河外星系恒星形成的物理规律探讨

高煜^{1,2*}

1. 厦门大学物理科学与技术学院天文学系, 厦门 361005;

2. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034

*联系人, E-mail: yugao@xmu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-11; 接受日期: 2021-01-05; 网络出版日期: 2021-02-01

国家自然科学基金(编号: 12033004, 11861131007, U1731237)和国家重点研发计划(编号: 2017YFA0402704)资助项目

摘要 冷气体($T < 20$ K)是星系中恒星形成(SF)的原料, 冷气体随引力塌缩成致密分子云核并最终将继续塌缩转变成SF到恒星, 而SF反馈又推动着星系的形成和演化. 详细了解气体的性质, 描绘SF和星系的物理关联以及SF对星系的反馈等, 是当今极为重要的关键研究. 本文主要总结了河外星系中SF的物理规律, 探讨了SF与冷气体的相关关系, 特别是随着对SF的进一步物理认识, 归纳了我们对SF与致密气体关系的系列相关研究, 从河外星系整体的研究到对近邻星系空间分解以及与银河系内致密云核的跨度10个数量级的关系; 甚至是对更高密度的致密气体, 从星系整体到近邻星系空间分解以及河内致密云核的跨度10个数量级的线性相关关系, 并指出在ALMA时代SF研究方向的未来发展前景. JCMT的大项目MALATANG提供了对极高密度致密分子气体在近邻星系中大规模分布和SF的认识, 了解在星系的中心和更广阔的漩涡盘区各种不同气体状态与致密分子气体和SF之间的物理关联, 以及SF和致密分子气体在不同物理尺度上的联系等. 随着ALMA/NOEMA的观测推进以及下一代望远镜的投入, 有望最终获得不论是遥远或近邻星系从分子云尺度到星系局部、整体各个不同物理尺度上对致密气体和SF的物理性质和规律、多谱线诊断和星系局部SF效率等前沿问题的突破性认识.

关键词 恒星形成, 分子气体, 河外星系, 亚毫米**PACS:** 97.10.Bt, 98.58.Db, 98.62.Ve, 95.85.Fm

1 引言

恒星形成是当代天体物理学研究的枢纽, 与行星系统的起源、星系的结构和演化以及宇宙重元素的形成都紧密相关. 然而很多关键问题, 如大质量恒星的形

成机制、近邻和遥远宇宙中恒星形成的异同、恒星形成的整体规律等都亟待解决. 过去十来年, 随着ALMA¹⁾时代的到来, 恒星形成领域有着越来越多的革命性的研究发现被揭示. 当然, 另一个在21世纪之初运转了近4年的Herschel红外空间望远镜²⁾已经为ALMA提供

1) <https://www.almaobservatory.org/en/home/>2) <https://www.herschel.caltech.edu/>**引用格式:** 高煜. 河外星系恒星形成的物理规律探讨. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 030013

Gao Y. Star formation laws in galaxies near and far (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 030013, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0459

了崭新的冷宇宙中恒星形成的宝贵数据, 这些归档数据仍然是未来研究所依据的主要资料库.

恒星形成是宇宙中最普遍、最重要的活动之一. 目前普遍认为恒星是在分子云中形成的, 研究分子云的物理性质以及探讨形成恒星的气体密度与恒星形成率(SFR)之间的关系(即恒星形成定律或Schmidt Law)^[1]势必是天文学最基本的研究课题之一. 观测研究星系分子气体的分布及其物理特性, 探究星系中的恒星形成定律有助于从整体上理解星系中恒星的形成, 进而了解星系的形成和演化. 星系整体上的SFR和气体之间的关系以及对星系盘平均后单位面积上的SFR和气体密度之间关系的统计研究也非常有意义. 通过这些关系, 我们有可能洞察到恒星形成历史及其在星系演化Hubble序列上的重要作用, 从而量化星系盘的一些物理性质和演化性质.

目前国际最先进的大型望远镜ALMA, 能够直接探测遥远和近邻星系中的恒星形成气体. 然而, 由于中国不是参与国成员, 所以很难开展系统性的大规模观测研究. 近年来, 在本课题组的积极努力推动下, 我国与JCMT³⁾和IRAM⁴⁾开展了合作并参与运行. 这将促进我们开展对宇宙各尺度上(从河内单个恒星到高红移星系)的恒星形成前沿研究, 同时为“中国南极昆仑站天文台”的科学目标的进一步凝练进行预研. 深入开展我们自己的望远镜设备上有关河外恒星形成规律的研究, 将提高我国在恒星形成研究领域的国际影响力.

2 星系整体的恒星形成定律

从Schmidt^[1]提出到现在已有广泛应用的SFR与气体密度遵守一个简单的幂率指数关系, 到Kennicutt^[2,3]对星系盘平均后得到的单位面积上SFR和气体面密度之间的幂率指数关系, 此即Kennicutt-Schmidt恒星形成定律(K-S定律). 长期以来该幂率指数的确定一直是备受争议的问题, 不同作者常得出不同的值. 一方面是由于对星系的SFR准确定标有待改进, 另一方面则有赖于对形成恒星的气体物理条件的认识. 目前广泛采用的测量SFR的方法是基于光学或紫外光度, 中、远红外(IR)光度, 射电连续谱光度或者光学复合线(Ha

发射线或[OII]禁线)强度. 事实上每一种方法都有其局限性, 如紫外和光学辐射都会受到不同程度的尘埃消光影响; 红外光度还包含了来自老年恒星加热的尘埃的贡献, 同时并不是所有电离光子或紫外光子都被尘埃吸收. 特别是当星暴和活动星系核(AGN)共生的情况下, 必须区分在宇宙演化的每一个阶段上恒星形成和AGN对总辐射的分别贡献. 所以, 寻找新的、更可靠的确定SFR的方法是尚待解决的问题^[4].

