十年描银河: 中德6 cm银道面偏振巡天的发现

高旭阳^{1,2,3*}, 孙晓辉^{1,4*}, 韩金林^{1,2,3*}, 肖莉^{1,2,3}, 石维彬^{1,5}, 石惠^{1,2,3}, 王陈^{1,2,3}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;

3. 中国科学院FAST重点实验室, 北京 100101;

4. 云南大学物理与天文学院, 昆明 650500;

5. 山东大学空间科学与物理学院, 威海 264209

* 联系人, E-mail: xygao@nao.cas.cn; xhsun@ynu.edu.cn; hjl@nao.cas.cn

2021-01-09 收稿, 2021-03-05 修回, 2021-03-05 接受, 2021-03-08 网络版发表

国家自然科学基金(U1831103, 11763008, U1631105, 11303035, 10833003, 10821061, 10773016, 10521001, 10473015)资助

摘要 射电连续谱偏振观测是探测银河系星际介质性质的有力工具. 中德6 cm银道面偏振巡天使用新疆天文台南山站25 m射电望远镜对银道面银经 $10^\circ\sim 230^\circ$ 、银纬 $\pm 5^\circ$ 之间的区域进行了总强度和线偏振的巡测. 历时10年, 完成了世界上地基射电望远镜观测频率最高的银道面射电连续谱偏振巡天, 揭示了银道面在6 cm波段的辐射分布和横向磁场取向. 该巡天是国产数据描绘的银河系画卷, 其较高的观测频率使得消偏振效应小, 能够探测来自银河系更远处的偏振辐射. 利用这些数据, 巡天团队对银河系超新星遗迹、电离氢区、法拉第屏等多种射电目标的研究取得了系列性结果: 先后发现了4颗新的银河系超新星遗迹, 其中在2011年发布的两个新超新星遗迹G178.2-4.2和G25.1-2.3是国内学者首次使用国内射电望远镜完成的发现工作; 对70多个已知超新星遗迹进行了流量密度、偏振和谱的测量, 首次探测到超新星遗迹G16.2-2.7、G69.7+1.0、G84.2-0.8、G85.9-0.6、G205.5+0.5和G206.9+2.3的偏振辐射, 新的6 cm波段总强度测量还为确定20个超新星遗迹的谱指数提供了关键数据; 完成了对巡天范围内可以准确估计6 cm波段流量密度的401个HII区的统计和测量, 补充了国际HII区列表中对于延展HII区的数据缺失. 在弥漫辐射偏振探测方面, 发现了若干在低频射电偏振观测数据中无法显现的、在总强度辐射上没有对应体的高法拉第旋率结构. 巡天数据已经在国际学术界产生重要影响, 并一直被用于科学研究.

关键词 巡天, 偏振, 射电连续谱, 超新星遗迹, HII区, 磁场

20世纪30年代, Jansky无意中探测到来自银河系中心的射电辐射, 标志着射电天文的诞生. 1962年, Westervhout等人^[1]和Wielebinski等人^[2]分别独立探测到银河系射电辐射的偏振特征, 确认了同步辐射是银河系射电辐射的主要机制. 偏振观测能够揭示银河系磁场、相对论性电子和热电子的性质, 是研究银河系磁场和星际介质性质的有力工具.

从20世纪70年代开始, 一些利用地基望远镜开展

的大规模全天^[3~5]和银道面^[6~8]射电连续谱和偏振辐射的巡测陆续开展, 观测频率范围从~100 MHz到~5 GHz. 偏振的射电波在星际介质中传播时, 偏振面因为热电子和星际空间磁场产生的法拉第效应而发生旋转, 称为法拉第旋转. 这样, 来自视线上不同距离以及在一个望远镜波束里的偏振辐射因为法拉第旋转的角度不同, 叠加之后会导致偏振辐射部分或全部抵消, 在观测上称为消偏振. 法拉第旋转与波长的平方成正

引用格式: 高旭阳, 孙晓辉, 韩金林, 等. 十年描银河: 中德6 cm银道面偏振巡天的发现. 科学通报, 2021, 66: 1315–1326

Gao X Y, Sun X H, Han J L, et al. Scanning the Milky Way for 10 years: Discoveries from the Sino-German 6 cm polarization survey of the Galactic plane (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1315–1326, doi: 10.1360/TB-2021-0038

比($4\sim RM\lambda^2$, RM 为法拉第旋率, λ 为观测波长), 波长越长, 法拉第旋转越大, 消偏振往往越严重. 这意味着, 低频的观测只能探测到银河系内与太阳距离很近的弥漫偏振辐射. 为了探测到来自银河系更远距离的偏振辐射, 获得银河系偏振辐射的全貌, 需要在较高的频率上开展偏振巡天观测.

德国马普射电天文研究所(Max-Planck-Institute for Radio Astronomy)先后利用Stockert 25 m和Effelsberg 100 m射电望远镜在11和21 cm波段完成了银道面^[9-16]和中银纬巡天^[17-19], 开展了很多先驱性的工作. 国家天文台在银河系磁场研究方面也具有优势, 取得了一些国际上有影响的结果^[20-22]. 为了加强合作, 中国科学院和马普学会(Max Planck Society)于2001年成立了中德马普射电天文伙伴小组, 规划利用新疆天文台南山站25 m射电望远镜对银道面在射电高频段(频率 ~ 5 GHz)开展银道面连续谱辐射的偏振性质巡天测量工作. 此后的10多年, 中国和德国的科学工作者为此作出了巨大的贡献, 项目取得圆满成功. 中德6 cm银道面偏振巡天是少数几个基于我国望远镜完成的大规模巡天, 是世界上极少数利用中小型地基望远镜完成的射电连续谱偏振巡天, 为研究银河系磁场和星际介质打开了新的窗口. 巡天数据已于2011年全部释放, 对全世界公开(<http://zmtt.bao.ac.cn/6cm>). 该项目先后培养了5名博士, 发表科学论文23篇.

