

# 内落候选源在分子云团块中的空间分布研究\*

万毓颀<sup>1,2</sup> 江治波<sup>1†</sup> 蒋禹<sup>1,2</sup> 陈志维<sup>1</sup>

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

**摘要** 恒星形成于致密分子云核的引力坍缩. 研究这种坍缩运动更容易发生在分子云团块的具体位置将有助于了解恒星在分子云团块中各个部分的形成情况, 为研究恒星形成提供更多的信息. 利用银河画卷项目提供的CO数据, 结合通过CO谱线所认证的3533个内落候选源的基本信息, 去寻找这些内落候选源所属的分子云团块, 并探讨内落候选源在分子云团块中的分布. 通过比较在3维球体中按一定数密度撒点所获得的分布与内落候选源在分子云团块中真实分布的差异, 发现内落候选源在分子云团块中的分布数密度随归一化中心距近似呈高斯衰减形式, 即内落源的数密度 $n$ 与归一化中心距 $r$ 的关系近似为 $n \propto e^{-ar^2}$ , 其中 $a$ 为衰减系数. 在 $^{13}\text{CO}$ 团块中, 最佳拟合的数密度函数为 $n \propto e^{-4.5r^2}$ ; 而在 $\text{C}^{18}\text{O}$ 团块中, 最佳拟合的数密度函数为 $n \propto e^{-3.2r^2}$ . 结果表明内落更易发生在分子云团块的中心部位, 而较少发生在团块的边缘位置.

**关键词** 恒星: 形成, 星际介质: 云, 内落候选源

**中图分类号**: P155; **文献标识码**: A

## 1 引言

自从上世纪70年代首次在猎户座探测到星际一氧化碳(CO)分子的转动量子数 $J = 1 - 0$ 的分子转动谱线<sup>[1]</sup>, 越来越多的观测证据都表明, 恒星诞生于星际空间中冷的分子气体中. 基于近邻小质量恒星形成区的大量观测数据, 主要包括毫米波分子谱线和红外观测数据以及相关的理论研究, Shu等<sup>[2]</sup>总结了小质量恒星形成的基本模型: 分子云中致密的分子云核, 在引力主导下开始由内到外的塌缩形成原恒星, 包层里的物质继续下落, 原恒星通过吸积盘增长质量, 直到包层和吸积盘的物质逐渐消耗, 原恒星成为一颗裸露的恒星, 到达经典金牛座T型星的阶段, 也就是主序前恒星. 主

序前阶段的年轻恒星会逐渐收缩、温度变高, 最后达到主序阶段<sup>[3-4]</sup>. 而对于大质量恒星的形成目前有两种主流模型来解释<sup>[5]</sup>. 一种是整体塌缩模型, 也称为湍流核吸积模型<sup>[6]</sup>. 这一模型中单个分子云核在引力作用下发生塌缩, 并通过盘吸积使得核中年轻星的质量持续增加. 另一种是竞争吸积模型<sup>[7]</sup>, 认为大质量恒星形成于气体最稠密的分子云核区域, 通过快速吸积气体而成为大质量恒星. 不论是上述哪种类型的恒星形成机制, 分子云核的引力塌缩代表着极早期的恒星形成过程<sup>[8]</sup>. 分子云核引力塌缩的开端也存在两种模式. 一种是自发式的恒星形成模式, 即当云核满足一定的物理条件后, 因某种不稳定性, 自动开始塌缩并最

2024-08-26收到原稿, 2024-10-14收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(U2031202、12373030和11873093), 国家重点研发计划(2023YFA1608000), 中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDJ-SSW-SLH047)资助

† [zbjiang@pmo.ac.cn](mailto:zbjiang@pmo.ac.cn)

终形成恒星;另一种是触发式恒星形成模式<sup>[9-10]</sup>,即当云核满足一定条件后,在外界的某种因素作用下(例如辐射流、激波、云-云碰撞等)而发生塌缩<sup>[11]</sup>.后一种模式在爆发式恒星形成中可能占主导作用.

分子云核的引力坍缩意味着外围包层里的气体向核心区域内落.由于核心区域的激发温度高于外围包层,这种气体的内落运动产生的观测效应是光学厚分子谱线的蓝不对称双峰轮廓,同时光学薄谱线的线心正好位于光学厚谱线的双峰轮廓的中间位置<sup>[12]</sup>.利用这种分子谱线的诊断方法,大量的观测研究表明气体内落运动最晚可以持续到Class I原恒星阶段<sup>[13-14]</sup>.针对大质量分子云核的分子谱线诊断研究说明气体的内落运动提供的质量下落速率( $\sim 10^{-4} - 10^{-2} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ )足够形成大质量恒星<sup>[15-16]</sup>,并且相当部分的大质量分子云核呈现整体坍缩的现象<sup>[17]</sup>.目前的研究大多仅限于对恒星形成区、致密分子云核等特定目标源的探索,所提供的样本数量有限.由于可供研究样本的数量不足,我们仍对引力坍缩阶段的气体内落运动缺乏全面的了解,因此迫切需要在整个银河系范围内进行大规模的无偏样本研究,这将有助于我们更全面地了解恒星形成极早期阶段的动力学过程.

基于银河画卷巡天计划(Milky Way Imaging Scroll Painting, MWISP)<sup>[18]</sup>提供的银经 $12^{\circ}$ 至 $230^{\circ}$ 、银纬 $\pm 5.25^{\circ}$ 范围内 $2400 \text{ deg}^2$ 的CO及同位素 $J = 1 - 0$ 分子谱线数据, Jiang等<sup>[19]</sup>利用 $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$   $J = 1 - 0$ 谱线的蓝不对称轮廓和对应的光学薄谱线 $^{13}\text{CO}/\text{C}^{18}\text{O}$   $J = 1 - 0$ 证认出3533个有气体内落特征的分子云团块,形成了国际上规模最大的分子云内落团块样本. Yang等<sup>[20]</sup>和 Yu等<sup>[21]</sup>从以上3533个样本中挑选了343个内落源开展了致密气体探针( $\text{HCO}^+$   $J = 1 - 0$ )和 $\text{H}^{13}\text{CO}^+$   $J = 1 - 0$ 的谱线研究,确认96个源具有明显的气体内落特征.同时以上致密气体探针的观测结果表明绝大部分的内落源样本没有明显的 $\text{HCO}^+$   $J = 1 - 0$ 发射.为了更全面地了解以上3533个内落源样本的物理性质和动力学状态,我们有必要充分利用MWISP提供的CO及同位素分子谱线数据.在这篇论文里,我们首先对 $2400 \text{ deg}^2$ 的MWISP CO分子谱线数据

开展无偏的分子云核检测,把提取得到的分子云核与3533个内落源样本进行交叉匹配,研究气体内落运动的位置相对于分子云核的空间分布关系,加深我们对分子云引力坍缩的动力学状态的认识,为充分了解恒星的形成机制提供具有统计意义的观测线索.