恒星形成星系的射电连续谱主要来自大质量恒星($\geq 8M_{\odot}$)的超新星遗迹加速相对论电子产生的非热同步加速辐射. 这些大质量恒星同时也加热周围的气体和尘埃电离HII区, 此外射电连续谱的发射基本上是光学薄、几乎不受尘埃消光的影响, 因此射电连续谱也是较好的定标SFR的选择. 例如, 利用VLA 20 cm波连续谱来作为SFR的标志, 结合高分辨率的CO图像, 在Arp 244 (天线星系^[5])和Taffy^[6]中得出SFR/CO比值, 即局域的恒星形成效率(SFE), 从而得知在碰撞星系之间的并合区有恒星形成效率极高的非常活跃的恒星形成区.

形成恒星的气体主要是分子云中稠密核区的高密度氢分子气体, 与中性氢原子气体(HI)及大部分氢分子气体(由CO来确定)无直接关系. 但是, 目前几乎所有有关星系中恒星形成定律的工作都是基于HI和CO而非高密度氢分子气体来测定. 这有其历史原因: Schmidt Law远在毫米波天文学诞生之前被提出; 自从20世纪70年代发现CO在2.6 mm的发射线后, 特别是21世纪最近十多年毫米波和红外天文的迅速发展, 天文学家逐渐认识到恒星是在分子云核中形成的. HCN分子可直接用来探测和度量正在形成恒星的高密度分子氢, 从而可以更好地用来描述星系的恒星形成定律. Gao和Solomon^[7]系统性地确定了远红外光度(定标SFR)和HCN(1-0)光度之间有很好的线性相关性(图1); 而与CO光度之间是非线性的且幂率指数并不唯一确定, 与星系样本有关. 不同星系样本中K-S关系的斜率变化只是反映了致密气体含量的不同. 结合有限的高红移HCN观测, SFR和HCN光度之间仍有非常好的线性相关(图1)^[8]. 对银河系稠密云核的HCN观测也显示这个关系能够延伸到分子云核^[9]. 因此, 星系和云核都

3) <https://www.eaobservatory.org/jcmt/>

4) <https://www.iram-institute.org/>

图 1 星系的 HCN(1-0) 光度和远红外光度的线性相关. 正常旋涡星系、亮红外和极亮红外星系以及高红移星系分别以空心圆圈、十字圆圈和实心圆标记. 实线表示对红外光度小于 10^{11} 太阳光度的星系数据进行的斜率固定为 1 的拟合^[8]

Figure 1 Correlation between HCN(1-0) and FIR luminosities in normal spirals (circles), local LIRGs and ULIRGs (circles with crosses), and high- z galaxies (solid circles). The solid line is the fit to the galaxies with $L_{\text{IR}} < 10^{11} L_{\odot}$ with a slope fixed at unity [8].

遵守同样的 SFR 与高密度分子气体 (HCN) 线性相关的恒星形成定律^[10].

近邻星系的 HCN 观测和 Spitzer/Herschel 远红外数据的比较可以填补从星系到分子云核间的空白间隙: 论证从分子云核大质量恒星形成的基本单元, 到星系中的恒星形成区和正在形成恒星的星系, 以及极亮红外星系、高红移星系横跨十几个量级的 SFR 与 HCN 是否线性相关, 从而完善恒星形成定律以及 SFR 与原子及分子气体或总气体之间的关系等研究工作.

最终完善恒星形成定律需要在众多星系中进行局部的 SFR 测量并确定同一区域的各种气体密度. Bigiel 等人^[11] 在 18 个近邻星系中定出单位面积上 SFR 和总气体面密度, 特别是分子氢气体的面密度之间基本上是线性关系, 而单位面积上 SFR 和原子氢气体面密度之间没有什么明显的相关性. 同时, 总气体面密度要在一个较高的临界气体密度之上时相关性才真正成立, 当密度低于这个临界阈值时, 单位面积上的 SFR 急剧下降, 基本上不再与总气体面密度相关. 当然, 该研究仍缺少星系中局域的高密度气体测量, 这需要在星系中进一步完成 HCN 成图观测后才能得到. Liu 等人^[12] 针对 181 个近邻星系的样本研究了星系尺度平均的

SFR 面密度与各种气体成分 (HI, H_2 , 总气体和致密分子气体) 之间的关系, 发现致密分子气体的面密度与 SFR 面密度关系最为紧密 (文献 [12] 中图 5), 幂指数为 $1.01(\pm 0.02)$. 进一步证明, 致密气体的恒星形成定律不仅与总光度即 SFR 相关, 而且与解除了距离简并的面密度同样相关. 致密气体面密度和恒星形成率面密度之间的关系是未来研究的一个方向, 特别是 ALMA 等设备使得更多星系致密气体空间分解的观测成为可能. 然而, 随着更进一步深度积分的高分辨率 HCN 以及其他致密气体分子探针如 HCO^+ 的观测发现, 尽管致密气体恒星形成定律比 K-S 定律更有可能代表着内秉的气体与恒星形成的物理联系, 但仍存在一定的不确定性和争议, 如星系核区和星系盘不同区域致密气体的 SFE 变化问题 (见第 3 节).

