

星系中巨分子云的形成与演化

张 同 杰 宋 国 玄

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

星系中的巨分子云 (GMCs) 是恒星形成的主要区域, 因此它的形成和演化对于星系的演化是至关重要的。本文将介绍分子云的基本特性、分子云之间的碰撞和巨分子云的形成、碎裂和寿命以及其他环境因素, 如旋臂扰动、较差自转等在巨分子云的形成和演化中的作用。同时也探讨在采用数值模拟研究巨分子云演化时所取分子云数目的影响。

关键词 星系: 星际介质 — 星际介质: 云

1 引 言

星际介质 (ISM) 在盘状星系的总质量中所占的比例很小, 但它在星系演化中起了很重要的作用。分子氢是星际介质的一个重要组成成分, 同时它也是星际介质中比较冷且密集的部分。在银河系中, 分子氢的质量几乎和原子氢相同。分子氢基本上以云的形式出现于星系中, 并称之为分子云。分子云的质量范围在 $10^2 M_{\odot}$ 与 $10^7 M_{\odot}$ 之间。它内部的 H_2 的数密度大约是 $100-300 \text{cm}^{-3}$ 。观测到晚型旋涡星系分子云的质量谱是 $N(M) \propto M^{-1.6[1]}$ 。

质量大于 $10^5 M_{\odot}$ 的分子云称作巨分子云。它的典型特征可描述如下: 其质量为 $4 \times 10^5 M_{\odot}$, 半径是 40pc。对 M83 和 M51 高分辨率的观测表明巨分子云是由分子氢而不是原子氢集合而成, 原子氢是在 OB 型星形成后从 H_2 气体中部分分离而来^[2,3]。

根据分子云的温度, 可以将其分为两个族^[4]。动力学温度 $< 10\text{K}$ 的冷分子云存在于旋臂区域和臂间区域。动力学温度 $> 10\text{K}$ 的热分子云主要分布在旋臂区域, 它大部分与射电 H II 区成协。热分子云是一些在旋臂区域中被目前已经形成或正在形成的 OB 型星加热的分子云。

关于分子氢的观测, 因为它在射电波段没有允许跃迁, 故为了得到大部分低激发温度 ($T < 100\text{K}$) 区域的分子氢的信息, 需要通过其他的探针分子, 其中最有效的探测工具是 CO 的 $2.6\text{mm}(J=1 \rightarrow 0)$ 线。

星系中恒星形成主要发生在分子云中, 特别是在巨分子云中。Dobashi 等人^[5] 在 1994 年利用 Nagoya 大学的两个 4m 毫米波望远镜在 $2'.7$ 角分辨率情况下对 Cygnus 天区进行了大

尺度 $^{13}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ 探测。他们发现, 挑选出来作为原恒星候选源的 215 个 IRAS 点源可能与分子云成协, 其中 61 个分子云和这些点源靠在一起。这表明, 在被探测到的分子云中有大约 40% 是恒星正在形成的场所。在巨分子云中, 各种物理过程使分子物质转变为恒星。大质量恒星中的星风、膨胀的 H II 区以及超新星的爆发, 一方面导致了恒星质量向星际物质的转移, 另一方面由于超新星爆发导致了巨分子云的碎裂, 因此巨分子云就碎裂为许多小质量的分子云。可是分子云之间的碰撞又导致了巨分子云的生长, 这样巨分子云和小质量分子云在星际介质中形成了一个循环过程。

在本文中将从分子云的基本特性的观测出发, 评述分子云之间的碰撞和巨分子云的生长机制、巨分子云的碎裂和寿命以及较差自转、旋臂扰动在巨分子云的形成和演化中的作用的理论和观测结果, 以及在采用数值模拟研究巨分子云演化时所取分子云数目的影响。

2 分子云的基本特性

星系中分子氢的质量依赖于从积分 CO 强度到 H_2 的柱密度的转换因子。由于这个因子的准确值有争议, 因此星盘中分子氢的总质量不能很好地确定。平均而言, 早型星系中分子物质的含量比旋涡星系中的含量低一个量级^[6]。在银河系中分子云主要分布在 3—7kpc 的环形区域内^[7], 在这个环形区域中分子氢的质量可能在 6×10^8 ^[8]— $2 \times 10^9 M_{\odot}$ ^[9] 之间。环形区域中分子云的平均标高是 60pc^[7]。在这种情况下, 分子氢的平均密度在 2.5×10^{-24} — $10^{-23} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间。Sodroski 等人^[10] 通过对银面区 Goddard-Columbia $^{12}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ 巡天估计了银河系中心 400pc 之内转换因子的值。发现在银盘里转换因子的值比银心区的值大 3—10 倍。在认为转换因子为常数情况下, 对银河系和河外旋涡星系由大尺度 ^{12}CO 观测所得结果表明, 在离中心很小的地方过高地估计了分子氢的相对含量, 而在离中心大的地方过低地估计了分子氢的相对含量。

