是随半径幂指数下降, 并且 CO 的特征长度与星系 B 波段  $25 \text{ mag} \cdot (\text{''})^{-2}$  处的半径强相关:  $l_{\text{CO}} = (0.2 \pm 0.05)r_{25}^{[21]}$ 。在  $\text{H}_2$  主导的旋涡星系中, 分子气体的耗散时标 ( $t_{\text{dep}}(\text{H}_2) = M_{\text{H}_2}/SFR$ ) 近似于常数 ( $1.9 \times 10^9 \text{ a}$ ,  $0.3 \text{ dex}$ )<sup>[98]</sup>。

由于早期每次巡天观测的样本不大, 很难对星系中的分子气体进行没有偏差的统计研究。近 10 年随着样本的扩大 (星系种类的增加), 分子气体耗散时标  $t_{\text{dep}}(\text{H}_2)$  被发现与比恒星形成率 ( $sSFR$ ) 有很强的负相关<sup>[99, 100]</sup>, 但它们之间的线性相关 (对数空间) 的斜率会随

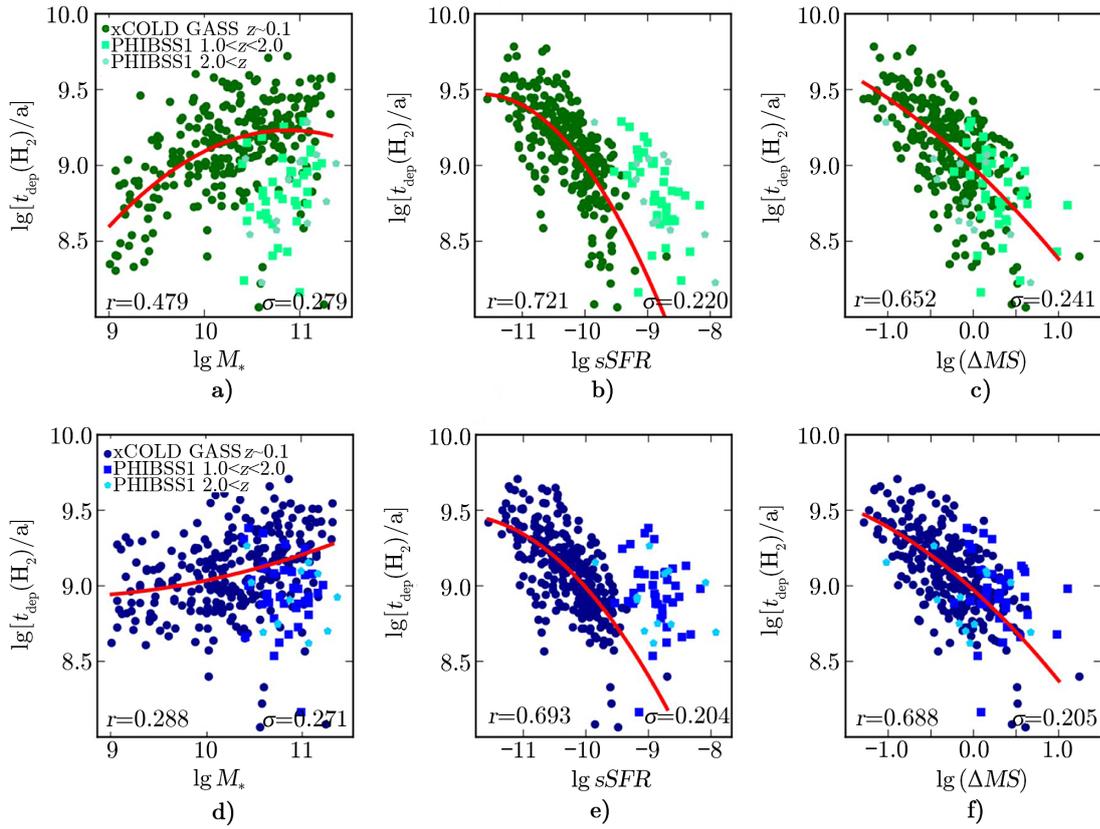


图 5 星系的分子气体耗散时标与恒星质量 $M_*$ 、比恒星形成率 $sSFR$ 和 $\Delta(MS)$ 之间的标度关系<sup>[96]</sup>

星系的种类变化，甚至不可以简单用线性关系描述；在一些相互作用星系和棒星系中，分子气体和 $SFR$ 的分布也会出现差异<sup>[22]</sup>。与此同时，描述气体的两个重要参数（分子气体恒星质量比 $f_{H_2} = M_{H_2}/M_*$ ，及 $H_2$ 与 $HI$ 的质量比 $r_{gas} = M_{H_2}/M_{HI}$ ）也与星系性质相关，但与之相关的一些标度关系会受到 $\alpha_{CO}$ 取值的影响。Accurso等人<sup>[96]</sup>将3.4节中所介绍的修正后的 $\alpha_{CO}$ 应用到较完备的低红移样本xCOLD GASS<sup>[14]</sup>和高红移大质量恒星形成样本PHIBSS1<sup>[101]</sup>上，来分析转换因子对气体标度关系的影响。我们基于Accurso等人的结果来研究分子气体恒星质量比例( $f_{H_2}$ )与耗散时标( $t_{dep}(H_2)$ )的一些标度关系。