3 恒星形成规律: 遥远和近邻

3.1 最基本转动谱线 HCN/ HCO^+ $J=1-0$

近些年, 随着国际毫米波和亚毫米波望远镜设备的升级和发展, 星系中的致密分子气体的观测逐渐增多^[8,13-20]. 但是目前绝大部分观测仅限于星系整体尺度或者近邻星系的核区, 虽然高分辨的 ALMA 观测在增多, 但是几乎没有能覆盖星系整体大部分区域的高密度分子谱线测量, 而有较高分辨率的 (如百 pc 尺度) 对大样本星系整体的观测研究仍然非常少, 几乎是空白的.

利用 IRAM 30 m 望远镜对近邻旋涡星系 M51 进行的 HCN(1-0) 较高空间分辨观测, 覆盖范围达 $4' \times 5'$, 是迄今为止 M51 中最大的观测覆盖范围^[18]. 在 kpc 尺度上测量得到的 IR 光度与 HCN(1-0) 光度之间的相关性, 是星系整体尺度上 SFR 与致密气体质量关系的自然延伸. 通过比较 M51 中得到的 IR-HCN 关系与从银河系分子云到高红移星系尺度范围的 IR-HCN 关系, 在物理尺度上架起了巨分子云尺度与星系整体尺度之间的桥梁 (图 2)^[7-9,11,15,17,18,21-33].

对于表面亮度较低的星系盘区域, 相应的致密气体分子的观测还比较困难. 现有的研究均表明恒星形成与致密气体的含量具有紧密的联系, 然而对于观测得到的紧密相关性的确切物理本质, 尚不是很清楚. 更具体地说, 我们尚不清楚从小尺度的巨分子云一直到遥远的星暴星系, 不同类别星系不同的物理尺度,

图 2 (网络版彩图)不同类别星系(正常旋涡星系、不规则星系、亮红外和极亮红外星系以及高红移星系)在不同物理尺度(分子云团块、巨分子云、巨分子协、星系盘以及星系整体)下的HCN(1–0)光度与红外光度的相关. 更新图取自文献[7–9,11,15,17,18,21–33]

Figure 2 (Color online) Correlation between HCN(1–0) and IR luminosities for clumps in the Milky Way, giant molecular clouds in the Magellanic Clouds, giant molecular associations in nearby galaxies, a nearby galactic disk, and the whole galaxies. This plot is updated and taken from refs. [7–9,11,15,17,18,21–33].

其致密气体的SFE是否是恒定的.

基于银河系致密云核和红外亮星系的HCN观测研究发现IR–HCN光度的线性相关性跨越8个量级^[7,9,13], 图2中也显示了大小麦哲伦矮星系及M31和M33的观测, 暗示着星系致密气体的SFE很可能是普适恒定的^[33]. 然而, 最近的一些研究对此也提出争议. 对近邻极亮红外星系(ULIRGs)的HCN(1–0)观测发现, 这些星系的IR/HCN比值相比正常恒星形成星系高2–4倍^[7,15,28]. 另外, 对近邻星系的HCN(1–0)成图观测发现IR/HCN在星系的物理环境区域(如中心核区和星系盘)呈现变化^[17,18,20,34], 在低金属丰度星系(大多是矮星系)中HCN(1–0)要远比HCO⁺(1–0)弱几倍^[35], 一定程度上类似于银河系的非常边缘上的分子云的情况⁵⁾.

高红移星系的HCN/HCO⁺(1–0)观测自Gao等人^[8](图1)以来没有太大的变化, 因为目前为数不多的ALMA观测是更高阶($J \geq 3$)的转动谱线^[36]. 对于IR/HCN(1–0)比值在星系不同物理环境的变化, 目前也有一些研究给出了可能的解释. 一种解释认为这可能与不同物理环境中HCN分子的丰度有关. 例如, 在活动

星系核系中的大尺度X射线辐射驱动的化学过程以及受到激波加热的高温致密核区, 其HCN分子的丰度都会显著增加^[37,38]; 基于Orion A观测发现, HCN(1–0)所示踪的气体比典型的致密气体密度低, 相关的研究则提出HCN分子也有可能通过与电子碰撞激发辐射光子^[39]. 此外, 红外辐射抽运激发HCN分子发射以及HCN的自吸收等^[40–42]都被认为是有可能影响到IR/HCN(1–0)比值变化的一些原因. 因此, 利用不同分子探针进行多谱线诊断是目前该领域研究的重点之一.

3.2 高阶转动谱线HCNHCO⁺ $J=4-3$ (包括CO)

在观测上, 不同分子的物理化学性质不同, 因此可以示踪不同成分的分子气体. CO分子低转动能级跃迁($J \leq 2$)的碰撞激发临界密度相对较低(约300–1000 cm^{–3}), 能够很好地示踪总分子气体的含量. 除CO外, 一些示踪致密气体的探针分子($n(\text{H}_2) \geq 10^4 \text{ cm}^{-3}$; 如HCN, HCO⁺, CS等)同样也是通过碰撞激发辐射光子. 对于高转动能级(high- J)的致密气体探针分子, 由于其跃迁较少受到光子捕获的影响, 有效临界密度几乎不受柱密度的影响. 同时这些分子跃迁能够探测较高密度和相对较冷的云核, 这些云核正是恒星形成初始阶段所处的环境. 另一方面, 高转动能级($J \geq 4-5$) CO分子的激发则对高温、高密度的气体更敏感, 因此其示踪的气体主要是受恒星形成影响的结果, 而不一定是促使恒星形成的原因. 在分子云中, 当引力相比湍流和磁场占据主导作用时, 将引起分子云的坍塌和碎裂并最终形成恒星, 因此分子气体的密度和恒星形成之间存在内秉的物理联系是恒星形成研究所预期的^[43]. 通过使用不同分子的观测进行多谱线诊断, 可以深入了解恒星形成场所的物理状态, 并进一步探索气体密度如何影响恒星形成的过程.

