



银河系外盘分子云观测发现恒星形成初始条件随金属丰度变化

林令瑞¹, 张智昱^{1*}, 王均智^{2*}

1. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023

2. 广西大学物理科学与技术学院, 南宁 530004

* 联系人, E-mail: zzhang@nju.edu.cn; junzhiwang@gxu.edu.cn

The initial condition for star formation varies with metallicity: insights from the Galactic outer disk molecular clouds

Lingrui Lin¹, Zhi-Yu Zhang^{1*} & Junzhi Wang^{2*}

¹ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

² School of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China

* Corresponding authors, E-mail: zzhang@nju.edu.cn; junzhiwang@gxu.edu.cn

doi: [10.1360/CSB-2025-0454](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0454)

“恒星是如何形成的?”是天文学领域的基本问题之一。目前我们已经认识到恒星形成于主要由氢分子构成的冷暗分子云。分子云在引力的作用下碎裂形成致密的分子云核。云核持续坍缩,直到触发稳定氢核聚变的条件,恒星便由此诞生。因此,研究分子云如何形成恒星,关键在于了解其中的“力与运动”,也就是分子云的“动力学”。

过去几十年对银河系分子云的观测发现,分子云内部的运动由无规则的湍动主导。湍流运动总体起到支撑分子云的作用,抵抗分子云的自引力坍缩。湍动和引力的相互抗衡达成“位力平衡”,即两倍动能加一倍自引力势能等于零。只有当分子云的自引力势能战胜其内部动能时,分子云才会坍缩形成恒星。因此,位力平衡常常被当作初始条件用来研究分子云中的恒星形成^[1]。

然而,在过去的研究中,分子云“位力平衡”的普适性并没有得到充分检验。尽管现在已经存在很多对银盘不同环境下分子云动力学状态的研究,但这些研究要么受限于观测分子云的气体探针(主要是¹²CO发射线;由于¹²CO发射经常饱和,因此该探针通常无法准确测量气体质量),要么研究的样本大多局限于太阳系近邻或银河系内银盘(银心距小于太阳银心距)的环境。近些年的银河系分子气体巡天在银河系外盘(银

心距大于太阳银心距)证认了大量的分子云,其中包括利用紫金山天文台13.7-m望远镜开展的银河画卷项目。这些分子云为我们提供了研究特殊环境下分子云动力学性质的关键样本^[2]。

与银河系内盘相比,银河系外盘的气体具有更低的金属丰度^[3]、更低的银盘中平面压^[4],以及更小的湍流能量注入^[5]。因此,外银盘分子云恒星形成的初始条件可能会与内银盘分子云有诸多差异。此外,对外银盘低金属丰度分子云的研究也可以在一定程度上帮助我们推测其他低金属丰度环境下的恒星形成特性,例如河外星系的外盘、矮星系甚至是宇宙早期星系。

在文献^[6]中,利用更可靠的分子气体探针(低阶¹³CO转动跃迁),我们对一批外银盘的分子云开展了成图观测(图1(a))。此外,我们还收集了内银盘以及近邻贫金属矮星系的数据作为比较。利用这些数据,我们测量了分子云的大小、速度弥散以及质量,并计算了它们的位力参数^[7]。位力参数正比于分子云内部动能和自引力势能的比值。当分子云处于“经典的”位力平衡(即只考虑动能和自引力势能)状态时,其位力参数等于1。当分子云的位力参数大于1时,分子云内部的动能主导,分子云处于超位力化状态;当分子云的位力参

引用格式: 林令瑞, 张智昱, 王均智. 银河系外盘分子云观测发现恒星形成初始条件随金属丰度变化. 科学通报, 2025, 70: 3367–3369

Lin L, Zhang Z-Y, Wang J. The initial condition for star formation varies with metallicity: insights from the Galactic outer disk molecular clouds (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 3367–3369, doi: [10.1360/CSB-2025-0454](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0454)