## 2 分子云团块的证认与匹配

### 2.1 分子云团块证认算法

要研究内落候选源在分子云团块中的分布情况,首先需要使用分子云团块的自动检测算法准确地寻找与内落候选源成协的分子云团块.自上世纪90年代开始,出现了许多分子云团块的自动检测算法,其中广泛应用的包括ClumpFind<sup>[22]</sup>、GaussClumps<sup>[23]</sup>和FellWalker<sup>[24]</sup>等.近年来,新的分子云团块算法如LDC (Local Density Clustering)<sup>[25]</sup>、ConBased<sup>[26]</sup>和FacetClumps<sup>[27]</sup>也相继问世,为相关研究提供了更多选择和可能性. Jiang等<sup>[27]</sup>对比了FellWalker、LDC、ConBased和FacetClumps在由不同密度的观测数据与仿真分子云团块构成的合成数据上的召回率、距离误差和区域交并比等指标,实验结果表明,在不同的环境中, FacetClumps具有更优的综合性能.因此本工作将选择使用FacetClumps来检测分子云团块.

FacetClumps主要包括4个子过程.首先,基于形态学进行信号区域的提取.其次,利用Facet模型检测团块的中心.第三,通过梯度对局部区域进行分割.最后,基于连通性的最小距离聚类将局部区域聚类到团块中心. FacetClumps结合了阈值分割、开运算和连通域标记等形态学操作,从数据中提取具有显著信号的区域.采用高斯Facet模型和多元函数的极值理论来确定团块可能的中心,提高了在密集区域的定位精度,并减少了对峰值的依赖.此外, FacetClumps利用基于梯度的方法将信号区域分割成局部区域,并通过基于连通性的最小距离聚类方法将局部区域聚类到团块中心,增强了区域分割的合理性.该算法具有自适应性,能够根据不同的局部情况自动迭代参数,在检测过程中针对微弱或者重叠较高的区域内的团块进

行算法优化.

由于本工作以银河画卷计划的数据为基础, FacetClumps的参数说明以及本文中所采用的参数取值如下:

- RMS: 代表数据的全局噪声水平; 取值为头文件中的RMS (Root Mean Square)或噪声文件数据的中值.

- Threshold: 代表截断信号的阈值; 取值为  $2 \times \text{RMS}$ .

- SWindow: 代表窗口函数的尺度; 取值为3像素.

- KBins: 代表用于计算特征值区间数的系数; 取值为35.

- FwhmBeam: 代表数据以像素为单位的波束大小; 取值为2像素.

- VeloRes: 代表设备以通道为单位的分辨率; 取值为2通道.

- SRecursionLBV: 代表递归终止时, 一个区域在空间方向上的最小面积和在速度通道上的最小长度; 取值分别为16像素和5通道.

## 2.2 分子云团块的匹配

### 2.2.1 匹配原则

我们从银河画卷数据库中提取了以Jiang等<sup>[18]</sup>表格中内落候选源位置为中心, 尺度约  $20' \times 20'$  的数据块, 并利用FacetClumps算法对这些数据块进行检测, 以获取数据块内的所有分子云团块以及对应的掩膜. 候选源是通过考察两个谱线对 ( $^{12}\text{CO}$  &  $^{13}\text{CO}$ , 以下简称P1, 及  $^{13}\text{CO}$  &  $\text{C}^{18}\text{O}$ , 以下简称P2) 获得的, 如果候选源来自于P1, 我们用 $^{13}\text{CO}$ 数据检测团块, 如果来自于P2, 则用 $\text{C}^{18}\text{O}$ 数据. 为确保匹配的准确性, 我们确定的匹配原则如下:

- 内落候选源中心位于团块空间掩膜范围内.
- 内落候选源中心速度在团块速度范围内.

图1是其中一个匹配成功的示例. 图中灰度图为相应团块速度范围内的积分强度. 蓝色线为该团块在空间方向的2维掩膜, 红星代表内落候选源的位置, 左下角分别标注了该内落候选源中心3维坐标以及由FacetClumps算法所确定的该团块的速度范围.

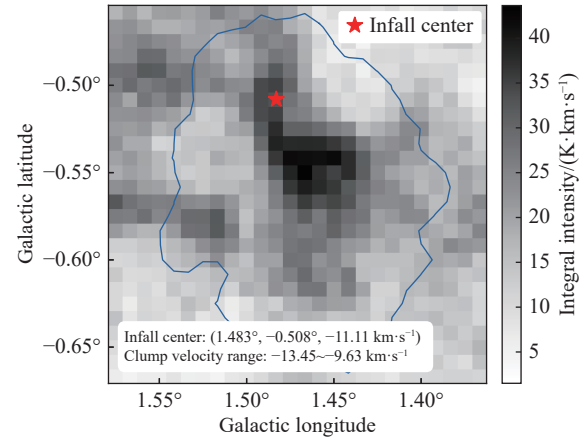


图1 内落候选源与分子云团块的匹配示意图. 积分强度由 $^{13}\text{CO}$ 数据获得.

Fig. 1 A cartoon for matching infall candidates and molecular clumps. Integral intensity obtained from  $^{13}\text{CO}$  data.

在一些情形下, 特别是对内银河区域, 由于分子气体分布复杂, 候选源中心位置可能会同时匹配两个及以上的团块, 如图2所示, 图中标示与图1类似, 图中候选源同时与两个团块匹配, 我们分别用蓝色和绿色的曲线表示这两个团块在空间方向的2维掩膜, 并在左下角标出了这两个团块的速度范围.

