

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.01.01

Taurus 分子云的 $\text{NH}_3(1, 1)$ 精细结构 强度异常研究

阿拜·解恩斯^{1,2}, 周冬冬², 加尔肯·叶生别克^{2,1}, 李大磊²

(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: 基于 $\text{NH}_3(1, 1)$ 精细结构强度异常 (hyperfine intensity anomaly, HIA) 普遍存在于恒星形成区, 开展 HIA 研究对了解恒星形成过程, 特别是恒星形成早期演化阶段具有重要意义。本文利用南山 26 米射电望远镜的 NH_3 谱线观测数据, 结合积分 HIA (hyperfine intensity anomaly) 定量计算方法, 获得金牛座 (Taurus) 分子云 B211/B213 + L1495 区域的 HIAs 成图分布。结果分析表明, HIA 普遍存在于 Taurus 分子云 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线内外卫星线的 HIAs 的平均值分别为 1.07 和 1.15, 均大于 1, 且系统性的收缩或膨胀运动 (systematic contraction or expansion motion, CE) 模型和辐射俘获 (hyperfine selective trapping, HST) 模型下的 HIAs 分别为 55.7% 和 21.7%, 表明该区域中 HIA 的产生机制符合 CE 模型预测。另外, HIAs 象限成图分布显示 B211/213 纤维结构脊线可能存在大规模的气体内落运动。相关性分析表明该区域分布在 CE 模型的 HIAs 与速度弥散正相关, 分布在 HST 模型的 HIAs 与速度弥散负相关。

关键词: 分子云; 分子谱线; 恒星形成; 精细结构强度异常

中图分类号: P145.2

文献标识码: A

1 引言

氨分子 (NH_3) 的反转谱线是研究分子云的重要工具, 在恒星形成区、分子云以及邻近的星系研究中, NH_3 是分子云密度、温度、速度和**本征线宽**的理想**探针**^[1-4]。 $\text{NH}_3(1, 1)$ 能级由于氢原子施加的势垒较低, 氮原子能够通过能量势垒发生“隧穿”, 迁移至等价位置。该隧穿运动引起周期性的“翻转”, 导致能级分裂, 使所有的 (J, K) 旋转状态分为反转双峰, 双峰之间的跃迁频率位于微波范围, **可以在射电波段观测**。在这种反转双峰中, 由于氮核的

收稿日期: 2012-08-07; 修回日期: 2012-11-29

资助项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”项目 (2021-XBQNXZ-028); 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目 (2022D01A362); 国家自然科学基金青年基金项目 (12103082); 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: 周冬冬, zhoudongd@xao.ac.cn, 加尔肯·叶生别克, jarken@xao.ac.cn

电四极矩与电子电场的相互作用,使每个反演态的能级都分裂成 3 个能级。由于选择定则的跃迁, $\text{NH}_3(1, 1)$ 线最终分裂为五个不同频率的精细结构谱线, 包括一个主线及对称的卫星线对。在局部热动平衡条件下, $\text{NH}_3(1, 1)$ 精细结构线中的两条内卫星线和外卫星线的强度各自相等, 分别为主线强度的 0.26 和 0.22 倍^[2], 该相等强度假设是密度、温度等重要物理参量计算的前提条件^[5]。

然而, 观测上 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线的卫星线强度并不总是相等的。1977 年 Matsakis 等人^[6]在 DR21 分子云中首次发现 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线卫星线强度不相等, 这种内卫星线 (inner satellite line, ISL) 和 (或) 外卫星线 (outer satellite line, OSL) 强度不相等现象被称为氨分子精细强度异常 (hyperfine intensity anomaly, HIA)。随后的观测研究表明, HIA 广泛存在于分子云^[7-11], 特别是恒星形成区^[12, 13]。HIA 是怎么产生的, 为什么广泛存在于分子云, 目前仍没有清晰的答案。在解析和数值计算中, 科学家提出了产生 HIA 的两种主要模型解释: 辐射俘获 (hyperfine selective trapping, HST) 模型^[6] 和系统性的收缩或膨胀运动 (systematic contraction or expansion motion, CE) 模型^[14]。

Matsakis 等人^[6]认为, 在 HST 模型下 $\text{NH}_3(2, 1)$ 高能态向 $\text{NH}_3(1, 1)$ 基态跃迁时, 其 $\Delta F = 1 - 0$ 和 $\Delta F = 2 - 1$ 精细结构线与 $\Delta F = 0$ 的主线跃迁存在不对称权重, 导致 $\text{NH}_3(1, 1)$ 的精细结构能级布居数偏离热布居, 从而使得 $\text{NH}_3(1, 1)$ 的卫星线出现反常强度。HST 模型要求产生 HIA 的 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线线宽在 $0.3 - 0.6 \text{ km s}^{-1}$, 因为如果线宽过大会出现 $\Delta F = 1 - 0$ 和 $\Delta F = 2 - 1$ 精细结构线与 $\Delta F = 0$ 的主线重叠^[6]。然而, 实际观测到的 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线线宽明显大于 0.6 km s^{-1} , Stutzki & Winnewisser 等人^[23]认为这是由于组成分子云的致密云核之间存在相互运动, 且其各自的谱线存在多普勒频移, 这些云核发射的谱线合并在一起组成了实际观测中的大于 0.6 km s^{-1} 的谱线线宽。在拉森定理和金斯理论假设下, 云核的空间尺度约为 0.3 pc , 质量约为 $1 M_{\odot}$ ^[24]。这些特点和恒星形成中的竞争吸积模型的初始条件符合, 因此该模型下, HIA 观测结果可以作为大质量恒星通过竞争吸积模型形成的观测证据。

