

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.01.01

恒星形成区G10.32-0.15中反馈机制的研究

张幸^{1,2}, 李大磊², 加尔肯·叶生别克^{2,1}

(1. 新疆大学, 乌鲁木齐 830046; 2. 中国科学院 新疆天文台, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 反馈在恒星形成过程中扮演重要角色, 对于恒星和行星的形成、星团以及母体分子云的演化都具有重要影响。基于美国GBT射电望远镜NH₃(1, 1)和(2, 2)的分子谱线数据以及从厘米波、亚毫米波到红外波段的连续谱数据, 对恒星形成区G10.32-0.15进行了多波段的观测研究。利用多波段的红外数据以及亚毫米波的连续谱数据确定了恒星星团的位置以及致密尘埃团块C1、C2、C3、C4和C5的分布。氨分子速度积分强度的分布与870微米示踪的致密尘埃的分布具有很好的成协性, 表明氨分子能很好地示踪致密分子气体。在局域热动平衡的假设下, 结合NH₃(1, 1)和(2, 2)的分子谱线数据, 通过辐射转移计算获取了分子气体的速度场、速度弥散、旋转温度、氨分子柱密度以及波束填充因子的分布。通过进一步的计算, 得到了G10.32-0.15气体的运动温度、声速、非热速度弥散、热压与非热压的比值以及马赫数。综合分析以上结果, G10.32-0.15中的致密气体可能受到了恒星形成区多种反馈机制的影响。C1区域的气体可能受到热反馈的影响, C2和C3区域的气体可能受到爆炸反馈的影响, C4和C5区域的气体可能受到动量反馈的影响。恒星形成区G10.32-0.15与周围的致密气体存在着复杂的相互作用, 不同区域的气体可能由不同反馈机制主导。

关键词: 分子云; 分子谱线; 恒星形成

中图分类号: P142.9 **文献标识码:** A

1 引言

恒星往往以成团的方式在分子云中形成^[1]。在恒星形成的整个过程中, 正在形成的恒星通过不断吸积周围的物质而增长, 同时也伴随着各种各样的反馈过程, 比如: 星风、外流、辐射等。通过这些反馈过程, 正在形成的恒星不断向母体分子云中输入物质、辐射、能量和动量, 进而影响恒星和行星的形成以及母体分子云的演化等^[2, 3]。Krumholz等^[2]把恒星形成

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-03-10

资助项目: 中国科学院青年创新促进会的资助; 上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划(2022E01050)

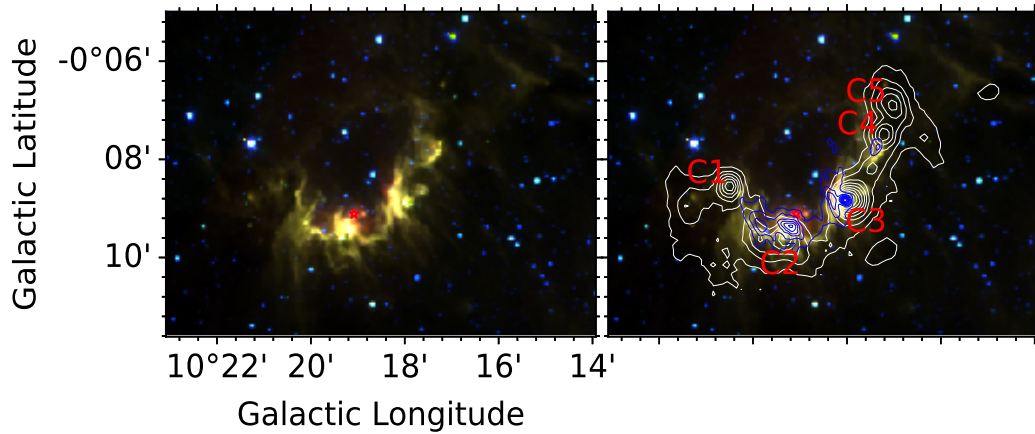
通讯作者: 李大磊, lidalei@xao.ac.cn; 加尔肯·叶生别克, jarken@xao.ac.cn

区的反馈分为三类：动量反馈（momentum feedback），爆炸反馈（“explosive” feedback）和热反馈（thermal feedback）。动量反馈主要指恒星在形成过程中往母体分子云中注入动量，进而推动分子云中的气体运动，驱动分子云中的湍流等，典型的形式有原恒星产生的外流和辐射压；爆炸反馈主要指恒星快速地加热周围的气体，把气体的温度加热到非常高，同时也驱动周围气体的运动，典型的类型为大质量恒星产生的星风、光电离反馈（photoionization feedback）以及超新星爆发。热反馈主要改变周围气体的温度结构，而不改变气体的运动状态，它主要源于非电离辐射。恒星形成区反馈机制的研究一直是研究的热点。国际一流的望远镜开展了重点的观测项目研究恒星形成区的反馈机制。例如，使用SOFIA（Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy）空间红外望远镜开展的大型观测项目FEEDBACK: Radiative and Mechanical Feedback in Regions of Massive Star Formation^[4]。利用韦布空间望远镜JWST（James Webb Space Telescope）正在开展PDRs4All: Radiative feedback from massive stars的观测研究^[5]。另外，巨分子云形成恒星星团的数值模拟方面也正在考虑多种反馈机制，如STARFORGE^[6]（STAR FORMation in Gaseous Environments）。