Carpenter 等人^[11] 利用覆盖超过 $32 \text{ deg}^2(177\text{pc} \times 211\text{pc})$ 上的 $^{12}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ 和 $^{13}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ 观测结果, 对在 Gem OB1 分子云复合体内球形云结构和恒星形成活动作了广泛的研究。他们用 LTE 分析从 ^{12}CO 和 ^{13}CO 资料中得到的分子气体的运动学温度和柱密度, 发现大多数分子气体的运动学温度 $\leq 10\text{K}$ 。有 ^{13}CO 发射的区域的平均 H_2 数密度在 65—120 cm^{-3} 之间, 这与以前关于分子云复合体的研究一致, 并且不依赖于这个区是否包含大质量恒星形成。对 Gem OB1 分子云复合体, 总的来说, H_2 的平均数密度比较低。他们认为, 对于 Gem OB1, 大多数分子气体包含在相对冷、低柱密度分子物质中。在 Gem OB1 分子复合体中的高柱密度区, 是通过来自新形成的大质量恒星的星风和 H II 区的外部压缩而成。因此, 大质量恒星形成一旦开始, 分子复合体的结构和进一步的演化, 在很大程度上是膨胀的 H II 区和星风与周围分子物质相互作用的结果。

Sempere 等人^[12] 在 1995 年利用 IRAM 30m 望远镜在分辨率为 $23''$ 和 $12''$ 情况下对晚型棒旋星系 NGC7479 的 $\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ 和 $\text{CO}(J=2 \rightarrow 1)$ 辐射进行了观测, 并且对基于非弹性碰撞分子云模型的分子气体进行了数值模拟。观测结果表明, CO 的发射都是沿着星系中的棒。分子气体集中在棒的中心区域, 在棒的中心位置和棒的其他位置的强度之比为 ~ 10 。这一特点能够解释在这个星系中被 IRAS 巡天探测到的星暴事件。对于图案速度 $\Omega_p = 30\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1}$ 、共转半径 $R_{\text{cr}} \sim 9\text{kpc}$ 的模型得到了最好的模拟结果。数值模拟结果

表明，一个狭窄的气体棒和恒星棒紧靠在一起，这与 CO 观测相符合。棒和旋涡结构都在共转半径之内，没有内林德布拉德共振 (ILR)。同时模拟结果也描绘了与在 NGC7479 的棒端和沿着旋臂能看到的与 H II 区相联系的分子气体的集中图像。

观测表明，巨分子云本身有自转运动。转动角动量可达到每单位质量约 $100\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pc}$ 。关于巨分子云自转运动的起源，Chernin 和 Efremov^[13] 在 1995 年作了详细的研究。他们分析了太阳附近的四个巨分子云，即 Orion A, Rosette, Mon R1 和 W3。其中沿 Orion A 云的长度方向有一个 $-0.10\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pc}^{-1}$ 的强速度梯度，这个值有 20% 的不确定性，其相应的自转角动量估计为每单位质量 $-75\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pc}$ 。另外三个巨分子云即 Rosette, Mon R1 和 W3 的自转角动量分别为 -47 , $-45\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pc}$ 和 $27\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pc}$ (单位质量)。普通巨分子云的速度梯度的绝对值小于 $0.05\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pc}^{-1}$ ，角动量小于 $15\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pc}$ 。观测到的这些巨分子云的速度梯度比由银河系的较差自转引起的速度梯度强。由上面可以看出，除 W3 外其他三个巨分子云在惯性参考系中相对于银河系有逆行转动。巨分子云转动的起源与巨分子云的形成有密切的联系。与前面提到的巨分子云是由小分子云的聚合形成观点不同，有人认为星系盘中星际气体产生了引力不稳定性并坍缩形成了巨分子云，这样形成的巨分子云由于星系盘的轨道较差自转就可产生其生来具有的自转运动。这种起源机制产生的自转运动或是顺转或是逆转，这取决于在这个区域中盘的转动曲线的特性，即转动角速度和到星系盘中心距离的变化关系。如果盘的转动曲线是上升或平坦的，那么相应区域巨分子云的自转总是顺向的。这个结论是 Mestel 在 1966 年研究行星形成时首先得到的。按这种观点，在太阳附近观测到的巨分子云逆行转动应该表明在这个区域的转动曲线是下降的，这与同太阳附近星系盘转动有关的资料是一致的。但 Mestel 机制不能解释巨分子云 W3 的顺向转动。Mestel 机制是不是唯一的巨分子云自转的原因？针对这个问题，Chernin 和 Efremov 提出了银河系中另一种可能的巨分子云自转起源的机制，它与星际气体的流体动力学过程有关，这个过程不是一个整体过程而是一个局部过程。他们认为这种过程是由气体的涡旋效应 (vorticity) 导致。星际气体流与旋臂有关的大尺度激波前沿的相互作用使得涡旋效应能够在银盘的局部区域产生。这种机制与 Mestel 机制相同，即也与银盘转动有关并且依赖于盘的转动曲线，但方式与 Mestel 机制不同。他们还建立了一系列二维和三维的计算机模型。这些模型对密度非均匀性与激波前沿的流体动力学相互作用的基本过程作了完全而又确切的定量分析和描述。结果表明，分子云与激波的碰撞在星际气体激波的后面导致了局部涡旋效应的产生。这个涡旋包括两个旋转方向相反的旋涡，一个平行于盘的转动方向，一个反平行于盘转动方向，因此这种相互作用的每一种情况中即有顺行也有逆行的局部转动产生。在形成的涡旋中，若由于气体的坍缩形成了巨分子云，那么涡旋所具有的自转角动量会转移到巨分子云之上，这样就形成了自转方向相反的巨分子云的自转运动。关于巨分子云的自转运动后面还要讨论。