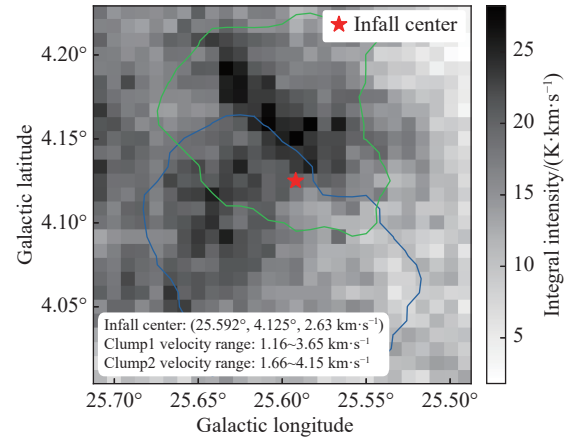


图2 内落候选源与多个分子云团块匹配情况示意图. 积分强度由 $^{13}\text{CO}$ 数据获得.

Fig. 2 A cartoon for an infall candidate matching multiple molecular clumps. Integral intensity obtained from  $^{13}\text{CO}$  data.

对于这类候选源同时匹配多个团块的情况, 我们暂时无法明确判断它们属于哪个团块, 因此

放弃对这部分内落候选源的匹配工作, 仅考虑那些能匹配唯一团块的内落候选源.

### 2.2.2 匹配结果

按照上述的匹配原则, 在由P1证认的3329个内落候选源中, 我们获得了1712个源的匹配, 占比约51.58%; 在由P2证认的204个内落候选源中, 获得了124个源的匹配, 占比约60.78%. 后续工作中仅以这类能匹配唯一团块的内落候选源作为研究样本, 其总数为1836个.

## 3 内落候选源在分子云团块中的分布

### 3.1 内落候选源在分子云团块2维投影中的分布

图3展示了1个内落候选源样本在其所属团块在天空平面的投影中的位置. 其中灰度图为积分强度图, 浅蓝色星号为团块质心的投影位置, 绿色星号为内落候选源的投影位置. 由于部分团块周围还存在其他团块, 故可能会出现部分团块的轮廓与积分强度图不吻合的现象. 在多数情形下, 团块在天空平面的投影为不规则图形, 且团块的大小也各不相同, 为定量描述内落候选源在团块二维投影中的分布, 我们定义一个无量纲的量 $\beta$ . 连接团块中心的投影位置与内落候选源中心的投影位置, 如图中的红色线段所示, 并延长至团块二维投影的边界, 如图中的蓝色线段所示. 计算红色线段的长度, 记为 $d_1$ , 同时计算红色线段与蓝色线段长度之和, 记为 $d_2$ . 则 $\beta=d_1/d_2$ , 将团块的投影近似为圆形时,  $\beta$ 为归一化中心距, 即圆内一点到圆心的距离与圆半径的比值,  $\beta$ 的数值可以在一定程度上定量地反映内落候选源在团块二维投影中的分布情况.

由 $\beta$ 的定义可知, 其值介于0到1之间.  $\beta$ 越小时, 内落候选源的投影越接近团块质心的投影; 而 $\beta$ 越大时, 则越接近团块投影的边界. 我们依据 $\beta$ 值将分子云团块的投影区域划分为中心区、过渡区和边缘区3个部分, 并按照以下规定进行分类:

- 中心区: 若 $\beta \leq 0.3$ .
- 过渡区: 若 $0.3 < \beta \leq 0.7$ .
- 边缘区: 若 $\beta > 0.7$ .

<sup>1</sup><https://www.scidb.cn/s/VBji22>

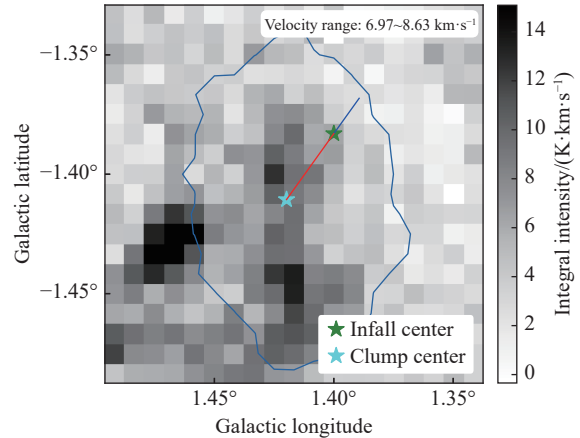


图3 内落候选源在分子云团块投影中的分布示意图. 积分强度由 $^{13}\text{CO}$ 数据获得.

Fig. 3 A cartoon for the distribution of infall candidates in the projection of molecular clumps. Integral intensity obtained from  $^{13}\text{CO}$  data.

图4展示了6个内落候选源在分子云团块投影中的位置示例, 图中标示与图3相同, 此外, 在每张图的右上角还标注了由该团块及其匹配的内落候选源计算得出的 $\beta$ 值以及该团块的速度积分范围. 上、中、下行分别为内落候选源位于中心区、过渡区及边缘区.

根据上述定义, 我们获取了所有内落候选源在所属分子云团块投影中所对应的 $\beta$ 值. 图5展示了两个谱线对所证认的内落候选源在团块投影中不同区域的分布. 具体来说, P1数据组的内落候选源在团块投影中的 $\beta$ 值平均为0.40, 标准方差为0.039. 其中, 位于中心区的个数为601, 占总数的35%; 位于过渡区的有970个, 占总数的57%; 而位于边缘区的个数为141, 占总数的8%. 而P2数据组的内落候选源在团块投影中的 $\beta$ 值平均为0.44, 标准方差为0.043. 其中, 位于中心区的个数为36, 占总数的29.03%; 位于过渡区的有72个, 占总数的58.06%; 而位于边缘区的个数为16, 占总数的12.90%. 总体而言, 两组候选源的 $\beta$ 值未显现显著的统计差别. 所有内落候选源在对应团块投影中的分布图及匹配表详见链接<sup>1</sup>. 为了避免部分团块的轮廓与积分强度图不吻合而引起的误会, 链接中的图仅画出了FacetClumps所证认出的团块掩膜区域中的数据积分强度.