在图4中，由于在恒星质量小于 $10^{10}M_{\odot}$ 的星系中金属丰度较低，当使用新的 $\alpha_{CO}$ 后， $f_{H_2}-M_*$ 在 $10^9M_{\odot} \sim 10^{10}M_{\odot}$ 之间变得很平；这与Krumholz恒星形成模型<sup>[102, 103]</sup>的结果一致<sup>[104]</sup>，说明 $SFR$ 与分子云的性质直接相关，因而 $t_{dep}(H_2)$ 和 $sSFR$ 不受星系质量的影响。同时，又由于在同样质量范围的星系中 $HI$ 气体恒星质量比随 $M_*$ 减小而增加<sup>[105]</sup>，所以也说明小质量星系把 $HI$ 转换为 $H_2$ 的效率更低。而在不同红移大质量星系中， $f_{H_2}$ 与 $M_*$ 的负相关也与 $SFR-M_*$ 在大质量星系中的变平一致，被认为是由强烈的恒星形成反馈导致。因此，所有星系（不同红移，不同质量）在 $f_{H_2}-sSFR$ 的图上都符合一条紧密的线性关系，而高红

移星系的  $f_{\text{H}_2}-\Delta(MS)$  (星系  $SFR$  与恒星形成星系在  $M_*$ - $SFR$  图中所处主序的差值) 的关系与近邻星系的不同也只是反映星系气体含量随时间的演化, 即气体含量随红移演化的减少导致主序星系 (位于  $M_*$ - $SFR$  主序上的星系) 比恒星形成率的降低<sup>[106]</sup>。所以, 从统计上来看, 这与  $SFR$  是由星系可用气体含量决定的结论一致。

如图 5 所示, 在修正了  $\alpha_{\text{CO}}$  的影响后,  $t_{\text{dep}}(\text{H}_2)$  与  $M_*$  的相关性变得很弱, 这与人们利用稳定模型所推得的一些结论<sup>[107, 108]</sup>一致, 表明气体耗散时标对恒星质量几乎没有依赖性。同时, 无论  $\alpha_{\text{CO}}$  怎么取值, 气体耗散时标与  $sSFR$  的相关性都存在, 而且一旦考虑  $sSFR$  随红移的演化,  $t_{\text{dep}}(\text{H}_2)$ - $sSFR$  关系与红移无关 (如  $t_{\text{dep}}(\text{H}_2)$ - $\Delta(MS)$  关系所示), 这表明主序星系的恒星形成是由在宇宙演化过程中相对保持不变的物理机制驱动, 且与恒星质量无关。但需要注意的是, 这些星系的气体耗散时标都明显小于哈勃时间, 这表明这些持续形成恒星的主序星系需要从周围环境中补充 (吸积) 新鲜气体<sup>[101]</sup>。

基于小于千秒差距尺度的空间分辨观测所测得恒星形成率 (面密度) 与分子气体质量 (面密度) 的相关性 (分子气体的恒星形成定律) 斜率在不同的工作中有较大差异:  $N \approx 1$ <sup>[5, 109]</sup>,  $N < 1$ <sup>[110]</sup>,  $N > 1$ <sup>[111, 112]</sup>。而恒星形成定律实际上已经进行了很多的简化, 所以不可简单地把 K-S 关系当作仅仅是致密分子团块与恒星形成两者之间的关系。例如 K-S 可能与 (气体坍缩) 恒星形成的时标有关<sup>[113]</sup>, 所以, 如果将恒星反馈 (恒星质量面密度) 的影响引入 ( $\Sigma_{\text{SFR}} = A\Sigma_{\text{gas}}\Sigma_*^{0.5}$ ) 就可以稍微减小弥散<sup>[114]</sup>。这种恒星形成率与分子气体质量之间的超线性斜率 (没有统一的斜率, 低气体密度的星系中斜率更高<sup>[29]</sup>) 类似于  $t_{\text{dep}}(\text{H}_2)$  改变 (与  $sSFR$  的负相关), 可能的主要原因是: CO 示踪分子云总体的质量, 而致密分子气体则示踪与恒星形成更直接相关的气体 (第 2.2 节); 在高气体密度区域中的非线性过程 (如重力坍缩和云-云碰撞) 加速了恒星形成<sup>[115]</sup>。

## 5 分子气体与星系演化

上述介绍的气体与恒星形成之间的相关性有助于建立星系演化的“平衡模型”, 在这个框架下, 星系的生长是通过流入 (吸积) 和流出后总的可用气体含量以及恒星形成过程的效率所决定<sup>[108]</sup>; 因此, 研究星系中冷气体的性质对于进一步了解星系演化非常重要。

