

猎户-波江超泡区域速度分辨的中性氢丝状结构与磁场取向关系*

聂宇辰^{1,2)}, 庆道冲^{1,3)}, 李 蒨^{1,3)†}, 陈训舟⁴⁾, Krčo Marko¹⁾, 李晨睿^{1,2)},
吕 鑫^{1,2)}, 杨媛媛¹⁾, 郑映慧^{1,2)}

(1)中国科学院国家天文台, 北京; 2)中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京;
3)清华大学天文系新基石科学实验室, 北京; 4)杭州电子科技大学, 浙江杭州)

摘要 磁场和恒星反馈共同塑造着弥散星际介质的结构演化, 而超泡环境中的气体动力学与磁场几何关系是其中的重要问题. 先前研究表明, 在通常为每秒几十到上百千米的较宽速度范围积分后, 中性氢(H I)丝状结构常与由尘埃偏振推断的天球面磁场取向保持一致. 本文利用 FAST 联测巡天 CRAFTS 的 H I 数据和 Planck 353 GHz 尘埃偏振数据, 对猎户-波江超泡区域不同速度成分的 H I 结构与磁场取向关系进行了分析. 研究中将 $v_{\text{LSR}} = -15 \sim 15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 H I 发射划分为 6 个连续速度切片, 并采用 rolling Hough transform(RHT)提取各速度切片中的丝状结构取向, 再与尘埃偏振所追踪的磁场取向进行比较. 结果表明: 随速度变化, H I 发射亮度和丝状结构形态均发生系统变化; 在超泡投影外侧区域, 负速度成分与磁场取向之间存在空间上连续的较大偏差, 而正速度成分则表现出更强的一致性; 相比之下, 超泡投影内侧区域随速度变化的差异较小. 该结果说明, 在猎户-波江超泡邻近环境中, 不同速度成分并不遵循一致的 H I-磁场取向关系, 宽速度积分下常见的整体一致性并不能代表同一视线中所有的运动学成分. 其中, 超泡投影外侧负速度范围内空间连续的大角度差结构, 提示该区域存在一类与周边主导成分几何关系不同的特殊原子气成分, 为理解复杂反馈环境中不同原子气成分的形成与演化提供了新的观测线索.

关键词 星际介质; 磁场; 中性氢; 尘埃偏振; 猎户-波江超泡

中图分类号 P155.2

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2026070

0 引言

磁场是星际介质的重要组成部分, 在气体输运、分子云形成和恒星形成等过程中都发挥着重要作用. 与此同时, 大质量恒星通过辐射、恒星风和超新星爆发等反馈过程持续向周围介质注入能量, 进而改变局部乃至大尺度星际环境的结构. 由这些反馈过程形成的超泡, 能够扫积周围原子气体, 并可能改变磁场在天球面上的投影几何, 因此是研究气体结构与磁场相互作用的重要对象^[1-2].

近年来, 多项工作表明, 弥散原子气体中的中性氢(H I)丝状结构往往与由尘埃偏振推断的天球面磁场取向一致^[3-6]. 这一现象说明, H I 形态不仅反映气体分布本身, 也包含与磁场几何有关的信息. 此前相关研究多基于通常为每秒几十到上百千米的较宽速度范围积分结果, 由于视线方向上不同运动学成分会叠加在一起, 速度积分后的结构取向往往只能给出

平均意义上的趋势. 对于受恒星反馈显著影响的区域而言, 不同速度成分可能对应不同的动力学状态, 因此有必要在保留速度分辨率的条件下重新检验 H I 与磁场之间的取向关系.

猎户-波江超泡是离太阳系较近、天空投影范围较大的超泡之一, 具有明显的壳层结构和复杂的多相介质环境^[7-8]. 已有偏振研究表明, 该区域天球面磁场沿着投影超泡边缘呈现出较为有序的分布, 这提示超泡膨胀可能已经在大尺度上重塑了磁场几何^[9]. 本文利用 CRAFTS H I 数据与 Planck 353 GHz 偏振数据, 在先前“宽速度积分 H I 结构与尘埃磁场取向一致”这一观测事实的基础上, 进一步将 H I 发射细分为多个窄速度切片, 考察其结构随速度的变化, 以及不同速度成分中 H I 丝状结构与磁场取向之间的关系.