利用APEX 12 m⁶⁾亚毫米波望远镜对20个近邻恒星形成星系进行的HCN(4–3), HCO⁺(4–3)和CS(7–6)多条分子谱线(示踪气体密度高达 10^6 cm^{-3})观测^[44], 分析发现这三条分子谱线的光度与红外光度之间均呈线性相关, 与HCN(1–0)和CS(5–4)分子的观测结果一致^[7,13,45]. 此外, 对银河系分子云、167个近邻星系(包括一些有空间分辨的观测)以及高红移恒星形成星系

5) Braine J, Sun Y, Shimajiri Y A, et al. Dense gas in the Outer Milky Way. *Astron Astrophys*, 2021, submitted

6) <http://www.apex-telescope.org/>

进行的大样本CO多转动能级($J=4-3-12-11$)谱线观测^[46], 结果发现所有探测到的9条高转动能级($J \geq 4$) CO分子谱线光度与远红外光度之间均呈紧密线性相关. 这些观测结果也与碰撞激发密度阈值理论预期基本一致, 即恒星形成率SFR大小主要与密度大于一定阈值(约 10^4 cm^{-3})的致密气体含量有关, 而与气体的总量和物理环境基本无关^[43,47]. 同时, 也有相关理论研究提出湍流调节恒星形成模型解释恒星形成定律^[48,49], 即恒星形成效率SFE与分子云的气体密度和云间湍流有关. 关于分子气体的物理状态和环境如何具体影响恒星形成过程, 目前仍存在一些争议, 也是有待深入研究的课题.

然而, 这些结果引出了新的科学问题: 星系不同物理环境的恒星形成模式是否不同? 如果不同, 又是什么物理量或物理机制起主导作用呢? 这些问题亟需更多不同物理状态的星系样本的观测数据来进行测试并验证相关的理论.

为了系统地研究星系局域小尺度致密气体的物理性质, 我们利用东亚天文台JCMT 15 m亚毫米波望远镜对一批近邻恒星形成星系进行了HCN(4-3)和 $\text{HCO}^+(4-3)$ 的成图观测(MALATANG巡天项目), 覆盖范围可达星系光学半径的约50%. MALATANG是目前国际上首次进行星系大样本系统性成图观测高转动能级致密分子的项目, 结合相关的分子、原子气体数据以及射电连续谱、红外光谱以及X射线辐射等多波段数据, 这将为恒星形成的相关研究, 如致密分子气体激发、恒星形成及其反馈, 尤其是致密气体与恒星形成定律的研究, 提供一个非常独特的观测数据资料库.

MALATANG巡天一期观测花费近400 h对22个星系进行了HCN(4-3)和 $\text{HCO}^+(4-3)$ 观测. 结果表明, 在部分已观测星系中, 两条高阶谱线的发射比预期的要弱, HCN(4-3)/HCN(1-0)比值在星系之间存在较大的弥散, 不同星系的不同区域之间也存在较大的弥散⁷⁾. 对6个星系中心2角分区域全采样成图观测的星系数据分析发现, 在亚kpc尺度上同样遵循线性 $L_{\text{IR}}-L'_{\text{dense}}$ 关系, 尽管星系内部不同区域也存在系统的变化(如文献[50]中图6). 另外, NGC 253无论在致密气体含量还是恒星形成效率上都有显著的变化, 这表明高转动能级致密

分子谱线对已有恒星成分的不敏感, 可能是更好的恒星形成气体的示踪者(如文献[51]中图11).

图3显示了不同类别星系在不同物理尺度下的HCN(4-3)光度和红外光度的关系, 这里MALATANG数据很好地衔接了银河系分子云团和河外星系整体的研究, 填补了致密气体与恒星形成关系在亚kpc物理尺度的空白. MALATANG项目二期将继续扩大观测样本, 补充更多的观测数据, 特别是对EMPIRE巡天星系^[20]的全面覆盖.

4 恒星形成规律研究的未来

目前仅有很少的星系有高分辨率的HCN/ HCO^+ 数据, 特别是高阶转动的分子谱线数据. 少数的ALMA高阶转动分子谱线对ULIRGs的观测尚未取得更高的空间分辨与灵敏度, 已列举在图3中. 将来更多在ALMA上的观测必将对既有AGN又有星暴的星系进行高空间分辨率的HCN等多谱线观测, 已有的如近邻的AGN和星暴混合体NGC 1068的系列工作^[52-55].

大型毫米波阵ALMA和NOEMA⁸⁾仍是观测研究星系中的恒星形成的最主要望远镜, 还可试图对AGN和星暴的贡献进行区分. 进行较大样本的高分辨率HCN等谱线观测仍然非常困难, 成本很高, 需要大量望远镜的观测时间. 目前, 只有ALMA大项目PHANGS(<http://www.phangs.org>)正在进行着好几十个近邻星系的CO(2-1)及该谱线频段附近的相关分子谱线的观测研究, 而致密气体的观测仍是不多的十来个性系的个例研究. NOEMA近期正在进行的大型观测项目, 对近邻星系M51的3 mm波段谱线成图观测, 将覆盖CO和多条致密分子谱线. 另外, ALMA对高红移星系也进行了一系列的毫米波和亚毫米波谱线(如CO和[CII])巡天观测^[56,57], 同时VLA射电阵也在进行深场低阶($J \leq 2$) CO的巡天观测^[58], 而高红移星系的致密气体观测目前则仍很匮乏^[59,60]. 进行大样本的系统性致密气体观测需要等到下一代大型(亚)毫米波单镜望远镜(口径在30-60 m, 可能在未来5-10年后实现).