G10.32-0.15首先在单天线的射电连续谱巡天观测中被发现，位于著名的含有电离氢区的分子云复合体W31的北部^[7-9]。随后，多台射电望远镜，对G10.32-0.15进行了多波段的射电连续谱和射电复合线的观测研究，如德国Effelsberg 100米望远镜开展的5 GHz的连续谱观测^[10]，日本Nobeyama 45米望远镜开展的10 GHz的连续谱观测^[11]以及美国国家射电天文台NRAO（National Radio Astronomy Observatory）140英尺的望远镜开展的H_{109 α} 的射电复合线观测^[12]。Kim & Koo^[13]基于甚大阵VLA（Very Large Array）21厘米波段的观测数据，探测到了G10.32-0.15的射电双极结构。在星际分子气体探测方面，Wilson^[14]利用NRAO的42米射电望远镜，在G10.32-0.15中探测到了OH和H₂CO的吸收线。使用Medicina 32米射电望远镜，Brand等人发现了22 GHz水脉泽辐射^[15]。利用澳大利亚ATCA（Australia Telescope Compact Array）望远镜干涉阵列，Walsh等^[16]探测到了6.7 GHz甲醇脉泽。利用阿塔卡马探路者实验望远镜APEX（Atacama Pathfinder Experiment telescope）12米的870微米连续谱数据以及¹³CO(2-1)和C¹⁸O(2-1)的分子谱线数据，Beuther等^[17]对G10.32-0.15的大尺度分子气体的动力学性质以及其中致密团块的恒星形成活动开展了研究，致密的尘埃分布在双极电离氢区的腰部。Dewangan等^[18]基于多波段的连续谱数据和分子谱线数据，研究了G10.32-0.15双极电离氢区中的触发恒星形成机制。

基于2MASS（The near-infrared Two Micron All Sky Survey^[19]）的巡天观测数据，Bica等^[20]证认了与G10.32-0.15射电辐射成协的红外星团。Bik等^[21]利用甚大望远镜VLT（Very Large Telescope）近红外K波段的光谱数据，研究了在这个红外星团中恒星的光谱型，发现了一颗O5V-O6V的大质量恒星，它主导了这个红外星团的近红外辐射，提供了电离氢区的电离辐射。利用深度的红外UKIDSS（United Kingdom Infra-Red Telescope Infrared Deep Sky Survey）的图像数据，Deharveng等^[18]证认了距离这颗大质量恒星10''以内的14颗恒星，并测量了较为精确的距离1.75 kpc。Townesley等^[22]利用空间X射线天文台Chandra望远镜研究了在这个红外星团的X射线辐射，在其中共探测到50多个X射线的点源，同时也发现了X射线的延展弥散辐射。

综上所述, G10.32-0.15距离我们1.75 kpc, 主要被一颗O型星电离的双极电离氢区, 内部包含一个红外星团, 双极电离氢区的腰部分布着正在进行恒星形成的致密分子气体。本文主要利用最新的GBT (Green Bank Telescope) 100米射电望远镜氨分子银道面巡天的高灵敏度和高分辨率的观测数据, 并结合多波段的连续谱数据, 对G10.32-0.15中的反馈机制开展观测研究。第2节介绍了本文使用的多波段观测数据; 第3节给出了利用观测数据得到的结果; 第4节讨论了所得到的结果; 第5节给出了全文的总结以及展望。



注: 左图: 由3.6、5.8和8微米辐射绘制的三色图; 右图: 背景为3.6、5.8和8微米辐射绘制的三色图, 白色等值线和蓝色等值线分别代表870微米辐射和20厘米辐射, 等值线的数值从图像中最大数值的10%到90%, 间隔为10%。C1、C2、C3、C4和C5是870微米的五个尘埃团块^[18]。两图中的红色五角星代表激发星的位置^[21]。

图 1 G10.32-0.15的三色图和870微米以及20厘米的辐射

2 观测数据和处理

2.1 分子谱线数据

NH_3 (1, 1) 和 (2, 2) 的分子谱线数据是GBT射电望远镜氨分子银道面巡天RAMPS^① (Radio Ammonia Mid-Plane Survey)观测数据的一部分^[23]。RAMPS 巡天观测的范围为银经 $l = 10^\circ$ 到 40° , 银纬 $b = -0.4^\circ$ 到 0.4° 。望远镜巡天配备的前端是1.3厘米K波段的七波束接收机KFPA (K-band Focal Plane Array), 终端为VEGAS (VErsatile GBT Astronomical Spectrometer), 氨分子谱线数据的角分辨率为 $32''$, 速度分辨率为 0.2 km s^{-1} 。