1 数据与方法

本文使用 FAST 联测巡天 CRAFTS 的 H I 窄带

* 国家自然科学基金资助项目(12588202, 12203069)

† 通信作者: 李蒨, 研究员. 主要研究方向: 恒星形成、星际介质、脉冲星和快速射电暴等. E-mail: dili@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2026-04-09

公开数据^[10-12]. CRAFTS 数据具有较高灵敏度, 适合追踪猎户-波江区域中较弱而连续的原子气体丝状结构. 本文选取覆盖赤经 $80^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 、赤纬 -13° 至接近赤道附近的天空区域, 并从完整数据立方中截取与猎户-波江超泡相关的主要速度范围, 即 $v_{\text{LSR}} = -15\sim 15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 各数据立方经拼接并裁去空白边界后, 得到覆盖超泡及其周边区域的 H I 图像.

磁场信息来自 Planck 353 GHz 尘埃偏振观测^[14]. 该频段的尘埃偏振可用来推断天球面磁场取向, 是本文表征磁场几何的基础. CRAFTS H I 数据与 Planck 偏振数据分别追踪的是原子气体形态和尘埃偏振所推断的磁场取向, 二者并不是同一种物理量. 本文同时使用这 2 类数据, 是因为先前研究已经发现, 在较宽速度范围积分后的 H I 丝状结构与尘埃偏振所追踪的磁场取向通常保持一致^[4-5]. 本文所关心的是: 这一关系在不同速度切片中是否仍然成立, 以及 H I 结构本身在不同速度上呈现何种变化.

在具体处理上, 本文将 $v_{\text{LSR}} = -15\sim 15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 划分为 6 个连续的 $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度切片, 分别对应中心速度约为 -12.5 、 -7.5 、 -2.5 、 2.5 、 7.5 和 $12.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 H I 分布. 为便于讨论, 本文将 $-15 \leq v_{\text{LSR}} < 0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 称为负速度成分, 将 $0 \leq v_{\text{LSR}} \leq 15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 称为正速度成分. 这些称谓仅是对该区域观测速度区间的运动学描述, 并不直接对应唯一的三维空间位置.

对每个速度切片, 先构建相应的 H I 积分强度图, 再采用 rolling Hough transform (RHT) 提取丝状结构的主要取向^[13]. RHT 是一种识别图像中细长线状结构的分析方法, 在星际介质研究中常用于描述 H I 丝状结构的方向分布. 对于本文所使用的 H I 图像, RHT 在每个像素位置给出的是经过该像素的各角度取向的线性延展结构的强度分布, 并进一步由这一分布按强度加权计算每一像素点位置的平均取向. 随后, 本文将由 RHT 得到的 H I 结构取向与由 Planck 偏振推断的磁场取向进行比较, 并计算二者之间的相对角度差 $|\Delta\theta|$. 由于这里讨论的是取向而非有正反之分方向, 因此将相差 180° 的 2 种情形视为等价, 并取二者之间的最小夹角; 平行时角度差接近 0° , 偏离增大时角度差也随之增大, 而 90° 对应最大偏离.

为保证比较的可信度, RHT 处理后的 H I 与尘埃数据在共同分辨率的网格坐标上进行比较. 本文采用的共同分辨率为 $15''$ ^[4], 并剔除 Planck 偏振角不确定度过大的位置. 此外, CRAFTS H I 图像中存在较宽尺度、近似水平方向的微弱条纹结构. 由于 RHT 对线状特征较为敏感, 这类条纹可能进入取向统计, 因此在进行 RHT 分析之前先对这类大尺度条纹进行

抑制处理. 为考察环境差异, 本文还依据超泡在天球上的投影轮廓, 将区域划分为超泡投影内侧和外侧 2 部分, 分别讨论其取向关系随速度的变化.