更为重要的是, 需要通过利用更多的分子谱线探针来获得较全面的星系中恒星形成区的高密度气体性

7) Zhang Z, et al., in preparation

8) <https://www.iram-institute.org/EN/noema-project.php>

图 3 (网络版彩图) 不同类别星系在不同物理尺度下的 HCN(4–3) 光度与红外光度的相关. 银河系分子云团块(菱形)数据取自文献[61]; 分辨至亚kiloparsec物理尺度的MALATANG星系(蓝色圆圈)数据取自文献[50,51]; 近邻恒星形成星系(黑色圆圈)数据取自文献[44]; 亮红外和极亮红外星系(方形)数据取自文献[44,62–64]; 高红移类星体(叉形)数据取自文献[65,66]. 实线表示对数据点的最佳拟合关系: $\log L_{\text{IR}} = 1.02(\pm 0.01) \log L'_{\text{HCN}(4-3)} + 3.58$. 小图显示贝叶斯拟合得到的斜率的概率分布. 斯皮尔曼等级相关分析得出相关系数为0.95

Figure 3 (Color online) Correlation between HCN(4–3) and IR luminosities for Galactic clumps (circles; data taken from ref. [61]), MALATANG sources resolved at sub-kiloparsec scales (blue circles; data taken from refs. [50,51]), nearby star-forming galaxies (black circles; data taken from ref. [44]), local LIRGs and ULIRGs (squares; data taken from refs. [44,62–64]), and high- z quasars (crosses; data taken from refs. [65,66]). The solid line represents the best-fit relation of $\log L_{\text{IR}} = 1.02(\pm 0.01) \log L'_{\text{HCN}(4-3)} + 3.58$. The probability density distribution of the slope derived from the Bayesian fitting is shown in the inset panel. A Spearman rank correlation analysis yields a correlation coefficient of 0.95.

质, 结合其他多波段数据和理论模型计算从而较精确地确定高密度气体质量. 目前除HCN之外, 用的比较多的还有CO高转动($J>3$)谱线、HNC, HCO^+ , CS以及CN等高偶极矩分子来作为致密分子气体的探针. 另外, 对SFR的更加准确的定标, 也是下一代大型望远镜的首要科学目标.

5 总结

虽然传统的K-S关系^[3,12]甚至延展的K-S关系^[67]中有中性氢气体HI, 但这仅提供了丰富的气体库存. 我们知道分子云才是恒星诞生的原材料, 弥漫的HI只能在一定的条件下转换为分子气体并进一步塌缩为致密的分子云核才能孕育恒星形成.

因此, 研究不同相位的星际介质气体的性质及它们之间的关系以及不同气体状态的转变, 进而建立其与恒星形成率SFR之间的联系, 特别是分子气体、致密气体和SFR的关系; 寻找近邻和高红移宇宙星系中的恒星形成规律, 是理解恒星形成和星系形成和演化的关键.

我国的FAST望远镜必将在近邻星系的HI巡天上得到大批星系的中性氢数据, 但是得到相应星系的分子氢气体的数据还是很困难且遥远的任务, 更不用说致密分子气体了. 我国目前仅有13.7 m的毫米波望远镜, 其灵敏度还达不到系统观测近邻星系的分子气体的程度, 在亚毫米波段的河外观测目前也基本上是空白. 因此, 南极Dome-A 5 m太赫兹望远镜将是我们在该波段进行河外星系观测的唯一利器.

随着ALMA阵列的全面运作, 其空前的灵敏度和空间分辨率标志着天文研究新时代的到来. 未来SKA⁹⁾阵列强大的信号收集能力以及下一代VLA (ngVLA)¹⁰⁾望远镜设备的建设和升级, 将使高红移星系致密气体(例如CS/HCN/HNC/HCO⁺ $J=1-0$ 分子探针等)的大规模探测变成可能. 与此同时, JWST空间望远镜¹¹⁾也将提供空间分辨率匹配的中红外图像, 更好地定标星系局域SFR的大小. 当然, SKA射电连续谱的高灵敏高分辨观测也可以用来对星系局域的SFR的定标. 这些观测研究都将极大地推动我们对星系中的恒星形成、星际介质物理状态以及恒星形成定律等有更好的认识.

致谢 该文的准备得到了紫金山天文台的谈清华博士对图3的更新以及相关文字的整理, 紫金山天文台的马红君女士以及现在在南非Capetown大学的陈昊博士也分别对整理参考文献和图2给予了大力的帮助. 同时感谢对JCMT大项目

9) <https://www.skatelescope.org/>

10) <https://ngvla.nrao.edu/>

11) <https://www.jwst.nasa.gov/>

MALATANG积极贡献的主要成员和所有相关成员, 特别是谈清华和现在在东亚天文台JCMT望远镜的蒋雪健博士. 另外, 对文中引述提到的相关工作的学生与合作者, 在此一并致谢.