在 CE 模型下, 系统性的收缩或膨胀运动 (如分子云中的外流、内落等) 可以导致辐射的光子出现多普勒频移。在存在系统性运动的分子云中, $\text{NH}_3(1, 1)$ 的某一个精细能级辐射的光子可能被另一个精细能级吸收, 从而导致 $\text{NH}_3(1, 1)$ 能级偏离热布居, 并最终造成 $\text{NH}_3(1, 1)$ 谱线强度出现异常^[14]。因此, HIA 可以成为示踪分子云吸积或者膨胀运动的探针^[14]并可能示踪恒星形成极早期, 如红外暗云内落运动的有效探针^[11]。

20 世纪 70 年代至今, 科学家提出了两种定量计算方法来表征 HIA 强度: (1) 利用峰值强度比^[12]和 (2) 积分强度比^[10]来定量表征 HIA (以下简称峰值 HIA 和积分 HIA)。Zhou 等人^[10]通过数值模拟和实际观测结果比较得出, 积分 HIA 比峰值 HIA 更能反映分子云中真实的 HIA 分布。峰值 HIA 的观测研究结果表明, $\text{NH}_3(1, 1)$ 线的 HIA 强度与宏观分子云物理量之间没有明确的相关性^[6, 9]。造成这个结果的原因可能来自两方面: (1) 峰值 HIA 不能真实表示分子云中的 HIA; (2) 前人的观测研究主要集中在恒星形成区的单点观测。这两个因素可能直接导致之前的研究不能做到客观系统, 同时也可能直接导致至今没有发现 HIA 和分子云物理参量的直接相关性。Zhou 等人^[10]采用积分 HIA 方法计算了猎户座分子云北部的

HIA, 结果发现 HIA 与分子云的物理参量相关。

综上所述, 本文将采用积分 HIA 定量计算方法开展金牛座分子云 (Taurus molecular cloud) 大尺度连续区域的 HIA 研究, 以探讨 HIA 在分子云和恒星形成区中普遍存在的原因、分布规律及其产生的物理机制, 进一步研究 HIA 与分子云物理参数的相关性。本文第 2 节介绍观测数据及处理方法, 第 3 节描述研究方法和结果, 第 4 节是结果分析与讨论, 第 5 节是总结与展望。