2 结果与分析

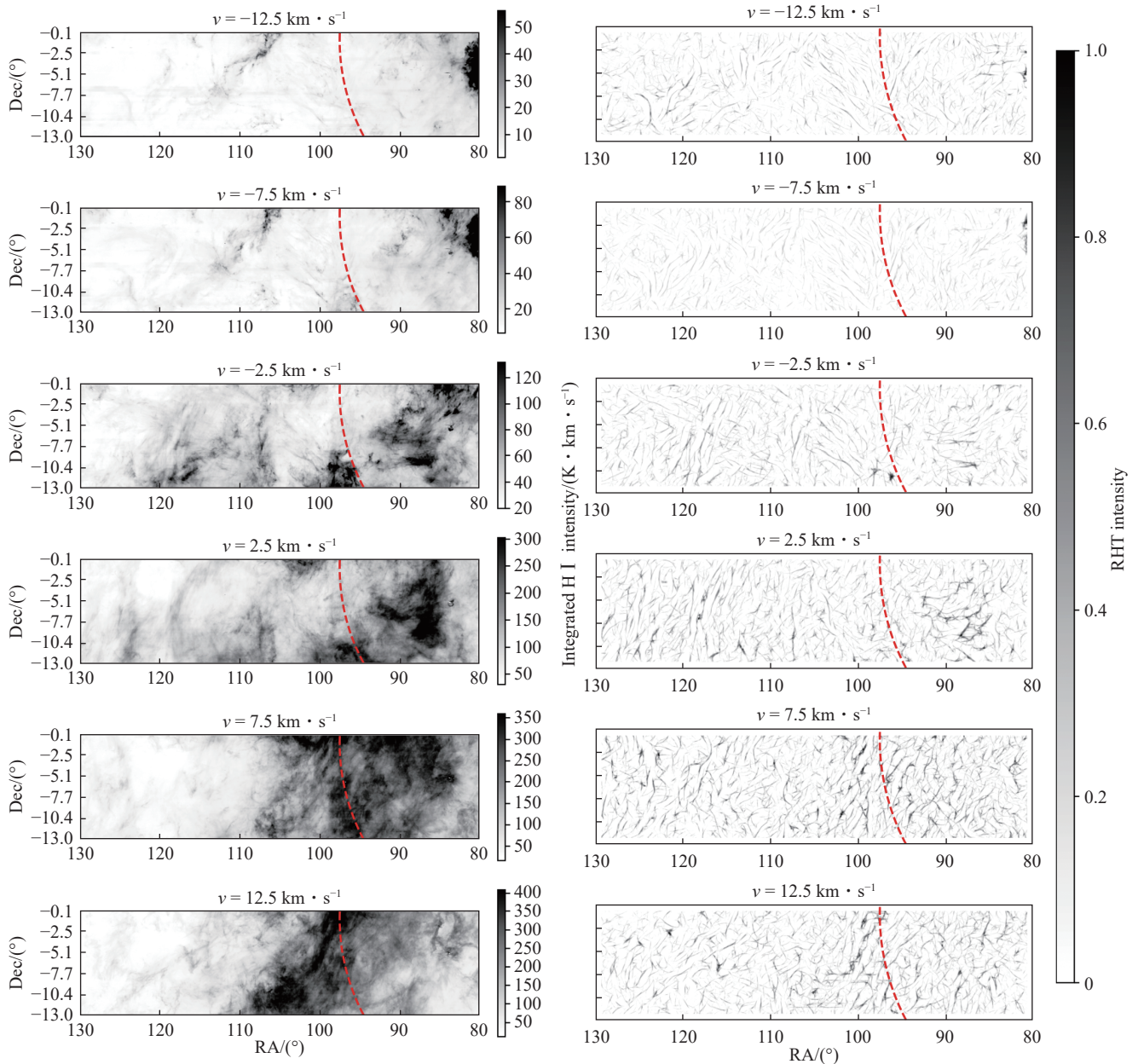
不同速度切片下的 H I 分布表现出明显的形态变化. 随着速度由负向正变化, H I 辐射整体上逐渐变亮, 主要结构的位置和延展方向也发生系统性改变. 从积分强度图可以看到: 负速度区间中的 H I 结构整体较弱, 在超泡投影外侧存在大尺度、倾斜延展的结构; 而在正速度区间, H I 辐射显著增强, 结构在天空中的位置整体向更大的赤经方向移动, 同时出现另一组与负速度时不同的细长结构.

RHT 图像更清楚地显示了这种差异. 在负速度切片中, 超泡外侧存在一片较为连续的丝状结构区, 其整体取向呈明显的对角延展; 在正速度切片中, 这类在负速度下较为显著的结构逐渐减弱, 而另一组取向相反、更加突出的细长结构变得显著. 也就是说, 不同速度切片中由 RHT 提取出的主要结构并不相同, 其几何形态也随速度发生变化. 这说明, 经速度分解后的 H I 图像并不是同一组结构在不同速度下的简单明暗变化, 而更像是不同运动学成分在天空投影中的相对贡献变化.

不同速度切片的积分强度图及对应的 RHT 结果见图 1. 从图 1 可以更直观地看到, 负速度与正速度成分在亮度分布、主导结构位置以及细长结构取向上均存在差异.