3 分子云之间的碰撞和巨分子云的形成

巨分子云的形成主要依赖于分子云之间的碰撞。当两个分子云互相碰撞时，碰撞的结果依赖于碰撞的性质。如果两个分子云碰撞后结合形成一个大分子云，在这种情况下，若干次碰撞后可形成巨分子云，并且通过数值积分或数值模拟可以研究分子云的质量谱。另一种情况是发生碰撞后的分子云失去相对动能，但不是结合成一个较大质量的分子云。因此，在巨

分子云的形成中分子云之间的碰撞是关键因素。根据分子云之间的碰撞的特性可分为两种不同的巨分子云形成理论。一种称为结合生长理论 (coagulation mechanism)^[14], 这种理论认为, 当两个小质量分子云碰撞时, 它们结合在一起形成一个大质量分子云, 其质量为这两个分子云质量之和。这样的连续碰撞逐渐形成巨分子云。另一种称为聚合生长理论 (aggregation mechanism)^[15,16], 这种理论则认为, 当两个分子云碰撞时, 碰撞是非弹性碰撞, 它消耗了碰撞分子云之间的相对动能。因此, 它们不是结合在一起, 而是有可能聚合形成一个较大质量的分子云, 连续多次的碰撞就会形成一个巨分子云。观测支持了聚合形成理论。在 1986 年, Sanders 等人^[17] 在高分辨率的 Massachusetts- Stony Brook CO 星系盘面巡天中证认了一些源, 这些源对应 CO 辐射极大且被证认为分子云核。Rivolo 等人^[18] 在 1986 年用两点相关函数分析了 2000 个分子云核。他们得出结论: 这些热核可以聚合形成特征尺度为 50—150pc 的团块。

许多人对结合理论作了广泛的研究。Kwan 和 Valdes^[14,19] 基于结合形成机制进行了数值模拟, 他们采取如果两个分子云核心之间的距离小于质量较大的分子云的半径, 那么这两个分子云将合并成一个质量是碰撞分子云的质量之和且与碰撞分子云有相同密度的分子云。结果表明, 这种巨分子云的形成机制是有效的。

Kwan^[20] 以及 Kwan 和 Valdes^[19] 分别研究了密度对质量谱演化的影响。有旋臂扰动存在时, 在低密度情况下, 即 $\rho = 2.5 \times 10^{-24} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 形成大质量分子云所需的时间要 10^8yr , 以致质量谱上上升得比较慢; 在高密度情况下, $\rho = 1.3 \times 10^{-23} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 大质量分子云很容易形成。当旋臂扰动存在时, 在旋涡扰动势极小处较高的分子氢空间密度导致了大质量分子云很快地形成。在大质量分子云的空间密度方面, 对于有无旋臂扰动情况的对比显得更引人注目。对于相同的分子氢初始平均密度情况, 在旋涡扰动势极小附近, 大质量分子云的增长率是没有旋臂扰动情况下的 3—6 倍。

Roberts 等人^[15,21-23] 曾经分别研究了分子云之间的碰撞和巨分子云的形成。在他们的机制中, 分子云之间的碰撞是恢复系数为 $\alpha = 0.5$ 的非弹性碰撞。在这种状况下, 关于巨分子云的形成唯一采纳的机制是聚合或成团生长机制, 而不是结合生长机制。