^①<https://sites.bu.edu/ramps/>

2.2 连续谱数据

获取了恒星形成区G10.32-0.15从厘米波、亚毫米波到红外的多波段连续谱观测数据。其中，射电连续谱21厘米波段的数据为VLA的观测数据，分辨率为 $5''4 \times 6''2$ ，噪声水平为 $3.0 \text{ mJy beam}^{-1}$ ^[24]。亚毫米波波段870微米的连续谱数据来源于APEX 12米的银道面巡天观测项目ATLASGAL^[25] (the APEX Telescope Large Area Survey of the Galaxy)。870微米数据的噪声水平约为 70 mJy beam^{-1} ，角分辨率为 $19''2$ 。红外波段数据是基于空间望远镜Spitzer的巡天观测项目GLIMPSE^[26] (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire)，本文使用的波段为3.6、5.8、和8微米。

3 结果

3.1 红外星团和致密尘埃团块的分布

G10.32-0.15是一个双极电离氢区，其激发星是一颗光谱型为O5V-O6V的大质量恒星^[18, 21] (见图1中的红色五角星)。这颗大质量恒星提供了整个电离氢区的电离辐射，主导了整个红外星团的近红外辐射^[18]。左图(见图1)为3.6、5.8和8微米所组成的三色图。3.6微米示踪红外星团中恒星的位置。8微米的辐射，代表的是多环芳香烃PAH的辐射，很好地示踪了电离氢区的边界。

从右图(见图1)中可以看出870微米的辐射主要分布在电离氢区的边界上，与8微米的辐射有很好的成协性。另外，基于870微米的数据，Beuther等^[17]证认了此区域的致密尘埃团块，其编号为C1、C2、C3、C4和C5^[18]。20厘米的辐射主要源于电离气体的自由-自由辐射，它主要集中在激发星附近(见右图中的蓝色等值线)。这里使用的20厘米的数据分辨率较高，只探测到较为致密的形态，而失去了之前使用低分辨率数据探测到的大尺度弥散结构^[13]。致密尘埃团块C3含有非常致密的20厘米辐射，为之前已证认的UCHII^[27] (Ultra-compact HII region)。

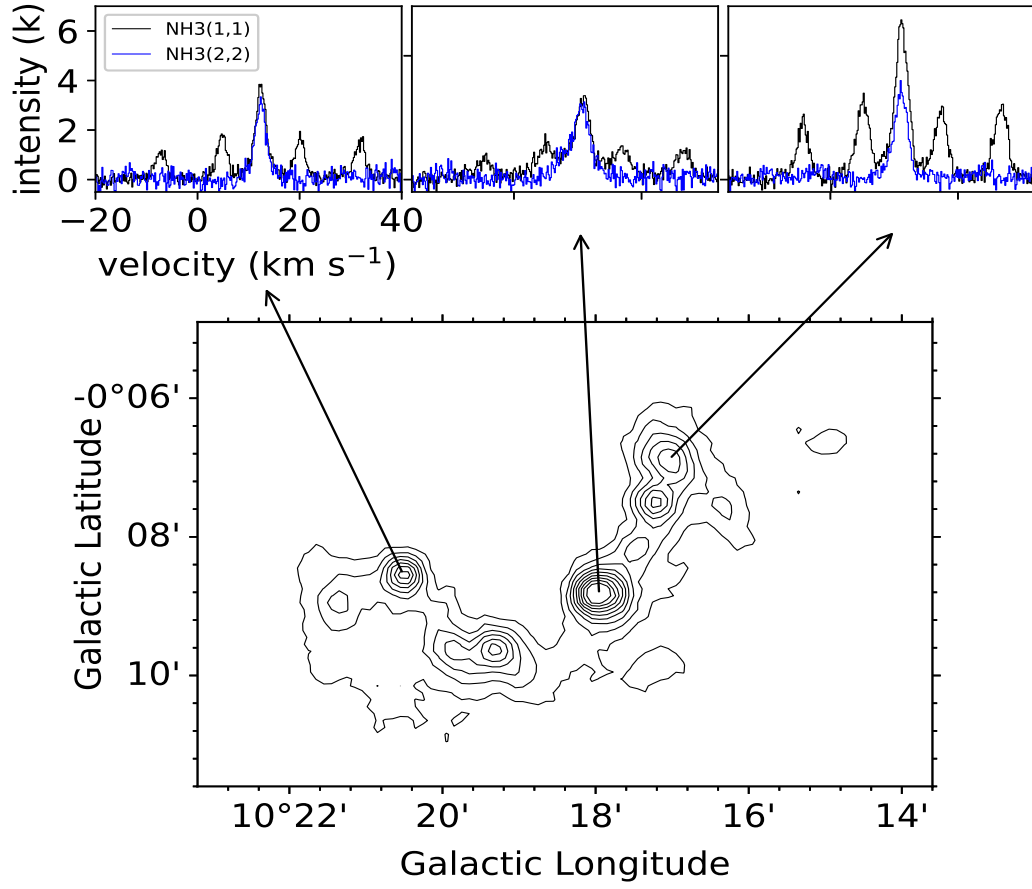
3.2 氨分子气体的分布

图2(上图)给出了致密尘埃团块C1、C3和C5典型的 NH_3 (1, 1) 和 (2, 2) 分子谱线的轮廓。 NH_3 (1, 1) 和 (2, 2) 都探测到非常强的信号，并且在 NH_3 (1, 1) 中探测到了明显的超精细结构。 NH_3 为单一速度成分的轮廓，类似于CS (2-1) 的谱线轮廓特征^[28]，而不同于 ^{13}CO (2-1) 和 C^{18}O (2-1) 含有多速度成分的谱线轮廓^[17, 28]。