进一步比较 H I 结构取向与磁场取向之间的相对角度可见, 超泡投影内外区域表现出明显不同的速度依赖特征. 在超泡投影外侧, 负速度成分与磁场取向之间的偏差较大, 而且这种偏差不是零散分布的, 而是沿着超泡投影边缘附近形成一片空间上连续的大 $|\Delta\theta|$ 结构. 随着速度升高并进入正速度范围, 这一大角度差结构明显减弱, 外侧 H I 丝状结构与磁场取向趋于一致. 统计结果显示, 外侧区域负速度成分的中位角度差约为 45° , 而正速度成分约为 28° , 二者存在明显差异.

值得注意的是, 负速度外侧区域的 $|\Delta\theta|$ 分布虽然整体偏向较大值, 但并未在 90° 附近形成窄峰. 这表明该区域并不存在单一集中的近垂直取向成分, 而是整体上表现为较大的取向偏差. 相反, 在正速度区间, 外侧分布整体向较小角度差移动, 表明整体上 H I 丝状结构与磁场的取向趋于接近. 折线统计也反映了同样趋势: 外侧区域的 $|\Delta\theta|$ 中位值随速度升高系统下降, 而投影内侧区域则基本保持稳定.



注: 左列为6个 $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度切片的 H I 积分强度图, 右列为对应的 RHT 强度图, 虚线表示超泡投影边界。