2 观测数据

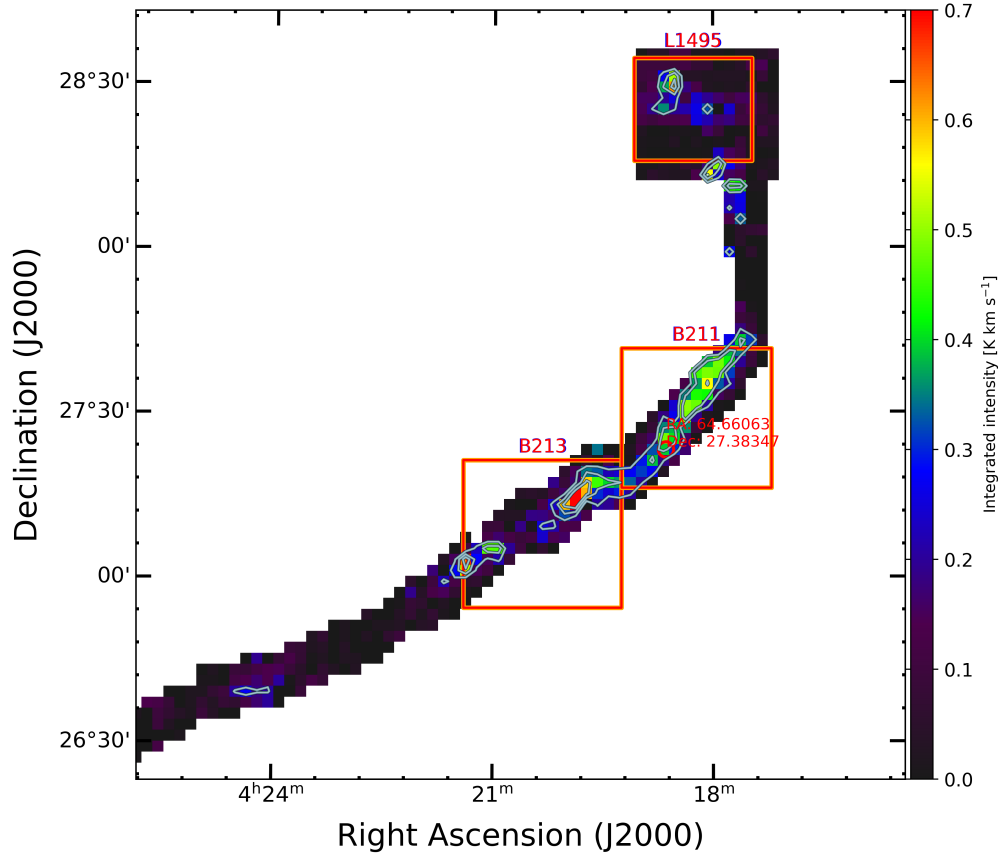
2.1 南山射电望远镜 NH_3 谱线观测

本文 NH_3 谱线观测使用了中国科学院新疆天文台南山观测基地 26 米射电望远镜和 K 波段双极化制冷接收机。在观测波段望远镜分辨率为 120 角秒, 观测终端带宽为 64 MHz, 数字消色散系统 (DFB) 8192 个通道, 对应的速度分辨率为 0.098 km s^{-1} 。观测时中心频率设为 23.708 GHz, 可以同时观测 $\text{NH}_3(1, 1)$ (23694.495487 MHz) 和 $(2, 2)$ (23722.633644 MHz) 线, 望远镜在 K 波段的主波束效率为 59%。从 2013 年 1 月至 3 月, 本观测采用了位置调制 (position switch, PS) 观测模式, 并且在该模式下的源上观测积分时间为 6 ~ 12 分钟。观测区域覆盖 Taurus 分子云 B211/B213 + L1495, 参考点 RA: 04: 18: 38.45, DEC: 27: 23: 00.6 (J2000), 观测面积约 $2.13^\circ \times 1.92^\circ$, PS 观测模式的观测间隔为 $120'' \times 120''$, 共采用了 537 个观测点覆盖全部观测区域。图 1 展示了 Taurus 分子云 B211/B213 + L1495 区域的 $\text{NH}_3(1, 1)$ 积分强度分布结果, 19.74% 的区域检测到的 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线, 但是只有 0.37% 区域检测到 $\text{NH}_3(2, 2)$ 线。

Taurus 分子云是小质量恒星形成研究的理想观测目标^[15, 16]; 是研究丝状结构和致密核的最佳场所之一^[17-19]; 是最早研究尘埃和气体关系的分子云之一^[20]; 我们的工作将首次开展 Taurus 分子云 B211/B213 + L1495 区域的 HIA 研究。B211 是较年轻、演化程度较低的区域, 致密区域氢分子柱密度可达 $2.2 \times 10^{-22} \text{ cm}^{-2}$, 几乎没有任何原恒星存在; B213 是活跃的恒星形成区域, 较为年长、演化程度较高的区域, 致密区域氢分子柱密度 $2.4 \times 10^{-22} \text{ cm}^{-2}$ 。

2.2 数据处理

本文主要使用 IRAM 和 GILDAS 软件包中的 CLASS 和 GREG 数据处理工具、Python 绘图包 matplotlib、天文包 APLpy、astropy、pandas、spectral-cube、pyspeckit 等对 NH_3 谱线数据进行数据处理和成图处理。首先, 排除 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线主线信噪比小于 3 的谱线, 得到信噪比大于 3 的谱线, 如图 2 所示。其次, 检查第一步获得的所有谱线, 排除 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线内卫星线与主线出现重叠的谱线, 因为重叠情况下计算的 HIA 不能够真实反映谱线的异常强度。再次, 对 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线进行拟合: 使用 pyspeckit.wrappers.fitnh3 参照 Zhou 等人^[10]的方法, 用 18 个高斯函数对 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线进行拟合, 获得线心速度和本证速度弥散。最后, 利用第三步得到的速度和本证速度弥散, 通过计算获得积分 HIA 的积分范围, 进而计算出积分



注：图中等高线是 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线的积分强度值，从 0.18 K km s^{-1} 开始到 0.54 K km s^{-1} ，步长为 0.18 K km s^{-1} ，红色的坐标表示观测中心的坐标。

图 1 Taurus 分子云 B211/B213+L1495 区域的 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线的积分强度图。

HIA。

积分 HIA 是 Zhou 等人^[10]提出的比峰值 HIA 更能准确地反映真实 HIA 的计算方法。该方法的提出归咎于卫星线的三个（或两个）超细结构线分别具有不同的频率间隔，即使在 LTE 和光学薄条件下，红端和蓝端 ISLs (OSLs) 卫星线表现出不同的线宽和峰值强度^[10]。本文遵循积分 HIA 计算方法通过其蓝端与红端积分强度的比值来确定 HIA：

$$HIA_{\text{IS}} = \frac{F_{\text{BISL}}}{F_{\text{RISL}}} \quad (1)$$

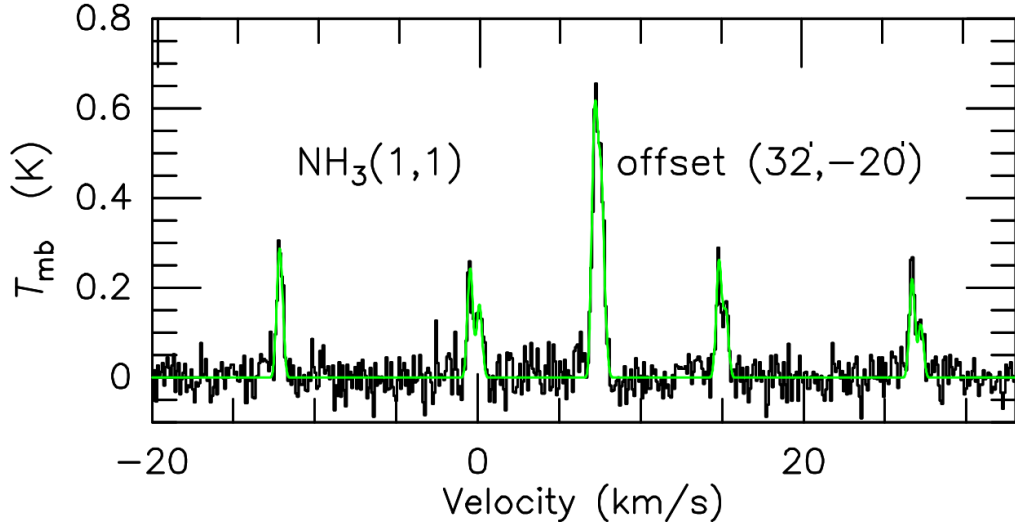
$$HIA_{\text{OS}} = \frac{F_{\text{BOSL}}}{F_{\text{ROS}}} \quad (2)$$