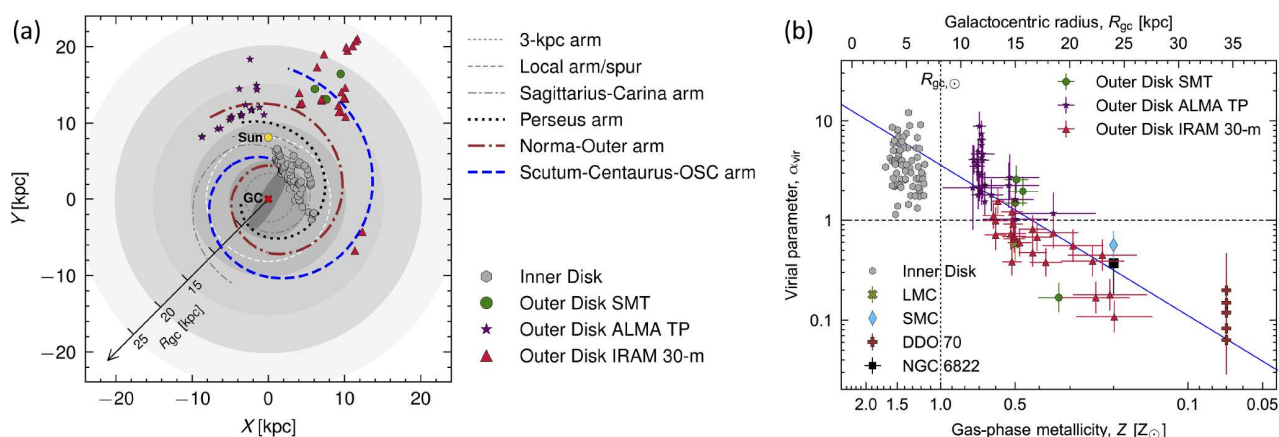


图 1 (网络版彩色)(a) 文献[6]的分子云样本在银河系盘面上的分布。图中展示了来自贝塞尔巡天的旋臂模型^[8], 包括: 3-kpc旋臂(灰色点线)、本地臂(灰色虚线)、人马座-船底座臂(灰色点划线)、英仙臂(黑色粗点线)、矩尺-外臂(棕色粗点划线)以及盾牌座-半人马座臂(蓝色粗虚线)。金色圆点和红色十字叉分别表示太阳和银河系中心的位置。白色虚线表示太阳轨道圆。紫色星形、红色三角形和绿色圆点分别表示通过ALMA Total Power (TP) Array、IRAM 30米望远镜和SMT观测的外盘分子云。灰色六边形表示来自Galactic Ring Survey的内盘分子云。(b) 分子云位力参数随气态金属丰度的变化。除了银河系中的分子云, 图中还包含进了近邻贫金属矮星系中的分子云, 即大麦哲伦云(橄榄色叉号, 中值)、小麦哲伦云(蓝色窄梭形, 中值)、NGC 6822(黑色正方形, 中值)和DDO 70(棕色十字)。水平黑色虚线表示动能和势能之间的经典位力平衡(即位力参数等于1)。银河系分子云的气态金属丰度由分子云的银心距结合银河系径向金属丰度梯度^[3]估计。竖直黑色点线表示太阳银心距。蓝色实线表示对用¹³CO数据研究的银河系分子云的位力参数随金属丰度变化趋势的线性拟合。改编自文献[6]

Figure 1 (Color online) (a) Distribution of molecular clouds on the Galactic plane in Ref. [6]. Spiral arm models from the BeSSeL survey (Bar and Spiral Structure Legacy Survey)^[8] are overlaid, including the 3 kpc arm (grey dotted line), the local arm/spur (grey dashed line), the Sagittarius-Carina arm (grey dashed dotted line), the Perseus arm (thick black dotted line), the Norma-outer arm (thick brown dashed dotted line), and the Scutum-Centaurus-OSC arm (thick blue dashed line). The gold dot and the red cross locate the Sun and the Galactic centre (GC), respectively. The white dashed line shows the solar circle. Purple stars, red triangles and green dots are the outer-disk molecular clouds observed with the ALMA TP Array, IRAM 30 m telescope and SMT, respectively. The grey hexagons show inner-disk molecular clouds captured by the Galactic Ring Survey. (b) Cloud virial parameter as a function of the gas-phase metallicity. Except from the Galactic molecular clouds, molecular clouds from metal-poor galaxies, namely, the LMC (olive cross, median), SMC (thin blue diamond, median), NGC 6822 (black square, median) and DDO 70 (brown pluses), are overlaid. The black dashed line represents the classical virial equilibrium between the kinetic energy and the self-gravitational energy (virial parameter equals one). The gas-phase metallicities of Galactic molecular clouds are estimated from their Galactocentric radii, using the Galactic radial gradient of metallicity. The vertical black dotted line shows the Galactocentric radius of the Sun. The blue line is a linear fit of the virial parameter versus metallicity trend using ¹³CO data for the Milky Way. Modified from Ref. [6]

