

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.01.01

# 恒星形成定律的研究现状

张超<sup>1 2 3</sup>

(1. 太原师范学院, 山西太原 030619 2. 太原师范学院计算与应用物理研究所, 山西晋中 030619 3. 太原师范学院智能优化计算与区块链技术山西省重点实验室, 山西晋中 030619)

**摘要:** 分子云的物理环境对恒星的形成的速率有重要的影响, 而了解恒星形成对行星的形成和星系的演化有很大帮助。主要回顾了近二十年, 银河系及其近邻星系中恒星形成与气体之间的关系 (即恒星形成定律), 希望可以更好地了解恒星形成的本质, 认识恒星形成与气体之间的关系以及恒星是否在以统一的方式形成。介绍了星际介质的组分与测量星际介质密度和恒星形成率的方法。重点综述了从星系尺度到分子云尺度致密气体与恒星形成率之间的关系, 并对恒星形成定律的研究进行了总结和展望。

**关键词:** 恒星形成定律; 大质量恒星形成; 恒星形成效率

**中图分类号:** P152 **文献标识码:** A

## 1 引 言

恒星形成的研究涉及了恒星起源和行星起源两个基本问题, 同时也将星系形成和演化连接起来。天文学家们试图从多种物理尺度上了解恒星形成活动: 从银河系内的单个分子云, 到整个星系尺度甚至到宇宙大尺度结构。恒星什么时候、在哪里、以怎样的方式形成一直困扰着天文学家。施密特在 1959 年第一次用定量测量的手段发现星际介质中的中性氢 (HI) 云与恒星形成速率有很强的相关关系, 表明了恒星可能是在气体中形成的<sup>[1]</sup>。随后人们发现氢原子示踪的原子气体的密度较小、温度较高, 在星系尺度上是被内部热压力所主导, 不完全由引力束缚<sup>[2]</sup>。随着研究的深入, 人们发现原子气体与恒星形成没有什么直接的关系, 由氢原子气体冷却变成 H<sub>2</sub> 分子的云团即分子云才是形成恒星的温床。研究表明并不是所有的分子云都会形成恒星, 只有极少的高密度的分子团块可以和恒星形成直接联系起来<sup>[3]</sup>。当分子云密度在局部增高, 就会对周围的气体产生更强的引力, 使得更多周围的气体聚集过来。1-10pc 的分子云首先会通过碎裂形成纤维状结构。这些纤维状结构不断收到湍流和磁场的挤压碰撞等作用, 和分子云自身的引力之间存在微妙的平衡。当这种平衡态被打破时, 例如

: 2012-08-07 ; : 2012-11-29

: 张超, zhangchao920610@126.com

分子云的质量超过金斯质量，引力占据主导地位，引发分子云开始塌缩，形成一颗或者多颗恒星。塌缩时分子云的引力能转化成热能，分子云的温度升高，直至达到氢-氦核聚变点燃的温度，新的恒星就形成了。虽然已经知道了恒星形成的一些物理机制，但是还有很多问题没有解决。如：大质量恒星是通过并和还是吸积形成的？分子云塌缩之前不仅受到引力的影响，其内部还有磁场和湍流支撑着，磁场和湍流的分布是怎样的，产生机制是什么？分子云内部的物质也不是均匀的而是有很多纤维结构构成，这些纤维结构有什么特点，与恒星形成有什么联系？气体密度与恒星形成有什么具体关系，与恒星形成效率有什么关系？等等。

分子云的物理环境和几何结构都会影响恒星形成的初始条件，为了解决这些问题，都要充分了解分子云的物理性质（如：密度、温度、元素丰度等）。分子云的性质也不是一成不变的，从宏观角度看，恒星内部的核反应为星系提供了能量来源，同时恒星的死亡又为星系提供了金属元素和尘埃，超新星爆发所产生的超星风能物质抛洒至星际空间。剧烈的恒星形成、超新星爆发、活动星系核、大尺度激波都会对分子云的物理性质产生巨大影响。银河系曾发生过并合<sup>[4]</sup>和星暴活动<sup>[5]</sup>，想要了解银河系的早期，可以通过研究近邻星系中的物理环境对恒星形成的影响。而研究高红移星系可以了解宇宙早期的性质，由于高红移星系距离太远，辐射不容易被探测到，因此，研究近邻星系可以为高红移星系研究提供理想的模板。因此回顾了近二十年从星系尺度到分子云尺度的气体面密度与恒星形成率的关系，即（K-S 定律），希望了解恒星形成与气体面密度之间的联系以及恒星是否在以统一的方式形成。第二章介绍星际介质的分类和测量气体面密度的各类探针。第三章介绍恒星形成率及其探针。第四章讨论银河系及近邻星系中的恒星形成与气体之间的关系并进行了简单的总结和展望。

## 2 星际介质

### 2.1 星际介质的组分

在浩瀚的宇宙中存在着大量的星际介质。星际介质包含尘埃和气体，其物理结构尺度跨度很大，从星际间介质（Mpc）到冷中性介质（kpc），到分子云（约 10-100pc），到分子云碎裂、塌缩形成更致密的团块（如 clump，约 1pc）和分子云核（约 0.1pc），直至分子云核继续塌缩形成恒星（ $R_{\odot}$ ）和行星（约 AU）。在银河系中，将近一半的银河系体积被热电离介质（HIM）充满，其密度小于  $0.01 \text{ cm}^{-3}$ ，温度大于  $10^5 \text{ K}$ 。剩下近一半的气体由温暖电离的介质（WIM）和温暖中性的介质（WNM）构成，密度范围约在  $0.1-1 \text{ cm}^{-3}$  之间，温度约为几千 K<sup>[6]</sup>。其余很少的一部分气体是冷中性介质（CNM），其密度大于  $10 \text{ cm}^{-3}$ ，温度小于  $100 \text{ K}$ <sup>[7]</sup>，分子云作为其中最冷的最致密的冷中性介质才是孕育恒星的温床<sup>[2]</sup>。分子云作为孕育恒星的温床，它的边界通常是由检测到的超过某个阈值的 CO 的低旋转跃迁发射来定义的。或者，也可以使用背景恒星的一定程度的消光来定义。例如通过消光测量得到的表面密度的概率分布函数，对于低消光值，即  $A_V \leq 2 - 5 \text{ mag}$ ，可以拟合到一个对数正态函数（Lombardi 等人，2010 年）。而对于更高的消光值，至少在一些分子云中，其尾部则遵循幂律分布。实际上，正是那些具有幂律尾部的分子云中存在着活跃的恒星形成活动（Kainulainen

等人, 2009 年)。在复杂的区域, 视向速度可以用来区分沿视线方向上不同距离的分子云。然而, 分子云被原子包层包围, 并存在一个过渡区域, 在该区域中氢主要是分子态的, 而碳主要是原子态的<sup>[8]</sup>。这些区域被称为 PDRs, 代表光解离区域 (Photo-Dissociation Regions) 或光主导区域 (Photon-Dominated Regions)<sup>[9]</sup>。分子云内部有很多的纤维结构, 纤维结构上有很多致密的云核 (core), 云核的质量对分子云较小但是密度很高, 这些云核可能会形成单星、双星、多星甚至小型的星团。理论上除了定义单个恒星诞生的地方为云核外还需要一个术语来表示单个星团 (star cluster) 诞生的地方, 于是 Williams 等人提出用 Clump 表示单个星团诞生的地方<sup>[10]</sup>。表 1 列出了分子云的一些参数<sup>[11]</sup>。

表 1: 分子云的一些参数

类型	质量 ( $M_{\odot}$ )	大小 (pc)	密度 ( $\text{cm}^{-3}$ )	谱线宽度 (km/s)	温度 (K)
巨分子云	$10^4 - 10^6$	20-60	100-300	6-15	7-15
分子云	$10^3 - 10^4$	3-20	$10^3 - 10^4$	4-12	15-40
团块	$10 - 10^3$	0.5-3	$10^3 - 10^4$	1-3	30-100
云核	$30 - 10^3$	<0.5	$> 10^6$	4-15	30-200

在银河系中, 大约 1% 的星际介质 (ISM) 以固态形式存在, 主要是硅酸盐和含碳物质<sup>[12]</sup>。尘埃粒子的尺寸范围从 0.35 nm 到大约  $1\mu\text{m}$  不等。尘埃的消光和红化不仅可以求尘埃和气体的柱密度, 也可以得到分子云的结构。由于望远镜的分辨率、灵敏度的提高和观测波长范围由原来的可见光波段扩大到射电波段, 使可探测到的尘埃消光从原来的  $A_v \sim 6\text{mag}$  到现在的  $A_v \sim 40\text{mag}$ , 使可以较精确的得到分子云内云核的结构。尘埃颗粒较大, 会吸收紫外波段的光子, 再在红外或毫米波段将能量发射出去。利用此特点, 在富尘埃星系中, 可以用红外辐射作为探针测量恒星形成率。

## 2.2 原子探针

宇宙中存在着大量的 H 原子气体。H 原子中两个超精细能级之间会发生跃迁 (电子的自旋方向从平行到反平行) 并产生谱线, 即平常所说的 21cm 谱线。虽然 21cm 谱线的产生几率 ( $2.9 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ ) 很低, 但是由于宇宙中的 H 原子含量巨大, 跃迁发射事件 ( $10^7 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) 还是很高的<sup>[13]</sup>。所以可以通过测量 21cm 谱线得到氢原子气体的柱密度。