Scoville 等人^[24] 在 1986 年利用高光度射电 H II 区分析了 94 个巨分子云, 并在模拟 OB 星协的形成中考虑了这个事实。OB 星协经历了一个活动时期并且产生超新星爆发事件。非弹性碰撞消耗了系统的能量。为了确保被消耗的分子云系统适当的总能量平衡以及维持物理上比较理想的从星协到分子云系统的能量转换率, Roberts 等人^[15] 在 1984 年研究旋臂结构和恒星形成时, 在计算机程序里采用了一种反馈机制。根据这种机制, 对在新爆发的超新星遗迹 (SNR) 的半径 R_{snr} 之内的分子云, 给定一个附加速度以代替在分子云碰撞中失去的随机的运动能量。

恒星偏振图表明, 星际磁场弥漫于我们银河系的气体之间^[25]。如果磁场足够强, 起初弥漫的分子云, 靠沿它们联线方向或缠绕的磁力线方向施加的一个力而相互碰撞, 并且交换动量。Clifford 和 Elmegreen^[26] 在 1983 年认为, 直接的分子云间碰撞可能是很少的, 且大多数低速分子云之间彼此的相互作用完全是由于磁力线缠绕造成的。当考虑分子云之间的由于磁力线缠绕而导致的非弹性碰撞时, 典型条件下分子云的有效碰撞截面将比它的几何截面大 2—4 倍。Kahn 和 Song^[16] 于 1994 年沿这条线索对巨分子云的形成作了研究, 他们探讨了不同碰撞恢复系数对巨分子云的形成所产生的影响。结果表明, 当碰撞恢复系数小于或等于 0.5

时，巨分子云能有效地形成，并且分子云之间的自引力在聚合生长过程中的作用是非常关键的。同时对于较低的平均密度 $\rho = 3.54 \times 10^{-24} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的情况作了数值模拟。尽管密度较低，但是在 $1.5 \times 10^8 \text{yr}$ 内大质量分子云的形成仍然非常有效。

可是，碰撞也可导致分子云的碎裂，尤其对那些有较大速度弥散度的小分子云。1973 年 Taff 和 Savedoff^[27] 描述的既简化又实际的模型中，一个碰撞的结果可以是一个碎块，也可以是两个或三个碎块。Casoli 和 Combes^[28] 以及 Combes 和 Gerin^[29] 分别采用这种模型分析了分子云的质量谱。从统计来看，有一半的碰撞导致结合，另一半则导致两个碎块、三个碎块的情况非常少。

4 巨分子云的碎裂和寿命

已经知道，恒星形成于分子云，尤其是巨分子云中。但由于恒星形成时的初始质量函数在某一质量处出现转折，所以现在一般接受的理论是：大质量恒星与小质量恒星的形成机制是不同的，即双模式理论^[30]。小质量恒星的形成机制是随机自传播机制^[31]：即当恒星一旦在某分子云区域中形成时，由于膨胀的 H II 区和恒星风的影响，在它附近由于激波的作用会随机地形成新的恒星，这样恒星形成区逐渐像链锁反应似地传播出去。观测事实也证实了这一点^[32]，并且这样的恒星形成机制对旋涡结构的影响也是与观测事实相一致的。关于大质量恒星的形成，目前认为是由分子云之间碰撞导致。Scoville 等人^[24] 在分析了高光度射电 H II 区域的 94 个巨分子云样品后发现，OB 星在单位分子氢中形成的效率显著地随质量为 $10^5 M_{\odot}$ 到 $3 \times 10^6 M_{\odot}$ 的巨分子云的质量增加而减少。因此他们提出，大质量恒星的形成一般不是由内部机制导致，OB 星的形成是巨分子云之间碰撞的结果。Loren^[33] 在 1976 年也认为在 NGC1333 区中的恒星形成是由分子云之间碰撞触发的。根据这些观测结果，宋国玄^[34] 在 1989 年认为：巨分子云之间的碰撞触发了分子云内大质量恒星的形成，而这些恒星形成时所产生的膨胀 H II 区和恒星风造成了巨分子云的碎裂。

在大质量恒星形成区域内，对触发机制清晰的证实是很困难的，因为这个区域一般结构非常复杂。为了研究恒星形成的触发机制，Hasegawa 等人^[35] 对来自在 Sgr B2 团附近分子云的 $^{13}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ 辐射作了高分辨率的观测。并对由得到的 ^{13}CO 天体图和较大的低分辨率天体图^[36] 揭示出来的在 Sgr B2 附近巨分子云的特征结构和运动学作了研究。结果表明，与发射区边缘附近稠密大质量分子云核成协的新诞生的 O 型星分布，就很好地说明这些恒星的形成是分子云碰撞的结果。这是迄今为止由分子云碰撞导致大质量恒星形成的一个最清晰的例子。