自从  $z \approx 2$  星系中的恒星形成活动达到巅峰以来<sup>[116]</sup>, 红星系的比例持续增加, 星系平均的  $SFR$  逐渐下降。通过研究完备星系样本的  $SFR$  和  $sSFR$ , 发现在较大的红移范围内 (可以扩展到  $z \approx 3$ ), 星系的恒星形成活动对质量有依赖, 而环境的影响主要体现在低红移星系 ( $z < 1$ ) 中<sup>[117]</sup>。  $SFR$  很大程度上由分子气体含量决定, 所以研究星系中分子气体如何以及何时耗尽, 对于理解星系中恒星形成的减弱和猝灭问题至关重要。

以下基于观测结果简单介绍在一些恒星形成猝灭机制中气体的变化, 以及一些不同物理环境对气体形成恒星过程影响的分析。

### 5.1 后星暴星系中 AGN 的影响

后星暴星系 (有强巴耳末吸收线, 且缺乏星云发射线<sup>[118]</sup>) 在过去的 1 Ga 内有强烈的恒

星形成活动, 然后很快就停止了, 所以是用来研究恒星形成停止过程非常好的对象。虽然后星暴星系当前的  $SFR$  已经变为早型星系的水平, 但 CO 探测发现, 有许多后星暴星系中分子气体含量与正常的恒星形成星系差不多<sup>[119, 120]</sup>。为了解释这些星系中如此低的恒星形成率, French 等人<sup>[121]</sup>观测了一些后星暴星系中的致密气体, 发现含量很少; 所以这个问题就变成了是什么阻止了 CO 所示踪的分子气体进一步形成致密气体。一种可能的起因是来自 AGN 的喷流或振动导致湍流的耗散<sup>[122]</sup>, 这种耗散加热气体从而抑制了其坍缩<sup>[123]</sup>, 所以在许多后星暴星系中都观测到类似 LINER 的活动<sup>[119, 124, 125]</sup>, 但因为湍流的作用是复杂的, 具体过程还不太清楚。不过, 加入 AGN 反馈所模拟的大质量早型星系能更好地重现大小与质量、速度弥散与质量、基本平面关系等标度关系, 以及星系内的总质量密度分布<sup>[126]</sup>。

## 5.2 形态的影响

对星系的图像研究发现, 恒星形成猝灭的星系有更高的恒星质量面密度<sup>[127]</sup>, 而且质量更集中于中央(核球/伪核球)<sup>[128]</sup>, 所以对于很多中央星系内的恒星形成停止, 形态猝灭<sup>[129, 130]</sup>机制可能会起到重要的作用。在棒或星系间(相互作用和并合)的潮汐力作用下<sup>[19, 131]</sup>, 气体内流到星系中心形成了恒星; 而星系内部结构(核球)的增长增加气体的动能, 使其变得稳定而避免重力坍塌, 从而减少致密气体比例和抑制恒星形成。Martig 等人<sup>[129]</sup>的模拟表明, 从盘到核球的过渡过程所产生的盘内剪切扰动可以触发稳定气体盘所需的湍流, 降低恒星形成的效率, 使得早型星系在持续吸积气体的同时变为红色并且“死亡”, 所以形态猝灭可以由星系自演化而成(时标大于 1 Ga), 并对小质量星系有效。不过单靠这种机制无法导致早型星系中冷气体含量的下降, 而外部的吸积需要与暗物质晕相关的过程(如激波加热和活动星系核反馈等)来抑制<sup>[132]</sup>; 这解释了为什么核球的存在是星系变红的必要条件而非充分条件。

## 5.3 环境的影响

环境在星系演化中起着重要作用: 高密度区域中以早期星系为主, 而低密度区域则以旋涡星系和不规则星系为主<sup>[133]</sup>; 而且一旦恒星形成的富气体星系到达高密度区域, 由于它们中的气体可能会被大质量的星系团剥离, 性质会发生变化; 这种外部环境效应是卫星星系中恒星形成猝灭的主要因素。虽然这种剥离主要作用于分布更为广泛的原子气体, 但也有观测发现, 在高密度区域中的很多旋涡星系不仅原子气体少, 分子气体也少<sup>[134, 135]</sup>, 并且分子气体分布比恒星更紧凑的星系倾向于有相互作用的迹象<sup>[22]</sup>。

很多学者提出多种不同的机制来解释这些现象, 主要包括: 与周边星系和物质的潮汐力能够在短时间内剥去星系内部冷气体, 甚至导致一部分恒星的潮汐剥离(tidal stripping)<sup>[136]</sup>; 被周围密度更高的热气体拖拽导致的冲压剥离(ram-pressure stripping)<sup>[137]</sup>和星系团内高速气体导致的黏性剥离(viscous stripping)<sup>[138]</sup>。这些机制在某些情况下可能只会扰乱星系中的热气体而不会影响盘上冷气团成分, 但由于没有新的下落气体的补充, 冷气体会慢慢被恒星形成所耗尽, 即窒息(strangulation)效应<sup>[139]</sup>。虽然缺乏气体的团星系的分子气体耗散时标也会与孤立的无扰动的系统相当, 而考虑气体循环后的总气体耗散时标大于冲压剥离的时标, 所以冲压剥离对于推动这些星系未来的演化也很重要<sup>[140]</sup>。不同的机制会在不同的时间