## 2.3 分子探针

### 2.3.1 CO 分子探针

在分子云中,  $\text{H}_2$  分子的丰度最高, 但是由于没有永久的电偶极矩并且其激发能较高, 所以不容易获得其光谱, 而作为分子云中分子丰度第二高的 CO 凭借其很强的谱线常用作分子云的探针。由于 CO  $J=1-0$  有较高的解离能 ( $\sim 11.1 \text{ eV}$ ), 并且所需的临界密度 ( $\sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$ ) 和激发温度 ( $\sim 5.5\text{K}$ ) 较低<sup>[14]</sup>。因此无论是弥散的或者致密的分子气体都很容易激发 CO 分子的发射。CO 分子的转动跃迁谱线处于 (亚) 毫米波段, 结合多条 CO 的转动谱线, 可以很好的示踪分子云的物理性质以及激发环境。但是在探测过低密度的分子云时, CO 不容易被激发从而产生谱线; 分子云密度过高时, CO 的发射线会出现饱和, 影响分子云内部高密

度区域的信息。

通过 CO 谱线得到积分强度后 ( $I_{\text{CO}} = \int T d\nu$ ), 通常用 “X-factor” 将其与  $\text{H}_2$  的柱密度联系起来:  $N(\text{H}_2) = X(\text{CO})I(\text{CO})$ 。如: Bolatto 等人<sup>[15]</sup>总结银河系及其近邻旋涡星系的 X-factor 为:  $X_{\text{CO}} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} (\text{K km s}^{-1})^{-1}$ 。分子云的温度、密度、金属丰度等因素都会影响  $X_{\text{CO}}$  的值。常用的校准  $X_{\text{CO}}$  的方法有两种: (1) 利用光学消光和标准气尘比得到  $\text{H}_2$  的柱密度, 然后和由同位素测量得到的 CO 柱密度作比较来校准  $X_{\text{CO}}$ <sup>[16][17][18]</sup>。(2) 通过比较  $\gamma$  射线与 CO 表面亮度来校准  $X_{\text{CO}}$ , 其中  $\gamma$  射线是由宇宙线和  $\text{H}_2$  的相互作用而产生的<sup>[19][20]</sup>。有研究表明<sup>[21]</sup>在忽略金属丰度的情况下满足:  $X_{\text{CO}} \propto n^{0.5} T_k^{-1}$ ,  $n$  为分子云的平均密度,  $T_k$  为温度; Shetty 等人<sup>[22]</sup>发现  $X_{\text{CO}}$  与温度  $T_k$  有微弱的关系:  $X_{\text{CO}} \propto T_k^{-0.5}$ ; Leroy 等人发现金属丰度较低的星系其  $X_{\text{CO}}$  较大<sup>[54]</sup>。需要注意, 这些研究是在一些特定条件下得到的, 在其他环境中可能并不适用。

利用 CO 探针也可以得到分子云的质量。测量 CO 的光度时, 若分子云为光学薄, 则其内部 CO 的发射也可以被探测到, 从而通过 CO 的谱线较精确的得到分子云的质量。但是多数情况下 CO 为光学厚。测量时只能得到分子云最外层 CO 的光度。Larson 发现 CO 的线宽与分子云的尺度存在一定的关系: 线宽正比于分子云尺度的开方 (“Larson relation”; 此关系假设巨分子云 (GMCs) 为自引力束缚系统)<sup>[24]</sup>。若巨分子云的面密度为常数  $100 M_{\odot} \text{ pc}^{-2}$ <sup>[25]</sup>, 利用 Larson relation 可得出 CO 的光度正比于分子气体的维里质量, 即可以通过 CO 的光度求得光学厚情况下总气体的质量<sup>[25][26]</sup>。如同某围墙后面包围着建筑, 只能看到围墙, 围墙后面建筑的深度和密度无法探测。但是如果假设所有的建筑是相似的, 且其中一个建筑的质量已知, 就可以通过围墙的视向面积粗略的得到建筑的总质量。基于此原理, CO J=1-0 的光度经常被用来测量分子云的质量, 其关系式为:  $M = \alpha_{\text{CO}} L(\text{CO})$ 。 $\alpha_{\text{CO}}$  的值也受分子云的温度、密度、金属丰度等因素影响,  $X_{\text{CO}} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} (\text{K km s}^{-1})^{-1}$  时对应的  $\alpha_{\text{CO}} = 4 M_{\odot} (\text{K km s}^{-1})^{-1}$  (不考虑 He)<sup>[15]</sup>。在近邻的星暴星系、(极)超亮红外星系 (LIGRs, LIR  $\sim 10^{11} L_{\odot}$ ; ULIGRs, LIR  $\sim 10^{12} L_{\odot}$ ) 中, 若使用银河系中  $\alpha_{\text{CO}}$  的值, 会出现推导出来的质量大于星暴星系的动力学质量<sup>[27]</sup>。Downes & Solomon<sup>[28]</sup>提出此类型星系中  $\alpha_{\text{CO}}$  的值为  $0.8 M_{\odot} (\text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2)^{-1}$ 。需要注意: 在利用  $L_{\text{CO}}$  推导气体质量时, 假设所有巨分子云内的恒星形成都是类似的。事实上, 在星暴星系和 (超)亮红外星系内这一假设是存在问题的。

### 2.3.2 致密气体探针

致密气体一般是指分子云的面密度 (体密度) 超过了某阈值的气体。只有当分子云密度足够高, 超过 “致密分子探针” 的临界密度, 才能激发分子探针产生谱线。然而阈值应该是多少还存在争议。一种观点认为阈值是典型分子云的平均密度, 即  $N(\text{H}_2) > 10^2 - 10^3 \text{ cm}^{-3}$ , 此密度也恰好高于 CO 的临界密度。第二种观点认为, 考虑到真实云核的密度, 云核的密度大约大于平均密度两个量级, 即  $N(\text{H}_2) > 10^4 \text{ cm}^{-3}$ , 且从此密度开始, 分子云受引力束缚, 开始有效地形成恒星<sup>[29][30][31]</sup>, 故倾向于第二种情况下的阈值。需要注意的是, 除了可以用密度界定阈值, 还可以用面密度如:  $\Sigma_{\text{mol}} > 116-129 M_{\odot} \text{ pc}^{-2}$  来界定<sup>[32][33][34]</sup>; 或者用柱密度如:  $N(\text{H}_2) > 6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  表示; 再或者用消光阈值  $A_V \sim 6$  表示<sup>[32]</sup>。

常用的致密气体探针有: CO 的高转动能级跃、CS、HCN、 $\text{HCO}^+$  等分子产生的谱线。致密分子探针的激发和 CO 一样依赖于物理环境, 事实上致密分子探针比 CO 对 UV 辐射更敏感, 所以致密气体分子探针对金属丰度依赖性更高<sup>[35]</sup>, 需要谨慎处理致密分子探针的使用范围, 不能一味简单的代替 CO。致密气体探针之间也各有优势, 需要依据具体情况来选择, 如: HCN 和  $\text{HCO}^+$  相对于其他的致密气体探针有更高的丰度和更强的发射, 所以在星系研究中最为广泛应用。迄今为止 HCN 和  $\text{HCO}^+$  已经在中等大小的星系样本进行了较为系统的巡天<sup>[29][30][36][37][38][39]</sup>。CS 探针受到红外抽运<sup>[40]</sup>和激波<sup>[41][42]</sup>的影响较小且能级所需的最低激发温度大多小于 70K, 非常适合探测致密的冷分子气体。

## 2.4 尘埃

尘埃也可以示踪分子气体。假设尘埃和气体充分混合, 如果知道了气-尘比 (gas-to-dust ratio; 银河系内约为 100), 就可以通过尘埃推出气体的质量<sup>[43][44]</sup>。需要注意的是这种方法计算出来的气体质量不仅是分子气体质量, 还包括原子气体质量。并且除了假设尘埃和气体充分混合外, 还需要对金属丰度、尘埃模型等采用一系列的假设, 才能在最后得出分子气体质量。

# 3 恒星形成率

## 3.1 初始质量分布函数

初始质量分布函数 (IMF) 是一个经验函数, 描述的是一组恒星中初始质量的分布, 其表达式为:  $dN/dM \propto M^{-\alpha}$  或  $dN/d\log M \propto M^{-\gamma} (\alpha = \gamma + 1)$ 。其中 N 为在给定的质量区间内 (即从 M 到 M+dM) 的恒星数量。M 为恒星的质量。Salpeter 在 1955 年将恒星的初始质量函数拟合为以  $\log M$  为底的幂律函数, 得出幂律指数  $\alpha=2.35$ , 适用于  $0.4M_{\odot}$  到  $10M_{\odot}$  的范围<sup>[45]</sup>, 这个初始质量分布函数称为 Salpeter IMF。Kroupa IMF 是另一种初始质量分布函数<sup>[46]</sup>, 它考虑了恒星质量分布在不同质量区间的变化。Kroupa IMF 通常采用分段幂律分布, 具有两个断点, 分别位于约  $0.5M_{\odot}$  和  $1M_{\odot}$  处。对于  $0.08M_{\odot}$  至  $0.5M_{\odot}$  的恒星, 斜率  $\alpha$  约为 0.3; 对于  $0.5M_{\odot}$  至  $1M_{\odot}$  的恒星, 斜率  $\alpha$  约为 1.3; 对于大于  $1M_{\odot}$  的恒星, 斜率  $\alpha$  约为 2.35, 与 Salpeter IMF 一致。