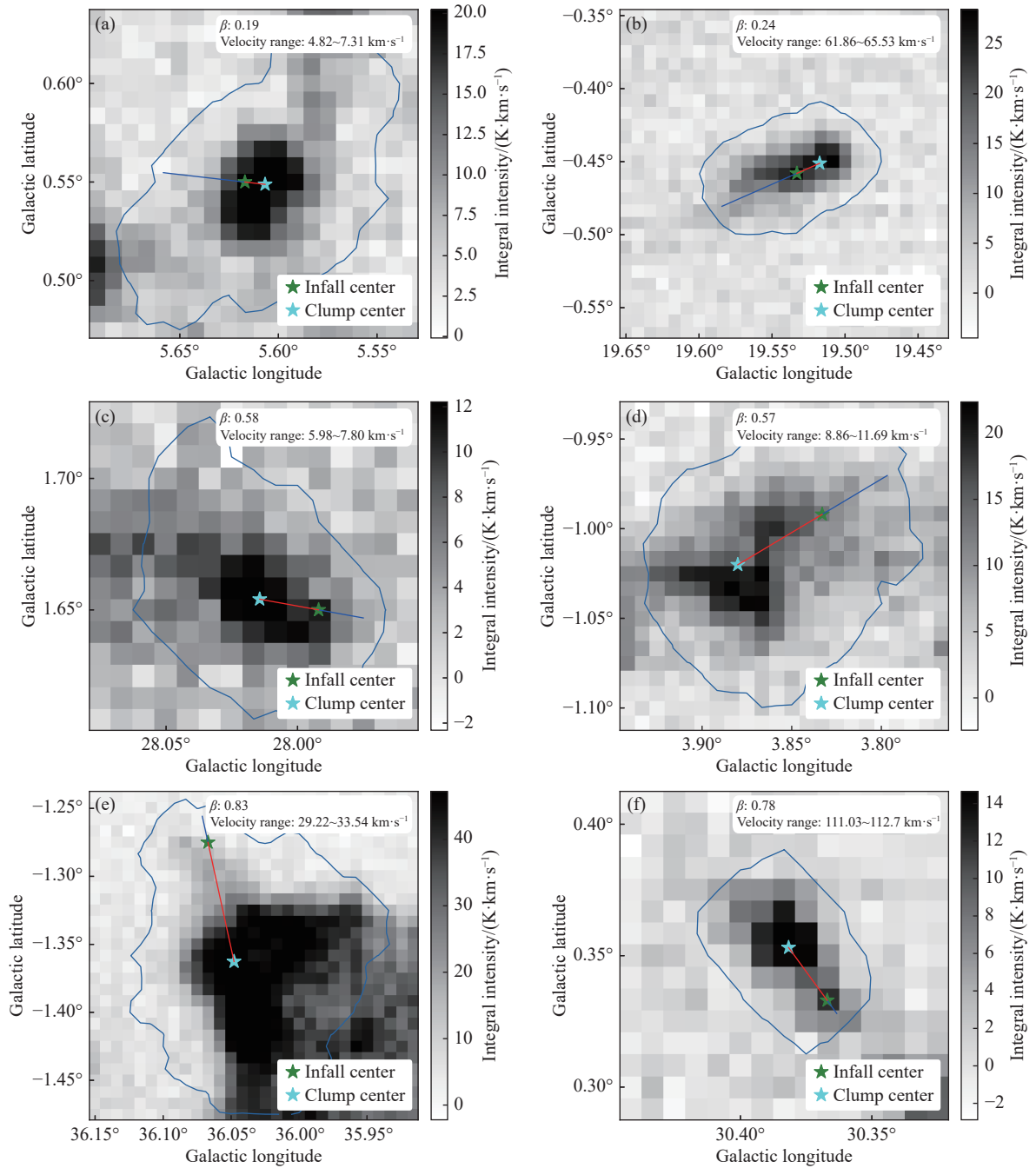


图 4 不同 $\beta$ 值的分子云团块的速度积分强度图。图(a)、(c)、(e)积分强度由 $^{13}\text{CO}$ 数据获得。图(b)、(d)、(f)积分强度由 $\text{C}^{18}\text{O}$ 数据获得。

Fig. 4 Integral intensity of molecular clumps with different  $\beta$  values. The integral intensity of panels (a), (c), (e) are obtained from  $^{13}\text{CO}$  data. The integral intensity of panels (b), (d), (f) are obtained from  $\text{C}^{18}\text{O}$  data.

为进一步细致研究内落候选源在团块中的位置分布, 我们计算了 $\beta$ 值的概率密度函数。图6展示了P1数据组在 $^{13}\text{CO}$ 团块投影中(左)及P2数据组在

$\text{C}^{18}\text{O}$ 团块投影中(右)的 $\beta$ 值的概率密度函数图。从图中可以看出, 两者的分布趋势比较接近, 都呈现中间多、两边少的分布特点。但值得注意的是, 这

种分布特点仅仅是内落候选源在分子云团块天空平面投影中的分布,并不代表内落候选源在3维分子云团块中的真实分布.

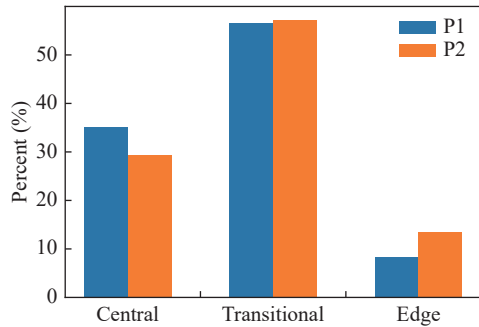


图 5 内落候选源在分子云团块投影中不同区域的分布统计图

Fig. 5 Statistical map of infall candidates distribution in different regions of the projection of molecular clumps

### 3.2 3维空间中的分布数密度函数

#### 3.2.1 蒙特卡洛模拟

由于无法直接观测到数据中分子云团块的3维结构,为获得内落候选源在分子云团块3维空间中的分布,我们采用蒙特卡洛方法对其空间分布情况进行模型模拟.

首先,我们假设分子云团块为一个近似球体,并且内落候选源在其中分布的数密度为各向同性,

因此仅沿半径方向变化.由于我们对实际观测的候选源位置进行了归一化处理,这一假设应该是合理的.

然后,通过假设一系列不同的分布数密度沿半径变化的函数关系,在一个虚拟的球体中进行模拟撒点.再将撒点后的球投影到一平面上,对每个点在投影平面上的圆心距 $d$ ,我们定义另一个无量纲的归一化中心距 $\gamma$ :  $\gamma = d/R$ ,其中 $R$ 为虚拟球体的半径.与 $\beta$ 类似, $\gamma$ 的取值范围也在0到1之间,反映每个点在投影圆中的分布情况.由此可获得不同模型下 $\gamma$ 值的概率密度函数.