和物理尺度上起作用, 而且对星系的形态和内部动力学产生的影响也不同, 如潮汐剥离等重力扰动会使圆盘变厚并增加核球与盘的比值, 而窒息效应则会降低盘的表面亮度。同时, 准确地确定主导的机制对理解剥离过程也很重要, 可以进一步校准流体动力学模拟, 所以确定高密度环境星系中恒星形成活动停止的扰动机制正在成为现代河外天文学的主要挑战之一<sup>[141]</sup>。

#### 5.4 并合和相互作用的影响

星系间的相互作用不仅能够剥离星系中的分子气体, 同时也会扰动和压缩分子气体, 触发短时星暴<sup>[142]</sup>, 使星系脱离主序<sup>[143]</sup>, 最终在短时间内通过加热、吹散或耗尽星系中气体来抑制恒星形成活动。观测发现的最强烈的星暴 (ULIRGs 和部分亚毫米波星系) 主要是主并合 (两星系质量比小于 3:1) 系统<sup>[144, 145]</sup>, 模拟表明外部扰动可以通过潮汐力引起气体内流来导致恒星形成<sup>[146]</sup>。而且富气体星系之间的主并合促使中心恒星形成率和黑洞快速增长, 点燃 AGN, 出现类似于类星体的能量释放; “吹散” 气体, 进而降低恒星形成和黑洞吸积 (AGN 反馈中类星体模式)。但研究发现, 即使在  $z=2$  星系并合频繁的时期, 也只是一小部分 (2%) 的大质量星系偏离主序, 而且对宇宙恒星形成率密度的贡献只有约 10%<sup>[147]</sup>, 这说明主并合对宇宙中总体恒星形成活动变化的贡献不是很大。

由于暗物质晕并合的概率随质量比的增加而上升, 气体丰富的小质量星系次并合 (两星系质量比大于 3:1) 的概率要大得多<sup>[148]</sup>, 而且过程要温和得多: 可以保留足够多的气体通过吸收动能或形成新盘而保持主星系薄盘<sup>[149]</sup>, 也可以将物质沉积到主星系外围来保持星系的内部结构, 或将气体导入主星系中心从而引发中心星暴。此外, 也有研究发现相互作用也会扰动星系内的分子气体, 提高转化为恒星的效率<sup>[150]</sup>。所以星系并合和相互作用对星系演化的影响是多方面的, 不仅对并合星系的性质有依赖<sup>[151]</sup>, 而且在不同阶段的影响也不同, 目前受到数据和方法的限制, 一些具体的过程还不是很明确。

## 6 总结与展望

探测星系中总的分子气体的含量和性质对于研究恒星形成的触发及驱动机制、星际介质的化学增丰过程, 以及星系生长和演化非常重要。为了完善星系演化图景, 本文总结了近 10 年来对星系整体和空间分辨的分子气体观测情况, 分别讨论了分子气体的观测方法, 分子气体质量与星系性质的一些标度关系, 以及分子气体在星系演化中扮演的角色。全文的主要内容如下。

(1) 首先简单介绍了恒星形成的相关背景知识, 包括观测性质、规律和理论。着重阐述了分子气体含量与恒星形成率之间的恒星形成定律, 之后结合理论分析了该定律背后的物理意义: 分子气体坍缩会受到一系列因素的影响, 而只有致密分子气体形成恒星的效率变化小, 即恒星只形成于最致密的分子气体中。

(2) 由于占分子气体比例最高的  $H_2$  很难直接探测, 发展出了多种研究分子气体含量的方法: 基于各种分子谱线流量或尘埃质量估计。每种方法都有优缺点与侧重, 随着近些年技

术的发展和观测数据的增加,多种探索方法可以相互结合,如使用 [C II] 来修正 CO 对分子气体的估计。同时,这种多分子多谱线的结合能更好地描述分子气体,对于进一步详细研究气体坍缩为恒星的过程有很大帮助。

(3) 基于多波段研究提供的星系性质信息,结合  $\alpha_{\text{CO}}$  转换因子研究的进步,越来越多的数据获取有助于我们理解冷气体的含量和分布,以及冷气体与恒星形成率的关系。虽然小质量星系中 HI 气体含量高,但转换为  $\text{H}_2$  的效率低,所以分子气体含量与星系质量的相关性很弱。而分子气体与恒星形成之间的关系十分紧密,低红移和高红移星系的不同也主要是由气体系统性的消耗导致的。分子气体耗散时标并不随恒星质量变化而显著改变,即平均而言小质量星系中分子气体形成恒星的效率与大质量星系相当。