1 观测系统的研制和安装

巡天观测使用新疆天文台南山站25 m射电望远镜, 德国马普射电天文研究所和新疆天文台工程师一起完成了接收机的研制. 2001年中德马普射电天文伙伴小组成立后, 就着手筹划接收机研制, 申请接收机研制经费. 接收机本身的研制经费是2002年初马普射电天文研究所向马普学会申请并得到支持的. 新疆天文台的工程师在研制过程中积极参与, 积累了接收机研制经验, 为6 cm观测系统之后的长期稳定运行提供了重要保障. 国家天文台的项目成员则逐行阅读和修改望远镜控制程序, 负责完成6 cm观测和数据处理软件系统的移植. 设备研制过程远非一帆风顺, 中方后来争取了接收机配套制冷设备的经费, 也曾克服订货进口等多重困难. 2003年, 接收机研制已经基本完成, 但考虑到要进行甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)观测, 我们不得不出少量经费请德国添加了VLBI观测所必需的配套附件. 德国同事后来又协助配套了所需的

控制计算机和辅助软件. 接收机于2004年初运抵新疆南山. 在同年5月的安装过程中, 德国工程师发现了一系列问题, 需要返回德国做好配件. 2004年8月, 接收机终于安装完毕, 并进行了最初的6 cm系统调试. 通过8月18~19日对射电强源超新星遗迹Cas A的观测及21日对观测数据的完整处理, 6 cm观测系统完成了初光. 在接下来的试观测阶段, 团队先后发现了望远镜馈源舱上的蒙布抖动和印度同步卫星的干扰问题, 它们对观测影响非常大. 德国工程师再次返德做好相关配件. 2005年11月, 在升级了充气蒙布并添加了窄带观测模式后, 新疆25 m射电望远镜的6 cm偏振观测系统最终全部完成. 利用该系统进行了VLBI观测, 结果表明, 它是当时世界上性能最好的接收机, 甚至比用在Effelsberg 100 m望远镜上的同频段接收机还要好.

接收机具有非常高的灵敏度, 意味着观测很容易受到更多的外界干扰, 如蒙布抖动、乌云、雨雪和望远镜副镜支撑结构上不时出现的鸟群. 另外, 因为台站周边地理原因, 6 cm观测还受到了非常严重的地面辐射干扰. 这与来自南天印度同步卫星的干扰一起, 对观测质量产生了严重的影响. 国家天文台研究团队长期前往南山站昼夜监控观测, 在观测结果中看到了非常多的扫描效应. 扫描效应和各种原因带来的干扰在后续的数据处理过程中花费了大量人力一一克服. 鉴于巡天数据的质量直接关系到后续科学结果的准确性, 我们后来对观测质量较差的区域进行了补充观测. 在观测大部分天区时, 观测的中心频率设置为4800 MHz, 带宽600 MHz. 在观测南面天空时(方位角 $150^\circ\sim 240^\circ$, 俯仰角 $30^\circ\sim 50^\circ$), 为避免印度同步卫星的影响, 改用半频带观测模式, 中心频率变为4963 MHz, 带宽295 MHz. 观测系统噪声温度在望远镜俯仰大于 30° 时约为22 K, 随着俯仰角的进一步降低, 因为地面辐射进入旁瓣, 系统温度会迅速升高^[23]. 在6 cm巡天观测过程中, 除部分无法升至高俯仰角的天区, 大部分天区的观测都是在俯仰角 $30^\circ\sim 80^\circ$ 完成. 所有观测过程都有详细的指南引导和过程记录, 为在后续数据处理中解决干扰和校准等问题提供了直接的信息参考.

2 研究结果

2.1 天图总览

经过近5年(2004年9月~2009年5月)的不懈观测和后续细致的数据处理, 中德合作组最终完成了6 cm银

道面偏振巡天的观测任务^[24-27]。巡天覆盖了银道面银经 $10^{\circ}\sim 230^{\circ}$ ，银纬 $\pm 5^{\circ}$ 之间 ~ 2200 平方度的天区范围。经过后续仔细的数据处理，得到了6 cm波段的总强度 I ，以及斯托克斯参量 U 和 Q 。6 cm巡天的灵敏度很高，约为1.0 mK T_B (T_B 表示亮温度)。角分辨率为9.5角分，与利用德国Effelsberg 100 m射电望远镜开展的11和21 cm波段银道面巡天在范围和分辨率上相仿。这些数据联合起来，可以开展对超新星遗迹、HII区、法拉第屏等多种射电目标的研究。图1展示了巡天直接观测得到的银道面在6 cm波段的总强度辐射 I 、线偏振辐射参量 U 和 Q ，以及利用经过大尺度结构补偿之后的 U 、 Q 重新计算得到的偏振辐射强度 P 。显而易见，总强度辐射结构和偏振辐射结构在内银河区域(银经 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$)十分丰富，在9.5角分的分辨率下很难将单个独立的射电源和很强的、弥漫的背景分开。在经过银经 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 这一银河系著名恒星形成区Cygnus X区域之后，随着银经的增加，射电结构逐渐减少且变得清晰可辨。需要格外注意的是，偏振辐射结构不总是与总强度辐射结构一一对应，而是呈现出不同的表征。如在银经 $130^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 区间，在总强度辐射图中可以辨认出诸如W3、W4、W5这些著名的银河系HII区，而在偏振辐射强度图中，除了观测到这些HII区内部和边缘的消偏振结构外，整个区域的偏振辐射强度在整体上都要高于周边的区域，这在总强度辐射图上是没有任何体现的。这种差异主要源于银河系的磁场作用，彰显了巡天观测中偏振测量的价值和重要性。