在巨分子云的碎裂和星系中恒星形成的讨论中，Roberts 和 Hausman^[15] 在 1984 年建立了一种二维模型。在这种模型中，分子云之间的碰撞是非弹性的，并且当两个分子云碰撞时有可能形成恒星。他们没有清楚地显示巨分子云的聚合过程。但是在模拟中引入一个时间间隔 τ_{del} ，即：当两个分子云碰撞时，一旦导致了恒星的形成，在这以后的时间间隔 τ_{del} 内，即使这两个分子云与其他分子云发生碰撞，也不会有恒星的形成发生。事实上，这暗示有恒星形成的分子云将碎裂，一个新的分子云的形成所需的时间由 τ_{del} 给出。 τ_{del} 与分子云的质量有密切的关系，分子云的质量越大 τ_{del} 越长。 τ_{del} 的引进将影响导致恒星的形成的分子云之间的碰撞。

如果巨分子云的寿命没有限制,那么小质量的分子云将被碰撞消耗尽,并且观测到的质量谱也将不是 $N(M) \propto M^{-1.6}$ 。由此可知,巨分子云是具有一定寿命的。巨分子云在结束其寿命后会碎裂成较小质量的分子云。如此往复循环,在星系年龄的时间尺度内,可以保持其一定的质量谱。因此对巨分子云寿命的研究具有很重要的意义。Kwan^[20]发现,仅当分子云的寿命大于 $2 \times 10^8 \text{yr}$ 时,分子云之间的结合形成才能维持观测到的巨分子云的丰度。在他们的研究中未涉及到决定巨分子云寿命的机制,也未讨论旋涡星系中旋臂的影响。在后来的研究中他们采用了这个估计。

恒星的形成发生在分子云,尤其是巨分子云中。观测表明与星团成协的巨分子云的年龄小于 $4 \times 10^7 \text{yr}$ 。一旦恒星在巨分子云中开始形成,那么由 H II 区和星风导致的巨分子云的有效碎裂将会发生,而对大质量的恒星将会导致超新星爆发。所有这些过程在 $\sim 10^7 \text{yr}$ 的时间尺度内似乎能使一个巨分子云碎裂。根据这种观点, Casoli 和 Combes^[28] 取 $4 \times 10^7 \text{yr}$ 为巨分子云的寿命,发现对于低密度的分子氢,如果巨分子云的寿命是无限的,那么包含在巨分子云内总质量的比例在分子云的演化中几乎保持不变。在同样密度情况下,如果巨分子云的寿命取 $4 \times 10^7 \text{yr}$,包含在巨分子云内总质量的比例将减少,而且密度若增加 10 倍,比例仍将几乎保持为常数。上述是在没有旋臂扰动情况下的结果。在考虑到旋臂扰动时,如果在旋臂和臂间区域所耗费的时间之比大约为 6,并且旋臂内的密度假定增加 10 倍,巨分子云的含量将产生脉动,这与观测结果类似。

观测结果告诉我们,巨分子云中大质量恒星的形成是巨分子云之间碰撞的结果^[24]。大质量恒星一旦形成, H II 区、星风和超新星爆发等就会使巨分子云碎裂。可以得出结论:巨分子云的碎裂主要是由于巨分子云之间的碰撞导致了大质量恒星的形成造成的。因此巨分子云的寿命取决于巨分子云碰撞概率的估计。宋国玄^[34]在 1989 年对巨分子云之间的碰撞概率作了粗略的估计,结果在考虑旋臂影响下,得到巨分子云的碰撞概率为 $1/8.18 \times 10^7 \text{yr}$,而不考虑旋臂影响时为 $1/2.45 \times 10^8 \text{yr}$ 。从而得到在旋臂和臂间区域内巨分子云的寿命分别是 $8.18 \times 10^7 \text{yr}$ 和 $2.45 \times 10^8 \text{yr}$ 。由此可知,巨分子云的寿命依赖于巨分子云所在的旋涡星系中的不同位置。宋国玄^[37]在 1989 年根据这种机制应用碰撞方程对分子云质量谱的演化作了研究,在这种模型中不同于早先的模型,巨分子云的寿命不必预先给定。相反,巨分子云的寿命可以从计算中得到,在这种计算中巨分子云一旦相互碰撞,它们的生命将结束。

5 星系中的较差自转在巨分子云形成中的作用

银河系的自转是较差自转,其他河外旋涡星系也是如此。那么较差自转在巨分子云形成中的作用是什么?