(4) 结合星系中恒星形成活动猝灭过程的研究,简要综述了近年来发现的星系演化的几个重要机制,以及这些物理机制对星系中(冷/致密)分子气体(含量)的影响。作用主要包括两个方面:星系内部核球主导的形态猝灭、AGN 反馈或恒星形成所产生的湍流和辐射,通过增加气体的温度或动能,降低气体坍缩成恒星的概率;暗晕的激波加热阻止了中央星系气体的吸积,各种环境效应造成了卫星星系气体剥离,以及星系间相互作用触发剧烈的 AGN 活动或恒星形成活动吹散或消耗了气体,导致气体含量降低。

需要指出的是,由于观测技术和条件的限制,分子气体观测的探测深度和分辨率都无法与光学红外波段相比,其观测样本较小并偏重于低红移、气体丰富的星系,尤其是对致密气体空间分辨的研究大都以个源为主。而现在所关注的冷气体之间、冷气体和星系其他性质之间的统计关系会受到这些样本的影响,使得人们对气体在星系演化中所起的作用还不能够清晰地了解。所以为了获得星系演化的完整物理图像,要继续对更全面的星系样本(扩展到更高红移和更暗的星系),在各种尺度上研究分子气体与恒星形成之间的关系。一方面,近些年,随着 ALMA, SKA 和 FAST 等先进射电望远镜陆续运行,以及多分子多谱线结合方法的普及应用,详细的星系分子气体信息大量增加,新的研究进展正不断涌现,未来一些更高红外空间分辨率的仪器(如 JWST),以及更加完善的运动学分析方法将能够精确地测量星系内气体的流动,使人们在更小的尺度上(几十秒差距尺度甚至是秒差距尺度)研究恒星形成原料的供给。基于多波段的观测数据并提出更准确的分子质量估计方法也是扩大研究样本的一种尝试。另一方面,未来一系列正在建设的具有极高空间分辨率的光学观测设备(30 m 望远镜 TMT、大麦哲伦望远镜 GMT 等)以及正在开展的一系列积分场光谱巡天,能够对较大的样本在较小的尺度上采样各种物理参数(如电离气体辐射、恒星年龄、金属丰度和丰度梯度),使人们能够确认与气体有关的参数或过程,同时检验和完善星系形成的模型,更好地理解恒星形成和星系演化等过程。

#### 参考文献:

- [1] White S D M, Rees M J. MNRAS, 1978, 183: 341
- [2] White S D M, Frenk C S. ApJ, 1991, 379: 52