基于中德6 cm银道面巡天获得的高灵敏度总强度图像，我们精确地测量了延展目标如超新星遗迹和HII区的流量密度，确定了它们的频谱并证认了新的超新星遗迹和HII区；对银河系弥漫辐射进行了热和非热成分分离，获得了它们的图像。基于偏振数据，我们研究了超新星遗迹的磁场结构，并估计了HII区以及法拉第屏的磁场。下面分别展示超新星遗迹、HII区、偏振结构和法拉第屏以及热和非热成分分离的结果，这些结果大大加深了我们对银河系星际介质的理解。

2.2 关于超新星遗迹的观测成果

超新星爆发产生的高速激波与周围星际介质作用，产生超新星遗迹。超新星遗迹是银河系宇宙线加速、星际介质加工、金属元素增丰的场所，对超新星遗迹的研究不但可以研究超新星遗迹本身及前身星的物理性质，还可以研究周围星际介质的物理性质及湍动。

图1 中德6 cm银道面偏振巡天全景图。从左到右分别为总强度 I 、Stokes参量 U 、Stokes参量 Q 和偏振强度 P

Figure 1 The panoramic image obtained by the Sino-German 6 cm polarization survey of the Galactic plane. From left to right: Total intensity I , Stokes U , Q and the polarization intensity P

中德6 cm银道面偏振巡天项目成果的一大亮点就是对大超新星遗迹的观测研究. 一些超新星遗迹十分延展(角直径为几度), 用波束很小的大型望远镜进行扫描成图观测非常耗时, 因而很难得到完整图像; 用综合孔径望远镜如VLA往往又会丢失大尺度结构信息. 中德6 cm巡天系统中, 波束大小正好合适, 又因为灵敏度很高, 可以很快获得几度大小天体的高质量图像.

我们先后对22个角直径大于 1° 和51个角直径小于 1° 的超新星遗迹^[28]进行了射电性质的观测研究, 对其中的6个超新星遗迹G16.2-2.7、G69.7+1.0、G84.2-0.8、G85.9-0.6、G205.5+0.5和G206.9+2.3实现了首次偏振测量. 对大超新星遗迹Cygnus Loop^[29]、G156.2+5.7^[30]、S147^[31]、HB3^[32]、G65.2+5.7^[33]和CTA 1^[34]进行了详细研究. 超新星遗迹G65.2+5.7的研究工作^[33]还被*Astronomy & Astrophysics*作为亮点文章进行发表.

对37个超新星遗迹, 6 cm巡天数据提供了最高频率的射电连续谱观测, 新的测量结果还对准确确定20个超新星遗迹的射电流量密度和射电辐射谱起到了关键作用. 如图2所示, 6 cm巡天的测量数据^[29]否定了超新星遗迹Cygnus Loop在5 GHz频率存在谱偏折的论断^[35](图2(c)); 证实了超新星遗迹S147的谱偏折确实存在^[31](图2(b), (d)). 此外, 利用6 cm测量新结果作为最直接的判据^[32], 明确否定了超新星遗迹HB3在高频段辐射谱变平的结论^[36].

到目前为止, 银河系内被认知的超新星遗迹仅约300颗. 甚为欣喜的是, 基于6 cm巡天数据并结合多波段观测数据, 我们团队先后发现了4颗新的银河系超新星遗迹: G178.2-4.2和G25.1-2.3^[37]、G150.3+4.5^[38]和2020年新发现的G21.8-3.0^[39](图3). 其中, 于2011年发布的G178.2-4.2和G25.1-2.3是国内学者首次利用我国

图2 超新星遗迹Cygnus Loop^[29](a)和S147^[31](b)的6 cm偏振强度观测图像(等高线表示总强度, 短线表示磁场矢量强度和取向), 以及超新星遗迹Cygnus Loop(c)和S147(d)的射电流量密度谱

Figure 2 6 cm polarization intensities of the SNRs Cygnus Loop^[29] (a) and S147^[31] (b) overlaid with the contours of total intensity emission, and the radio continuum spectra of the Cygnus Loop (c) and S147 (d). In (a) and (b), the bars indicate the B -fields and their orientations

图3 利用6 cm巡天数据新发现的超新星遗迹. (a) G21.8-3.0^[39]; (b) G150.3+4.5^[38]; (c) G178.4-4.2^[37]; (d) G25.1-2.3^[37]
Figure 3 Four new SNRs discovered in the 6 cm survey. (a) G21.8-3.0^[39]; (b) G150.3+4.5^[38]; (c) G178.4-4.2^[37]; (d) G25.1-2.3^[37]

自己的射电望远镜和第一手观测资料发现的超新星遗迹. 此外, 我们还依靠6 cm观测数据否定了前人关于OA184^[40]、G192.8-1.1^[41]、G16.8-1.1^[26]、G11.1-1.0、G16.4-0.5和G20.4+0.1^[42]是超新星遗迹的论断, 其中OA184、G192.8-1.1、G16.8-1.1和G20.4+0.1已在Green超新星遗迹表^[43]中被去除. 另外, 6 cm巡天数据还在国际同行发现的5个新超新星遗迹G152.4-2.1、G190.9-2.2、G128.5+2.6、G150.8+3.8、G160.1-1.1^[44,45]的工作中起到了至关重要的作用. 因为cm巡天对超新星遗迹研究领域作出了显著贡献, 韩金林研究员被邀请在IAU Symp 296做特邀报告^[46].