其中， F_{BISL} 和 F_{RISL} 分别是内卫星线蓝端和红端的积分强度， F_{BOSL} 和 F_{ROS} 是外卫

星线蓝端和红端的积分强度。HIA 的误差 σ_{HIA} 采用以下方法计算^[10]:

$$\sigma_{\text{HIA}} = \text{HIA} \times \sigma_{\text{BL}} \times \sqrt{\frac{N_c}{(F_B)^2} + \frac{N_c}{(F_R)^2}} \quad (3)$$

其中 HIA 是内卫星线或外卫星线的 HIA 值, N_c 为积分范围内的通道数, σ_{BL} 为基线的噪声水平, F_B 和 F_R 分别表示卫星线蓝端和红端的积分强度。



注: 图中黑色线为实际观测结果, 绿色线为谱线拟合结果。

图 2 南山 26 米射电望远镜在 Taurus 分子云的 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线的观测结果。

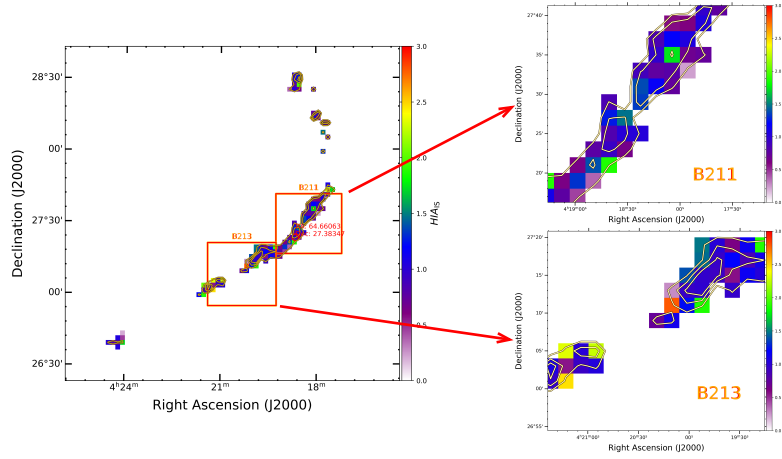
3 结果

3.1 积分 HIA 的分布结果

利用 2.2 节描述的数据处理和计算方法, 最终获得 106 条谱线, 并计算了积分 HIA, 结果展示在图 3 和图 4。图 3 展示的是内卫星线的积分 HIA, 标记为 HIA_{IS} ; 图 4 展示的是外卫星线的积分 HIA, 标记为 HIA_{OS} 。从图 3 和图 4 可以看到, HIA 普遍存在于 Taurus 分子云, 且 HIA 主要沿着 B211/213 纤维结构分布在 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线积分强度较大的区域。另外, 从 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 分布趋势来看, B211/213 纤维结构脊线东侧分布的 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 大部分小于 1, 而西侧呈现更复杂的分布情况。

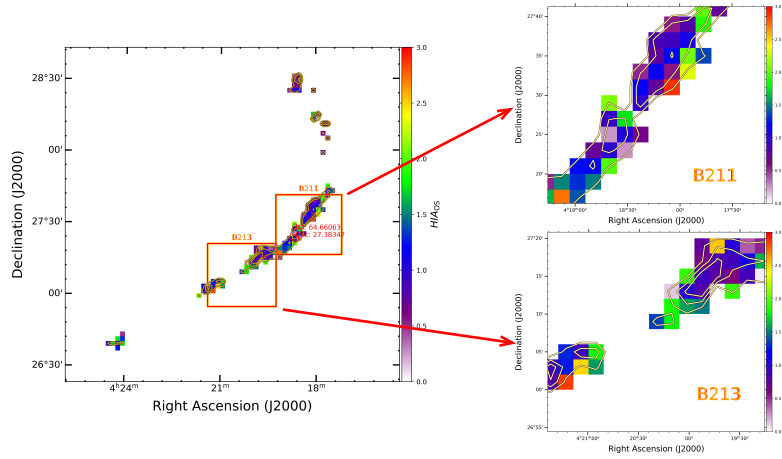
3.2 积分 HIA 的统计结果

图 5 展示了 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 的统计结果。从图 5 得到: HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 在 1 左右均有分布, 大多数的 HIA 值不等于 1; HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 的分布相近, 从分布轮廓分析, HIA_{OS} 比 HIA_{IS} 更偏离 1, 即 OSL 比 ISL 更加异常, 但并不显著; HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 的平均值分别



注：图中等值线和红色坐标如图 1 所述。

图 3 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线信噪比大于 3 的 Taurus 分子云 B211/B213 区域的 ISLs 的积分 HIA 分布图。