- [3] Williams J P, Blitz L, McKee C F. In: Mannings V, Boss A P, Russell S S, eds. *Protostars and Planets IV*. Tucson: University of Arizona Press, 2000: 97
- [4] Karttunen H, Krüger P, Oja H, et al. *Fundamental Astronomy*. Berlin: Springer, 2007.
- [5] Bigiel F, Leroy A, Walter F, et al. *AJ*, 2008, 136: 2846
- [6] Wolfe A M. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2007, 379: 1
- [7] Bell E F, McIntosh D H, Barden M, et al. *ApJ*, 2004, 600(1): L11
- [8] Bundy K, Ellis R S, Conselice C J, et al. *ApJ*, 2006, 651(1): 120
- [9] Faber S M, Willmer C N A, Wolf C, et al. *ApJ*, 2007, 665(1): 265
- [10] Walter F, Decarli R, Sargent M, et al. *ApJ*, 2014, 782(2): 79
- [11] Riechers D A, Pavesi R, Sharon C E, et al. *ApJ*, 2019, 872(1): 7
- [12] Carilli C L, Walter F. *ARA&A*, 2013, 51: 105
- [13] Kruijssen J M D. *Classical and Quantum Gravity*, 2014, 31(24): 244006
- [14] Saintonge A, Catinella B, Tacconi L J, et al. *ApJS*, 2017, 233: 22
- [15] Tacconi L J, Genzel R, Saintonge A, et al. *ApJ*, 2018, 853(2): 179
- [16] McKee C F, Ostriker E C. *ARA&A*, 2007, 45: 565
- [17] Lotz J M, Jonsson P, Cox T J, et al. *MNRAS*, 2008, 391: 1137
- [18] Balogh M, Eke V, Miller C, et al. *MNRAS*, 2004, 348: 1355
- [19] Li C, Kauffmann G, Heckman T M, et al. *MNRAS*, 2008, 385: 1903
- [20] Boselli A, Cortese L, Boquien M. *A&A*, 2014, 564: A65
- [21] Leroy A K, Walter F, Bigiel F, et al. *AJ*, 2009, 137: 4670
- [22] Bolatto A D, Wong T, Utomo D, et al. *ApJ*, 2017, 846: 159
- [23] Bundy K, Bershadsky M A, Law D R, et al. *ApJ*, 2015, 798: 7
- [24] Kennicutt R C Jr. *ARA&A*, 1998, 36: 189
- [25] Kennicutt R C Jr, Hao C N, Calzetti D, et al. *ApJ*, 2009, 703: 1672
- [26] Janowiecki S, Catinella B, Cortese L, et al. *MNRAS*, 2017, 466: 4795
- [27] Schmidt M. *ApJ*, 1959, 129: 243
- [28] Kennicutt R C Jr. *ApJ*, 1998, 498(2): 541
- [29] Kennicutt R C, Evans N J. *ARA&A*, 2012, 50: 531
- [30] Wong T, Blitz L. *ApJ*, 2002, 569: 157
- [31] Walter F, Brinks E, de Blok W J G, et al. *AJ*, 2008, 136(6): 2563
- [32] Kang X, Chang R, Yin J, et al. *MNRAS*, 2012, 426(2): 1455
- [33] Kubryk M, Prantzos N, Athanassoula E. *A&A*, 2015, 580: A126
- [34] Wu J, Evans N J, Gao Y, et al. *ApJ*, 2005, 635: L173
- [35] Gao Y, Solomon P M. *ApJS*, 2004, 152: 63
- [36] Zhang Z Y, Gao Y, Henkel C, et al. *ApJ*, 2014, 784: L31
- [37] Liu D, Gao Y, Isaak K, et al. *ApJ*, 2015, 810(2): L14
- [38] Gao Y, Carilli C L, Solomon P M, et al. *ApJ*, 2007, 660: L93
- [39] Lada C J, Forbrich J, Lombardi M, et al. *ApJ*, 2012, 745: 190
- [40] Tan Q H, Gao Y, Zhang Z Y, et al. *ApJ*, 2018, 860: 165
- [41] Lee M Y, Stanimirović S, Douglas K A, et al. *ApJ*, 2012, 748: 75
- [42] Tan J C, Beltrán M T, Caselli P, et al. *Protostars and Planets VI*, Tucson: University of Arizona Press, 2014: 149
- [43] Hopkins P F, Narayanan D, Murray N, et al. *MNRAS*, 2013, 433: 69
- [44] Federrath C, Klessen R S. *ApJ*, 2013, 763: 51
- [45] Tchernyshyov K, Peek J E G. *AJ*, 2017, 153: 8
- [46] Hill A S, Cami J, Fissel L, et al. *Canadian Long Range Plan for Astronomy and Astrophysics White Papers*. Canada: LRP, 2020: 44
- [47] Zucker C, Schlafly E F, Speagle J S, et al. *ApJ*, 2018, 869(1): 83
- [48] Zasowski G, Finkbeiner D P, Green G M, et al. *BAAS*, 2019, 51(3): 314