最后,通过计算由不同模型所获得的 $\gamma$ 值的概率密度函数和 $\beta$ 值的概率密度函数之间的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)以及K-S检验的方法,来获得最似然的模型.公式(1)为RMSE的计算方法:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (f_{\beta i} - f_{\gamma i})^2}. \quad (1)$$

其中 $N$ 为总区间数, $f_{\beta i}$ 和 $f_{\gamma i}$ 分别为第 $i$ 个区间处 $\beta$ 和 $\gamma$ 的概率密度函数值. RMSE越小,说明两者之间的偏差和波动越小. K-S检验是一种非参数检验方法,可以用来检验两个样本是否来自同一概率分布.

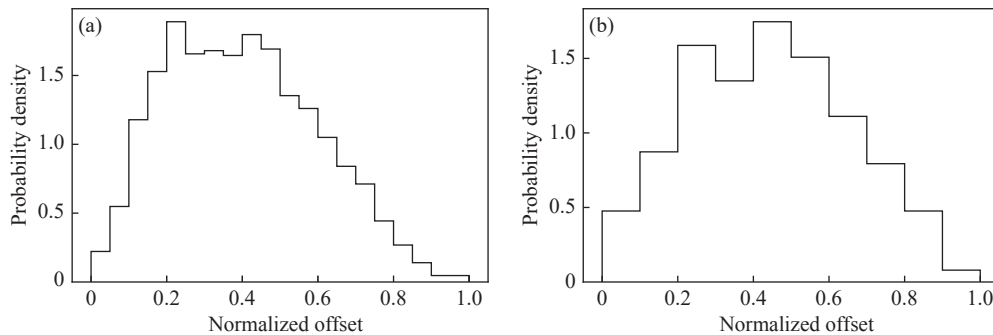


图 6 P1数据组(左)和P2数据组(右)的 $\beta$ 值概率密度函数图

Fig. 6 Probability density function plot of the value of  $\beta$  for P1 dataset (left) and P2 dataset (right)

#### 3.2.2 不同函数模型的模拟结果

首先考虑最简单的分布情况,即内落候选源在分子云团块中是均匀分布的.图7分别展示了P1、P2两组内落候选源数据在对应分子云团块中

的 $\beta$ 值的概率密度函数图以及由均匀分布模型获得的 $\gamma$ 值的概率密度函数图.从图7中可以看出,两个数据组的 $\beta$ 和 $\gamma$ 的概率密度函数都存在明显偏差, $\gamma$ 值相比 $\beta$ 更多地分布在较大值处.由此可以推断,

内落候选源在团块中真实的分布并非近似均匀的,

其数密度更可能是从团块中心向团块边界递减的.

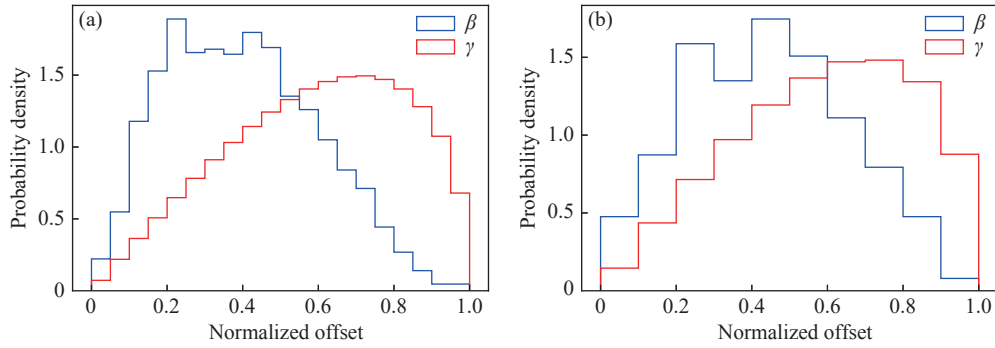


图 7 P1数据组(左)和P2数据组(右)的 $\beta$ 和均匀分布模型获得的 $\gamma$ 值的概率密度函数图

Fig. 7 Probability density function plot of the value of  $\beta$  for P1 dataset (left) and P2 dataset (right) and the value of  $\gamma$  obtained from the uniform distribution model

因此, 我们着重考虑3种常见的衰减函数, 一是幂律衰减, 即  $n \propto r^{-a}$ , 其中  $n$  为数密度,  $r$  为候选源的归一化中心距, 正数  $a$  为待定系数; 另一种是指数衰减, 即  $n \propto e^{-ar}$ , 符号与上式相同; 最后一种是高斯衰减, 即  $n \propto e^{-ar^2}$ , 符号与上式相同. 为确定每种模型下最佳的  $a$  值, 对每种衰减模型, 我们在一定范围内以 0.1 为间隔取一系列  $a$  值, 计算按不同的  $a$  值进行模拟撒点获得的  $\gamma$  值的概率密度函数和  $\beta$  值的概率密度函数之间的 RMSE, 使 RMSE 最小的  $a$  值即为该模型下实现最佳拟合的衰减系数. 此方法获得的最佳  $a$  值的误差不超过 0.1.

图8为幂律衰减模型所获得的 $\gamma$ 值和 $\beta$ 值的概率密度函数之间的RMSE随 $a$ 的变化图, 其中左右图分别为数据组P1、P2的拟合结果. 对P1数据组,  $a$ 取1.7左右时RMSE最小, 约0.39; 对P2数据组,  $a$ 取1.5左右时RMSE最小, 约0.29. 由此可见, 在幂律衰减模型中对P1、P2数据组在对应分子云团块中分布的最佳拟合模型分别为  $n \propto r^{-1.7}$  和  $n \propto r^{-1.5}$ . 图9分别给出幂律衰减模型下两组数据的最佳拟合结果, 从图中可以看出, 虽然幂律衰减较均匀分布能更好地拟合观测的 $\beta$ 值分布, 但并不理想, 因此我们继续进行指数衰减模型的拟合.