图3展示了 NH_3 (1, 1) 和 (2, 2) 的速度积分强度的分布图，可以看出 NH_3 (1, 1) 的分布比 (2, 2) 稍微延展一些。氨分子主要分布在电离氢区的边界上，与870微米示踪的尘埃辐射有很好地成协性。在870微米辐射最强的尘埃核中心， NH_3 的辐射也最强。与之前的结果相比， NH_3 与CS(2-1)的分布类似^[28]，而不同于 ^{13}CO (2-1) 更为延展的分布^[17]。

3.3 氨分子谱线的拟合

在局域热动平衡的假设下，利用辐射转移公式(1)和(4)同时拟合 NH_3 (1, 1)和(2, 2)的谱线数据，可得到气体的速度、速度弥散、氨分子的柱密度、旋转温度和填充因



注: 上图: 三个典型区域NH₃ (1, 1) 和 (2, 2) 的谱线轮廓; 下图: 黑色等值线代表870微米的辐射, 等值线的数值从图像中最大数值的10%到90%, 间隔为10%。

图 2 氨分子的典型谱线轮廓

子^[29]。

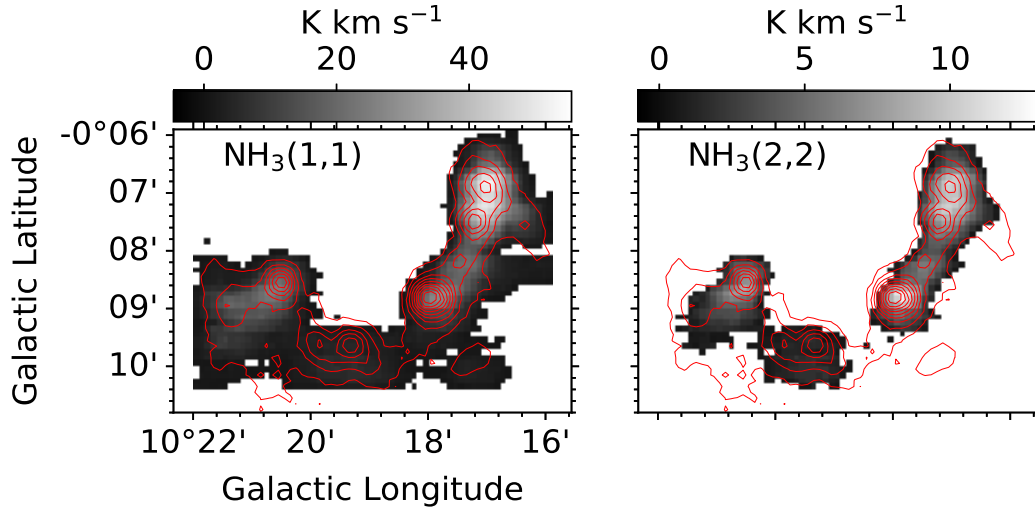
氨分子谱线的光深

$$\tau = \frac{N_{\text{tot}} g A_{ul} c^2}{Q} \frac{c}{8\pi\nu_0^2 \sigma\nu_0 \sqrt{2\pi}} \frac{1 - \exp(-h\nu_0/(k_B T_{\text{rot}}))}{1 + \exp(-h\nu_0/(k_B T_{\text{rot}}))}, \quad (1)$$

其中, N_{tot} 是柱密度, g 是能级的简并因子, Q 是配分函数, A_{ul} 是爱因斯坦A系数, c 是光速, ν_0 是静止频率, σ 是速度弥散, h 是普朗克常数, k_B 是玻尔兹曼常数, T_{rot} 是NH₃ (1, 1) 和 (2, 2) 之间的旋转温度。

NH₃ (1, 1) 不同超精细结构之间的强度比与光深之间的关系^[30]

$$\frac{\Delta T_a^*(J, K, m)}{\Delta T_a^*(J, K, s)} = \frac{1 - \exp(-\tau(J, K, m))}{1 - \exp(-a\tau(J, K, m))}, \quad (2)$$



注：左图：NH₃ (1, 1) 的速度积分强度图；右图：NH₃ (2, 2) 的速度积分强度图。两图中的红色轮廓是870微米的辐射。等值线的数值从图像中最大数值的10%到90%，间隔为10%

图3 NH₃的速度积分强度图

其中， ΔT_a^* 为谱线的观测强度， m 和 s 指超精细结构的主线和卫星线， $\tau(J, K, m)$ 为主线的光深， a 是卫星线与主线强度的比值。