- [49] Jóhannesson G, Porter T A, Moskalenko I V. *ApJ*, 2018, 856(1): 45
- [50] Tielens A G G M. *Reviews of Modern Physics*, 2013, 85: 1021
- [51] Kaufman M J, Wolfire M G, Hollenbach D J, et al. *ApJ*, 1999, 527(2): 795
- [52] Yamashita T, Komugi S, Matsuhara H, et al. *IAU*, 2015, 29: 2256489
- [53] Cormier D, Bigiel F, Jiménez-Donaire M J, et al. *MNRAS*, 2018, 475(3): 3909
- [54] Sánchez S F, Kennicutt R C, Gil de Paz A, et al. *A&A*, 2012, 538: A8
- [55] Bolatto A D, Wolfire M, Leroy A K. *ARA&A*, 2013, 51: 207
- [56] Young J S, Scoville N Z. *ARA&A*, 1991, 29: 581
- [57] Solomon P M, Downes D, Radford S J E, et al. *ApJ*, 1997, 478: 144
- [58] Genzel R, Tacconi L J, Gracia-Carpio J, et al. *MNRAS*, 2010, 407: 2091
- [59] Shetty R, Glover S C, Dullemond C P, et al. *MNRAS*, 2011, 415(4): 3253
- [60] Evans A S, Kim D C, Mazzarella J M, et al. *ApJ*, 1999, 521: L107
- [61] Shirley Y L, Evans N J, II, Young K E, et al. *ApJS*, 2003, 149: 375
- [62] Gao Y, Solomon P M. *ApJ*, 2004, 606: 271
- [63] Reiter M, Shirley Y L, Wu J, et al. *ApJS*, 2011, 195: 1
- [64] van der Tak F F S, van Dishoeck E F, Caselli P. *A&A*, 2000, 361: 327
- [65] Dalgarno A, Lepp S. *ApJ*, 1984, 287: L47
- [66] Zhang Z Y, Papadopoulos P P, Ivison R J, et al. *Royal Society Open Science*, 2016, 3(6): 160025
- [67] Leroy A K, Bolatto A, Gordon K, et al. *ApJ*, 2011, 737: 12
- [68] Shi Y, Wang J, Zhang Z Y, et al. *Nature Communications*, 2016, 7: 13789
- [69] Bertemes C, Wuyts S, Lutz D, et al. *MNRAS*, 2018, 478: 1442
- [70] Bakes E L O, Tielens A G G M. *ApJ*, 1994, 427: 822
- [71] Papoular R, Conrad J, Giuliano M, et al. *A&A*, 1989, 217: 204
- [72] Brandl B R, Devost D, Higdon S J U, et al. *ApJS*, 2004, 154: 188
- [73] Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. *AJ*, 2010, 140: 1868
- [74] Cortzen I, Garrett J, Magdis G, et al. *MNRAS*, 2019, 482: 1618
- [75] Ikeda M, Maezawa H, Ito T, et al. *ApJ*, 1999, 527(1): L59
- [76] Ikeda M, Oka T, Tatematsu K, et al. *ApJS*, 2002, 139(2): 467
- [77] Shimajiri Y, Sakai T, Tsukagoshi T, et al. *ApJ*, 2013, 774(2): L20
- [78] Jiao Q, Zhao Y, Zhu M, et al. *ApJ*, 2017, 840(2): L18
- [79] Yang C, Omont A, Beelen A, et al. *A&A*, 2017, 608: A144
- [80] Valentino F, Magdis G E, Daddi E, et al. *ApJ*, 2018, 869(1): 27
- [81] Bothwell M S, Aguirre J E, Aravena M, et al. *MNRAS*, 2017, 466(3): 2825
- [82] Jiao Q, Zhao Y, Lu N, et al. *ApJ*, 2019, 880(2): 133
- [83] Offner S S R, Bisbas T G, Bell T A, et al. *MNRAS*, 2014, 440: L81
- [84] Glover S C O, Clark P C, Micic M, et al. *MNRAS*, 2015, 448(2): 1607
- [85] Glover S C O, Clark P C. *MNRAS*, 2016, 456(4): 3596
- [86] Schrubba A, Leroy A K, Walter F, et al. *AJ*, 2012, 143: 138
- [87] Rémy-Ruyer A, Madden S C, Galliano F, et al. *A&A*, 2014, 563: A31
- [88] Wolfire M G, Hollenbach D, McKee C F. *ApJ*, 2010, 716: 1191
- [89] Grenier I A, Casandjian J M, Terrier R. *Science*, 2005, 307: 1292
- [90] Maloney P, Black J H. *ApJ*, 1988, 325: 389
- [91] Poglitsch A, Krabbe A, Madden S C, et al. *ApJ*, 1995, 454: 293
- [92] Bolatto A D, Jackson J M, Ingalls J G. *ApJ*, 1999, 513: 275
- [93] Röllig M, Ossenkopf V, Jeyakumar S, et al. *A&A*, 2006, 451: 917
- [94] Tielens A G G M, Hollenbach D. *ApJ*, 1985, 291: 722
- [95] Zanella A, Daddi E, Magdis G, et al. *MNRAS*, 2018, 481: 1976
- [96] Accurso G, Saintonge A, Catinella B, et al. *MNRAS*, 2017, 470: 4750
- [97] Accurso G, Saintonge A, Bisbas T G, et al. *MNRAS*, 2017, 464: 3315