2.3 关于HII区的成果

HII区是大质量恒星发出的UV光子电离周围氢原

子形成的气体云. 相比受尘埃消光影响的光学波段, HII区在射电高频波段的辐射具有光薄特性, 更利于开展观测. 准确地测量HII区的射电连续谱流量密度对计算HII区的辐射性质具有重要作用. HII区具有视线方向磁场和大量热电子, 会影响脉冲星法拉第旋率的测量^[47]. 此外, 通过建立法拉第屏模型, 还可以帮助我们研究银河系内物质密度和磁场强度的关系.

目前, 世界上最为全面的银河系HII区列表是利用红外WISE数据建立的, 其中包含了8000多个银河系HII区及候选体^[48-51]. 常用的银河系射电HII区列表则为Paladini等人^[52]通过收集前人建立的24个源表综合而成, 包含了1442个目标源.

中德6 cm银道面偏振巡天覆盖了银道面~2200平方度的天区, 且在热韧致辐射更为主导的高频

(~ 5 GHz)进行观测, 为HII区的证认工作提供了良好的数据基础. 2008年, Shi等人^[53]从部分刚刚处理完成的6 cm巡天反银心方向的小块天区数据中证认出了3个延展的HII区: G148.8+2.3、G149.5+0.0(可能为SH 2-205的一部分)和G169.9+2.0(图4第一排), 说明6 cm巡

天数据具有高灵敏度, 能够探测暗弱的延展辐射. 在全部巡天数据处理完成后, Gao等人^[42]结合WISE和Paladini两大银河系HII区列表, 在整个6 cm巡天范围内共证认出401个能够准确测量6 cm波段流量密度的HII区, 其中9个为新HII区(图4第2~4排). 该研究结果补充了30

图4 6 cm巡天中发现的新HII区^[42,53]

Figure 4 HII regions newly discovered in the 6 cm survey^[42,53]

多个WISE红外HII区列表中缺失的延展HII区. 此外, 我们的结果更正了被广泛使用的射电HII区列表^[52]中存在的非常多的问题, 如整合前人不同源表时, 没有去除重复认证的有76处, 错误认证的有78个.

2.4 星际云团和偏振结构的研究成果

中德6 cm银道面偏振巡天得到的偏振图像呈现出非常复杂的结构, 与平滑的总强度图像形成了鲜明的对比, 意味着偏振图像蕴含着更多的星际介质信息. 6 cm偏振巡天由于波长短、法拉第旋转小, 因而探测到来自更远距离的辐射, 是理解银河系弥漫星际介质磁场的关键数据之一.

在对反银心区域的偏振图像进行分析时, Gao等人^[25]发现了G172.3-2.9的偏振辐射强度被异常增强, 它的成因至今未被揭开, 将被进一步探究. Xiao等人^[27]注意到, 在许多延展HII区的边缘, 存在着非常显著的消偏振现象, 如著名HII区W1、W3和W4. 在内银河 $10^\circ < l < 60^\circ$ 天区, 非常多的HII区和弥漫射电辐射交织在一起, 偏振数据显示出十分丰富的结构. Sun等人^[26]详细讨论了6 cm偏振数据中观测到的“补丁(patch)”、“空洞(void)”和“运河(canal)”结构(图5)并分析了成因, 该工作被*Astronomy & Astrophysics*主编作为亮点文章加以介绍, 认为该工作“对银河系同步辐射的巡天观测非常有意, 一方面帮理解银河系磁场结构, 另一方面帮助理解银河系对宇宙微波背景观测的污染. 中德6 cm银道面巡天在这方面作出了重要贡献.”

我们还发现, 在银河系广袤的星际空间有很多法

拉第屏. 它们在总强度图像上完全没有痕迹, 在其他波段如H α 也非常弱, 但是在偏振图像中却特别突出. 这些结构只能是由法拉第旋转效应产生, 因此被称为法拉第屏. 它使得背景的偏振辐射发生旋转, 与前景的偏振辐射叠加后, 表现为该区域的偏振强度相比于周围区域显著增强或减弱. 通过这个简单的原理模型, 尽管只有一个频率上的观测数据, 我们仍然可以获取法拉第屏的法拉第旋率信息. 经过数据分析, 发现6 cm巡天中观测到的这些法拉第屏的法拉第旋率都比较大, 考虑到电子密度很小, 推断这些云团的规则磁场非常强, 远远高于星际介质中的规则磁场强度. 如法拉第屏G146.4-3.0, 视直径超过 3° , 在总强度图中没有任何对应体, 根据模型估算的视线方向磁场强度超过 $10 \mu\text{G}$ ^[25].

在银盘边缘, 大质量恒星星风或超新星爆发会“吹出”巨大的泡状结构(superbubble), 泡状结构继续膨胀, 冲出银盘, 破裂后会进一步形成烟囱结构(chimney). 这类结构被认为是物质和能量从银盘输运到银晕的管道, 对研究银河系的演化具有重要的意义^[54-56]. 在众多的数值模拟中, 最难限定的就是此类结构的磁场信息. Gao等人^[57]利用中德巡天的偏振数据和法拉第屏模型, 首次对W4 superbubble结构的磁场进行了准确的估计.

