米波射电观测研究银河宇宙线的分布和起源

朱辉^{①②}, 田文武^{①*}, 苏洪全^{①②}, 吴丹^{①③}^① 中国科学院国家天文台, 光学天文重点实验室, 北京 100012;^② 中国科学院大学, 北京 100049;^③ 北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875

* 联系人, E-mail: tww@bao.ac.cn

收稿日期: 2015-04-14; 接受日期: 2015-06-16

国家重点基础研究发展计划 (编号: 2012CB821800, 2013CB837901) 和国家自然科学基金 (批准号: 11473038, 11273025, 1126114046) 资助项目

摘要 100 多年来, 银河宇宙线的起源, 传播, 空间分布一直是宇宙线的研究重点之一, 至今虽有巨大进展但仍远没有完全明白. 近年来, 射电, 光学, X-ray 和 γ -ray 的联合观测对我们了解银河宇宙线起到了重要的推动作用. 它们已经给出的众多证据表明银河宇宙线很有可能主要起源于超新星遗迹的扩散激波加速. 对高灵敏度 Fermi 银河弥散 γ -ray 数据的分析, 使得我们对宇宙线在银河系内分布和组成的认识进一步加深. 米波射电观测将有可能在银河宇宙线的空间分布和传播 (通过电离氢区和行星状星云的吸收观测, 高灵敏度高分辨率米波射电巡天), 宇宙线的起源 (超新星遗迹激波区域的观测, 河外点源和脉冲星的闪烁, 散射观测, TeV γ -ray 源在低能端的对应体的搜寻) 方面起到重要的作用.

关键词 宇宙线, 超新星遗迹, 星际介质, 激波

PACS: 98.70.Sa, 98.38.Mz, 98.38.-j, 52.35.Tc

doi: 10.1360/SSPMA2015-00158

1 引言

自 1912 年, 奥地利科学家 Hess 发现宇宙线以来, 它的起源、加速和传播一直是困扰天文和物理学家的一个重要科学问题之一. 宇宙线主要由质子 (约 90%), 氦核 (约 10%) 以及少量的重元素核和电子组成 (约 1%)^[1]. 宇宙线的能谱分布呈现幂率形式, 在约 4 PeV 和约 4 EeV 处有两个转折, 分别被称为“膝”和“踝”. 一般认为“膝”以下的宇宙线起源于银河系内, 称为银河宇宙线^[2].

银河宇宙线的起源地可能包括超新星遗迹, 脉冲星风云, X 射线双星, 银心, 巨泡 (Superbubbles)

等^[3-6]. 其中最有可能的起源地是超新星遗迹, 即超新星遗迹激波加速宇宙线粒子. 这一机制的雏形最早由 Baade 和 Zwicky 在 1934 年提出^[7]. 他们注意到如果银河系内每 100 年有 2-3 次超新星爆发, 每次爆发的动能是 10^{51} erg, 其中 10% 的能量用于加速粒子, 就可以很好地解释银河系内宇宙线的能量密度 (约 1 eV cm^{-3})^[8]. 而宇宙线在超新星遗迹激波中的具体加速过程, 扩散激波加速机制 (也称为一阶费米加速机制), 直到 20 世纪 70 年代才被明确^[9-12]. 射电观测在银河宇宙线的超新星遗迹起源早期论证中, 提供了很多信息, 起到了重要作用: (1) 高分辨率观测揭示的明亮纤维状结构直接显示激波所在位

引用格式: 朱辉, 田文武, 苏洪全, 等. 米波射电观测研究银河宇宙线的分布和起源. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 119504

Zhu H, Tian W W, Su H Q, et al. Studying the distribution and the origin of Galactic cosmic rays by meter wavelength radio observation (in Chinese). Sci Sin- Phys Mech Astron, 2015, 45: 119504, doi: 10.1360/SSPMA2015-00158

置, 而扭曲的湍流结构, 符合扩散激波加速机制的预期^[13]; (2) 能量为 E 的相对论性电子的同步辐射的峰值频率为^[14]

$$\frac{\nu}{\text{MHz}} = 16.0 \left(\frac{E}{\text{GeV}} \right)^2 \left(\frac{B_{\perp}}{\mu\text{G}} \right), \quad (1)$$

其中 $B_{\perp}$ 表示磁场强度; GHz 高频射电观测给出 GeV 高能电子存在的直接证据; (3) 观测到的超新星遗迹的平均射电谱指数 α 大约为 0.5^[16] ($S_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}$), 支持扩散激波加速机制预言的被加速粒子的能谱指数 γ 在 2 附近 ($\gamma = 1 + 2\alpha$); (4) 超新星遗迹的偏振观测可以给出磁场的方向, 空间变化的信息, 在一定假设下可以用来估计磁场的大小^[15], 暗示了可能的磁场放大现象.