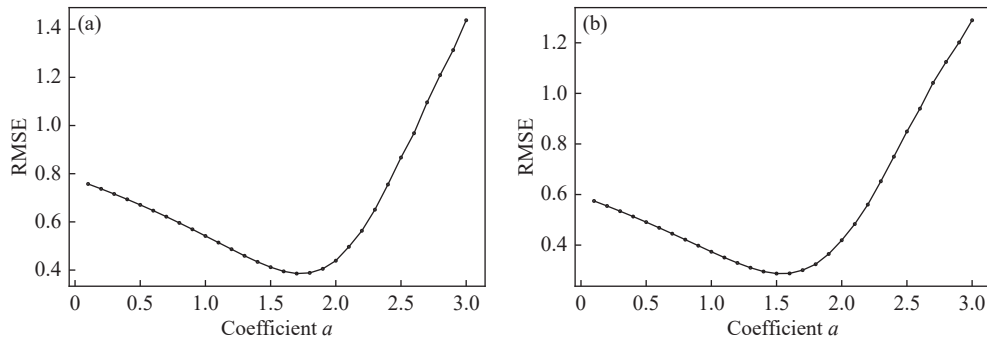


图 8 P1数据组(左)和P2数据组(右)的 $\beta$ 的概率密度函数与幂律衰减模型获得的 $\gamma$ 的概率密度函数的RMSE随 $a$ 的变化图

Fig. 8 The RMSE of the probability density function of  $\beta$  for the P1 dataset (left) and the P2 dataset (right) versus the probability density function of  $\gamma$  obtained from the power-law decay model as a function of  $a$

图10为指数衰减模型获得的 $\gamma$ 值和 $\beta$ 值的概率密度函数之间的RMSE随 $a$ 的变化图, 左右图分别

为数据组P1和P2的拟合结果. 由图可知, 对P1数据组,  $a$ 取4.7左右时RMSE最小, 约0.165; 对P2数

据组,  $a$ 取3.7左右时RMSE最小, 约0.172. 由此可以推测, 在指数衰减模型中对P1、P2数据组在对应分子云团块中分布的最佳拟合模型分别为  $n \propto e^{-4.7r}$  和  $n \propto e^{-3.7r}$ . 图11分别给出指数衰减模型下两组数据的最佳拟合结果, 从图中可以看出, 指数衰减模型对观测的 $\beta$ 的概率密度函数的拟合效果比幂律衰减模型更好. 然后我们分别对P1和

P2数据组的所有 $\beta$ 和 $\gamma$ 值进行K-S检验. 检验结果显示, P1数据组中的 $P$ 值为 $9.96 \times 10^{-4}$ , 远小于0.05, 并不支持 $\beta$ 和 $\gamma$ 来自同一分布; 2数据组中的 $P$ 值为0.42, 大于0.05, 检验结果支持 $\beta$ 和 $\gamma$ 来自同一分布. 由此可见, 指数衰减模型对P1数据组的拟合效果并不理想, 而且P2数据组样本数目太少, 因此还需要进行高斯衰减模型的拟合.

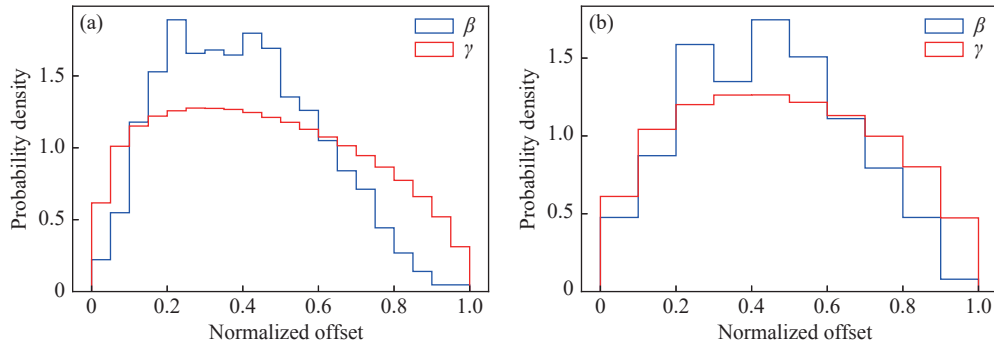


图 9 P1数据组(左)和P2数据组(右)的 $\beta$ 和最佳幂律衰减模型获得的 $\gamma$ 值的概率密度函数图

Fig. 9 Probability density function plot of the value of  $\beta$  for P1 dataset (left) and P2 dataset (right) and the value of  $\gamma$  obtained from the best power-law decay model

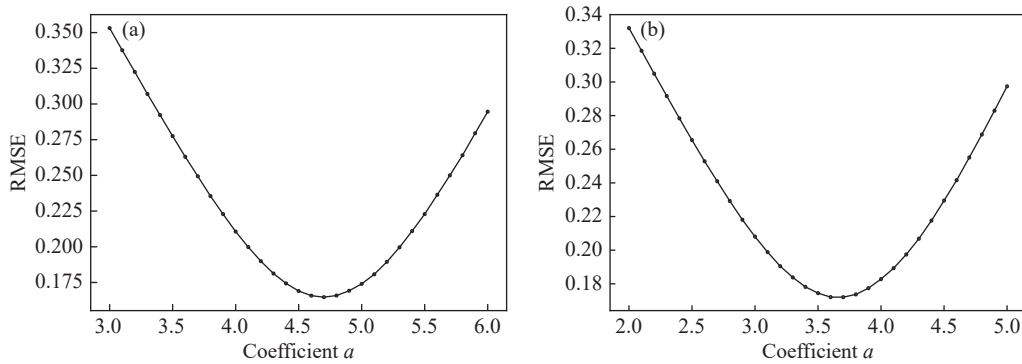


图 10 P1数据组(左)和P2数据组(右)的 $\beta$ 的概率密度函数与指数衰减模型获得的 $\gamma$ 的概率密度函数的RMSE随 $a$ 的变化图

Fig. 10 The RMSE of the probability density function of  $\beta$  for the P1 dataset (left) and the P2 dataset (right) versus the probability density function of  $\gamma$  obtained from the exponential decay model as a function of  $a$

高斯衰减模型获得的 $\gamma$ 值和 $\beta$ 值的概率密度函数之间的RMSE随 $a$ 的变化如图12所示, 左右图分别为数据组P1和P2的拟合结果. 由图可知,  $a$ 取4.5左右时, P1数据组中的RMSE最小, 约0.113;  $a$ 取3.2左右时P2数据组中的RMSE最小, 约0.134. 因此在高斯衰减模型中对P1、P2数据组在对应分子云团块中分布的最佳拟合模型分别为

$n \propto e^{-4.5r^2}$  和  $n \propto e^{-3.2r^2}$ . 图13分别给出高斯衰减模型下两组数据的最佳拟合结果, 从图中可以看出, 高斯衰减模型对 $\beta$ 的概率密度函数的拟合效果比指数衰减模型更好. 对P1和P2数据组的所有 $\beta$ 和 $\gamma$ 值进行K-S检验的结果显示, P1数据组中的 $P$ 值为0.18, 大于0.05, 检验结果支持P1数据组中的 $\beta$ 和 $\gamma$ 来自同一分布; P2数据组中的 $P$ 值为0.74, 大于

0.05, 检验结果也支持P2数据组中的 $\beta$ 和 $\gamma$ 值来自同一分布. 由此可见, 高斯衰减模型能很好地描述内落候选源在分子云团块中的分布, 不过由于实际

的分子云团块并不是一个规则的球, 所以在分布上和以球来进行模拟撒点的结果难免会有一些差别.