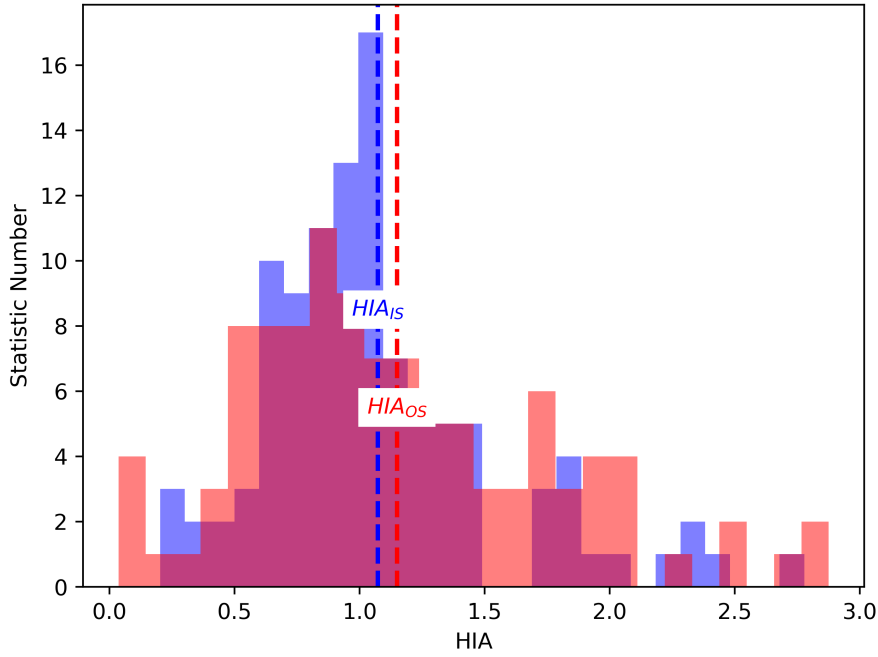
注：图中等值线和红色坐标如图 1 所述。

图 4 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线信噪比大于 3 的 Taurus 分子云 B211/B213 区域的 OSLS 的积分 HIA 分布图。

是 1.07 和 1.15。 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 的平均值均大于 1 表明，该区域中 CE 模型是产生 HIA 的主要模型，且 OSLS 比 ISL 更加异常。

3.3 积分 HIA 的象限统计结果

如引言所述，~~HST 模型下 HIA 结果可以作为大质量恒星通过竞争吸积模型形成的观测证据~~，CE 模型下 HIA 可以成为示踪分子云吸积或者膨胀运动的更好的探针^[14]。计算研究发现这两种模型有一个显著不同的特征：HST 模型下，由于特定的跃迁选择和权重关系，内卫星线的 HIA 只能大于 1（即 $HIA_{IS} > 1$ ），外卫星线的 HIA 只能小于 1（即 $HIA_{OS} < 1$ ）^[23]；CE 模型下，膨胀运动只能同时增强红端的卫星线，抑制蓝端的卫星线（即 $HIA_{IS} < 1$ ，

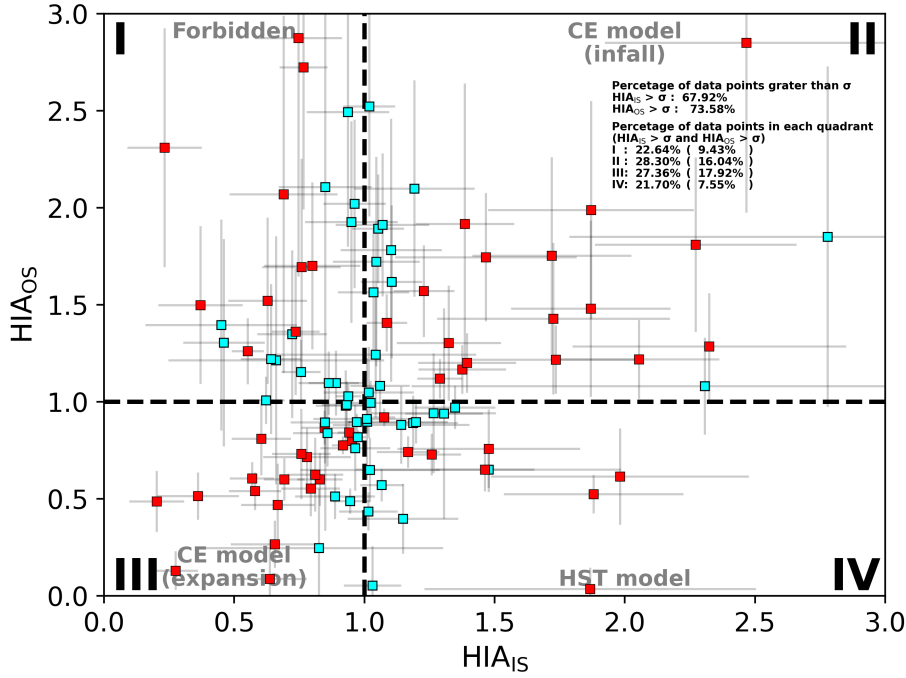


注: 图中蓝色表示 ISL 的积分 HIA, 红色表示 OSL 的积分 HIA, 蓝色虚线表示 ISL 的积分 HIA 的平均值, 红色虚线表示 OSL 的积分 HIA 的平均值。

图 5 Taurus 分子云 B211/B213 + L1495 区域的积分 HIA 统计结果分布图。

$HIA_{OS} < 1$); 与之相反塌缩运动只能同时增强蓝端的卫星线, 抑制红端的卫星线 (即 $HIA_{IS} > 1$, $HIA_{OS} > 1$)^[14]。基于上述预测, Zhou 等人^[10]提出象限分析法: 第 I 象限为两种模型的禁止区域 ($HIA_{IS} < 1$, $HIA_{OS} > 1$), CE 模型下示踪内落运动的点在第 II 象限 ($HIA_{IS} > 1$, $HIA_{OS} > 1$), 示踪膨胀运动的点在第 III 象限 ($HIA_{IS} < 1$, $HIA_{OS} < 1$), HST 模型预测的点在第 IV 象限 ($HIA_{IS} > 1$, $HIA_{OS} < 1$)。