- [98] Leroy A K, Walter F, Brinks E, et al. *AJ*, 2008, 136: 2782
- [99] Boselli A, Cortese L, Boquien M, et al. *A&A*, 2014, 564: A66
- [100] Saintonge A, Kauffmann G, Wang J, et al. *MNRAS*, 2011, 415: 61
- [101] Tacconi L J, Neri R, Genzel R, et al. *ApJ*, 2013, 768: 74
- [102] Krumholz M R, McKee C F, Tumlinson J. *ApJ*, 2008, 689: 865
- [103] Krumholz M R, McKee C F, Tumlinson J. *ApJ*, 2009, 693: 216
- [104] Lu Z, Mo H J, Lu Y. *MNRAS*, 2015, 450: 606
- [105] Brown T, Catinella B, Cortese L, et al. *MNRAS*, 2015, 452: 2479
- [106] Karim A, Schinnerer E, Martínez-Sansigre A, et al. *ApJ*, 2011, 730: 61
- [107] Davé R, Finlator K, Oppenheimer B D. *MNRAS*, 2012, 421: 98
- [108] Lilly S J, Carollo C M, Pipino A, et al. *ApJ*, 2013, 772: 119
- [109] Leroy A K, Walter F, Sandstrom K, et al. *AJ*, 2013, 146: 19
- [110] Shetty R, Kelly B C, Bigiel F. *MNRAS*, 2013, 430: 288
- [111] Kennicutt R C Jr., Calzetti D, Walter F, et al. *ApJ*, 2007, 671: 333
- [112] Schruba A, Leroy A K, Walter F, et al. *ApJ*, 2010, 722: 1699
- [113] Elmegreen B G. *ApJ*, 2018, 854(1): 16
- [114] Shi Y, Helou G, Yan L, et al. *ApJ*, 2011, 733(2): 87
- [115] Momose R, Koda J, Kennicutt R C, et al. 2013, 292: 335
- [116] Madau P, Dickinson M. *ARA&A*, 2014, 52: 415
- [117] Darvish B, Mobasher B, Sobral D, et al. *ApJ*, 2016, 825: 113
- [118] Dressler A, Gunn J E. *ApJ*, 1983, 270: 7
- [119] French K D, Yang Y, Zabludoff A, et al. *ApJ*, 2015, 801: 1
- [120] Rowlands K, Wild V, Nesvadba N, et al. *MNRAS*, 2015, 448(1): 258
- [121] French K D, Zabludoff A I, Yoon I, et al. *ApJ*, 2018, 861: 123
- [122] Nesvadba N P H, Boulanger F, Salomé P, et al. *A&A*, 2010, 521: A65
- [123] Guillard P, Boulanger F, Lehnert M D, et al. *A&A*, 2015, 574: A32
- [124] Yan R, Newman J A, Faber S M, et al. *ApJ*, 2006, 648: 281
- [125] Yang Y, Tremonti C A, Zabludoff A I, et al. *ApJ*, 2006, 646: L33
- [126] Dubois Y, Gavazzi R, Peirani S, et al. *MNRAS*, 2013, 433: 3297
- [127] Kauffmann G, Heckman T M, De Lucia G, et al. *MNRAS*, 2006, 367: 1394
- [128] Bell E F. *ApJ*, 2008, 682: 355
- [129] Martig M, Bournaud F, Teyssier R, et al. *ApJ*, 2009, 707: 250
- [130] Martig M, Crocker A F, Bournaud F, et al. *MNRAS*, 2013, 432: 1914
- [131] Lin L, Li C, He Y, et al. *ApJ*, 2017, 838: 105
- [132] Fang J J, Faber S M, Koo D C, et al. *ApJ*, 2013, 776: 63
- [133] Dressler A, Oemler A, Couch W J, et al. *ApJ*, 1997, 490: 577
- [134] Fumagalli M, Krumholz M R, Prochaska J X, et al. *ApJ*, 2009, 697: 1811
- [135] Zabel N, Davis T A, Smith M W L, et al. *MNRAS*, 2019, 483: 2251
- [136] Moore B, Lake G, Katz N. *ApJ*, 1998, 495: 139
- [137] Gunn J E, Gott J R, III. *ApJ*, 1972, 176: 1
- [138] Nulsen P E J. *MNRAS*, 1982, 198: 1007
- [139] Larson R B, Tinsley B M, Caldwell C N. *ApJ*, 1980, 237: 692
- [140] Boselli A, Cortese L, Boquien M, et al. *A&A*, 2014, 564: A67
- [141] Boselli A, Roehlly Y, Fossati M, et al. *A&A*, 2016, 596: A11
- [142] French K D, Arcavi I, Zabludoff A. *ApJ*, 2017, 835: 176
- [143] Guo R, Hao C N, Xia X Y, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, 16: 113
- [144] Sanders D B, Soifer B T, Elias J H, et al. *ApJ*, 1988, 325: 74
- [145] Borne K D, Bushouse H, Colina L, et al. *Ap&SS*, 1999, 266: 137
- [146] Moreno J, Torrey P, Ellison S L, et al. *MNRAS*, 2015, 448: 1107

- [147] Rodighiero G, Daddi E, Baronchelli I, et al. ApJ, 2011, 739: L40  
[148] Lacey C, Cole S. MNRAS, 1993, 262: 627  
[149] Moster B P, Macciò A V, Somerville R S, et al. MNRAS, 2010, 403: 1009  
[150] Michiyama T, Iono D, Nakanishi K, et al. PASJ, 2016, 68: 96  
[151] Xu C K, Shupe D L, Béthermin M, et al. ApJ, 2012, 760: 72

## Progress on the Study of Molecular Gas and Star Formation in Galaxies

GAO Yang<sup>1,2,3</sup>, XIAO Ting<sup>1,4</sup>

(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; 3. Purple Mountain Observatory, Key Lab. of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China; 4. Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Star formation is a process that gas cool, condense and form stars, and it plays a very important role in galaxy structure growth and evolution. Therefore it is important to study the molecular gas content, its relationship to star formation, and the physical processes that affect properties of galaxies, to have a complete picture of galaxy formation and evolution. With the advancement of observational technology (especially radio telescope), recently, there are more and more studies of molecular gas at various scales. This review gives a summary on recent progress: first we introduce various methods of tracing molecular gas and the new results; then review the molecular gas scaling relations from statistical studies, including molecular gas fraction and depletion time, based on observations of CO emission lines and dense gas tracers, and then compare them with theory of star formation on small scales; finally discuss how the morphology quenching, AGN feedback, and environment affect the molecular gas in galaxies and cease the star formation.

**Key words:** galaxy formation and evolution; ISM; star formation; molecular gas; galaxy morphology