## 3.2 恒星形成率及其探针

恒星形成率 (SFR) 是指恒星形成的速率, 其单位为  $M_{\odot}\text{yr}^{-1}$  或  $M_{\odot}\text{Myr}^{-1}$ 。最直接测量恒星形成率的方法是对不同类型恒星记数。理想情况下, 恒星形成率可以由公式:  $SFR = \sum_{M_* = M_t}^{M_u} N(M_*, t_*) M_* / t_*$  得到。其中  $N(M_*, t_*)$  表示单位质量单位恒星寿命时间内的恒星个数,  $t_*$  为所有恒星中最长的寿命。事实上不能掌握全部恒星的信息, 而在少数几个近邻星系中 (如大麦哲伦云和小麦哲伦云), 通过现有的技术, 比较容易对年轻的大质量的恒星进行记数。由于年轻星候选体 (YSO) 特别是大质量的年轻恒星在光度上占主导地位, 因此通过对新形成恒星的记数可以示踪恒星形成率。只需要假设一定的 IMF, 所有恒星的形成率可

由 YSOs 的记数中得出:  $SFR(SOs) = N(YSOs) \langle M_* \rangle / t$ , 这里  $\langle M_* \rangle$  表示新形成恒星的平均质量,  $t$  表示 YSOs 的平均寿命。对于其他离较远的星系, 现阶段的仪器还没有足够的分辨率来对恒星进行记数, 然而通过一些合理的假设, 可以从大质量恒星的光度结合初始质量函数推出恒星形成率: (1) 假设恒星形成率在给定探针探测的有效时标内是恒定的。对大多数近期没有星暴活动的盘星系和椭圆星系来说, 此假设基本成立; 对于有星暴活动的星系来说, 需要假设他们在探针的有效时标内恒星形成率基本恒定。(2) 假设恒星的形成满足某种初始质量函数。这个假设是现在绝大多数恒星形成率的基本假设, 因为只有通过 IMF 才可以从大质量恒星的质量 (或光度) 外推到恒星的总质量。可惜的是这个假设还存在很大的争议, 还无定论。(3) 假设观测数据可以对初始质量函数完全采样, 即在最高质量的取样点上至少有一颗恒星。对于恒星形成活跃的星系, 这一点大多数情况下是满足的。在这些假设下, 使用简单的线性关系, 就可以从大质量的年轻的恒星光度推导出质量, 并进一步通过 IMF 外推至所有形成恒星的总质量<sup>[47]</sup>。

恒星形成率探针主要有两种类型: (1) 整体恒星形成率探针, 主要用于研究星系尺度上的平均性质。这种情况下不需要很高的分辨率和灵敏度, 比较容易对大样本的远距离的星系进行统计研究。(2) 局部恒星形成率探针, 适用于较小的尺度 (sub-kpc)。这种情况下, 需要较高的分辨率和灵敏度。由于不同分子云的物理性质千差万别, 这个尺度也不能太小, 否则由于单个个体的独特性质会出现很大的统计偏差<sup>[47]</sup>。以下列举了一些常用的恒星形成率探针:

紫外-红外辐射: 紫外辐射主要来自大质量年轻恒星光球层的辐射, 所以可以将紫外辐射同恒星形成率直接联系起来。由于紫外波段的光子容易受到尘埃消光的影响, 只依靠紫外辐射来求恒星形成率会出现很大误差。如果假设所有的紫外辐射都被尘埃有效吸收, 尘埃吸收紫外波段的光子再在红外波段将能量发射出去, 这样就可以将紫外光度与红外光度联系在一起, 如:  $L_{UV}(\text{corr}) = L_{UV}(\text{observed}) + \eta L_{IR}$  (系数  $\eta$  依赖于测量 UV 和 IR 的通频带), 同样可以推出恒星形成率。对富尘埃的核区星暴星系来说, 由于尘埃对红外波段的消光很少, 总红外辐射可能是最好的恒星形成率探针, 如:  $SFR(M_{\odot}\text{yr}^{-1}) = 4.5 \times 10^{-44} L_{TIR}(\text{ergs s}^{-1})$ , 其中  $L_{TIR}$  指中远红外总光度的积分<sup>[50]</sup>。

发射线探针: 发射线探针最广泛应用的是来自围绕大质量年轻恒星的电离气体的光学和近红外发射线。如  $H\alpha$  探针, 大质量年轻恒星周围的气体会被大质量恒星的辐射电离, 同时发出从可见光波段到红外波段的发射线。对于传统 IMF, 这些发射线探针示踪的是质量大于约  $15M_{\odot}$  的恒星, 其中峰值贡献来自  $30M_{\odot}$ - $40M_{\odot}$  范围内的恒星。因此, 这些发射线 (以及自由-自由射电连续谱) 代表了恒星形成率的几乎瞬时测量, 示踪的是寿命约为 3-10 百万年的恒星<sup>[11]</sup>。常用的发射线探针有:  $H\alpha$  发射线 (较近较远的星系中都适用)、 $[O II]$  发射线 (适用于中等红移的星系中)、 $Ly\alpha$  发射线 (适用于高恒星形成率的星系中) 等。

射电辐射: 厘米波段的射电辐射主要包含热辐射和同步辐射, 低频的射电辐射主要由超新星爆发产生的带电粒子在磁场中回旋辐射产生。回旋辐射与星系的远红外辐射之间有很强的相关性, 所以可以利用射电辐射求得 SFR (这一关系的运用有局限性, 适用于某些星系)。由于射电辐射仪器分辨率和灵敏度的提高, 现在射电辐射主要用于计算高红移的正在形成恒

星的星系的恒星形成率。

表 2 列举了常用的一些恒星形成率探针和其使用范围。利用恒星形成率探针得到光度后, 可以利用  $\log M_* (M_\odot \text{ yr}^{-1}) = \log L_x - \log C_x$  求得恒星形成率, 其中  $C_x$  为光度和恒星形成率之间的转换因子, 具体值见表 2<sup>[51]</sup>。

表 2: 恒星形成率探针

波段	年龄 (Myr <sup>a</sup> )	$L_x$ Units	$\log C_x^b$	$\dot{M}_x / M_*^{K98c}$
FUV	0-10-100	ergs s <sup>-1</sup> ( $\nu L_\nu$ )	43.35	0.63
HUV	1-10-200	ergs s <sup>-1</sup> ( $\nu L_\nu$ )	43.17	0.64
H $\alpha$	0-3-10	ergs s <sup>-1</sup>	41.27	0.68
TIR	0-5-100 <sup>d</sup>	ergs s <sup>-1</sup>	43.41	0.86
24 $\mu\text{m}$	0-5-100 <sup>d</sup>	ergs s <sup>-1</sup> ( $\nu L_\nu$ )	42.69	-
70 $\mu\text{m}$	0-5-100 <sup>d</sup>	ergs s <sup>-1</sup> ( $\nu L_\nu$ )	43.23	-
1.4GHz	0-100	ergs s <sup>-1</sup> Hz <sup>-1</sup>	28.20	-
2-10keV	0-100	ergs s <sup>-1</sup>	39.77	0.86

a) 第二个数表示贡献发射的平均星族年龄, 第三个数给出了贡献 90% 光度所需恒星的年龄上限。b) SFR 和对应光度的转换因子。c) 最新校准得到的 SFR 和之前得到的 SFR 的比值。新的校准得到较低的 SFR 主要是因为采用了不同的 IMF 以及更新的星族合成模型。d) 年龄的取值范围假设了在 0-100Myr 内有恒定的恒星形成活动。对比较安静的区域 (如普通星系的盘上), 最大年龄值应该会高得多。此表来自<sup>[51]</sup>。

## 4 K-S 定律

Schmidt 提出了 SFR 和气体密度之间存在一定的比例关系, 第一次用定量测量的手段发现星际介质中的中性氢原子云 (HI) 与恒星形成速率有很强的相关关系, 表明了恒星可能是在气体中形成的<sup>[1]</sup>。Kennicutt 研究了一系列的星系并且发现了盘平均星系的 SFR 表面密度和气体表面密度之间的关系:  $\Sigma \text{SFR} \propto \Sigma_{\text{gas}}^{1.4}$ <sup>[50]</sup>。此后, 越来越多的人开始研究气体和恒星形成之间的关系, 希望可以找到气体演化到恒星具体的物理图景。后来此类关系被称为 Kennicutt-Schmidt (K-S) 定律:  $\Sigma \text{SFR} = A \Sigma_{\text{gas}}^N$ 。

### 4.1 星系的 K-S 定律

图 1<sup>[51]</sup> 是前人对 K-S 定律观测结果的汇总。图中每一个点代表一个星系, 从 61 个正常的盘星系和 36 个星暴星系<sup>[50]</sup> 扩展到贫金属星暴星系 ( $Z < 0.3Z_\odot$ )、近邻的低表面光度星系<sup>[52]</sup>。恒星形成率的测量使用了 H $\alpha$ 、Pa $\alpha$  和红外辐射作为探针。气体的表面密度使用 CO 作为探针, 为了简便, 所有星系取 X(CO) 为  $2.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$  ( $\text{K km s}^{-1}$ ) (不考虑 He)。