NH₃ (1, 1) 和 (2, 2) 之间的旋转温度 $T_{\text{rot}}^{[30]}$

$$\frac{\tau(J', K')}{\tau(J, K)} = \frac{\nu^2(J', K')}{\nu^2(J, K)} \frac{\Delta\nu(J, K)}{\Delta\nu(J', K')} \frac{T_{\text{ex}}(J, K)}{T_{\text{ex}}(J', K')} \frac{|\mu(J', K')|^2 g(J', K')}{|\mu(J, K)|^2 g(J, K)} \times \exp\left(\frac{-\Delta E(J', K'; J, K)}{k_B T_{\text{rot}}(J', K'; J, K)}\right), \quad (3)$$

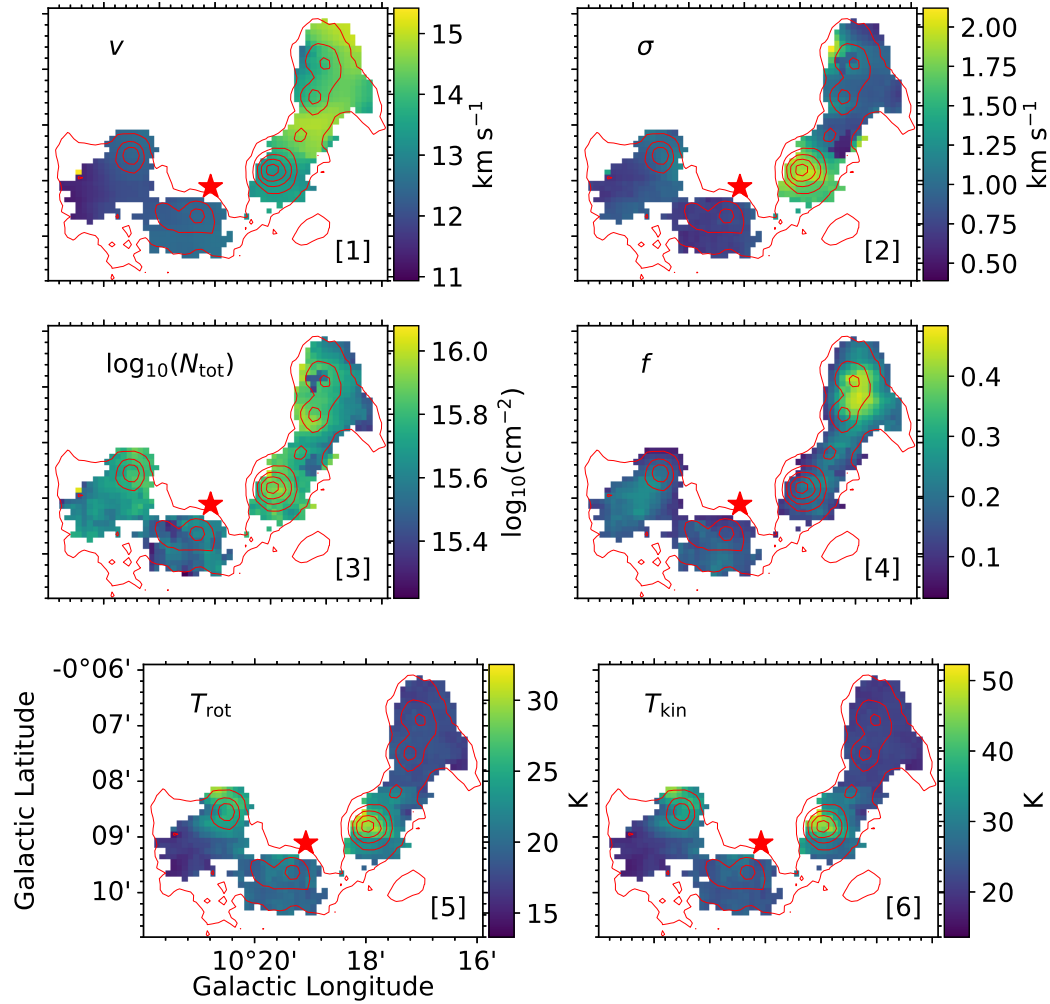
其中， $|\mu(J, K)|^2$ 偶极矩阵元， ΔE 为能级差。

根据公式 (1), (2) 和 (3)，并假设谱线的轮廓为高斯函数，可得到谱线的强度为

$$I_\nu = f \frac{h\nu}{k_B} \left(1 - \exp(-\tau(\nu))\right) \left(\frac{1}{\exp(h\nu/(k_B T_{\text{rot}})) - 1} - \frac{1}{\exp(h\nu/(k_B T_{\text{cmb}})) - 1} \right), \quad (4)$$

其中， f 是填充因子， T_{cmb} 为宇宙微波背景辐射的温度。利用最小二乘法同时拟合 NH₃ (1, 1) 和 (2, 2) 的谱线数据，可得到气体的速度、速度弥散、氨分子的柱密度、旋转温度和填充因子的空间分布^[23] (图4中的子图[1]-[5])。