数小于1时, 分子云的自引力势能主导, 分子云处于亚位力化状态。

我们发现, 大银心距分子云的速度弥散系统性地比小银心距分子云的更低。这与湍流注入随银心距下降的趋势一致^[5]。此外, 分子云的位力参数同样也随着银心距的增加而下降。内银盘的分子云普遍处于超位力化状态, 而银心距大于15千秒差距的外盘分子云普遍处于亚位力化状态。

利用气态金属丰度随银心距变化的梯度^[3], 我们将分子云的银心距换算成金属丰度, 从而进一步将近邻矮星系中的分子云纳入比较。分子云的位力参数随着金属丰度的下降呈现出系统性下降的趋势(图1(b))。这个趋势从富金属的内银盘延伸到低金属丰度的外银盘, 并扩展到近邻的贫金属矮星系中。这个趋势说明, 经典的位力平衡(仅考虑分子云的动能和自引力势能)并不普适。

内银盘富金属分子云的超位力化状态意味着自引力不足以束缚分子云内部的湍动。之前的研究对此现象的解释是,

这些分子云还额外受到外界压强的束缚^[9]。考虑到分子云“浸没”在弥散的星际介质里, 并且银河系中平面压在内银盘更高, 所以这个解释是符合预期的。

外银盘和贫金属矮星系中分子云的亚位力化状态意味着分子云内部的湍流不足以支撑其自引力。如果没有其他机制对抵抗分子云的自引力, 这些分子云便无法维持平衡, 从而迅速坍缩演化, 无法被系统性地观测到。因此, 我们考虑更一般的位力平衡^[7], 即除了经典位力平衡考虑的动能和自引力势能外, 还考虑分子云内部磁场的能量。我们发现, 支撑亚位力化的分子云所需的磁场强度与在太阳系近邻分子云中实测的磁场强度^[10]非常相近。因此, 我们并不需要贫金属分子云有着更强的磁场, 而是相比湍流, 磁场对支撑贫金属分子云的贡献比例更高。换言之, 贫金属分子云的低湍流强度使得磁场在支撑自引力方面相对更为显著。相比之下, 内银盘分子云的湍流本身就已经足够强大, 能够独立支撑其自引力, 因此它们内部磁场的作用相对次要。

本工作首次直接在分子云的尺度上揭示了恒星形成初始条件随金属丰度的变化。这一发现必将影响所有恒星形成理论。特别是在讨论贫金属环境下(如星系外盘、矮星系和宇

宙早期星系)的恒星形成时, 相关研究需要额外考虑诸如磁场等机制的影响。此外, 要验证以上推测, 我们未来需要对这些贫金属分子云中的磁场强度进行直接测量。

致谢 感谢国家重点研发计划(2023YFA1608204)和国家自然科学基金(12173016, 12041305)资助。

推荐阅读文献

- 1 McKee C F, Tan J C. The formation of massive stars from turbulent cores. [Astrophys J](#), 2003, 585: 850–871
- 2 Sun Y, Xu Y, Yang J, et al. A possible extension of the Scutum-Centaurus arm into the outer second quadrant. [Astrophys J](#), 2015, 798: L27
- 3 Méndez-Delgado J E, Amayo A, Arellano-Córdova K Z, et al. Gradients of chemical abundances in the Milky Way from H II regions: distances derived from Gaia EDR3 parallaxes and temperature inhomogeneities. [Mon Not R Astron Soc](#), 2022, 510: 4436–4455
- 4 Wolfire M G, McKee C F, Hollenbach D, et al. Neutral atomic phases of the interstellar medium in the Galaxy. [Astrophys J](#), 2003, 587: 278–311
- 5 Miville-Deschênes M A, Murray N, Lee E J. Physical properties of molecular clouds for the entire Milky Way disk. [Astrophys J](#), 2017, 834: 57
- 6 Lin L, Zhang Z Y, Wang J, et al. Inadequate turbulent support in low-metallicity molecular clouds. [Nat Astron](#), 2025, 9: 406–416
- 7 Bertoldi F, McKee C F. Pressure-confined clumps in magnetized molecular clouds. [Astrophys J](#), 1992, 395: 140
- 8 Reid M J, Menten K M, Brunthaler A, et al. Trigonometric parallaxes of high-mass star-forming regions: our view of the Milky Way. [Astrophys J](#), 2019, 885: 131
- 9 Field G B, Blackman E G, Keto E R. Does external pressure explain recent results for molecular clouds? [Mon Not R Astron Soc](#), 2011, 416: 710–714
- 10 Crutcher R M. Magnetic fields in molecular clouds. [Annu Rev Astron Astrophys](#), 2012, 50: 29–63