图 1 中可以看出, 恒星形成率的面密度与气体的表面密度有很强的相关关系, 其斜率 N 约为 1.4-1.5。说明恒星形成随着气体面密度以指数方式增加, 即不同类型的恒星形成系统中, 气体转换为恒星的效率 (恒星形成效率  $\text{SFE} = \text{SFR} / M_{\text{gas}}$ ) 是不同的。如, 极亮红外星系的恒星形成效率远高于近邻的普通盘星系近 2 个量级 ( $\sim 100$  倍)。为什么同样质量的气体

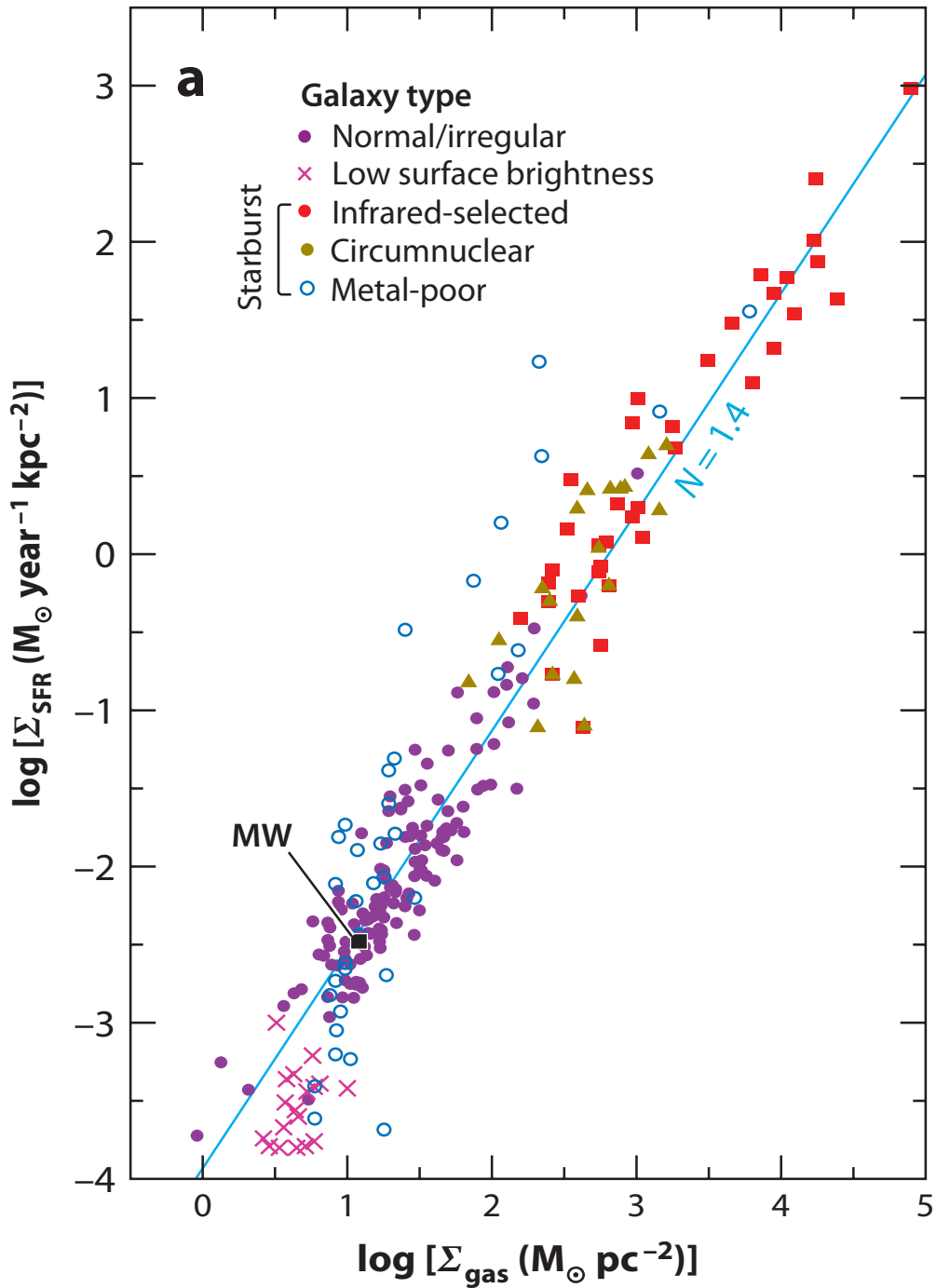


图 1: 在不同类型的恒星形成星系中, 对整个盘做平均的恒星形成率面密度以及气体 (HI 和分子) 面密度之间的关系。每个符号代表一个单独的星系, 其 SFR 和气体质量都对恒星形成区域的半径进行了归一化。其中的颜色分别是: 紫色-普通漩涡星系和不规则星系; 红色-红外波段选定的星暴星系; 黄色-核周星暴, 其恒星形成率从  $P_\alpha$  测得。银河系是黑色的方块。品红十字-近邻的低表面光度星系; 开口蓝色圆圈-小质量不规则星系以及低金属丰度星暴星系 (从 O 元素测得的金属丰度  $< 0.3Z_\odot$ )。此图来自<sup>[51]</sup>。



恒星形成效率差异如此之大?

现有的一种模型<sup>[53]</sup>解释为: 假设恒星形成满足此关系式:  $\rho(SFR = f_{H_2}\epsilon_{ff}\rho_{gas}/t_{ff})$ , 其中:  $f_{H_2}$  为分子气体在总气体中所占的比例,  $t_{ff}$  为自由下落时标且满足  $t_{ff} \propto \rho_{gas}^{-0.5}$ ,  $\epsilon_{ff}$  为自由下落时标内的恒星形成效率,  $\rho_{gas}$  为气体的密度, 则可以推得  $(SFR) = \rho_{gas}^{1.5}$  即  $N=1.5$ 。需要注意的是此模型中假设恒星形成的时标为自由下落时标, 但是除了引力, 分子内还存在湍流和磁场, 恒星形成的时标是否为自由下落时标还有待考证。

图 1 中还有一些细节需要注意: 贫金属星系和低表面光度星系看起来偏离了主体部分。主要原因可能是对不同的星系选取了一样的  $X(CO)$ 。如果这些贫金属星系采用较大的  $X(CO)$ , 则会更靠近主体部分<sup>[54]</sup>。取不同的  $X(CO)$  也会导致斜率有很大不同, 如在星暴星系中选取的  $X(CO)$  比原先的值低 5 倍, 则整个 K-S 定律的斜率会从 1.4-1.5 扩展到 1.7-1.9<sup>[55]</sup>。近些年人们对星系整体的 K-S 定律还有很多研究, 如: Liu 等人使用射电辐射作为 SFR 探针对 181 个星系 (115 个正常星系, 66 个 (超) 极亮红外星系) 进行分析, 发现斜率  $N$  对  $X(CO)$  的取值很敏感, 由于  $X(CO)$  取值的不同, 斜率  $N$  可以由 1.14 扩展到 1.6<sup>[56]</sup>; Ballantyne 等人数值模拟了 132 个半径从 10 到 100 秒差距的爱丁顿极限恒星形成盘, 指出在爱丁顿极限下斜率  $N$  对光深依赖较大且在温暖致密的盘中使用 CO 作为探针推导气体的表面密度并不适用, 需要更高阶的致密分子探针<sup>[57]</sup>。

#### 4.2 空间分辨率的 K-S 定律

星系整体的 K-S 定律显示了恒星形成率和气体质量 (密度) 在星系尺度上的平均性质, 同时也将恒星形成活动及气体探针的物理性质平均起来。但是要进一步了解气体演化到恒星具体的物理图景, 必须在更小的尺度上如亚星系尺度和巨分子云尺度上来观测气体与恒星形成率的关系。随着望远镜分辨率和灵敏度的提高, 这一课题得以研究。Bigiel 等人<sup>[58]</sup>和 Schruha 等人<sup>[59]</sup>使用 VLA (the Very Large Array) 和 IRAM 30-m 对近邻的正常盘星系进行了 CO  $J = 2-1$  和 HI 的成图观测, 并且将近邻正常盘星系的恒星形成率分别于原子气体 (THINGS 巡天)、分子气体 (HERACLES 巡天,  $^{12}CO J = 2-1$ ) 和总气体作比较, 发现 HI 示踪的原子气体与恒星形成没什么关系, 而  $H_2$  示踪的分子气体则在亚星系尺度上和恒星形成线性相关。然而在更小的尺度上 (数十个 pc),  $H_2$  和恒星形成的关系不再成立, 对于更小尺度的结构如致密云核 (pc 尺度),  $H_2$  和恒星形成更没有明显的联系。

事实上, 并不是所有的巨分子云中恒星形成都很活跃, 恒星形成不仅受到引力的影响, 还受到湍流和磁场的支撑, 然而湍流和磁场在不同的分子云中差异很大。且在巨分子云尺度上,  $^{12}CO J = 1-0$  和  $^{12}CO J = 2-1$  示踪的  $H_2$  气体的密度还不足以形成恒星, 所以以巨分子云为单位研究恒星形成并不是最好的选择, 尤其在望远镜分辨率和灵敏度都有很大提高的今天。既然如此, 那么什么样的气体成分才同恒星形成直接相关呢?