从尘埃团块C1到C5，气体的速度大约从11 km s⁻¹增加到15 km s⁻¹，存在速度梯度 (见图4中的子图[1])。气体速度弥散的范围为0.52~2.12 km s⁻¹，平均值为1.00 km s⁻¹。速度弥散较大的区域为尘埃团块C3以及C5的东北方向 (见图4中的子图[2])。氨分子柱密度的范围为1.50×10¹⁵~1.10×10¹⁶ cm⁻²，平均值为4.79×10¹⁵ cm⁻²。填充因子的范围为0.06~0.45，平均值为0.20，其最大值所在的区域为尘埃团块C4和C5所在的区域，但是也小于50%。氨



注: 从左到右下的子图依次为速度、速度弥散、氨分子柱密度、填充因子、旋转温度和运动温度的分布, 红色轮廓是870微米的辐射。等值线的数值从图像中最大数值的10%到90%, 间隔为10%。子图的序号标记在每个图的右下角。红色五角星是激发星的位置。

图 4 氨分子拟合参数的分布图

分子旋转温度的范围为14.5~31.0 K, 平均值为20.1 K。旋转温度较高的区域为尘埃团块C1、C2和C3所在的区域(见图4中的子图[5])。

4 讨论

4.1 气体的运动温度

通过蒙特卡洛算法模拟, Tafalla等^[31]建立了NH₃旋转温度 T_{rot} 和气体运动温度 T_{kin} 之间的关系(5),

$$T_{\text{kin}} = \frac{T_{\text{rot}}}{1 - T_{\text{rot}}/42 \ln[1 + 1.1 \exp(-16/T_{\text{rot}})]}, \quad (5)$$

其中, T_{kin} 是运动温度, T_{rot} 是NH₃(2, 2)和(1, 1)之间的旋转温度。通过公式(5)可把G10.32-0.15氨分子的旋转温度转化成气体的运动温度(见图4中的子图[6]), 运动温度的范围为16.2~49.3 K, 平均值为25.3 K。

从运动温度分布图4(子图[6])可以看出, 靠近激发星位置的致密团块C1、C2和C3气体的温度较高, 而C4和C5所在区域的温度较低。这说明激发星以及星团中的其它恒星产生了热反馈, 加热了周围的气体, 而C4和C5受到的热反馈较小。尘埃团块C3除了靠近激发星位置的气体温度较高之外, 其本身温度也较高, 这是受C3中UCHII^[27]的加热所致。

4.2 速度弥散和湍流

通过氨分子可以较为精确地测量气体的温度, 进而可研究气体中的热成分以及非热成分^[32, 33]。利用公式(6), 由气体的运动温度, 可得到气体的声速

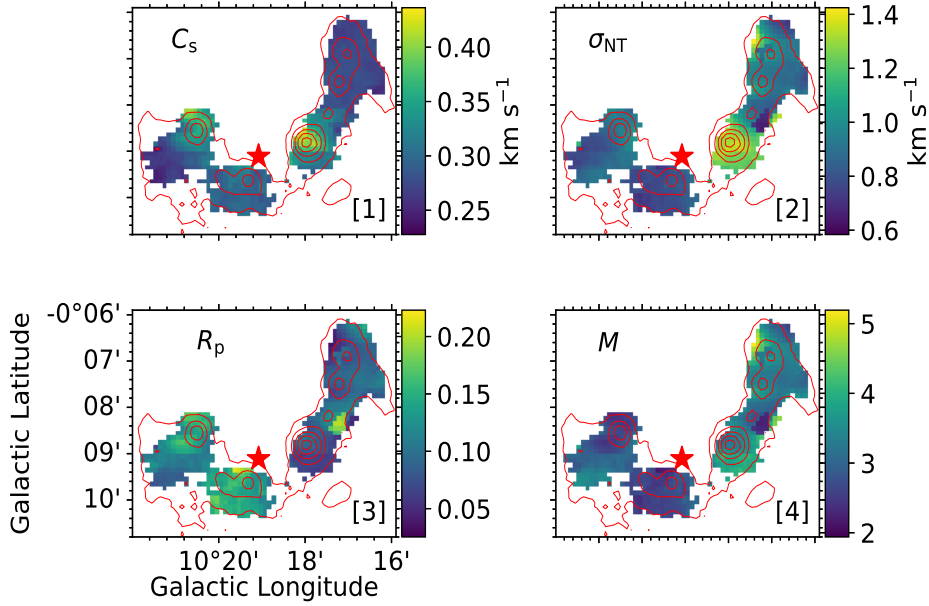
$$C_s = \sqrt{\frac{k_B T_{\text{kin}}}{\mu m_H}}, \quad (6)$$

其中, μ 为分子云的平均分子量, m_H 是氢原子的质量。图5中的子图[1]给出了G10.32-0.15声速的分布, 其范围为0.24~0.42 km s⁻¹, 平均值为0.30 km s⁻¹。由于声速直接跟气体运动温度相关, 因此声速跟气体运动温度有同样的分布, 即靠近激发星附近的C1、C2和C3团块具有较大的声速, C4和C5团块所在的区域声速较小。