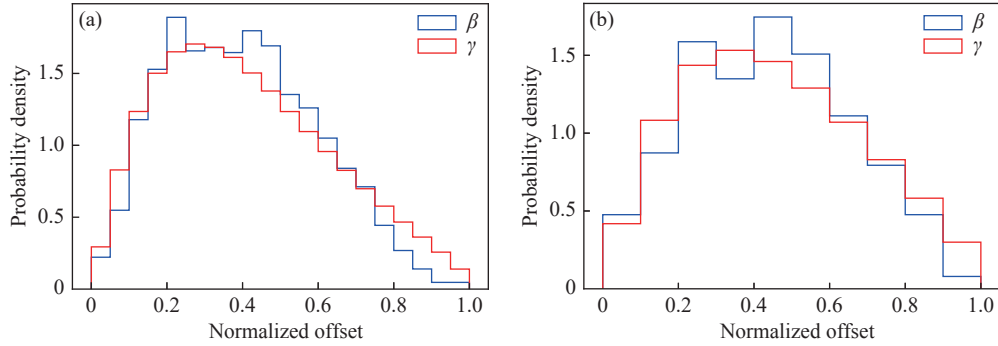


图 11 P1数据组(左)和P2数据组(右)的 $\beta$ 和最佳指数衰减模型获得的 $\gamma$ 值的概率密度函数图

Fig. 11 Probability density function plot of the value of  $\beta$  for P1 dataset (left) and P2 dataset (right) and the value of  $\gamma$  obtained from the best exponential decay model

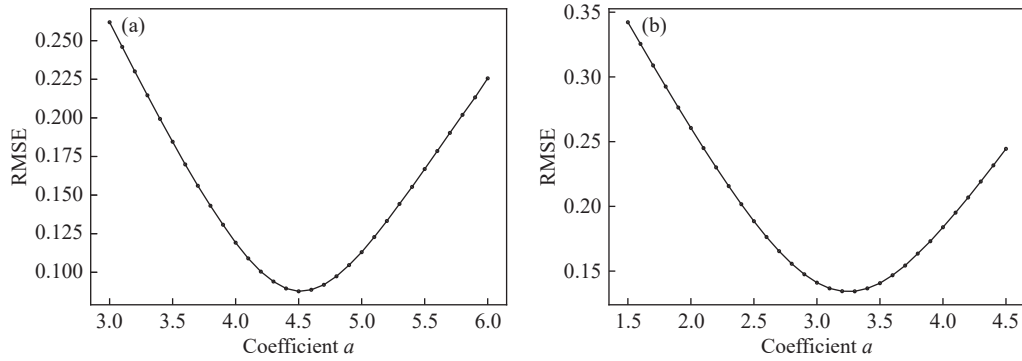


图 12 P1数据组(左)和P2数据组(右)的 $\beta$ 的概率密度函数与高斯衰减模型获得的 $\gamma$ 的概率密度函数的RMSE随 $a$ 的变化图

Fig. 12 The RMSE of the probability density function of  $\beta$  for the P1 dataset (left) and the P2 dataset (right) versus the probability density function of  $\gamma$  obtained from the Gaussian decay model as a function of  $a$

## 4 讨论

由不同分布模型所得到 $\gamma$ 的概率密度函数与反映内落候选源在团块中真实分布情况的 $\beta$ 概率密度函数的比较结果可知, 这批内落候选源在分子云团块中的分布情况为数密度从团块中心到边界逐渐减小, 且随着归一化中心距由中心到边界近似呈高斯衰减. 其中由 $^{13}\text{CO}$  ( $J = 1 - 0$ )谱线示踪的内落候选源表现出比 $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J = 1 - 0$ )谱线示踪更快的衰减趋势. 但是, 由于通过 $\text{C}^{18}\text{O}$ 谱线筛选的候选源样本数比通过 $^{13}\text{CO}$ 筛选的候选源数目要小

一个量级, 我们这里提示对高斯衰减参数 $a$ 的解读应谨慎对待. 此外, 由于 $\text{CO}$  ( $J = 1 - 0$ )并不是示踪内落运动的最佳谱线, 而我们使用的谱线数据的空间分辨率有限, 这使得这批样本只能作为内落候选源看待. 尽管如此, 由于这批内落候选源在证认时只考虑其谱线的轮廓特征, 而未先验地设置一些条件, 如著名恒星形成区、HII区等, 所以我们仍然认为, 这些候选源的分布可以在一定程度上代表真实内落源的空间分布. 要获得内落源在分子云团块的精确分布, 还需要进行更进一步

的观测研究, 包括进行更进一步的筛选(例如

HCO<sup>+</sup> 观测证认)和更高空间分辨的成图观测.