图 6 展示了 Taurus 分子云 B211/B213 + L1495 区域的积分 HIA 的象限统计分布结果。图 6 中黑色的虚线把所有的 HIA 区分为四个象限, 浅蓝色数据点表示 HIA_{IS} 或 HIA_{OS} 偏离 1 (即异常) 小于 σ_{HIA} , 或 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 偏离 1 同时小于 σ_{HIA} 的数据点, 红色点表示 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 偏离 1 同时大于 σ_{HIA} 的数据点。计算结果显示 HIA_{IS} 偏离 1 大于 σ_{HIA} 的占比为 67.92%, 异常值大于 σ_{HIA} 的 HIA_{OS} 占比为 73.58%。从象限统计结果可以得到, 分布在 CE 模型的 HIAs 占比为 55.7%, HST 模型下的 HIAs 占比为 21.7%; 异常大于 σ_{HIA} 的 HIAs 分布在 CE 模型的占比为 33.9%, 分布在 HST 模型的仅占 7.6%。从这个结果我们可以看到, 无论是所有 HIAs 还是异常大于 σ_{HIA} 的 HIAs, 在 Taurus 分子云 B211/B213 + L1495 区域中 CE 模型下的 HIAs 都远多于 HST 模型下的 HIAs, 这意味着在 Taurus 分子



注：浅蓝色数据点表示 HIA_{IS} 或 HIA_{OS} 偏离 1 小于 σ_{HIA} ，或 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 偏离 1 同时小于 σ_{HIA} ，红色数据点表示 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 偏离 1 同时大于 σ_{HIA} 。

图 6 Taurus 分子云 B211/B213 + L1495 区域积分 HIA 的象限分布统计图。

云 B211/B213 + L1495 区域中产生 HIA 的主要模型是 CE 模型，这与 Camarata 等人^[9]的结果不一致，他们的结果表明 HST 模型是产生 HIA 的主要模型。

4 分析与讨论

4.1 积分 HIA 的象限分析

我们把 HIA 的象限结果标记在 Taurus 分子云 B211/B213 + L1495 区域，得到积分 HIA 的象限分布图，见图 7 (a)。图 7 (a) 中浅蓝色表示分布在禁止区域的数据点（第 I 象限），桃红色表示的是 CE 模型下示踪内落运动的数据点（第 II 象限），黄色表示的是 CE 模型下示踪膨胀运动的数据点（第 III 象限），HST 模型的数据点用蓝色表示（第 IV 象限）。为了比较 HIAs 的象限分布与积分强度、速度、速度弥散的分布趋势，我们根据所获得的 HIA 集成了相应区域的积分强度、速度、速度弥散分布图，见图 7 (b)、(c) 和 (d)。比较象限分布图和积分强度分布图可以看到，分布在禁止区域的数据点（浅蓝色）出现在 $NH_3(1, 1)$

线积分强度小的地方。我们检查禁止区域的 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线发现, 这些谱线的信噪比都比较差, 这可能是最终导致计算得到的积分 HIA 分布在禁止区域的原因。此外, 我们还发现, 第二象限的数据点更倾向于分布在 B211/213 的脊线区域, 这表明脊线区域可能存在向内运动。Palmeirim 等人^[22]认为 B211/213 纤维结构正在向其长轴径向收缩, 同时通过条纹吸积更多的环境物质, 这与我们看到 B211/213 的脊线主要分布着第二象限数据点的结果一致。

图 7 中速度和速度弥散分布图展示了 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线示踪的运动特性的变化。在 Taurus 分子云 B211/B213 + L1495 区域, 气体速度主要集中在平均值附近, 只有很小的差异。基于南山 26 米射电望远镜灵敏度的局限, 我们只探测到周围一小部分延展气体的 NH_3 , 所示的速度主要代表该区域密度最大的 NH_3 的速度。另外, 我们发现速度弥散范围在 $0.5\text{--}2.8\text{ km s}^{-1}$ 范围, 14.0% 的谱线速度弥散超过 1.5 km s^{-1} 。但是速度展宽更大。另外在 B213 区域 NH_3 积分强度最大的区域, 分布的是 CE 模型下示踪膨胀运动的点, CE 模型下示踪内落运动和 HST 模型的数据点分布在边缘区域, 这意味着该区域中心可能存在膨胀运动。Seo 等人^[21]的研究结果表明, B213 较之 B211 更年轻, 且存在多个原恒星, B213 的膨胀运动可能与恒星形成活动有关。

4.2 积分 HIA 与分子云物理参量的相关性分析

图 8 展示了异常强度大于 σ_{HIA} 的 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 与速度弥散的相关关系。从图 8 可以看到, 随着速度弥散的增加, 分布在第二象限的 HIA_{IS} 、第三象限的 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 存在逐渐偏离 1 的趋势, 即 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线的 HIA 强度随着速度弥散增大而变得越来越大。这表明, CE 模型下速度弥散的增加实际上使得 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线精细结构强度变得更加异常。第二象限的 HIA_{OS} 与速度弥散的线性关系表明, CE 模型下示踪内落运动的外卫星线的积分 HIA 与速度弥散不相关。