分子谱线的展宽包含热展宽和非热展宽两部分^[32]。因此, 从谱线轮廓中减去热成分的展宽就可以得到非热成分的展宽。非热速度弥散^[34]

$$\sigma_{\text{NT}} = \sqrt{\sigma_{\text{NH}_3}^2 - \frac{k_B T_{\text{kin}}}{m_{\text{NH}_3}}}, \quad (7)$$

其中, σ_{NH_3} 是氨分子谱线得到的速度弥散, m_{NH_3} 是氨分子的质量。图5中的子图[2]给出了G10.32-0.15非热速度弥散的分布, 其范围为0.65~1.42 km s⁻¹, 平均值为0.93 km s⁻¹。从图中可以看出, 非热速度弥散较强的地方为C3团块和C5团块的东北方向。C3是一个活跃的恒星形成区, 其非热的速度弥散可能由外部的激发星以及内部的恒星形成活动所共同驱动。



注: 从左到右下的子图依次为声速、非热速度弥散、热压与非热压的比值、马赫数的分布, 红色轮廓是870微米的辐射。等值线的数值从图像中最大数值的10%到90%, 间隔为10%。子图的序号标记在每个图的右下角。每个子图的五角星为激发星的位置。

图 5 推导参数的分布图

C5团块的东北方向具有较大的非热速度弥散, 但运动温度较低, 这可能是激发星以及所在星团产生动量反馈的结果, 即改变了气体的运动状态而非温度。

通过进一步分析热的成分和非热的成分, 可获得热压和非热压的比值以及马赫数。热压与非热压的比值^[35]

$$R_p = C_s^2 / \sigma_{NT}^2, \quad (8)$$

图5中的子图[3]给出了G10.32-0.15热压和非热压比值的分布, 其范围为0.03~0.21, 平均值为0.11。由图可知, 绝大部分热压值低于20%, 因此非热压主导了整个恒星形成区。热压与非热压比值相对较高的区域为尘埃团块C1和C2所在的区域, 而在其它区域比值较低。

马赫数

$$M = \sigma_{NT} / C_s, \quad (9)$$

图5中的子图[4]给出了G10.32-0.15马赫数的分布, 其范围为2.16~5.36 平均值为3.13。由于马赫数的最小值大于2, 因此在整个恒星形成区, 气体都是超音速的。另外, 在尘埃团

块C5的东北方向, 马赫数在5左右, 所以此处的气体为超高音速。

4.3 反馈机制

依据Krumholz 等^[2]关于反馈机制的分类方法, 可对G10.32-0.15中的反馈机制开展研究。尘埃团块C1区域的气体温度较高, 但速度弥散相对较小, C1区域的气体可能受到热反馈机制的影响。在靠近激发星位置的C2和C3团块中探测到20厘米的自由-自由辐射。另外, 这个区域的气体温度较高, 速度弥散较大, 因此, 这个区域的气体可能受到爆炸反馈机制的影响。尘埃团块C4和C5区域的气体运动温度较低, 但是速度弥散较大, 尤其是C5区域的东北方向, 含有马赫数在5左右的超高音速气体, 因此, C4和C5区域可能受到动量反馈机制的影响。综上, 在恒星星团形成区G10.32-0.15中, 不同区域受到反馈的影响由可能由不同的机制主导。

5 总结

使用氨分子谱线和多波段的连续谱数据, 对恒星形成区G10.32-0.15开展了研究, 所得结果总结如下:

(1): 氨分子的速度积分强度图与870微米辐射示踪的致密尘埃的分布成协, 表明氨分子能很好地示踪致密分子气体;

(2): 在局域热动平衡的假设下, 利用分子辐射转移的计算方法同时拟合 NH_3 (1, 1)和(2, 2)的谱线数据, 获取了氨分子的速度、速度弥散、柱密度、旋转温度以及填充因子的分布;

(3): 基于拟合的参数分布, 进一步得到了分子气体的运动温度、声速、非热速度弥散、热压与非热压的比值以及马赫数; 整个恒星形成区的气体主要由非热成分主导;

(4): 通过对运动温度、非热速度弥散、马赫数以及20厘米辐射等数据的综合分析, 发现在G10.3-0.15恒星形成区中可能存在动量反馈, 爆炸反馈(电离反馈)和热反馈, 并且不同区域可能由不同的反馈机制所主导。

参考文献:

- [1] Lada C J, Lada E A. *ARA&A*, 2003, 41: 57–115
- [2] Krumholz M R, Bate M R, Arce H G, et al. In: Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al, eds. *Protostars and Planets VI*. . [S.l.]: [s.n.] , 2014: 243–266
- [3] Pineda J E, Arzoumanian D, Andre P, et al. In: Inutsuka S, Aikawa Y, Muto T, et al, eds. *Protostars and Planets VII*. 2023. . [S.l.]: [s.n.] , Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 534
- [4] Schneider N, Simon R, Guevara C, et al. *PASP*, 2020, 132(1016): 104301
- [5] Berné O, Habart É, Peeters E, et al. *PASP*, 2022, 134(1035): 054301
- [6] Grudić M Y, Guszejnov D, Hopkins P F, et al. *MNRAS*, 2021, 506(2): 2199–2231
- [7] Westerhout G. *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 1958, 14: 215