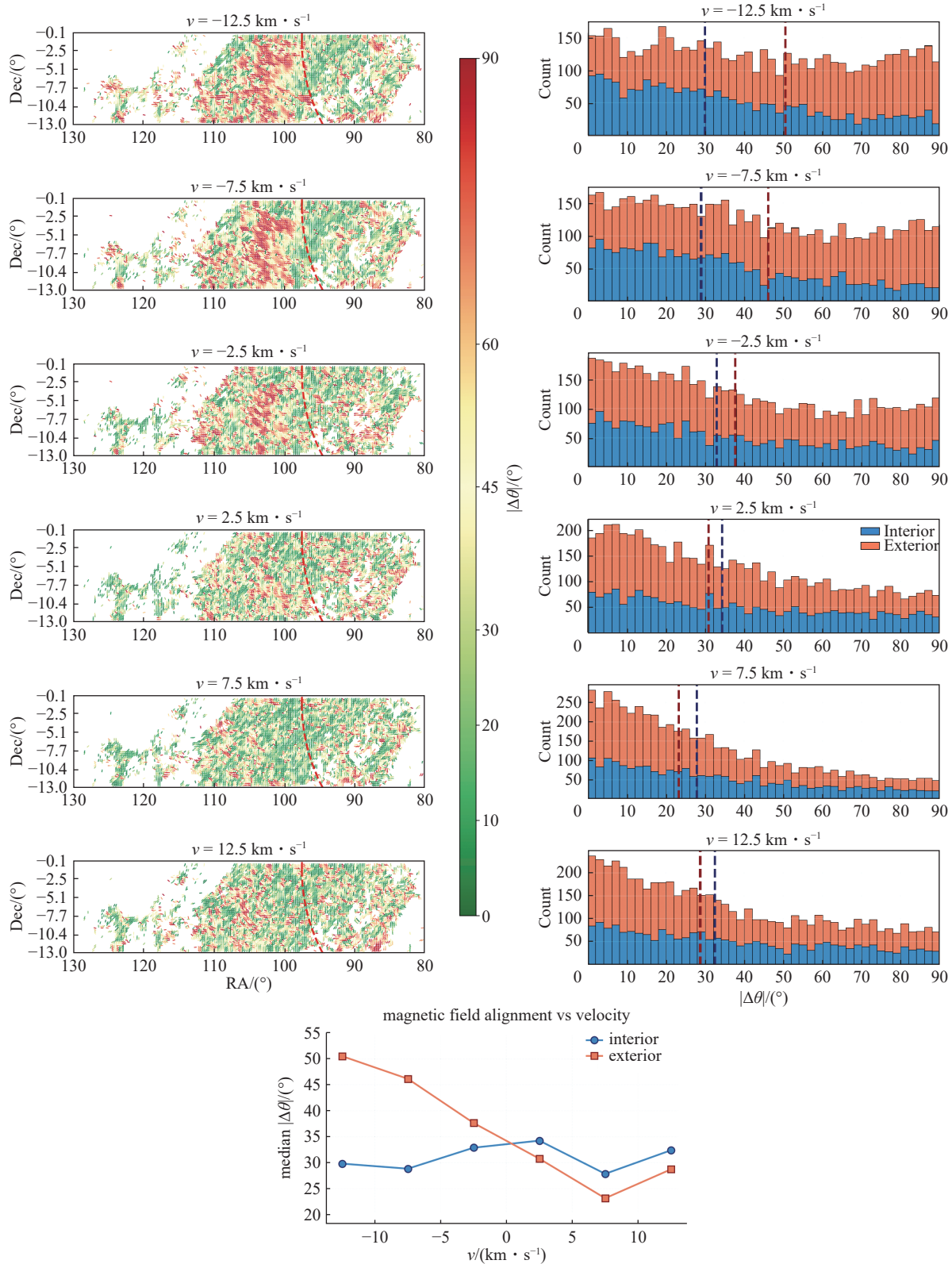
图1 不同速度切片的 CRAFTS H I 图像与 RHT 结果

与外侧区域相比, 超泡投影内侧区域在不同速度区间中的取向关系变化较小。无论在负速度还是正速度范围内, 内侧区域的 H I 丝状结构总体上都与磁场取向保持较为接近的关系, 没有表现出像外侧区域那样显著的速度分化。这说明, 本文所见最明显的速度依赖特征并不是普遍存在于整个研究区域, 而是集中体现在超泡投影外侧的特定成分之中。

相对角度差的空间分布、直方图以及中位值随速度的变化见图2。这些结果将空间形态与统计趋势放在一起, 显示外侧区域的取向差异主要集中在负速度成分中。

除角度差本身外, 局域取向一致性也提供了理解不同速度成分的重要线索。正速度切片中, 局域取向

一致性较高的 H I 丝状结构更倾向于对应较小的 $|\Delta\theta|$, 表明这部分中性氢丝状结构与尘埃偏振所反映的磁场方向之间存在较明确的关联^[4-5]。相比之下, 在负速度切片中, 不同角度弥散范围内的样本都可同时对应较大和较小 $|\Delta\theta|$, 并未呈现出“局域取向一致性越高、角度差越小”的明显趋势。这说明负速度成分中的 H I 丝状结构与尘埃所反映的主导磁场几何之间关联较弱。代表性 H I 光谱进一步显示, 在所考察的速度范围内, 内侧与外侧区域的气体亮度整体上并无显著差别, 而二者与磁场的相对取向关系仅在负速度范围内明显不同, 因此仅亮度强弱变化并不能解释外侧负速度成分所表现出的偏离。结合其在空间上的连续分布以及在速度上的集中出现, 这一现象更适合被



注：上部左侧给出各速度切片中 $|\Delta\theta|$ 的空间分布，上部右侧给出对应内、外区域样本的 $|\Delta\theta|$ 直方图，即 H I 丝状结构与磁场相对角度差的分布；下部给出内、外区域 $|\Delta\theta|$ 中位值随速度的变化。