2.5 银河系的热辐射和非热辐射的分离

银河系在分米、厘米波段的射电连续谱辐射主要由热致辐射和同步辐射主导, 表现这两种辐射机制的典型天体是HII区和超新星遗迹. 除了可识别的这些

图5 在6 cm巡天中发现的法拉第屏G40.9-4.2(a)和G55.3-1.5(b)^[26]. 彩色图表示偏振强度, 短线表示磁场矢量的取向
Figure 5 Polarization intensity images of Faraday screens G40.9-4.2 (a) and G55.3-1.5 (b) discovered in the 6 cm survey^[26]. The bars indicate the orientations of magnetic field

典型天体之外, 银河系在更大尺度上存在着弥漫的热气体和由相对论性电子在银河系磁场中运动而产生的大尺度的同步辐射. 这两种不同的辐射成分通常混杂在一起, 很难分离并进行定量分析, 需要建立一种有效的辐射成分分离方法, 这对于建立银河系同步辐射模

板, 进而研究宇宙微波背景辐射性质具有重要意义.

前人对辐射成分分离方法的探索工作有很多, 如 Broadbent等人^[58]利用红外天文卫星(Infrared Astronomical Satellite, IRAS)红外数据示踪热韧致辐射, Alves等人^[59]则利用射电复合线作为热韧致辐射的探

图6 Cygnus X区域热和非热辐射成分分离结果^[62]. (a) 分离前的总强度辐射; (b) 分离出的同步辐射成分; (c) 分离出的热韧致辐射成分; (d) 叠加了分离出的热成分等高线的红外IRIS 60 μm图像

Figure 6 The thermal and non-thermal emission components separated for the Cygnus X region^[62]. (a) The total intensity emission before separation. The separated non-thermal (b) and thermal (c) components, respectively. (d) The IRIS 60 μm image overlaid with the contours of the separated thermal emission component

针。此外,利用热致辐射和同步辐射都具有幂律谱的辐射形式,但谱指数具有较大差别的特点,Paladini等人^[60]和WMAP团队^[61]都做出了相应的成分分离工作。然而,结果的准确性受到同步辐射谱指数准确性的限制。WMAP数据则因为较低的分辨率限制了探究银河系内小尺度源辐射性质的可能性。

利用全新的中德6 cm银道面偏振巡天的总强度数据,结合德国Effelsberg 100 m射电望远镜完成的11和21 cm波段银道面巡天观测数据,Sun等人^[26]完成了对银道面银经 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、银纬 $\pm 4^{\circ}$ 之间区域的热和非热辐射成分分离。Xu等人^[62]在Sun等人^[26]工作的基础上对成分分离方法进行了改进:通过加入408 MHz^[3]、Stockert 1420 MHz^[63]和WMAP K-band数据^[64],详细求解不同区域同步辐射谱指数以代替固定的同步辐射谱指数。新方法被应用到Cygnus X区域这一银河系内著名的辐射混杂区,取得了良好的效果(图6)。

3 总结

中德6 cm银道面偏振巡天项目从2001年12月开始筹划,到2005年8月开始观测,再到2009年5月观测任务完成,最后到2011年巡天数据正式发表,花了10年时间揭示银河横向磁场的各种细节,后续又10年的数据分析不断产生新科学结果,并发现了一批新天体。它是国家天文台建台之后完成的第一个系统性的巡天工作,应该算得上国家天文台建台20周年的代表作。直到现在,6 cm银道面巡天数据仍然在为国内外科学家提供中国望远镜原创的系统性基础数据,开展科研工作。系列结果包括:(1)完成了对银道面 ~ 2200 平方度区域总强度和偏振辐射的巡测,描绘了银道面在6 cm波段的辐射分布,通过分析偏振图像,揭示了银河系局部磁场特性;(2)研究并发现了一批超新星遗迹,准确地测量了超新星遗迹的6 cm波段流量密度,确定了辐射谱并

揭示了它们的偏振特性;(3)在巡天范围内统计出400多个HII区,补充了WISE HII区列表对延展HII区的缺失,指出并改正了目前常用射电HII区列表中的错误;(4)发现了一批只有在高频偏振观测中才能揭示的高法拉第旋率源,准确估计了视线方向磁场强度;(5)完成并改进了热致辐射和同步辐射的分离方法,为研究银河系辐射特性提供了帮助。

该巡天项目能取得一定的成果是因为抓住了科学上需要研究和解决的问题,发挥了设备适合大天区巡测的优势。在如 ~ 5 GHz的高频段,对银河系进行偏振巡天观测是研究磁化星际介质所必需的,但过去一直缺数据。像德国Effelsberg 100 m这样的大望远镜,在这个波段由于波束太小,无法完成大天区范围的巡天观测。新疆天文台25 m望远镜在 ~ 5 GHz频率上的波束大小约为10角分,能较快地进行巡天观测,并且分辨率与Effelsberg 100 m望远镜在21 cm波段观测的分辨率差不多,所取得的数据可以对银河系大小尺度射电辐射源进行多波段分析,揭示星际介质很多原先未知的物理性质。