参考文献

- Schmidt M. The rate of star formation. *Astrophys J*, 1959, 129: 243
- Kennicutt RC Jr. The star formation law in galactic disks. *Astrophys J*, 1989, 344: 685
- Kennicutt RC Jr. The global schmidt law in star-forming galaxies. *Astrophys J*, 1998, 498: 541–552, arXiv: [astro-ph/9712213](#)
- Kennicutt RC Jr., Hao C N, Calzetti D, et al. Dust-corrected star formation rates of galaxies. I. Combinations of H α and infrared tracers. *Astrophys J*, 2009, 703: 1672–1695, arXiv: [0908.0203](#)
- Gao Y, Lo K Y, Lee S W, et al. Molecular gas and the modest star formation efficiency in the “Antennae” galaxies: Arp 244 = NGC 4038/9. *Astrophys J*, 2001, 548: 172–189, arXiv: [astro-ph/0010128](#)
- Gao Y, Zhu M, Seaquist E R. Star formation across the Taffy bridge: UGC 12914/15. *Astrophys J*, 2003, 126: 2171–2184, arXiv: [astro-ph/0307490](#)
- Gao Y, Solomon P M. The star formation rate and dense molecular gas in galaxies. *Astrophys J*, 2004, 606: 271–290, arXiv: [astro-ph/0310339](#)
- Gao Y, Carilli C L, Solomon P M, et al. HCN observations of dense star-forming gas in high-redshift galaxies. *Astrophys J*, 2007, 660: L93–L96, arXiv: [astro-ph/0703548](#)
- Wu J, Evans Neal J I, Gao Y, et al. Connecting dense gas tracers of star formation in our galaxy to high- z star formation. *Astrophys J*, 2005, 635: L173–L176, arXiv: [astro-ph/0511424](#)
- Gao Y. Starbursts near and far. *Nature*, 2008, 452: 417–419, arXiv: [1003.3503](#)
- Bigiel F, Leroy A, Walter F, et al. The star formation law in nearby galaxies on sub-kpc scales. *Astron J*, 2008, 136: 2846–2871, arXiv: [0810.2541](#)
- Liu L, Gao Y, Greve T R. The global star formation laws of galaxies from a radio continuum perspective. *Astrophys J*, 2015, 805: 31, arXiv: [1502.08001](#)
- Gao Y, Solomon P M. HCN Survey of normal spiral, infrared-luminous, and ultraluminous galaxies. *Astrophys J Suppl S*, 2004, 152: 63–80, arXiv: [astro-ph/0310341](#)
- Baan W A, Henkel C, Loenen A F, et al. Dense gas in luminous infrared galaxies. *Astron Astrophys*, 2008, 477: 747–762
- García-Burillo S, Usero A, Alonso-Herrero A, et al. Star-formation laws in luminous infrared galaxies. *Astron Astrophys*, 2012, 539: A8, arXiv: [1111.6773](#)
- Zhang Z Y, Gao Y, Henkel C, et al. Dense gas tracers and star formation laws in active galaxies: APEX survey of HCN $J=4 \rightarrow 3$, HCO $^+$ $J=4 \rightarrow 3$, and CS $J=7 \rightarrow 6$. *Astrophys J*, 2014, 784: L31, arXiv: [1402.1039](#)
- Usero A, Leroy A K, Walter F, et al. Variations in the star formation efficiency of the dense molecular gas across the disks of star-forming galaxies. *Astrophys J*, 2015, 150: 115, arXiv: [1506.00703](#)
- Chen H, Gao Y, Braine J, et al. Spatially resolved dense molecular gas and star formation rate in M51. *Astrophys J*, 2015, 810: 140, arXiv: [1507.08506](#)
- Bigiel F, Leroy A K, Jiménez-Donaire M J, et al. The EMPIRE survey: Systematic variations in the dense gas fraction and star formation efficiency from full-disk mapping of M51. *Astrophys J*, 2016, 822: L26, arXiv: [1604.05316](#)
- Jiménez-Donaire M J, Bigiel F, Leroy A K, et al. EMPIRE: The IRAM 30 m dense gas survey of nearby galaxies. *Astrophys J*, 2019, 880: 127, arXiv: [1906.08779](#)
- Chen H, Braine J, Gao Y, et al. Dense gas in the outer spiral arm of M51. *Astrophys J*, 2017, 836: 101, arXiv: [1612.00459](#)
- Bigiel F, Leroy A K, Blitz L, et al. Dense gas fraction and star formation efficiency variations in the antennae galaxies. *Astrophys J*, 2015, 815: 103, arXiv: [1510.05680](#)
- Brouillet N, Muller S, Herpin F, et al. HCN and HCO $^+$ emission in the disk of M31. *Astron Astrophys*, 2005, 429: 153–159
- Buchbender C, Kramer C, Gonzalez-Garcia M, et al. Dense gas in M 33 (HerM33es). *Astron Astrophys*, 2013, 549: A17, arXiv: [1210.3263](#)
- Evans N J, Kim K T, Wu J, et al. Star formation occurs in dense gas, but what does “Dense” mean? *Astrophys J*, 2020, 894: 103, arXiv: [2004.06631](#)