张同杰和宋国玄^[38]在 1995 年利用了一个较差自转的 Toomre 盘 (Toomre 1963),在计算机上模拟分子云在这样一个盘中的演化。为了比较,同时建立了一个转动角速度 $\omega = 0.05 \text{m} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的轴对称刚体自转盘。在这两个模型中,巨分子云的形成采用聚合形成机制,分子云的数目取 120000 个,单个分子云的质量为 $10^4 M_{\odot}$ 。演化结果表明:两种情况下所形成的巨分子云的外形都是不规则的且呈纤维状;较差自转情况下所形成的巨分子云内分子云的成员是不固定的,而刚体自转情况则基本是固定的;较差自转情况下的巨分子云的比例在演化中越来越大,刚体自转情况下则基本保持不变;在演化中,较差自转情况中巨分子云的纤维状的方向一

一般在变化,且纤维状巨分子云作逆向转动,而刚体自转情况下其方向保持不变。之所以出现这样的结果,他们认为:聚合形成导致了巨分子云的不规则外形,这与结合形成机制中形成的球形巨分子云完全不同;星盘的较差自转作用把一些分子云从一个巨分子云拉出,又把一些分子云拉进其他巨分子云中,这就导致了巨分子云内分子云成员的不固定;同时较差自转也增加了巨分子云之间的碰撞机会,使形成的巨分子云的比例在演化中越来越大;另一方面,由于较差自转的存在,使距星盘中心较近的分子云比距星盘中心较远的分子云转动得快。因此使得巨分子云的纤维状的方向一般在变化,且纤维状巨分子云作逆向转动,由此可知,巨分子云确实存在自转运动,这与前人的观测也是相符合的。因此较差自转不仅在巨分子云的形成中起了很大的积极作用,而且在巨分子云的自转运动中也起了很大的作用。

最近 CO 的观测表明,巨分子云的质量有的超过 $10^7 M_{\odot}$ 。原因可能是:第一,分子氢的密度比一般的高;第二,在分子氢存在的星盘中,较差自转比 Toomre 盘还要强。

6 旋臂扰动在巨分子云和恒星形成中的作用

我们已经知道,分子云之间的非弹性碰撞导致了巨分子云的形成。并且碰撞依赖于当地的分子物质的平均密度。在旋臂扰动存在时,旋臂区域的分子物质的平均密度将增加。这好像是在旋臂区域中将有更多的巨分子云形成。那么,旋臂扰动对于星系尺度上的巨分子云形成的影响是什么?

Kwan 和 Valdes^[14] 在 1987 年利用巨分子云的结合形成机制建立了一种模型来研究巨分子云的形成。他们的计算机模拟结果表明:在有旋臂扰动情况下巨分子云的形成要比没有旋臂扰动时更有效,这说明旋臂扰动明显地加大了巨分子云的形成效率。

从对早型星系(其中多数是透镜状星系)的 CO 观测结果中知道,旋涡密度波的存在对巨分子云的形成不是必要的^[6]。宋国玄^[37] 在 1989 年基于巨分子云的寿命是由巨分子云的碰撞所决定的思想,对分子云碰撞方程进行了数值积分。计算表明:在整个盘状星系的盘面内,不管有无旋臂,两者产生的巨分子云总质量几乎相等。这也说明,旋臂结构的存在并不是保持巨分子云具有一定含量的必要条件,即旋臂扰动对星系中巨分子云质量与所有分子云质量之比没有影响。若初始时刻所有分子云都具有质量 $10^3 M_{\odot}$,不论考虑旋臂效应与否,经过若干时间后,都会有约 65% 的分子云质量蕴藏在巨分子云中。但是在考虑旋臂效应时所经历的时间要比不考虑旋臂效应时短。Li 等人^[39] 在 1993 年利用 $H\alpha$ 、 ^{12}CO ($J=1 \rightarrow 0$)、射电连续谱和 H I 辐射的高分辨率图像,详细研究了早型旋涡星系 NGC7625 中分子气体和原子气体的分布及其与恒星形成的关系。他们探讨了 H_2 的运动学和大质量恒星的形成效率,从中得出结论:和大部分旋涡星系一样,恒星的形成在有效地进行着,并不需要旋涡密度波的触发。