中德6 cm银道面偏振巡天项目除科学产出之外,更为重要的是培养了一批射电天文研究与技术方面的人才。新疆天文台的工程师通过该项目提升了接收机研制和维护的能力,后续研制了1.3 cm波段制冷接收机,开展了氨分子谱线巡天。该项目培养的射电天文研究的博士在科研院所和高校都已成为科研骨干,并且正在参与FAST以及平方公里阵列(Square Kilometre Array, SKA)先导设备的连续谱偏振观测。

该项目的圆满完成离不开中国科学院与国际合作局领导的支持,离不开天文财政专项的支持和国家自然科学基金两个面上项目的支持,离不开新疆天文台在仪器安装、调试和观测等所有过程中给予的极大支持和基地支持,最核心的是离不开德国同行的真诚合作。

参考文献

- 1 Westerhout G, Seeger C L, Brouw W N, et al. Polarization of the galactic 75-cm radiation. *Bull Astron Inst Netherlands*, 1962, 16: 187–212
- 2 Wielebinski R, Shakeshaft J R, Pauliny-Toth I I K. A search for a linearly polarized component of the galactic radio emission at 408 Mc/s. *Observatory*, 1962, 82: 158–164
- 3 Haslam C G T, Salter C J, Stoffel H, et al. A 408 MHz all-sky continuum survey. II. The atlas of contour maps. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1982, 47: 1–143
- 4 Brouw W N, Spoelstra T A T. Linear polarization of the galactic background at frequencies between 408 and 1411 MHz. *Reductions. Astron Astrophys Suppl Ser*, 1976, 26: 129–146

- 5 Wolleben M, Landecker T L, Reich W, et al. An absolutely calibrated survey of polarized emission from the northern sky at 1.4 GHz. Observations and data reduction. *Astron Astrophys*, 2006, 448: 411–424
- 6 Altenhoff W J, Downes D, Goad L, et al. Surveys of the galactic plane at 1.414, 2.695 and 5.000 GHz. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1970, 1: 319–355
- 7 Haverkorn M, Gaensler B M, McClure-Griffiths N M, et al. The southern galactic plane survey: Polarized radio continuum observations and analysis. *Astrophys J Suppl Ser*, 2006, 167: 230–238
- 8 Landecker T L, Reich W, Reid R I, et al. A survey of the polarized emission from the galactic plane at 1420 MHz with arcminute angular resolution. *Astron Astrophys*, 2010, 520: A80
- 9 Reif K, Steffen P, Reich W. The 11-cm survey of the galactic plane using the 25 M Stockert telescope. *Kleinheubacher Berichte*, 1984, 27: 295–303
- 10 Reich W, Fürst E, Haslam C G T, et al. A radio continuum survey of the galactic plane at 11 cm wavelength. I. The area $357.4^\circ \leq L \leq 76^\circ$, $-1.5^\circ \leq B \leq 1.5^\circ$. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1984, 58: 197–248
- 11 Reich W, Fürst E, Reich P, et al. A radio continuum survey of the galactic plane at 11 cm wavelength. II. The area $358^\circ \leq L \leq 76^\circ$, $-5^\circ \leq B \leq 5^\circ$. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1990, 85: 633–690
- 12 Fürst E, Reich W, Reich P, et al. A radio continuum survey of the galactic plane at 11 cm wavelength. III. The area $76^\circ \leq L \leq 240^\circ$, $-5^\circ \leq B \leq 5^\circ$. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1990, 85: 691–803
- 13 Junkes N, Fürst E, Reich W. A survey of linear polarization along the galactic plane. The area $4.9^\circ \leq l \leq 76^\circ$, $-1.5^\circ \leq b \leq 1.5^\circ$. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1987, 69: 451–464
- 14 Duncan A R, Reich P, Reich W, et al. Polarimetric structure in the first Galactic quadrant from the 2.695 GHz Effelsberg survey. *Astron Astrophys*, 1999, 350: 447–456
- 15 Reich W, Reich P, Fürst E. The Effelsberg 21 CM radio continuum survey of the galactic plane between $L=357^\circ$ and $L=95.5^\circ$. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1990, 83: 539–568
- 16 Reich P, Reich W, Fürst E. The Effelsberg 21 cm radio continuum survey of the Galactic plane between $L=95.5^\circ$ and $L=240^\circ$. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1997, 126: 413–435
- 17 Uyaniker B, Fürst E, Reich W, et al. A 1.4 GHz radio continuum and polarization survey at medium Galactic latitudes. I. Observation and reduction technique. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1998, 132: 401–411
- 18 Uyaniker B, Fürst E, Reich W, et al. A 1.4 GHz radio continuum and polarization survey at medium Galactic latitudes. II. First section. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1999, 138: 31–45
- 19 Reich W, Fürst E, Reich P, et al. The Effelsberg 1.4 GHz Medium Galactic Latitude Survey (EMLS). In: Uyaniker B, Reich W, Wielebinski R, eds. *The Magnetized Interstellar Medium*, 8–12 September 2003, Antalya, Turkey. 2004, 45–50
- 20 Han J L, Qiao G J. The magnetic field in the disk of our Galaxy. *Astron Astrophys*, 1994, 288: 759–772
- 21 Han J L, Manchester R N, Berkhuijsen E M, et al. Antisymmetric rotation measures in our Galaxy: Evidence for an A0 dynamo. *Astron Astrophys*, 1997, 322: 98–102
- 22 Han J L, Manchester R N, Qiao G J. Pulsar rotation measures and the magnetic structure of our Galaxy. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1999, 306: 371–380
- 23 Wang C, Han J L, Sun X H, et al. The total power response to the ground radiation at 6cm wavelength of the Urumqi 25m radio telescope at Nanshan station. *Astron Res Technol*, 2007, 4: 181–187
- 24 Sun X H, Han J L, Reich W, et al. A Sino-German $\lambda 6$ cm polarization survey of the Galactic plane. I. Survey strategy and results for the first survey region. *Astron Astrophys*, 2007, 463: 993–1007
- 25 Gao X Y, Reich W, Han J L, et al. A Sino-German $\lambda 6$ cm polarization survey of the galactic plane. II. The region from 129° to 230° longitude. *Astron Astrophys*, 2010, 515: A64
- 26 Sun X H, Reich W, Han J L, et al. A Sino-German $\lambda 6$ cm polarization survey of the galactic plane. III. The region from 10° to 60° longitude. *Astron Astrophys*, 2011, 527: A74
- 27 Xiao L, Han J L, Reich W, et al. A Sino-German $\lambda 6$ cm polarization survey of the galactic plane. IV. The region from 60° to 129° longitude. *Astron Astrophys*, 2011, 529: A15
- 28 Sun X H, Reich P, Reich W, et al. A Sino-German $\lambda 6$ cm polarization survey of the galactic plane. VII. Small supernova remnants. *Astron Astrophys*, 2011, 536: A83
- 29 Sun X H, Reich W, Han J L, et al. New $\lambda 6$ cm observations of the Cygnus Loop. *Astron Astrophys*, 2006, 447: 937–947
- 30 Xu J W, Han J L, Sun X H, et al. Polarization observations of SNR G156.2+5.7 at $\lambda 6$ cm. *Astron Astrophys*, 2007, 470: 969–975
- 31 Xiao L, Fürst E, Reich W, et al. Radio spectral properties and the magnetic field of the SNR S147. *Astron Astrophys*, 2008, 482: 783–792
- 32 Shi W B, Han J L, Gao X Y, et al. The radio spectrum and magnetic field structure of SNR HB3. *Astron Astrophys*, 2008, 487: 601–604
- 33 Xiao L, Reich W, Fürst E, et al. Radio properties of the low surface brightness SNR G65.2+5.7. *Astron Astrophys*, 2009, 503: 827–836