#### 4.3 致密气体探针的 K-S 定律

有研究表明在银河系内, 致密气体中的恒星形成效率要比巨分子云高很多。这些致密气体的密度约为  $10^4 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ , 比巨分子云的平均密度高 2-4 个数量级, 并且这些致密分子气体的恒星形成效率也比 CO 示踪的总分子气体高的多<sup>[60][61]</sup>。这些证据表明恒星形成在物理

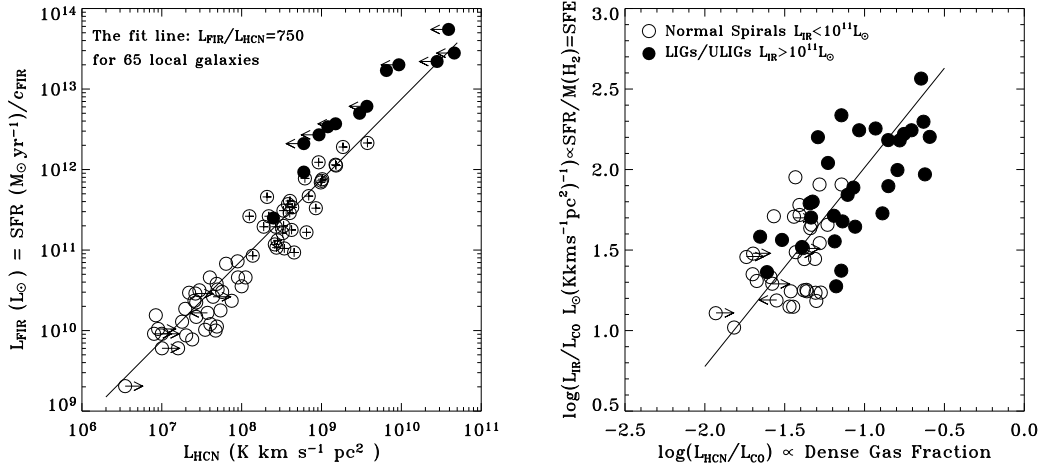


图 2: 左图: HCN-FIR 的相关关系 (针对近邻普通星系斜率为 1)。闭合的圆圈是高红移 AGN 和星系。右图: 近邻星系样本中  $L'_{\text{HCN}}/L'_{\text{CO}}$  和  $L'_{\text{IR}}/L'_{\text{CO}}$  之间的相关关系。此图来自<sup>[62]</sup>。

上同致密分子气体的关系更加密切。Gao & Solomon 对 65 个近邻星系中 HCN  $J = 1-0$  的谱线进行观测, 发现 HCN 示踪的致密气体与恒星形成率之间存在很强的线性关系 ( $N=1$ ) (图 2 左)<sup>[62]</sup>。这个关系被扩展到银河系内的致密分子团块上依然成立 (图 3), 甚至对于高红移和类星体也有可能成立 (图 3 右)<sup>[63]</sup>。Liu 等人使用射电辐射作为 SFR 探针对 181 个星系 (115 个正常星系, 66 个 (超) 极亮红外星系) 进行分析, 同样发现致密气体的面密度与恒星形成率存在很强的线性关系<sup>[56]</sup>:

$$\dot{M}_{\odot} (M_{\odot} \text{yr}^{-1}) \sim 1.2 \times 10^{-8} M_{\text{dense}} (M_{\odot}) \quad (1)$$

这种线性关系被解释为: 假设气体质量、恒星形成率和恒星形成效率在不同的致密团块里都是类似的, 即“恒星形成的基础单元” (简称基础单元)<sup>[64]</sup> 在不同物理尺度上的集体表现是相同的, 那么恒星形成率以及致密气体质量, 可以简单的认为是通过添加更多的基础单元来堆积起来的。需要注意的是: 对于河外星系特别是星暴星系和极亮红外星系, 由于分子云处在极端的物理环境, 上述猜想还有待证实。

Lada 等人对 11 个近邻的分子云使用 HCN 作为致密气体探针进行成图, 结合 Gao & Solomon 星系的数据<sup>[62]</sup>, 画出图 (4) 并得到如下关系式<sup>[65]</sup>:

$$\dot{M}_{\odot} (M_{\odot} \text{yr}^{-1}) = 4.6 \times 10^{-8} f_{\text{dense}} M_{\text{mol}} (M_{\odot}) \quad (2)$$

其中,  $f_{\text{dense}}$  为致密气体在分子云中所占比例,  $M_{\text{mol}}$  为分子云的质量。图 (4) 左为分子云的恒星形成率与分子云质量的相关关系图像。实心黑点代表的是高密度气体, 而空心的圆圈代表的是低密度气体。三条虚线由上到下表示致密气体在分子云中所占比例即  $f$  为 100%、

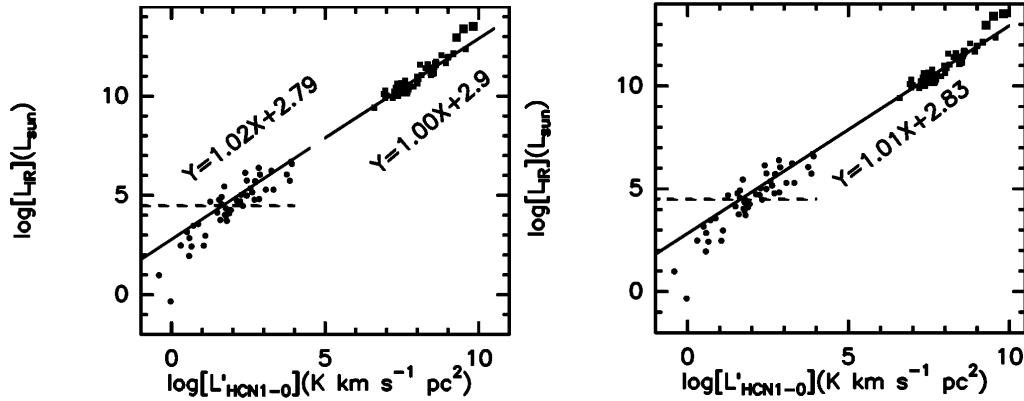


图 3: 在银河系分子团块以及河外星系中的关系。左图: 分别对河外星系以及对银河系分子团块的最小二乘法拟合 (仅对  $LIR > 10^{4.5} L_{\odot}$  的团块拟合, 也即高于虚线的那些数据点)。右图: 对所有数据的整体拟合。三个填充方块显示了高红移类星体 (QSO)。本图来自<sup>[7]</sup>。

10%、1%。图 (4) 右与左类似, 只是结合了 Gao & Solomon 星系的数据<sup>[65]</sup>。由图 (4) 可得出恒星形成不论对单个分子云还是整个星系都遵循一个基本原则: 分子云转变为恒星的速率取决于致密气体在分子云中的质量, 并且如果致密气体的比例是一样的那么恒星形成率和致密气体之间的相关关系不论在分子云中还是星系中都是线性相关的。此外, Neal 等人用射电辐射 (自由-自由辐射) 和 HCN 作为探针对大质量致密的团块进行研究发现致密气体质量和恒星形成率之间有良好的线性关系<sup>[66]</sup>。Zhang 等人<sup>[78]</sup> 对 20 个近邻的正在形成恒星的星系使用 CS、HCN、HCO<sup>+</sup> 等致密分子探针研究恒星形成定律, 发现只要分子密度大于  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  (致密气体), 恒星形成率与致密气体探针所示踪的面密度成线性相关。

Vutisalchavakul 等人<sup>[68]</sup> 发现, 在银河系平面中更遥远和更致密的云核中恒星形成率与致密气体探针所示踪的面密度也呈现线性相关。他们进一步证明了恒星形成效率 (SFE), 每单位致密气体质量的恒星形成率 (恒星形成效率; SFE) 无论是在近邻的分子云到银道面分子云中还是附近的星系到遥远的 (U)LIRGs 中都是恒定的 (如图 5 左所示)。相反地, 每单位分子气体质量的恒星形成率表现出更大的弥散性 (如图 5 右所示)。这表明, 与总分子气体质量相比, 致密气体与恒星形成之间的联系更为紧密。

分子云整体的恒星形成效率相较于致密气体中的恒星形成效率要低, 可能的原因是大多数的分子云没有受到引力束缚而致密气体呈引力束缚态<sup>[69]</sup>。这也可以解释分子团块中红外光度和致密气体探针光度 (即致密气体恒星形成定律) 以及气体光度和致密团块的维里质量之间的紧密联系 (如 Wu 等人在 2010 年发表的文章<sup>[61]</sup>)。此外, 早期恒星形成产生的反馈会影响分子团块中气体结构, 降低恒星形成率, 从而影响分子团块中的恒星形成效率<sup>[70]</sup>。

然而, 现阶段一些研究对致密气体恒星形成定律提出质疑。Stephens 等人提出银河系中 HCN J=1-0 的大部分亮度都是来自于分子云中弥散气体的亚热辐射而不是致密气体<sup>[71]</sup>。在