- 26 Chin Y N, Henkel C, Whiteoak J B, et al. Molecular abundances in the Magellanic Clouds. *Astron Astrophys*, 1997, 317: 548
- 27 Chin Y N, Henkel C, Millar T J, et al. Molecular abundances in the Magellanic Clouds. III. LIRS36, a star-forming region in the Small Magellanic Cloud. *Astron Astrophys*, 1998, 330: 901
- 28 Graciá-Carpio J, García-Burillo S, Planesas P, et al. Evidence of enhanced star formation efficiency in luminous and ultraluminous infrared galaxies. *Astron Astrophys*, 2008, 479: 703–717
- 29 Juneau S, Narayanan D T, Moustakas J, et al. Enhanced dense gas fraction in ultraluminous infrared galaxies. *Astrophys J*, 2009, 707: 1217–1232, arXiv: [0911.0413](#)
- 30 Privon G C, Herrero-Illana R, Evans A S, et al. Excitation mechanisms for HCN(1–0) and HCO⁺(1–0) in galaxies from the great observatories all-sky lrg survey. *Astrophys J*, 2015, 814: 39, arXiv: [1509.07512](#)
- 31 Krips M, Neri R, García-Burillo S, et al. A multi-transition HCN and HCO⁺ study of 12 nearby active galaxies: Active galactic nucleus versus starburst environments. *Astrophys J*, 2008, 677: 262–275, arXiv: [0712.0319](#)
- 32 Kepley A A, Leroy A K, Frayer D, et al. The green bank telescope maps the dense, star-forming gas in the nearby starburst galaxy M82. *Astrophys J*, 2014, 780: L13, arXiv: [1312.1595](#)
- 33 Shimajiri Y, André P, Braine J, et al. Testing the universality of the star-formation efficiency in dense molecular gas. *Astron Astrophys*, 2017, 604: A74, arXiv: [1705.00213](#)
- 34 Rosolowsky E, Pineda J E, Gao Y. Minimal HCN emission from molecular clouds in M33. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 415: 1977–1984, arXiv: [1104.3935](#)
- 35 Braine J, Shimajiri Y, André P, et al. Dense gas in low-metallicity galaxies. *Astron Astrophys*, 2017, 597: A44, arXiv: [1612.02196](#)
- 36 Oteo I, Zhang Z Y, Yang C, et al. High dense gas fraction in intensely star-forming dusty galaxies. *Astrophys J*, 2017, 850: 170, arXiv: [1701.05901](#)
- 37 Lepp S, Dalgarno A. X-ray-induced chemistry of interstellar clouds. *Astron Astrophys*, 1996, 306: 21
- 38 Kohno K, Matsushita S, Vila-Vilaró B, et al. Dense molecular gas and star formation in nearby seyfert galaxies. In: *Proceedings of the Central Kiloparsec of Starbursts and AGN: The La Palma Connection*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2001. 672
- 39 Kauffmann J, Goldsmith P F, Melnick Gary, et al. Molecular line emission as a tool for galaxy observations (LEGO). I. HCN as a tracer of moderate gas densities in molecular clouds and galaxies. *Astron Astrophys*, 2017, 605: 5, arXiv: [1707.05352v1 astro-ph.GA](#)
- 40 Graciá-Carpio J, García-Burillo S, Planesas P, et al. Is HCN a true tracer of dense molecular gas in luminous and ultraluminous infrared galaxies? *Astrophys J*, 2006, 640: L135–L138, arXiv: [astro-ph/0602339](#)
- 41 Aalto S, Martín S, Costagliola F, et al. Probing highly obscured, self-absorbed galaxy nuclei with vibrationally excited HCN. *Astron Astrophys*, 2015, 584: A42, arXiv: [1504.06824](#)
- 42 Mills E A C, Battersby C. Origins of scatter in the relationship between HCN 1–0 and dense gas mass in the galactic center. *Astrophys J*, 2017, 835: 76, arXiv: [1701.04822](#)
- 43 Lada C J, Forbrich J, Lombardi M, et al. Star formation rates in molecular clouds and the nature of the extragalactic scaling relations. *Astrophys J*, 2012, 745: 190, arXiv: [1112.4466](#)
- 44 Zhang Z Y, Henkel C, Gao Y, et al. Physical conditions of molecular gas in the Circinus galaxy multi-*J* CO and CI³ PP₀ observations. *Astron Astrophys*, 2014, 568: A122, arXiv: [1407.1444](#)
- 45 Wang J, Zhang Z, Shi Y. CS (5–4) survey towards nearby infrared bright galaxies. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2011, 416: L21–L25, arXiv: [1106.2873](#)
- 46 Liu D, Gao Y, Isaak K, et al. High-*J* CO versus far-infrared relations in normal and starburst galaxies. *Astrophys J*, 2015, 810: L14, arXiv: [1504.05897](#)
- 47 Lada C J, Lombardi M, Alves J F. On the star formation rates in molecular clouds. *Astrophys J*, 2010, 724: 687–693, arXiv: [1009.2985](#)
- 48 Krumholz M R, McKee C F. A general theory of turbulence-regulated star formation, from spirals to ultraluminous infrared galaxies. *Astrophys J*, 2005, 630: 250–268, arXiv: [astro-ph/0505177](#)
- 49 Krumholz M R, Thompson T A. The relationship between molecular gas tracers and Kennicutt-Schmidt laws. *Astrophys J*, 2007, 669: 289–298, arXiv: [0704.0792](#)
- 50 Tan Q H, Gao Y, Zhang Z Y, et al. The MALATANG Survey: The $L_{\text{GAS}}-L_{\text{IR}}$ correlation on sub-kiloparsec scale in six nearby star-forming galaxies as traced by HCN $J=4\rightarrow 3$ and HCO⁺ $J=4\rightarrow 3$. *Astrophys J*, 2018, 860: 165, arXiv: [1805.05619](#)