- 34 Sun X H, Reich W, Wang C, et al. New $\lambda 6$ cm and $\lambda 11$ cm observations of the supernova remnant CTA 1. *Astron Astrophys*, 2011, 535: A64
- 35 Kundu M R, Becker R H. Observations of the Cygnus Loop at 6cm wavelength. *Astrophys J*, 1972, 77: 459–463
- 36 Tian W W, Leahy D. Radio spectral index variations of the SNR HB3. *Astron Astrophys*, 2005, 436: 187–193
- 37 Gao X Y, Sun X H, Han J L, et al. A Sino-German $\lambda 6$ cm polarization survey of the galactic plane. VI. Discovery of supernova remnants G178.2–4.2 and G25.1–2.3. *Astron Astrophys*, 2011, 532: A144
- 38 Gao X Y, Han J L. Discovery of a new supernova remnant G150.3+4.5. *Astron Astrophys*, 2014, 567: A59
- 39 Gao X Y, Reich P, Reich W, et al. Discovery of a new supernova remnant G21.8–3.0. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2020, 493: 2188–2194
- 40 Foster T, Kothes R, Sun X H, et al. 10^{51} erg less: The galactic H II region OA 184. *Astron Astrophys*, 2006, 454: 517–526
- 41 Gao X Y, Han J L, Reich W, et al. A Sino-German $\lambda 6$ cm polarization survey of the galactic plane. V. Large supernova remnants. *Astron Astrophys*, 2011, 529: A159
- 42 Gao X Y, Reich P, Hou L G, et al. A Sino-German $\lambda 6$ cm polarisation survey of the galactic plane. IX. HII regions. *Astron Astrophys*, 2019, 623: A105
- 43 Green D A. A revised catalogue of 294 galactic supernova remnants. *J Astrophys Astron*, 2019, 40: 36–47
- 44 Foster T J, Cooper B, Reich W, et al. Two radio supernova remnants discovered in the outer Galaxy. *Astron Astrophys*, 2013, 549: A107
- 45 Gerbrandt S, Foster T J, Kothes R, et al. The search for faint radio supernova remnants in the outer Galaxy: Five new discoveries. *Astron Astrophys*, 2014, 566: A76
- 46 Han J L, Gao X Y, Sun X H et al. Radio polarization observations of large supernova remnants at 6 cm. *IAU Symp*, 2014, 296: 202–209
- 47 Mitra D, Wielebinski R, Kramer M, et al. The effect of HII regions on rotation measure of pulsars. *Astron Astrophys*, 2003, 398: 993–1005
- 48 Anderson L D, Bania T M, Balser D S, et al. The WISE catalog of Galactic H II regions. *Astrophys J Suppl Ser*, 2014, 212: 1–18
- 49 Anderson L D, Armentrout W P, Johnstone B M, et al. Finding distant Galactic HII regions. *Astrophys J Suppl Ser*, 2015, 221: 26–36
- 50 Anderson L D, Armentrout W P, Luisi M, et al. A Green Bank Telescope survey of large galactic H II regions. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 234: 33–45
- 51 Makai Z, Anderson L D, Mascoop J L, et al. The infrared and radio flux densities of galactic H II regions. *Astrophys J*, 2017, 846: 64–84
- 52 Paladini R, Burigana C, Davies R D, et al. A radio catalog of galactic HII regions for applications from decimeter to millimeter wavelengths. *Astron Astrophys*, 2003, 397: 213–226
- 53 Shi W B, Sun X H, Han J L, et al. Discovery of three large HII regions in the galactic plane. *Chin J Astron Astrophys*, 2008, 8: 575–579
- 54 Norman C A, Ikeuchi S. The disk-halo interaction: Superbubbles and the structure of the interstellar medium. *Astrophys J*, 1989, 345: 372–383
- 55 Tomisaka K. Blowout of superbubble in galactic magnetic field. *Astrophys J Lett*, 1990, 361: 5–8
- 56 Tomisaka K. Superbubbles in magnetized interstellar media: Blowout or confinement? *Mon Not Roy Astron Soc*, 1998, 298: 797–810
- 57 Gao X Y, Reich W, Reich P, et al. Magnetic fields of the W4 superbubble. *Astron Astrophys*, 2015, 578: A24
- 58 Broadbent A, Haslam C G T, Osborne J I. A technique for separating the galactic thermal radio emission from the non-thermal component by means of the associated infrared emission. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1989, 237: 381–410
- 59 Alves M I R, Davies R D, Dickinson C, et al. A derivation of the free-free emission on the Galactic plane between $l = 20^\circ$ and 44° . *Mon Not Roy Astron Soc*, 2012, 422: 2429–2443
- 60 Paladini R, De Zotti G, Davies R D, et al. Analysis of the thin layer of galactic warm ionized gas in the range $20^\circ < l < 30^\circ$, $-1.5^\circ < b < 1.5^\circ$. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2005, 360: 1545–1552
- 61 Gold B, Odegard N, Weiland J L, et al. Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Galactic Foreground emission. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 192: 15–42
- 62 Xu W F, Gao X Y, Han J L, et al. Thermal and non-thermal emission in the Cygnus X region. *Astron Astrophys*, 2013, 559: A81
- 63 Reich W. A radio continuum survey of the northern sky at 1420 MHz-Part I. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1982, 48: 219–297
- 64 Jarosik N, Bennett C L, Dunkley J, et al. Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Sky maps, systematic errors, and basic results. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 192: 14–28