-
- [8] Goss W M, Shaver P A. Australian Journal of Physics Astrophysical Supplement, 1970, 14: 1
- [9] Shaver P A, Goss W M. Australian Journal of Physics Astrophysical Supplement, 1970, 14: 77
- [10] Altenhoff W J, Downes D, Pauls T, et al. A&AS, 1979, 35: 23
- [11] Handa T, Sofue Y, Nakai N, et al. PASJ, 1987, 39: 709–753
- [12] Reifenstein E C, Wilson T L, Burke B F, et al. A&A, 1970, 4: 357–377
- [13] Kim K T, Koo B C. ApJ, 2001, 549(2): 979–996
- [14] Wilson T L. A&A, 1974, 31: 83
- [15] Brand J, Cesaroni R, Caselli P, et al. A&AS, 1994, 103: 541–572
- [16] Walsh A J, Burton M G, Hyland A R, et al. MNRAS, 1998, 301(3): 640–698
- [17] Beuther H, Linz H, Henning T, et al. A&A, 2011, 531: A26
- [18] Dewangan L K, Ojha D K, Grave J M C, et al. MNRAS, 2015, 446(3): 2640–2658
- [19] Skrutskie M F, Schneider S E, Stiening R, et al. In: Garzon F, Epchtein N, Omont A, et al, eds. The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys. 1997. . [S.l.]: [s.n.] , Astrophysics and Space Science Library, vol. 210
- [20] Bica E, Dutra C M, Soares J, et al. A&A, 2003, 404: 223–232
- [21] Bik A, Kaper L, Hanson M M, et al. A&A, 2005, 440(1): 121–137
- [22] Townsley L K, Broos P S, Garmire G P, et al. ApJS, 2018, 235(2): 43
- [23] Hogge T, Jackson J, Stephens I, et al. ApJS, 2018, 237(2): 27
- [24] White R L, Becker R H, Helfand D J. AJ, 2005, 130(2): 586–596
- [25] Schuller F, Menten K M, Contreras Y, et al. A&A, 2009, 504(2): 415–427
- [26] Churchwell E, Babler B L, Meade M R, et al. PASP, 2009, 121(877): 213
- [27] Wood D O S, Churchwell E. ApJS, 1989, 69: 831
- [28] Kim K T, Koo B C. ApJ, 2002, 575(1): 327–336
- [29] Mangum J G, Shirley Y L. PASP, 2015, 127(949): 266
- [30] Ho P T P, Townes C H. ARA&A, 1983, 21: 239–270
- [31] Tafalla M, Myers P C, Caselli P, et al. A&A, 2004, 416: 191–212
- [32] Zuckerman B, Evans I, N. J. ApJ, 1974, 192: L149
- [33] Larson R B. MNRAS, 1981, 194: 809–826
- [34] Myers P C. ApJ, 1983, 270: 105–118
- [35] Lada C J, Bergin E A, Alves J F, et al. ApJ, 2003, 586(1): 286–295

Study the Feedback Mechanism in Star Forming Region G10.32-0.15

ZHANG Xing^{1,2}, LI Da-lei², ESIMBEK Jarken^{2,1}

(1. University of Xingjing, Urumqi 830046, China; 2. XinJiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Feedback plays an important role in star formation and strongly impacts the formation of stars and planets, and the evolution of the star cluster and the parental molecular cloud. Multi-wavelength studies of star forming region G10.32-0.15 were conducted using the $\text{NH}_3(1,1)$ and $(2,2)$ spectrum line data of the ammonia molecule observed with the GBT and with the inclusion of multi-wavelength continuum data from the cm, sub-mm to infrared bands. The infrared star cluster and dense dust clumps C1, C2, C3, C4 and C5 are identified in the source based on the multi-wavelength infrared and sub-mm continuum data. The NH_3 velocity-integrated intensity distribution is clearly associated with the dense dust distribution detected by $870\ \mu\text{m}$ FIR emission, indicating that NH_3 is a good dense gas tracer. The distribution of velocity, velocity dispersion, rotation temperature, NH_3 column density and filling factor can be derived by fitting a radiation transfer model to the $\text{NH}_3(1,1)$ and $(2,2)$ data under the assumption of Local Thermal Equilibrium. Furthermore, the kinetic temperature, the sound speed, the non-thermal velocity dispersion, the ratio between thermal pressure and non-thermal pressure, and the Mach number are derived based on those fitted parameters. From the above results, the dense gas in G10.32-0.15 is affected by multiple feedback processes: the dense gas in C1 is **likely** affected by thermal feedback, the dense gas in C2 and C3 is **likely** affected by explosive feedback, and the dense gas in C4 and C5 is **likely** affected by momentum feedback. Therefore, very complicated interactions exist between the infrared star cluster and the surrounding gas and different feedback mechanisms **maybe** dominate the different regions in G10.32-0.15.

Key words: molecular clouds; molecular spectrum lines; star formation