张同杰和宋国玄^[40] 在 1995 年对旋臂扰动在巨分子云形成中的作用作了数值模拟。模拟采用了巨分子云的聚合形成机制,且分子云数目取 120000 个,单个分子云的质量为 $10^4 M_{\odot}$ 。模拟结果表明,当不考虑由于恒星形成导致的巨分子云的碎裂时,旋臂的存在只能促进一些质量较大的巨分子云形成,而对形成的中间质量的巨分子云的数量基本没有影响。同时也把结果与既不考虑旋臂的存在也不考虑恒星形成引起的巨分子云的碎裂情况下巨分子云的演化结果^[16]作了比较,并且,对在巨分子云的结合形成机制下考虑到由于恒星的形成导致的巨分子云的碎裂时,旋臂结构在巨分子云形成中的作用的研究结果^[14]作了详细讨论。他们得出

结论：由于大质量的巨分子云较易碎裂，且数量又少。所以在巨分子云的聚合形成过程中，若包括了恒星形成引起的巨分子云的碎裂，旋臂扰动对巨分子云的总体含量基本没有影响；旋臂扰动的存在只是促使大部分巨分子云存在于旋臂区域，而在臂间区域只有少量的巨分子云。

7 分子云数目不同对巨分子云碎裂和恒星形成率 (SFR) 的影响

分子物质在星系中形成了一个循环。研究这个循环一般采用计算机数值模拟。由于计算机的限制，单个分子云质量的选取是一个很重要的问题。在所有的分子云演化的研究中，分子云的初始质量谱可分为两种类型：一种是假定在初始时刻分子云具有不同的质量，并满足一定的质量谱规律^[9,28,29,41,42]。另一种是所有的初始分子云都有相同的质量^[11,15,16]。在我们的模拟中一般采用第二种方式，分子云初始质量相同且单个分子云的质量为 $10^4 M_{\odot}$ 。可是观测证实存在许多较小质量的分子云。Genzel^[43] 在 1991 年证实单个分子云的质量可低到 $20 M_{\odot}$ 。这就出现了一个问题：单个分子云的最小质量或分子云数目的不同在巨分子云数值模拟演化中的影响是什么？我们知道，分子云的聚集必然依赖于分子云的碰撞截面。决定这个参量一般有两种方法：一种方法是假定所有分子云都有相同的平均密度，而不管单个分子云的质量有多大。观测表明分子云的平均密度是 $100 \sim 300 \text{H}_2 \cdot \text{cm}^{-3}$ ，Kahn 和 Song^[16] 在 1991 年取 $200 \text{H}_2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。另一种方法是对不同数量的分子云数值模拟取相同的平均自由程。

Noguchi 和 Ishibashi^[44] 1986 年在研究星系尺度上巨分子云中的恒星形成速率时，采用了第二种方法。他们在模拟研究中没有考虑巨分子云的形成及碎裂过程，而只是假定在巨分子云已形成下由于碰撞而有大质量恒星的诞生。在这种情况下通过分子云数目不同的模拟实验后指出：只要巨分子云的平均自由程在不同粒子数下保持不变，恒星形成的效率也可保持不变。宋国玄和张同杰^[45] 也对分子云数目的影响作了讨论。他们的模拟是在包括巨分子云的形成和碎裂条件下进行了研究。在这种条件下发现：若取平均自由程保持不变的条件，恒星形成效率会大大提高；而若依据上面第一种方法，即保持分子云中数密度不变的条件，那么恒星形成的效率就与模拟粒子的数目无关。产生这一差别的主要原因在于文献 [45] 包括了恒星形成引起的巨分子云的碎裂及巨分子云通过聚合形成的过程。

8 总结与展望

巨分子云形成的进一步研究依赖于对分子云循环的理解，其中包括巨分子云的形成与碎裂，而且分析巨分子云的碎裂尤为重要。因为这一问题与恒星形成密切相关，这样，巨分子云的演化研究更使我们需进一步研究恒星在巨分子云中的形成过程。同时在这一基础上可以进一步研究星暴星系的形成过程。

目前计算机的内存容量越来越大，速度越来越快，这为计算机数值模拟提供了更有利的条件。同时，高分辨率的分子气体的观测，再加上光学和红外观测资料越来越丰富，也为我们详细研究恒星的形成过程和巨分子云的形成和演化提供了更多的机会。