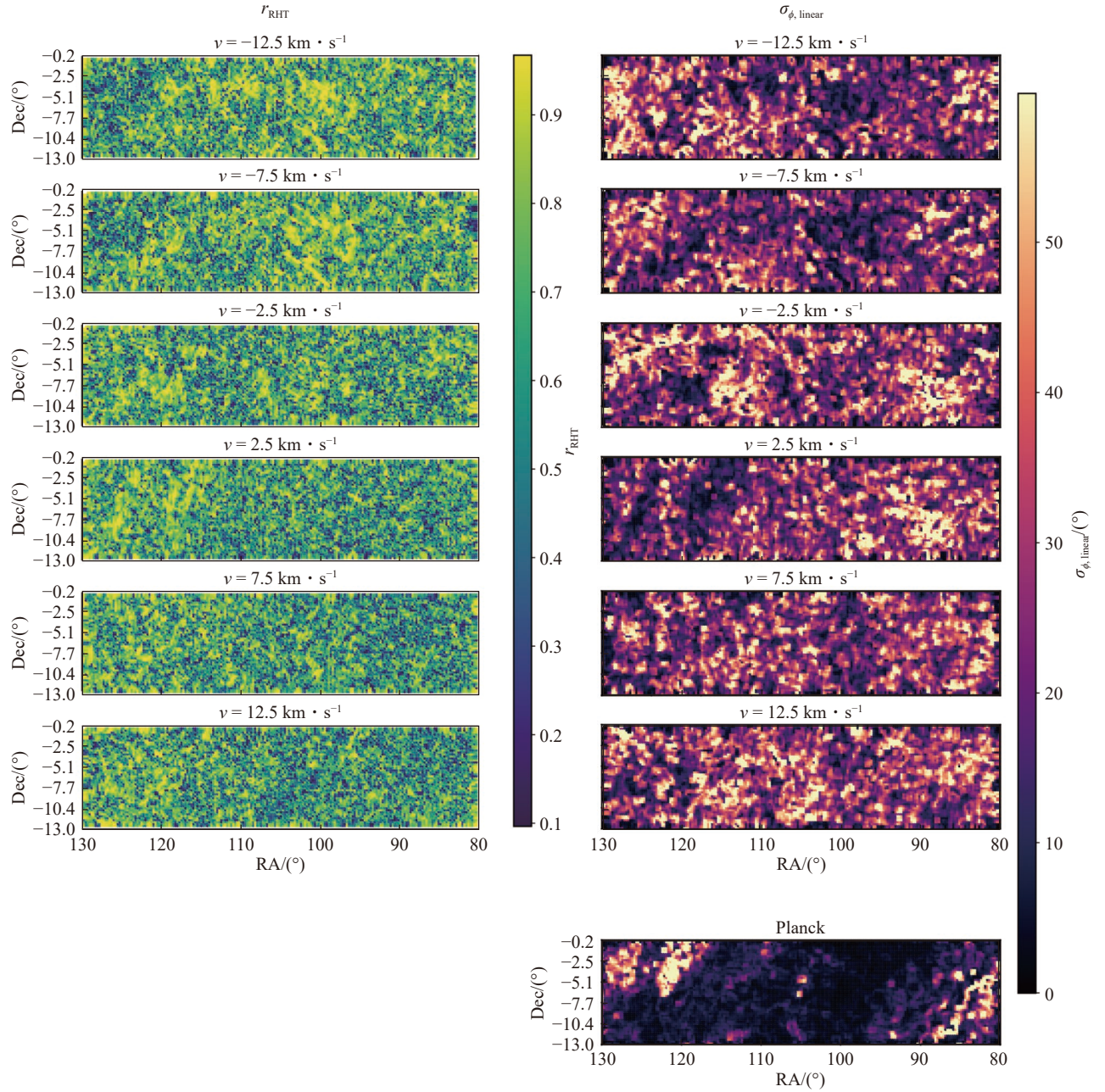
图 2 H I 结构与磁场取向的速度依赖

理解为一种具有结构性的特殊偏离成分，而不是由弱信号随机散布形成的零散假象。

局域取向一致性的 2 种度量见图 3；代表性的内、外

侧光谱以及角度差与一致性之间的关系分别见图 4、5。

需要指出的是，已有研究表明，在较宽速度范围积分后的弥散星际介质中，H I 丝状结构常与尘埃偏

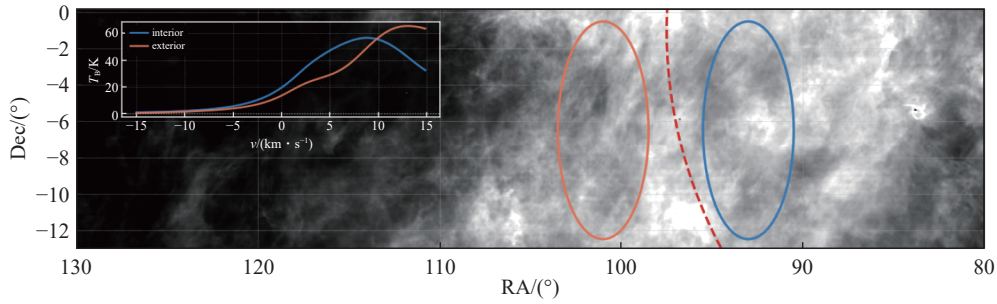


注: 左列为圆统计定义下的局域一致性量, 即合向量长度 r_{RHT} ; 右列为线性定义下的角度弥散 $\sigma_{\phi, \text{linear}}$; 右下图给出 Planck 磁场取向对应的 $\sigma_{\phi, \text{linear}}$, 用于与 H I 结果比较。