- 51 Jiang X J, Greve T R, Gao Y, et al. The MALATANG survey: Dense gas and star formation from high-transition HCN and HCO^+ maps of NGC 253. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 494: 1276–1296, arXiv: [2003.06595](#)
- 52 García-Burillo S, Combes F, Usero A, et al. Molecular line emission in NGC 1068 imaged with ALMA. *Astron Astrophys*, 2014, 567: A125, arXiv: [1405.7706](#)
- 53 Viti S, García-Burillo S, Fuente A, et al. Molecular line emission in NGC 1068 imaged with ALMA. *Astron Astrophys*, 2014, 570: A28, arXiv: [1407.4940](#)
- 54 García-Burillo S, Combes F, Ramos Almeida C, et al. ALMA images the many faces of the NGC 1068 torus and its surroundings. *Astron Astrophys*, 2019, 632: A61, arXiv: [1909.00675](#)
- 55 Imanishi M, Nguyen D D, Wada K, et al. ALMA 0."02 resolution observations reveal HCN-abundance-enhanced counter-rotating and outflowing dense molecular gas at the NGC 1068 nucleus. *Astrophys J*, 2020, 902: 99, arXiv: [2008.08101](#)
- 56 Walter F, Decarli R, Aravena M, et al. ALMA spectroscopic survey in the hubble ultra deep field: Survey description. *Astrophys J*, 2016, 833: 67, arXiv: [1607.06768](#)
- 57 Birkin J, Weiss A, Wardlow J, et al. An ALMA/NOEMA survey of the molecular gas properties of high-redshift star-forming galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2021, 501: 3926, arXiv: [2009.03341](#)
- 58 Dominik M, Bachelet E, Bozza V, et al. OGLE-2014-BLG-1186: Gravitational microlensing providing evidence for a planet orbiting the foreground star or for a close binary source? *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 484: 5608D
- 59 Hodge J A, da Cunha E. High-redshift star formation in the Atacama large millimetre/submillimetre array era. *R Soc Open Sci*, 2020, 7: 200556, arXiv: [2004.00934](#)
- 60 Tacconi L J, Genzel R, Sternberg A. The evolution of the star-forming interstellar medium across cosmic time. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2020, 58: 157–203, arXiv: [2003.06245](#)
- 61 Liu T, Kim K T, Yoo H, et al. Star formation laws in both galactic massive clumps and external galaxies: Extensive study with dust continuum, $\text{HCN}(4-3)$, and $\text{CS}(7-6)$. *Astrophys J*, 2016, 829: 59, arXiv: [1605.08979](#)
- 62 Imanishi M, Nakanishi K. ALMA detection of the vibrationally excited HCN $J=4-3$ emission line in the AGN-hosting luminous infrared galaxy IRAS 20551–4250. *Astrophys J*, 2013, 146: 91, arXiv: [1308.4414](#)
- 63 Imanishi M, Nakanishi K. ALMA observations of nearby luminous infrared galaxies with various AGN energetic contributions using dense gas tracers. *Astrophys J*, 2014, 148: 9, arXiv: [1404.6597](#)
- 64 Imanishi M, Nakanishi K, Izumi T. ALMA multiple-transition observations of high-density molecular tracers in ultraluminous infrared galaxies. *Astrophys J*, 2018, 856: 143, arXiv: [1803.02408](#)
- 65 Barvainis R, Maloney P, Antonucci R, et al. Multiple CO transitions, CI, and HCN from the Cloverleaf Quasar. *Astrophys J*, 1997, 484: 695–701, arXiv: [astro-ph/9702118](#)
- 66 Riechers D A, Weiß A, Walter F, et al. Dense molecular gas excitation in nuclear starbursts at high redshift: HCN, HNC, and $\text{HCO}^+(J=6-5)$ emission in the $z=3.91$ quasar host of APM 08279+5255. *Astrophys J*, 2010, 725: 1032–1039, arXiv: [1010.2485](#)
- 67 Shi Y, Yan L, Arm L, et al. Revisiting the extended Schmidt Law: The important role of existing stars in regulating star formation. *Astrophys J*, 2018, 853: 149

Star formation laws in galaxies near and far

GAO Yu^{1,2*}

¹ *Department of Astronomy, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;*

² *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China*

Cold gas is the raw material for star formation (SF) in galaxies. Owing to gravitational force, cold gas collapses into dense molecular cloud cores and will eventually continue to collapse and transform into stars. Moreover, SF feedback drives the formation and evolution of galaxies. A detailed understanding of the properties of molecular gas, the description of the physical relationship between SF and galaxies, and SF feedback in galaxies are extremely important studies today. Herein, we only summarize the physical laws of SF in extragalactic galaxies and discuss the relationship between SF and cold gas. In particular, with further physical understanding of star formation, we will summarize our series of related studies on the relationship between SF and dense molecular gas. From the overall global study of entire galaxies, distant external galaxies, and the spatially resolved decomposition of nearby galaxies down to the Galactic dense cloud cores, the linear relationship is valid with a span of 10 orders of magnitude. At even higher densities traced by higher- J rotation ladders of dense gas tracers, this 10-orders-of-magnitude correlation is again tightly maintained from entire galaxies to the spatial decomposition of the denser gas in nearby galaxies, spanning further with the Galactic dense cloud cores. We further discuss future development prospects of this research direction in the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) era. The James Clerk Maxwell Telescope large project MALATANG provides an understanding of the large-scale distribution of extremely dense and warm molecular gas in nearby galaxies and probes the relationships among the various gas phases, the dense molecular gas, and SF in the centers of the galaxies and most of the inner spiral disks, ultimately elucidating the physical connection in the relationship between SF and dense molecular gas on different physical scales. With the advancement of ALMA/Northern Extended Millimeter Array observations and the investment in next-generation telescopes, we expect to finally obtain the physical properties and laws of dense molecular gas and SF on different physical scales, from the molecular cloud scale to different regions in galaxies (distant and/or nearby galaxies). Eventually, a breakthrough understanding of contemporary issues, such as multispectral diagnosis and local SF efficiency of galaxies, will be in sight.

star formation, molecular gas, galaxies, submillimeter

PACS: 97.10.Bt, 98.58.Db, 98.62.Ve, 95.85.Fm

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0459](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0459)