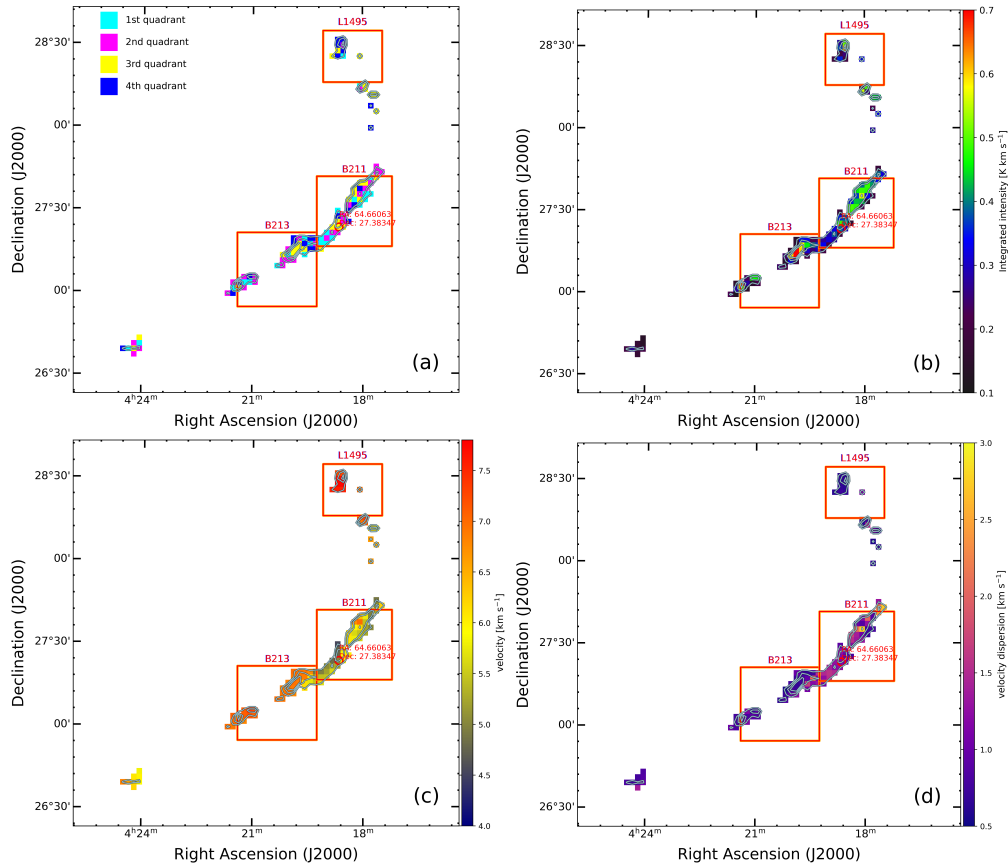
分布在第四象限的 HIA_{IS} 和 HIA_{OS} 随着速度弥散的增加逐渐趋向于 1, 即 HST 模型下速度弥散的增加减弱了强度异常现象。这种现象可以解释为当速度弥散增加时, 谱线的重叠污染会减弱或消除超精细结构强度之间的差异, 这个结果与 Stutzki 等人^[23]提出的 HST 模型下 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线的 HIA 强度会随着线宽的增大而减低预测一致。

5 总结

本文利用南山 26 米射电望远镜的氨分子谱线数据对金牛座分子云 B211/B213 + L1495 区域进行了氨分子精细结构强度异常 (hyperfine intensity anomaly, HIA) 研究。结果表明:

(1) HIA 现象在金牛座分子云内普遍存在, 且主要沿着 B211/213 纤维结构分布, 纤维结构脊线东侧的 $\text{NH}_3(1, 1)$ 内外卫星线的异常强度倾向于均大于 1, 而西侧的 $\text{NH}_3(1, 1)$ 精细结构强度异常表出更复杂的分布。

(2) HIA 的统计结果分析表明, $\text{NH}_3(1, 1)$ 线内外卫星线异常强度的平均值都大于 1, 这表明金牛座分子云 B211/B213 + L1495 区域中产生 HIA 的主要机制符合 CE 模型预测。



注：图中等值线和红色坐标如图 1 所述。

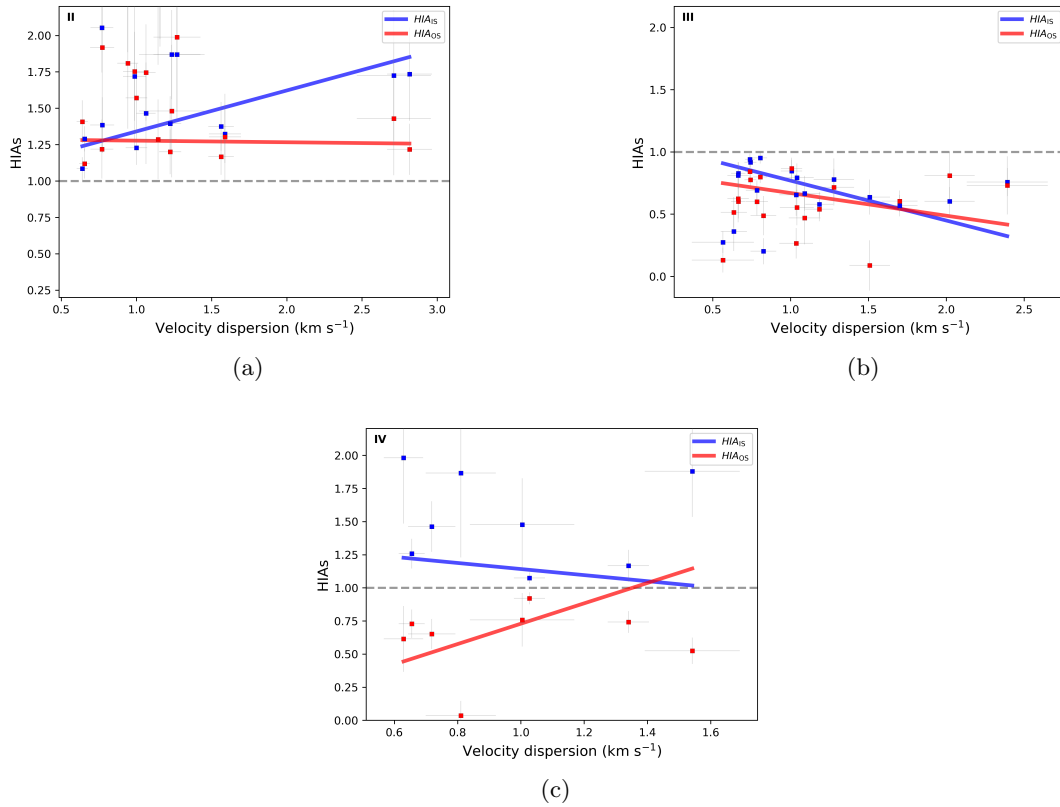
图 7 Taurus 分子云 B211/B213 + L1495 区域的积分 HIA 的象限分布图 (a)、积分强度图 (b)、速度分布图 (c) 和速度弥散分布图 (d)。