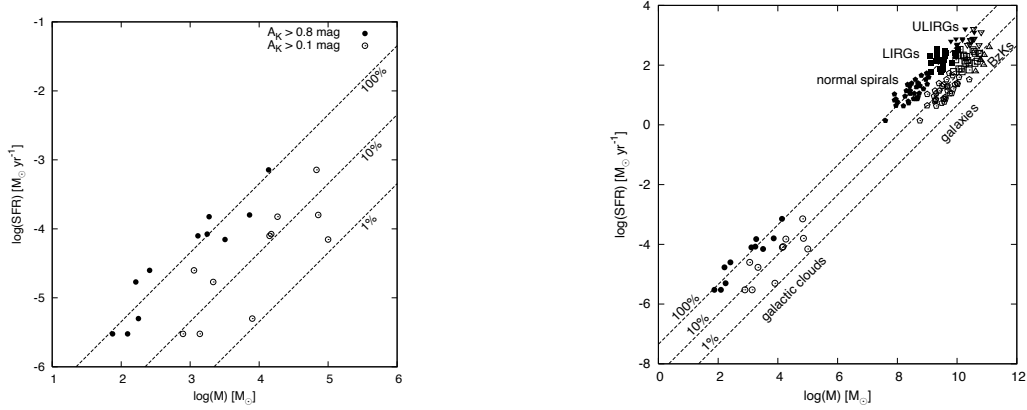


图 4: 左边为分子云的恒星形成率与分子云质量的相关关系图像。实心黑点代表的是高密度气体, 而空心的圆圈代表的是低密度气体。三条虚线由上到下表示恒星形成效率为 100%、10%、1%。右边与左边类似, 只是结合了 Gao&Solomon 星系的数据。此图来自<sup>[65]</sup>。

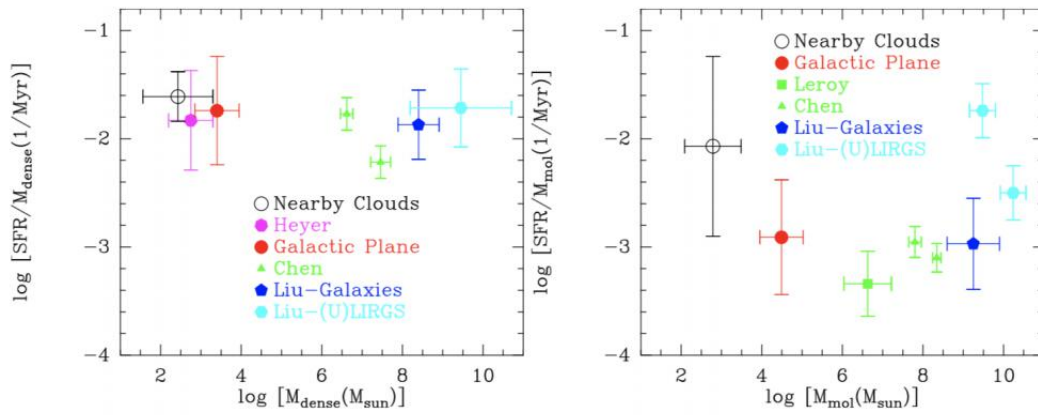


图 5: (左) 致密气体的恒星形成效率。(右) 分子气体的恒星形成效率。样本基于近邻分子云、银河平面云子云、近邻星系和遥远星系。图片来自<sup>[68]</sup>。

观测星系时, 整个星系为一个整体, HCN 的光度不可避免的会包含来自弥散的气体的部分, 从而需要对 Wu 等人<sup>[61]</sup>中发现的银河系内的大质量气体团块及延伸到其它星系线性关系提出深层次的解释。最近其它一些工作也表明, HCN 发射可能来自更弥散的区域, 这些研究都是针对太阳周边 (延伸至猎户座云的距离) 的云团进行的<sup>[72][73]</sup>。Nguyen-Luong 等将这些结果扩展到了 M17 星云<sup>[74]</sup>。随后 Evans 等发现在较低密度 (50-100 cm<sup>-3</sup>) 中存在 HCN J=1-0 和 HCO<sup>+</sup> J=1-0 的发射。大多数分子云中低密度区域占比较大, 因此低密度区域可以主导探针的总光度<sup>[75]</sup>。这些研究对致密气体探针的光度是否主要来自于致密气体提出了质疑。这些研究挑战了 HCN、HCO<sup>+</sup> 等常用的致密气体探针用来示踪致密气体质量的有效性, 是有待深入研究的课题。

此外, Mills 等人<sup>[76]</sup>使用 12m Mopra 望远镜和 Herschel Hi-GAL 中的数据, 研究了银河中心 HCN J=1-0 与致密气体质量之间的相关性, 发现在单个分子云核心约 10 秒差距的尺寸尺度上, HCN J=1-0 与致密气体质量有很好的相关性。然而个别云团显示出大约 0.75 个数量级的偏差。偏差的原因可能是红外辐射抽运激发 HCN 分子发射以及 HCN 的自吸收等影响到了 IR/HCN(1-0) 比值的变化。因此利用不同分子探针进行多谱线观测将是证明星系中不同致密气体示踪剂一致性的一种方法。Li 等人<sup>[77]</sup>通过多种致密气体探针 (HCN J=1-0, HCO<sup>+</sup> J=1-0, HNC J=1-0 和 CS J=3-2) 观测得到的致密气体探针光度与红外光度之间的关系。使用了 IRAM 30 米望远镜对 70 个具有不同红外亮度的邻近星系源进行了 3 毫米和 2 毫米波段的观测。发现致密气体探针的亮度与红外光度之间存在紧密的线性相关性, 不同的致密气体探针在示踪分子气体时没有系统性差异。

与 HCN J=1-0、HCO<sup>+</sup> J=1-0 等谱线相比, 其对应的同位素分子谱线通常具有较低的光深, 因此能够追踪到更致密的气体。这是因为同位素分子的丰度较低并且有更高的激发密度。Zhang 等人<sup>[78]</sup>利用 APEX 12m 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<sup>+</sup>(4-3) 和 CS(7-6) 多条分子谱线 (示踪气体密度高达 10<sup>6</sup> cm<sup>-3</sup>) 观测<sup>□</sup>, 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<sup>□</sup>。Liu 等人<sup>[79]</sup>对银河系分子云、167 个近邻星系以及高红移恒星形成星系进行的大样本 CO 多转动能级 (J=4-3-12-11) 谱线观测, 发现所有探测到的 9 条高转动能级 (J 4) CO 分子谱线光度与远红外光度之间均呈紧密线性相关<sup>□</sup>。Liu 等人<sup>[80]</sup>对 146 个银河系内恒星形成区使用分子探针 H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> 和 H<sup>13</sup>CN 的光度示踪致密气体质量。发现 H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> 和 H<sup>13</sup>CN 所示踪的致密气体与恒星形成率之间依然存在线性关系。

## 5 总结与展望

对于恒星形成团块的物理性质, K-S 定律给出一条最经典、最显著的统计特性。它描述了恒星形成率面密度  $\Sigma_{\text{SFR}}$  与总气体面密度  $\Sigma_{\text{gas}}$  ( $\Sigma_{\text{gas}} = \Sigma_{\text{HI}} + \Sigma_{\text{H}_2}$ ) 之间的经验关系。K-S 定律对盘星系整体作平均, 为后续研究提供了将气体发射和恒星形成活动联系到一起直接定量的方法。此定律还可以扩展到遥远的不易观测的高红移星系, 为星系演化和大尺度结构演化