图3 不同速度切片中的局域取向一致性

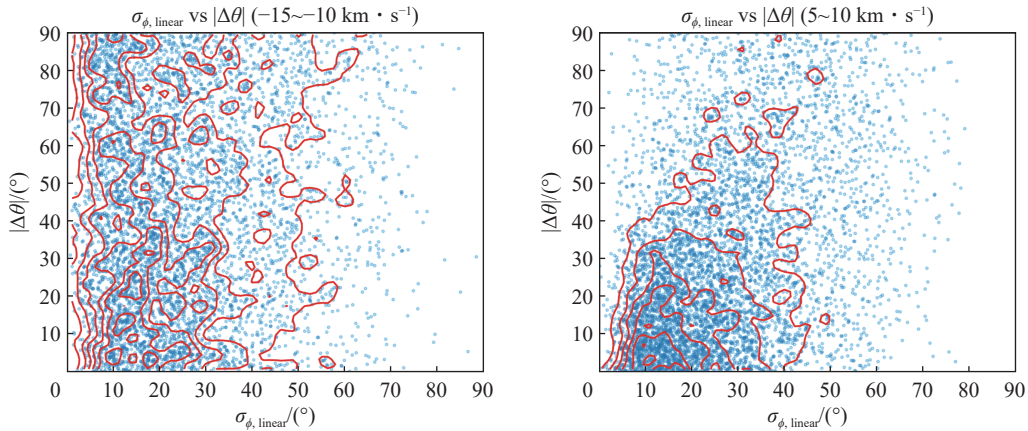
振所推断的磁场方向保持一致。然而, 这一结果并不能直接推出在速度分层之后, 每一个窄速度成分都同样遵循这一关系。本文所揭示的一个重要现象是: 在猎户-波江超泡投影内侧, 速度分层后的多个 H I 成分整体上仍与磁场保持较好一致, 而外侧负速度范围内则出现了空间上连续的大角度差结构。也就是说, 本文结果不仅涉及宽速度积分下主导关系的再现, 更显示出这种关系在速度分辨条件下于不同投影环境中的表现并不相同。尤其是内侧区域在不同窄速度切片中都保持较好一致, 这一点本身并不能由宽速度积分结果自动推出。

综合形态、取向及其一致性结果可以看出, 负速度与正速度成分之间存在稳定而系统的几何差异。尤其是超泡投影外侧负速度范围内那片空间连续的大角度差结构, 并不是整个研究区域普遍存在的现象, 也不是所有弱 H I 成分的共同特征, 因为在其邻近区域, 同样较弱的丝状结构仍可与磁场保持较好一致。因此, 该偏离结构应当包含值得进一步解释的物理信息, 并提示该气体成分可能具有不同于周边主导成分的形成或演化过程。现有结果尚不能完全消除投影效应和视线深度上的不确定性, 因此负速度外侧成分未必唯一对应某一确定的三维壳层位置; 同时, 其是



注: 灰度背景为 $v_{\text{LSR}} \in [-15, 15] \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的 H I 积分强度图, 蓝色和橙色椭圆标出代表性的内侧和外侧位置, 插图给出对应的 H I 亮温谱。

图 4 内外侧区域的 H I 光谱示例



注: 左右图分别对应 $-15 \sim -10$ 和 $5 \sim 10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 2 个速度切片中, 线性角度弥散 $\sigma_{\phi, \text{linear}}$ 与相对角度差 $|\Delta\theta|$ 的散点关系。

图 5 角度差与局域取向一致性的关系

否体现了超泡环境的特殊性, 也仍需通过非超泡对照天区以及更直接的动力学诊断进一步检验。不过, 其在速度上的集中出现、空间上的连续形态以及与其正速度成分不同的取向关系, 共同说明它是理解猎户-波江超泡邻近环境中原子气体动力学分层的重要线索。

3 结论

本文利用 FAST/CRAFTSH I 数据和 Planck 353 GHz 尘埃偏振数据, 对猎户-波江超泡区域速度分辨的 H I 丝状结构与磁场取向关系进行了研究。结果表明: 不同速度切片中的 H I 形态在亮度、结构位置和丝状结构取向上均存在系统变化。其中, 超泡投影外侧区域在负速度下表现出空间上连续的大角度差结构, 而在正速度下则与磁场取向更趋一致; 相比之下, 超泡投影内侧区域随速度变化的差异较弱, 并在不同窄速度切片中都保持了较好的取向一致性。

这些结果说明, 在猎户-波江超泡邻近环境中, 不同速度成分并不遵循完全相同的 H I-磁场取向关系。特别是外侧负速度范围内那片空间连续的大角度差结构, 表明宽速度积分下常见的整体一致性并不能代表所有运动学成分都具有相同的几何关系; 而内侧区域在速度分层后多个切片中仍与磁场保持较好

一致, 也说明这种一致性本身可能包含重要的环境信息。该负速度外侧结构显然不是普通的随机弱成分, 而应对应一类值得进一步解释的特殊气体成分。现有结果尚不能唯一确定超泡环境是否为造成该现象的主要影响因素, 但它为进一步理解复杂反馈环境中的原子气体分层及其动力学来源提供了新的观测线索。进一步工作可结合位置-速度图分析超泡相关结构, 并利用 ROHSA 等谱线分解方法^[15]以及非超泡环境对照天区, 检验该偏离结构是否对应独立的动力学成分, 以及超泡环境是否为其形成的关键影响因素。