(3) HIA 象限分布结果表明, B211/213 纤维结构脊线可能存在大规模的向内运动。

(4) 相关性分析结果显示, CE 模型下 HIA 随着速度弥散的增加更加异常, HST 模型下 HIA 随着速度弥散的增大而减弱。

参考文献:

- [1] Cheung A C, Rank D M, Townes C H, et al. ApJ, 1969, 157, L13
- [2] Ho P T P, Martin R N, & Barrett A H. ApJ, 1981, 246, 761
- [3] Goodman A A, Benson P J, Fuller G A, et al. ApJ, 1993, 406, 528
- [4] Barranco J A, & Goodman A A. ApJ, 1998, 504, 207
- [5] Ho P T P, Townes C H, ARA&A, 1983, 21, 239
- [6] Matsakis D N, Brandshaft D, Chui M F, et al. ApJ, 1977, 214, L67



注: 图中蓝色和红色数据点分别表示 ISL 和 OSL 的积分 HIA, 蓝色和红色直线分别表示 ISL 和 OSL 的积分 HIA 的回归线。

图 8 Taurus 分子云 B211/B213+L1495 区域的积分 HIA 与 $\text{NH}_3(1, 1)$ 线的速度弥散的线性关系图, 红色和蓝色数据点分别表示内外卫星线的积分 HIA, 实线表示线性拟合结果。(a) 分布在第 II 象限 (CE 模型下示踪内落运动) 的积分 HIA 与速度弥散的线性关系图; (b) 分布在第 III 象限 (CE 模型下示踪膨胀运动) 的积分 HIA 与速度弥散的线性关系图; (c) 分布在第 IV 象限 (HST 模型) 的积分 HIA 与速度弥散的线性关系图。

- [7] Takano T, Stutzki J, Fukui Y, et al. A&A, 1986, 167, 333
- [8] Ungerechts H, Walmsley C M, Winnewisser G, A&A, 1986, 157, 207
- [9] Camarata M A, Jackson J M, & Chambers E, ApJ, 2015, 806, 74
- [10] Zhou D, Wu G, Esimbek J, et al. A&A, 2020, 640, A114
- [11] Wu, G., Henkel, C., Zhou, D., et al. 2024, A&A, 691, A111
- [12] Longmore S N, Burton M G, Barnes P J, et al. MNRAS, 2007, 379, 535
- [13] Fontani F, Palau A, Busquet G, et al., MNRAS, 2012, 423, 1691
- [14] Park Y -S. A&A, 2001, 376, 348
- [15] Shu F H, Adams F C, Lizano S, et al. ARA&A, 1987, 25, 23
- [16] Nakamura F & Li Z. ApJ, 2008, 687, 354
- [17] Torres R M, Loinard L, Mioduszewski A J, et al. ApJ, 2009, 698, 242
- [18] Hacar, A., Tafalla, M., Kauffmann, J, et al., A&A, 2013, 554 A55

- [19] Young et al, AJ, 2018, 805:185
 [20] Lilley A E, ApJ, 1955, 121, 559
 [21] Seo Y M, et al, ApJ, 2015, 805, 185
 [22] Palmeirim P, Andr e P, Kirk J, et al., A&A, 2013, 550 A38
 [23] Stutzki, J., & Winnewisser, G. 1985, A&A, 144, 13
 [24] Stutzki J., Jackson J. M., Olberg M, et al., 1984, A&A, 139, 258

NH₃(1, 1) hyperfine intensity anomalies in the Taurus molecular cloud

Abay · Jeans^{1,2}, Zhou Dongdong², Esimbek Jarken^{1,2}, Li Dalei²

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

Abstract: ~~The NH₃(1, 1) hyperfine intensity anomaly (HIA) is prevalent in star-forming regions, and it is essential to carry out HIA studies to understand the star-forming process, especially the early stages of evolution.~~ Using the NH₃ spectral line observation data from the Nanshan 26-meter radio telescope and the integrated HIA (hyperfine intensity anomaly) quantitative calculation method, we have conducted an HIA study of the Taurus molecular cloud and obtained the HIA mapping distribution. The results show that HIAs are prevalent in the Taurus molecular cloud. The mean values of HIAs for the inner and outer satellite lines of NH₃(1, 1) are 1.07 and 1.15, respectively, greater than 1. The percentages of HIAs located in the systematic contraction or expansion motion (CE) model and the hyperfine selective trapping (HST) model are 55.7% and 21.7%, respectively, indicating that the mechanism producing HIAs in this region aligns with the predictions of the CE model. Additionally, the quadrant distribution map suggests that there may be large-scale inward motion on the ridge of the B211/213 filamentary structure. The correlation analysis reveals that HIAs associated with the CE model are positively correlated with the velocity dispersion, while those associated with the HST model are negatively correlated with it.

Key words: molecular cloud; molecular spectrum line; star formation; hyperfine intensity anomaly