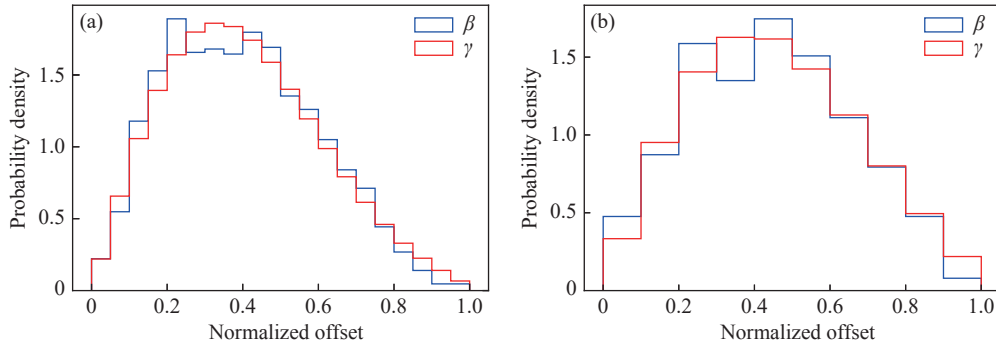


图 13 P1数据组(左)和P2数据组(右)的 $\beta$ 和最佳高斯衰减模型获得的 $\gamma$ 值的概率密度函数图

Fig. 13 Probability density function plot of the value of  $\beta$  for P1 dataset (left) and P2 dataset (right) and the value of  $\gamma$  obtained from the best Gaussian decay model

## 5 结论

本文以银河画卷巡天项目提供的<sup>12</sup>CO、<sup>13</sup>CO和C<sup>18</sup>O ( $J = 1 - 0$ )数据所获得的内落候选源为样本, 通过其所在分子云团块投影平面中的位置, 利用蒙特卡洛方法, 研究内落运动发生在分子云团块中的空间位置的数密度分布.

我们采用分子云核的检测算法FacetClumps对总数为3533个内落候选源所在天区的分子云团块进行抽取, 并将所获得的团块与内落候选源进行了匹配, 结果获得了1836个能匹配唯一确定团块的样本, 其中1712个由<sup>12</sup>CO/<sup>13</sup>CO谱线对获得, 124个由<sup>13</sup>CO/C<sup>18</sup>O谱线对获得, 分别占总样本数的51.58%和62.25%. 为获得比较明确的位置信息, 我们仅对这些能匹配唯一确定团块的样本进行研究.

利用蒙特卡洛方法, 我们发现两组样本所呈现的空间数密度分布均呈高斯衰减形式, 衰减函数模型最佳拟合分别为 $n \propto e^{-4.5r^2}$ 和 $n \propto e^{-3.2r^2}$ . 结果表明内落更易发生在分子云团块的中心部位, 而较少发生在团块的边缘位置.

## 参考文献

[1] Wilson R W, Jefferts K B, Penzias A A. *ApJ*, 1970, 161: L43  
 [2] Shu F H, Adams F C, Lizano S. *ARA&A*, 1987, 25: 23

[3] Hayashi C, Hōshi R, Sugimoto D. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 1962, 22: 1  
 [4] Hosokawa T, Omukai K. *ApJ*, 2009, 691: 823  
 [5] Tan J C, Beltrán M T, Caselli P, et al. *Protostars and Planets*, 2014, 5: 149  
 [6] McKee C F, Tan J C. *ApJ*, 2003, 585: 850  
 [7] Bonnell I A, Bate M R, Clarke C J, et al. *MNRAS*, 2001, 323: 785  
 [8] Bachiller R. *ARA&A*, 1996, 34: 111  
 [9] Bisbas T G, Wunsch R, Whitworth A P, et al. *ApJ*, 2011, 736: 142  
 [10] Zhang S, Wang K, Liu T, et al. *MNRAS*, 2023, 520: 322  
 [11] 徐小云, 陈学鹏, 张世瑜, 等. *天文学报*, 2024, 65: 45  
 [12] Evans I N J. *ARA&A*, 1999, 37: 311  
 [13] Mardones D, Myers P C, Tafalla M, et al. *ApJ*, 1997, 489: 719  
 [14] Gregersen E M, Evans I N J, Mardones D, et al. *ApJ*, 2000, 533: 440  
 [15] Chen X, Shen Z Q, Li J J, et al. *ApJ*, 2010, 710: 150  
 [16] Yang Y, Jiang Z, Chen Z, et al. *ApJ*, 2021, 922: 144  
 [17] Yang Y, Chen X, Jiang Z, et al. *ApJ*, 2023, 955: 154  
 [18] Su Y, Yang J, Zhang S, et al. *ApJS*, 2019, 240: 9  
 [19] Jiang Z, Zhang S, Chen Z, et al. *RAA*, 2023, 23: 075001  
 [20] Yang Y, Jiang Z B, Chen Z W, et al. *RAA*, 2020, 20: 115  
 [21] Yu S, Jiang Z, Chen Z, et al. *AJ*, 2024, 168: 52  
 [22] Williams J P, de Geus E J, Blitz L. *ApJ*, 1994, 428: 693  
 [23] Stutzki J, Guesten R. *ApJ*, 1990, 356: 513  
 [24] Berry D S. *A&C*, 2015, 10: 22  
 [25] Luo X, Zheng S, Huang Y, et al. *RAA*, 2022, 22: 015003  
 [26] Jiang Y, Zheng S, Jiang Z, et al. *A&C*, 2022, 40: 100613  
 [27] Jiang Y, Chen Z, Zheng S, et al. *ApJS*, 2023, 267: 32

## Spatial Distribution of Infall Candidates in Molecular Clumps

WAN Yu-jie<sup>1,2</sup>    JIANG Zhi-bo<sup>1</sup>    JIANG Yu<sup>1,2</sup>    CHEN Zhi-wei<sup>1</sup>

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**ABSTRACT** Stars form through the gravitational collapse of dense molecular cloud cores. Studying where this collapse motion is more likely to occur in molecular cloud clumps will help to understand the formation of stars in various parts of molecular clumps and provide more information for studying star formation. We leverage CO data from the Milky Way Imaging Scroll Painting (MWISP) project, along with basic information on 3533 infall candidates identified via CO spectral lines, to search for the molecular cloud clumps associated with these candidates and investigate the distribution of infall candidates within them. By comparing the distributions obtained by scattering points at a series of certain number densities in a 3D sphere with the real distribution of infall candidates in molecular cloud clumps, it is founded that the distribution number density of infall candidates within molecular cloud clumps approximately exhibits Gaussian decay with normalized center distance. Specifically, the relationship between the number density  $n$  of infall candidates and their normalized center distance  $r$  is  $n \propto e^{-ar^2}$ , where  $a$  is the decay coefficient. In  $^{13}\text{CO}$  clumps, the best-fitting number density function is  $n \propto e^{-4.5r^2}$ , while in  $\text{C}^{18}\text{O}$  clumps, it is  $n \propto e^{-3.2r^2}$ . The results indicate that infall is more likely to occur in the center of molecular cloud clumps, and less likely to occur at the edges of the clumps.

**Key words** stars: formation, interstellar medium (ISM): clouds, infall candidates

ChinaXiv:202510.00056v1