4 参考文献

- [1] Ferriere K M, Mac Low M M, Zweibel E G. Expansion of a superbubble in a uniform magnetic field[J]. *The Astrophysical Journal*, 1991, 375: 239
- [2] Tomisaka K. Superbubbles in magnetized interstellar media: blowout or confinement?[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1998, 298(3): 797
- [3] Planck Collaboration. Planck intermediate results. XXXII. The relative orientation between the magnetic field and structures traced by interstellar dust[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 586: A135
- [4] Clark S E, Hill J C, Peek J E G, et al. Neutral hydrogen structures trace dust polarization angle: implications for

- cosmic microwave background foregrounds[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(24): 241302
- [5] Clark S E, Hensley B S. Mapping the magnetic interstellar medium in three dimensions over the full sky with neutral hydrogen[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 887(2): 136
- [6] Kalberla P M W, Kerp J, Haud U, et al. Cold Milky Way H I gas in filaments[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 821(2): 117
- [7] Ochsendorf B B, Brown A G A, Bally J, et al. Nested shells reveal the rejuvenation of the Orion-Eridanus superbubble[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 808(2): 111
- [8] Joubaud T, Grenier I A, Ballet J, et al. Gas shells and magnetic fields in the Orion-Eridanus superbubble[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 631: A52
- [9] Soler J D, Bracco A, Pon A. The magnetic environment of the Orion-Eridanus superbubble as revealed by Planck[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 609: L3
- [10] Li D, Wang P, Qian L, et al. FAST in space: considerations for a multibeam, multipurpose survey using China's 500-m aperture spherical radio telescope (FAST)[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2018, 19(3): 112
- [11] Nan R D, Li D, Jin C J, et al. The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (fast) project[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2011, 20(6): 989
- [12] Zhang K, Wu J W, Li D, et al. Status and perspectives of the CRAFTS extra-galactic H I survey[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(5): 959506
- [13] Clark S E, Peek J E G, Putman M E. Magnetically aligned H I fibers and the rolling Hough transform[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 789(1): 82
- [14] Planck Collaboration. Planck 2018 results. III. High frequency instrument data processing and frequency maps[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 641: A3
- [15] Marchal A, Miville-Deschênes M A, Orieux F, et al. ROHSA: Regularized Optimization for Hyper-Spectral Analysis: application to phase separation of 21 cm data[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 626: A101

Velocity-resolved relationship between filamentary H I structure and magnetic-field orientation in the Orion-Eridanus superbubble region

Nie Yuchen^{1, 2)}, Qing Daochong^{1, 3)}, Li Di^{1, 3)}, Chen Xunzhou⁴⁾, Krčo Marko¹⁾, Li Chenrui^{1, 2)}, Lü Xin^{1, 2)}, Yang Aiyuan¹⁾, Zheng Yinghui^{1, 2)}

(1)National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China; 2)School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China; 3)New Cornerstone Science Laboratory, Department of Astronomy, Tsinghua University, Beijing, China; 4)Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang, China)

Abstract Magnetic fields are a fundamental property of diffuse interstellar medium. Previous studies have shown that filamentary H I structure often follows the plane-of-sky magnetic field inferred from polarized dust emission. Leveraging high-sensitivity FAST/CRAFTS H I survey and Planck 353 GHz dust polarization, we target the Orion-Eridanus superbubble environment and map relative orientation between H I filaments and dust-inferred magnetic field across $v_{\text{LSR}} = -15$ to $15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. We find a clear environmental bifurcation: exterior to the projected shell, low-velocity gas ($-15 \leq v_{\text{LSR}} < 0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) shows large and spatially coherent misalignment, whereas higher-velocity exterior gas aligns significantly better. The interior remains comparably well-aligned across all velocities, with little velocity dependence. Therefore broad H I-dust alignment commonly seen in velocity-integrated studies does not apply uniformly to all kinematic components in the Orion-Eridanus environment. The spatially coherent low-velocity exterior structure represents a distinct component with enhanced misalignment, providing a new observational clue to the origin of geometrically differentiated atomic gas in a feedback-shaped environment.

Keywords interstellar medium; magnetic fields; neutral hydrogen; dust polarization; Orion-Eridanus superbubble

【责任编辑: 范 林】