参 考 文 献

- [1] Sanders D B, Scoville N Z, Solomon P M. *Ap. J.*, 1985, 289: 373
- [2] Allen R J, Atherton P D, Tilanus R P J. *Nature*, 1986, 319: 296
- [3] Lo K Y, Ball R, Masson C R *et al.* *Ap. J.*, 1987, 317: L63
- [4] Solomon P M, Sanders D B, Rivolo A R. *Ap. J.*, 1985, 292:L19
- [5] Dobashi K, Bernard J P, Yonekura Y *et al.* *Ap. J. Suppl.*, 1994, 95:419
- [6] Wiklind T, Henkel C. *Ap. J.*, 1989, 225: 1
- [7] Sanders D B, Solomon P M, Scoville N Z, *Ap. J.*, 1984, 276:182
- [8] Bhat C L, Mayor C J, Wolfendale A W. *Phil. Trans. of Royal Soc. of London*, 1986, A319: 249
- [9] Sanders D B, Clemens D P, Scoville N Z. *Ap. J.*, 1985, 299: 1080
- [10] Sodroski T J, Odegard N, Dwek E *et al.* *Ap. J.*, 1995, 452: 262
- [11] Carpenter J M, Snell R L, Schloerb F P. *Ap. J.*, 1995, 445: 246
- [12] Sempere M J, Combes F, Casoli F. *Astron. Astrophys.*, 1995, 299: 371
- [13] Chernin A D, Efremov Yu N. *M.N.R.A.S.*, 1995, 275: 209
- [14] Kwan J, Valdes F. *Ap. J.*, 1987, 315: 92
- [15] Roberts W W, Hausman M A. *Ap. J.*, 1984, 277: 744
- [16] Kahn F D, Song G X. *Astrophys. Space Sci.*, 1994, 211: 127
- [17] Sanders D B, Clemens D P, Scoville N Z *et al.* 1986, *Ap. J. Suppl.*, 60:1
- [18] Rivolo A R, Solomon P M, Sanders D B. *Ap. J.*, 1986, 301: L19
- [19] Kwan J, Valdes F. *Ap. J.*, 1983, 271: 604
- [20] Kwan J. *Ap. J.*, 1979, 229: 567
- [21] Roberts W W, Stewart G L. *Ap. J.*, 1987, 314: 10
- [22] Adler D S, Roberts W W. In: Dickman R L, Snell R L, Young J S eds. *Molecular clouds in the Milky Way and external galaxies*. Berlin: Springer, 1988. 291
- [23] Roberts W W, Adler D S. In: Dickman R L, Snell R L, Young J S eds. *Molecular clouds in the Milky Way and external galaxies*. Berlin: Springer, 1988. 289
- [24] Scoville N Z, Sanders D B, Clemens D P. *Ap. J.*, 1986, 310: L77
- [25] Cleary M N, Heiles C, Haslam C G J. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1979, 36: 95
- [26] Clifford P, Elmegreen B G. *M.N.R.A.S.*, 1983, 202: 629
- [27] Taff L G, Savedoff M P. *M.N.R.A.S.*, 1973, 164: 357
- [28] Casoli F, Combes F. *Astron. Astrophys.*, 1982, 110: 287
- [29] Combes F, Gerin M. *Astron. Astrophys.*, 1985, 150: 327
- [30] Wyse R F G, Silk J. *Ap. J.*, 1987, 319: L1
- [31] Gerola H, Seiden P E. *Ap. J.*, 1978, 223: 129
- [32] Seiden P E, Gerola H. *Ap. J.*, 1979, 233: 55
- [33] Loren R B. *Ap. J.*, 1976, 209: 466
- [34] 宋国玄. *天体物理学报*, 1989, 9: 32
- [35] Hasegawa T, Sato F, Whiteoak J B *et al.* 1994, *Ap.J.*, 429: L77
- [36] Bally J, Stark A A, Wilson R W *et al.* 1987, *Ap.J. Suppl.*, 65: 13
- [37] 宋国玄. *天文学报*, 1989, 30: 149
- [38] Zhang T J, Song G X. 1995a, to be published
- [39] Li J G, Seaquist E R, Wrobel J M *et al.* *Ap. J.*, 1993, 413: 150
- [40] 张同杰, 宋国玄. *天体物理学报*, 1997
- [41] Tomisaka K. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1984, 34: 457
- [42] Tomisaka K. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1986, 38: 335
- [43] Genzel R. In: James R A, Millar T J eds. *Molecular clouds*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. 75
- [44] Noguchi M, Ishibashi S. *M.N.R.A.S.*, 1986, 219: 305

[45] Song G X, Zhang T J. 1995c, to be published

(责任编辑 舒似竹)

The Formation and Evolution of Giant Molecular Clouds in Galaxies

Zhang Tongjie Song Guoxuan

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Science, Shanghai 200030)

Abstract

In this paper, the essential properties of molecular clouds, the collision between molecular clouds and the formation of GMCs are introduced. In addition, the disruption and lifetime of GMCs, together with the influences of spiral perturbation and differential rotation on the formation of GMCs, are also reviewed. The effect of the adopted molecular cloud number in the simulation on the result is discussed as well.

Key words galaxies: ISM--ISM: molecular clouds