的理论模拟和计算奠定基础。然而对于致密气体探针的恒星形成定律线性关系的本质，目前的研究还远没有给出清晰的描述。值得进一步探索的重点有以下两方面：

1. 致密气体探针所示踪的“致密”气体的定义，即致密气体的实际空间分布。研究发现常用的致密气体探针（如：HCN J=1-0）可能大部分气体辐射光度来自分子云中弥散气体的亚热辐射，这与它们示踪致密气体的假设相矛盾<sup>[72][73]</sup>。Stephens 等人<sup>[71]</sup>提出大质量恒星形成团块的红外光度和致密气体探针 HCN 光度可能只占整个星系的很小一部分，HCN 的发射主要来自于低质量恒星形成团块或亚热辐射。Evans 等人<sup>[75]</sup>使用分子探针 HCN (J=1-0) 和 HCO+(J=1-0) 对 6 个远距离 ( $d \sim 3.5-10.4$  kpc) 的分子云进行高分辨率的成图观测，发现在  $A_v \sim 8 \text{ mag}$  阈值以下的气体所产生的光度占总光度很大一部分，即发现探针 HCN 和 HCO<sup>+</sup> 发射在较低的密度  $n=50-100 \text{ cm}^{-3}$  中存在，由于大多数分子云中低密度的区域占比较大，低密度区域可以主导探针的总光度。在分子云中不同的致密气体探针所示踪的气体结构是否相同，探针示踪的总气体光度有多少比例来源于恒星成团形成的最小单元，即致密云核，有多少来自于弥散气体的亚热辐射？目前的研究结果只是给出了较为表面、唯象层面的相关性。相关的工作虽然不多，但足以让进一步研究致密气体探针所示踪的致密气体的定义。
2. 年轻恒星形成的反馈作用对气体空间分布的影响。来自周围恒星形成等活跃天体的气体膨胀和辐射压力，会明显影响气体的空间分布。这些因素在不同的分子云区域中各具特点，导致气体空间分布和恒星形成效率的复杂性<sup>[81]</sup>。高 CCH/H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> 和 H<sup>13</sup>CN/H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> 比值是光质离解区的良好探针<sup>[81][82]</sup>。如图 6 所示为分子云 G9.62+0.19 中 CCH/H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> 和 H<sup>13</sup>CN/H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> 的强度比图<sup>[82]</sup>。右下方的圆形轮廓线的部分称为区域 B。区域 B 所包含的电离氢区把近似球形的分子云挤压成半球形，把另一半气体电离或者驱散。并且电离氢区中的光解离区明显与分子云剩余部分及纤维状结构连接在一起，表明了它们之间的相互作用。表明了年轻恒星的反馈对空间气体分布是有影响的。Zhang 等人分析致密气体探针 CS J=2-1，以是否存在射电复合线 H40 $\alpha$  发射（示踪 HII 区，即存在年轻恒星）为分类标准，研究早期形成的恒星是否会影响恒星形成率<sup>[83]</sup>。如图 7(a) 所示，存在 H40 $\alpha$  发射恒星形成区的恒星形成定律呈亚线性，即有较低的恒星形成率。图 (b) 为  $L_{\text{bol}}/L_{\text{CS}}$  与银心距离的关系。存在 HII 区域的  $L_{\text{bol}}/L_{\text{CS}}$  比没有 HII 区域有更高的比率。演化靠后的恒星形成区可能消耗了更多的气体，导致较高的  $L_{\text{bol}}/L_{\text{CS}}$  比率，并且  $L_{\text{bol}}/L_{\text{CS}}$  并没有随着银河系环境的不同而发生改变。以上可以看出，年轻恒星形成的反馈作用对气体空间分布是有影响的，但不同因素在不同的分子云区域中各具特点，导致气体空间分布和恒星形成效率的复杂性，需要更多的分辨率更高的数据对恒星形成反馈作用做进一步研究。

现在有更多新观测数据产生，如 1. Herschel Hi-GAL 是一个专门针对银河系内平面进行的红外巡天项目，它利用赫歇尔空间望远镜的强大能力，对银河系内恒星形成区域进行了前所未有的详细观测。Herschel Hi-GAL 项目通过观测银河系内平面的尘埃连续发射和分子谱线，提供了关于恒星形成区域的物理状态（如温度、密度和化学组成）的详细信息。这些观

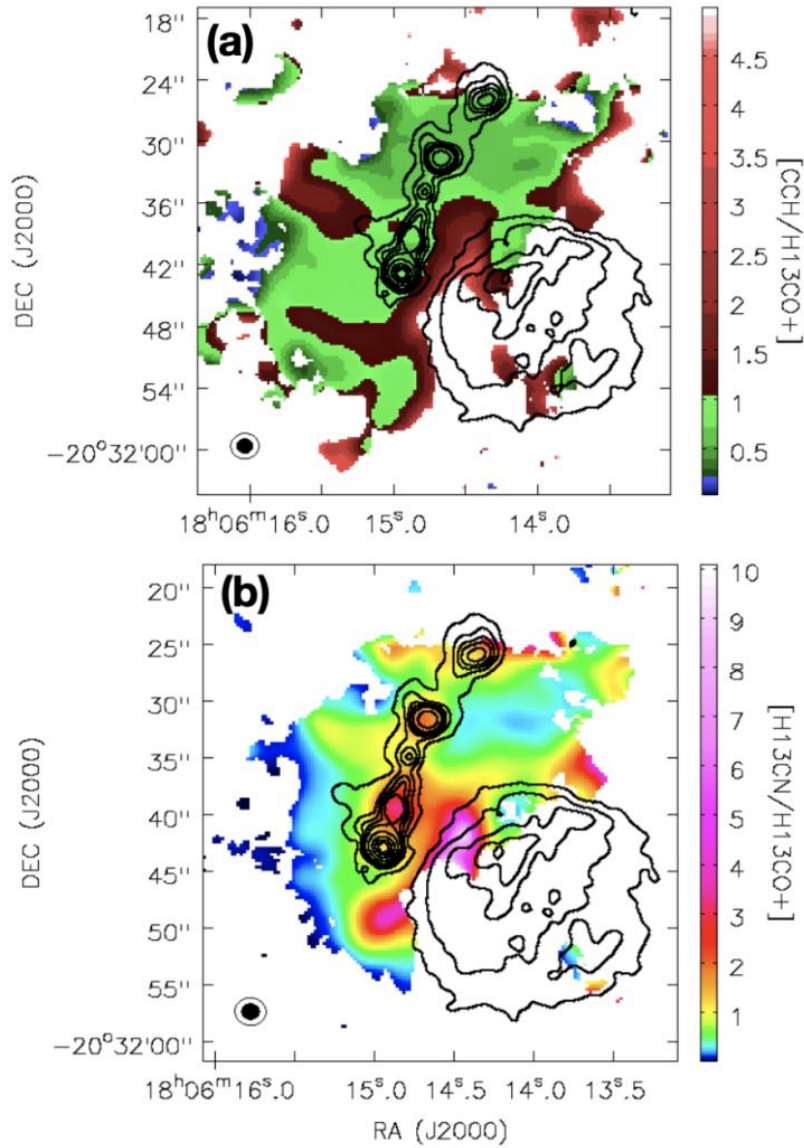


图 6: 样本为分子云 G9.62+0.19, 黑色的轮廓线代表的是 3mm 轮廓, 区域 B 存在电离氢区。彩色强度代表的是 (a)  $CCH/H^{13}CO^+$  和 (b)  $H^{13}CN/H^{13}CO^+$  的强度图。此图来自<sup>[82]</sup>。

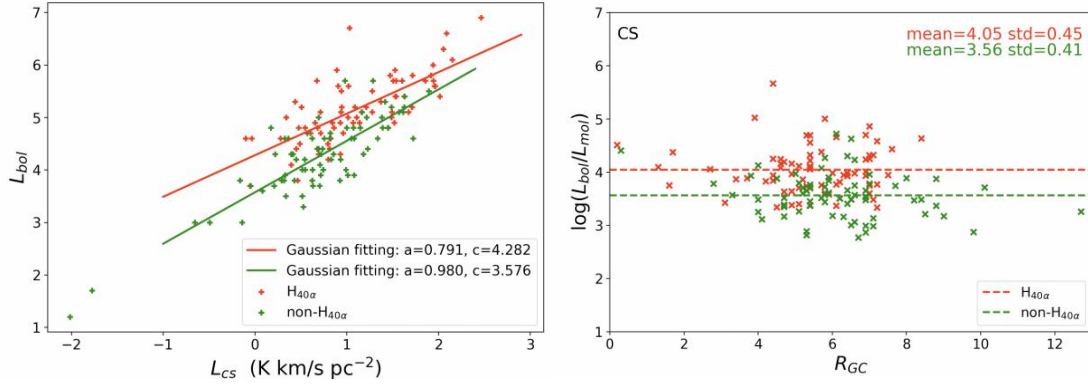


图 7: (a) ATOMS 观测样本中致密气体探针 CS ( $J=2-1$ ) 的光度与红外光度的关系图。红色和绿色圆点分别代表存在和不存在  $H_{40\alpha}$  发射的恒星形成区。红色线为线性拟合, 斜率为 0.79, 呈次线性。绿色线为线性拟合, 斜率为 0.98, 呈近线性。(b)  $L_{\text{bol}}-L_{\text{CS}}$  与银心距离的关系。红色和绿色十字分别代表存在和不存在  $H_{40\alpha}$  发射的恒星形成区。红色和绿色虚线分别为  $L_{\text{bol}}-L_{\text{CS}}$  的平均值<sup>[83]</sup>。

测结果对于验证和发展恒星形成理论, 包括恒星形成定律, 即恒星形成率与分子气体密度的关系等, 都具有重要意义。2. MALATANG 巡天项目<sup>[84]</sup>使用东亚天文台 JCMT 15m 亚毫米波望远镜对一批近邻恒星形成星系进行了 HCN  $J=4-3$  和  $\text{HCO}^+ J=4-3$  的成图观测, 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。3. 观测项目 ATOMS<sup>[82]</sup>使用世界最大的毫米波观测阵列 ALMA 获得了银河系内 146 个恒星形成区不同分子探针, 如  $\text{HCO}^+$ , HCN,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ , CS,  $\text{H}^{13}\text{CN}$  等高分辨率的观测, 此外还有射电复合线  $H_{40\alpha}$  和 3mm 连续谱的观测。ATOMS 源是一个多样化的样本, 在银河系中的空间分布广泛, 适合统计研究不同物理条件下的恒星形成过程。ATOMS 观测项目提供大样本、高分辨率的气体成图, 可以直接开展致密气体探针的研究。这些观测项目对进一步研究致密气体探针所示踪的致密气体定义、恒星形成效率、年轻恒星形成的反馈作用及致密气体恒星形成定律线性现象的解释有重要作用。