Summary for “十年描银河：中德6 cm银道面偏振巡天的发现”

Scanning the Milky Way for 10 years: Discoveries from the Sino-German 6 cm polarization survey of the Galactic plane

Xu-Yang Gao^{1,2,3*}, Xiao-Hui Sun^{1,4*}, Jin-Lin Han^{1,2,3*}, Li Xiao^{1,2,3}, Wei-Bin Shi^{1,5}, Hui Shi^{1,2,3} & Chen Wang^{1,2,3}¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³ CAS Key Laboratory of FAST, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;⁴ School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650500, China;⁵ School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai 264209, China* Corresponding authors, E-mail: xygao@nao.cas.cn; xhsun@ynu.edu.cn; hjl@nao.cas.cn

Radio continuum polarization observation is a powerful tool to study the properties of the Galactic interstellar medium. By using the 25-m radio telescope of Xinjiang Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences the Sino-German 6 cm polarization survey of the Galactic plane was carried out by the National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences and the Max-Planck-Institute for Radio Astronomy. The observed sky coverage is the Galactic plane in the region from 10° to 230° in the Galactic longitude and within $\pm 5^\circ$ in the Galactic latitude. The survey is by far at the highest frequency for a Galactic plane polarization survey conducted by a ground-based radio telescope. Through the ten-year efforts by the Chinese and German scientists, the survey revealed the distribution of the total intensity emission and the orientation in the sky plane of the Galactic magnetic fields, which allows us to paint a scroll of the Galaxy with the data obtained with a telescope in China. At such a higher frequency than that of other surveys over the world, the 6 cm observations experience less Faraday rotations, and are thus able to detect the polarized emission from a further distance. Based on the survey data, we have obtained a series of results on Galactic supernova remnants (SNRs), HII regions and Faraday screens with high rotation measures. Four new Galactic SNRs have been discovered, among which G178.2–4.2 and G25.1–2.3 published in 2011 are the first discovery of Galactic SNRs by a Chinese radio telescope using the first-hand data. Measurements of flux densities, polarization and spectra were performed for more than 70 known SNRs. The polarized emission is observed, for the first time, for the SNRs G16.2–2.7, G69.7+1.0, G84.2–0.8, G85.9–0.6, G205.5+0.5 and G206.9+2.3. The accurate measurements of the 6 cm flux densities are crucial to determine the spectra of 20 SNRs. Measurements and statistic studies were made for 401 HII regions toward which the flux densities can be precisely estimated. The result complemented the WISE HII region catalog with regards on the extended sources and fixed the mistakes in the commonly used radio HII region catalog. For the diffuse polarized emission, we have detected many new intriguing structures with high Faraday rotation measures which cannot be observed at low radio frequencies because of severe depolarization. These structures, referred to as Faraday screens, do not have total intensity correspondents, indicating the necessity of polarization observations in understanding the Galactic interstellar medium. The 6 cm survey data have been made public and the results have already generated high impacts on relevant research fields. The project has demonstrated that a medium size telescope such as the 25 m dish used for the survey is also capable of achieving great science, and the key is to find the niche in this case which is the polarization survey of the Galactic plane. The survey not only produced exciting results on the polarized emission from the Galaxy but also trained next generation radio astronomers who are now active for large facilities such as the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) and the Square Kilometre Array (SKA).

surveys, polarization, radio continuum, supernova remnants, HII regions, magnetic fieldsdoi: [10.1360/TB-2021-0038](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0038)