## 参考文献:

- [1] Schmidt, Maarten, *ApJ*, 1959, 129: 243
- [2] Meidt S E, Schinnerer E, García-Burillo S, et al. *ApJ*, 2013, 779: 45
- [3] Gao Y, Solomon P M, *ApJ*, 2004, 606: 271
- [4] Gilmore G, Wyse R F G, Norris J E, *ApJ*, 2002, 574: L39
- [5] Gratton R G, Carretta E, Bragaglia A, 2012, *AA Rev*, 20: 50
- [6] Cox D P, 2005, *ARAA*, 43: 337
- [7] Field G B, Goldsmith D W, Habing H J, *ApJ*, 1969, 155: L149
- [8] van Dishoeck E F, Black J H, 1988, *ApJ*, 334: 771
- [9] Hollenbach D J, Tielens A, 1997, *ARAA*, 35: 179
- [10] Williams J P, Blitz L, McKee C F, *Protostars and Planets IV*, 2000, 97
- [11] Robert C. Kennicutt, Jr, Neal J Evans II, *ARAA*, 2012, 50:531-608
- [12] Draine B T, *ARAA*, 2003, 41: 241
- [13] Jonathan, Pritchard, Abraham Loeb, *IOP Publishing*, 2012, 75: 8
- [14] Papadopoulos P, Van der Werf, Xilouris E M, et al. 2012, *MNRAS*, 426: 2601
- [15] Bolatto A D, Wolfire M, Leroy A K, *ARAA*, 2013, 51: 207B
- [16] Dickman R L, *ApJ*, 1975, 202: 50-7
- [17] Dickman R L, *ApJS*, 1978, 37: 407-27
- [18] Dame T M, Hartmann D, Thaddeus P, *ApJ*, 2001, 547: 792-813
- [19] Strong A W, Mattox J R, *AA*, 1996, 308: L21-4
- [20] Bolemen H, *ARAA*, 1989, 27: 469-516
- [21] Maloney P, Black J H, *ApJ*, 1988, 325: 389
- [22] Shetty R, Glover S C, Dullemond C P, et al. *MNRAS*, 2011, 412: 1686
- [23] Leroy A K, Bolatto A, Gordon K, et al. *ApJ*, 2011, 737: 12
- [24] Larson R B, *MNRAS*, 1981, 194: 809-26
- [25] Solomon P M, Rivolo A R, Barrett J, et al. *ApJ*, 1987, 319: 730
- [26] Dickman R L, Snell R L, Schloerb F R, *ApJ*, 1986, 309: 326
- [27] Bryant P M, Scoville N Z, *ApJ*, 1999, 117:2632-55
- [28] Downes D, Solomon P M, *ApJ*, 1998, 507: 615-54
- [29] Gao Y & Solomon P M, *ApJS*, 2004, 152:63
- [30] Gao Y & Solomon P M, *ApJ*, 2004, 606:271
- [31] Lada E A, *ApJ*, 1992, 393: L25
- [32] Goldsmith P F, Heyer M, Narayanan G, *ApJ*, 2008, 680:428
- [33] Heiderman A, Evans II N J, Allen L E, et al. *ApJ*, 2010, 723
- [34] Lada C J, Lombardi M, Alves J F, *ApJ*, 2010, 724:687
- [35] Rosolowsky E, Pineda J E, Gao Y, *MNRAS*, 2011, 415:1977
- [36] Bussmann R S, Narayanan D, Shirley Y L, et al. *ApJ*, 2008, 681:L73
- [37] Garcia-Burillo S, Usero A, Alonso-Herrero A, et al. *AA*, 2012, 539: A8
- [38] Gracia-Carpio J, Garcia-Burillo S, Planseas P, et al. *AA*, 2008, 479: 703
- [39] Juneau S, Narayanan D T, Moustakas J, et al. *ApJ*, 2009, 707: 1217
- [40] Sakamoto K, Aalto S, Evans A S, et al. *ApJ*, 2010, 725: L228
- [41] Leen T M & Graff M M, *ApJ*, 1988, 325: 411
- [42] Van der Tak, Boonman A, Braakman R, et al. *AA*, 2003, 412: 133
- [43] Sandstrom K M, Leroy A K, Walter F, *ApJ*, 2013, 777:617-646
- [44] Draine B T, Princeton University Press, 2011, ISBN: 978-0-691-12214-4
- [45] Salpeter E, *ApJ*, 1955, 121:161
- [46] Kroupa P, Weidner C, Pflamm-Altenburg J, et al. 2011, *ArXiv e-prints*
- [47] 张智昱 2014 近邻星系中的致密气体和恒星形成张智昱. 博士论文. 南京: 中国紫金山天文台, 2014: 43

- 
- [48] Kennicutt Jr, 1998, ApJ, 498: 5411-552
- [49] Kennicutt R C, & Evans N J, ARAA, 2012, 50: 531
- [50] Kennicutt R, ARAA, 1998, 36, 189
- [51] Kennicutt R & Ii N, ARAA, 2012, 50: 531-608
- [52] Wyder T, Martin D, Barlow T, et al. ApJ, 2009, 696: 1834
- [53] Narayanan D, Krumholz M, Ostriker E, et al. MNRAS, 2012, 421: 3127
- [54] Leroy A K, Bolatto A, Gordon K, et al. ApJ, 2011, 737: 12
- [55] Narayanan D, Krumholz M R, Ostriker E C, et al. MNRAS, 2011, 418: 664
- [56] Liu L, Gao Y, Greve, ApJ, 2015, 805: 31
- [57] Ballantyne D, Armour J, Indergaard J, ApJ, 2013, 765: 1035-1045
- [58] Bigiel F, Leroy A, Walter F, et al. AJ, 2008, 136: 2846
- [59] Schrubba A, Leroy A K, Walter F, et al. AJ, 2012, 143: 138
- [60] Jingwen W, Ii N, Gao Y, et al. ApJ, 2005, 635: 173-176
- [61] Wu J, Evans II N J, Shirley Y L, et al. ApJS, 2010, 188: 313
- [62] Gao Y, & Solomon P M, ApJS, 2004, 152: 63
- [63] Gao Y, Carilli C L, Solomon P M, et al. ApJ, 2007, 660: L93
- [64] Shirley Y L, Wu J, Shane Bussmann R, et al. Massive Star Formation: Observations Confront Theory, 2008, 387: 401
- [65] Lada C, Forbrich J, Lombardi M, et al. ApJ, 2011, 745
- [66] Evans N, Heiderman A, Vutisalchavakul N, 2014, ApJ, 782
- [67] Zhang Z, Gao Y, Henkel C, et al. ApJ, 2014, 784 : 31
- [68] Vutisalchavakul N, Evans I, Heyer M, ApJ, 2016, 831
- [69] Dobbs C, Burkert A, Pringle J, MNRAS, 2011, 413
- [70] Barnes P, Hernandez A, O'Dougherty S, et al. ApJ, 2016, 831
- [71] Stephens I, Jackson J, Whitaker J, et al. ApJ, 2016, 824: 29
- [72] Pety J, Guzmán V, Orkisz J, Liszt H, et al. A&A, 2017, 599, A98
- [73] Kauffmann J, Goldsmith P, Melnick G, et al. A&A, 2017, 605
- [74] Nguyen-Luong, Q Nakamura, F Sugitani, et al. ApJ, 2020, 891:66
- [75] Evans N J, Kim K-T, Wu J, et al. ApJ, 2020, 894: 103
- [76] Mills E, Battersby C, ApJ, 2017, 835: 76
- [77] Li F, Wang J, Gao F, et al. MNRAS, 2021, 503: 4508.
- [78] Zhang Z Y, Henkel C, Gao Y, et al. A&A, 2014: 568
- [79] Liu D, Gao Y, Isaak K, et al. ApJ, 2015, 810: L14
- [80] Liu T, Evans N J, Kim K T, et al. MNRAS, 2020, 496, 2821
- [81] Krumholz M R, Bate M R, Arce H G, et al. Protostars and Planets VI, 2014, 243
- [82] Liu T, Evans N J, Kim K-T, et al. MNRAS, 2020, 496, 2790
- [83] Zhang C, Evans N J, Liu T, et al. MNRAS, 2022, 510, 4998
- [84] Jiang X-J, Greve T R, Gao Y, et al. MNRAS, 2020, 494

---

## A Review of the Laws of Star Formation

Zhang Chao<sup>1, 2, 3</sup>

*(1. Taiyuan Normal University, Shanxi Taiyuan, 030619; 2. Institute of Computational and Applied Physics, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 3. Shanxi Key Laboratory for Intelligent Optimization Computing and Blockchain Technology, Jinzhong 030619, Shanxi, China)*

**Abstract:** The physical environment of molecular clouds has a very important impact on the star formation rate, and understanding star formation is of great help to the formation of planets and the evolution of galaxies. This paper mainly reviews the relationship between star formation and gas in the Milky Way and the other galaxies in the past decade (that is, star formation law). In order to understand the nature of star formation; understand whether there is any necessary connection between star formation and gas, and whether stars are forming in a unified way. This article focuses on the relationship between dense gas and star formation rate from the galactic level to the individual molecular cloud level. At the same time, the composition of the interstellar medium and the method of measuring the density and star formation rate of the interstellar medium are also introduced.

**Key words:** star formation law, massive star formation, star formation efficiency