近些年来随着高分辨率和高灵敏度的大型 X-ray (XMM-Newton, Chandra 等), γ -ray 望远镜 (Fermi, HESS, VERITAS, Milagro 等) 的相继运行, 更多的证据表明银河宇宙线来源于超新星遗迹的扩散激波加速粒子, 包括: (1) 年轻超新星遗迹中存在 X-ray 同步辐射, 表明大量 10–100 TeV 的高能电子的存在^[17], 对 X-ray 同步辐射纤维状结构宽度的分析, 显示磁场被放大到约 100–600 μG ^[18]; (2) 许多与分子云相互作用的超新星遗迹有 GeV–TeV γ -ray 辐射, 其辐射机制可以用中性 π 介子衰变解释^[19–21]; (3) Fermi 望远镜对超新星遗迹 IC443 和 W44 的观测强烈支持这两个遗迹中存在大量 GeV 能量的质子^[22]. 当前, 对超新星遗迹的 X-ray 和 γ -ray 高能观测已经成为了研究银河系宇宙线的最热门的方向.

另外, 超新星遗迹的 $\text{H}\alpha$ 观测和与超新星遗迹相互作用的分子云的分子谱线观测也给出了超新星遗迹加速银河系宇宙线的重要证据, 包括 $\text{H}\alpha$ 的宽窄两成分结构支持有宇宙线诱导的激波先驱 (Precursor) 的存在^[23], 分子谱线观测发现与超新星遗迹相互作用的分子云呈现高于普通分子云 1–2 个量级的电离率^[24]. 当然, 银河宇宙线之谜不只是它的起源问题, 我们对它在银河系内的传播与分布同样缺乏足够的了解^[25].

相比高能观测, 近些年来射电观测对银河宇宙线的研究贡献并不耀眼. 但是随着一批大型射电望远镜阵列, 尤其是米波 (<300 MHz) 射电望远镜阵列

的建造和运行, 米波射电观测将有可能成为研究银河宇宙线的另一重要领域. 本文将在后面的几个章节里对米波射电观测在宇宙线的空间分布研究, 与 γ -ray 弥散辐射的对比研究, 揭示扩散激波加速理论的粒子注入问题, 湍流结构, 寻找高能 γ -ray 源的低能段对应体等方面进行总结, 展望和讨论.

2 银河宇宙线中电子组分的三维分布

宇宙线在超新星遗迹的激波中被加速后, 会逐步扩散到整个银河系, 这些宇宙线中的电子在磁场中运动就产生了弥散同步射电辐射. 根据已观测到的射电同步辐射建立宇宙线中电子三维模型是研究银河系磁场结构, 宇宙线分布与传播的重要手段^[26]. 在利用同步辐射建立三维模型的过程中, 核心难题之一就是如何获得弥散同步辐射源的距离信息. 电离氢区和行星状星云在米波波段的观测最有可能解决这一难题.

对于密度为 n_e , 温度为 T_e 的电子团块, 在频率 ν 处的自由-自由吸收系数可以表示为^[27]

$$\frac{\kappa_{\nu}}{\text{pc}^{-1}} = 3.28 \times 10^{-7} \left(\frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right)^2 \left(\frac{T_e}{10^4 \text{ K}} \right)^{-1.35} \cdot \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2.1}. \quad (2)$$

而光深

$$\begin{aligned} \tau_{\nu} &= \int \kappa_{\nu} dl \\ &= 3.28 \times 10^{-7} \left(\frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right)^2 \left(\frac{T_e}{10^4 \text{ K}} \right)^{-1.35} \cdot \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2.1} \frac{\Delta l}{\text{pc}}. \end{aligned} \quad (3)$$

其中 Δl 为电子团块的大小. 对于一个典型的 HII 区, $n_e = 100 \text{ cm}^{-3}$, $\Delta l = 10 \text{ pc}$ ^[27], 光深 τ 随频率的变化由图 1 所示. 可以看到当频率小于 100 MHz 时, 典型的电离氢区将变成光学厚的. 此时电离氢区后面的弥散同步辐射将被吸收而无法被观测到.

在实际观测中, 对于一个主波束小于电离氢区角大小的单天线望远镜或者 UV 覆盖完备的阵列来说, 电离氢区方向获得的亮温度可以表示为

$$T_{\text{on}} = T_{\text{HII}}(1 - e^{-\tau}) + T_{\text{bg}}e^{-\tau} + T_{\text{fg}}, \quad (4)$$

图 1 典型电离氢区和行星状星云的光深与观测频率的关系. 实线代表温度 $T_e=10000$ K, 电子密度 $n_e=100 \text{ cm}^{-3}$, 大小 $\Delta l=10 \text{ pc}$ 的电离氢区, 光深随频率的变化. 虚线代表行星状星云的光深变化曲线, 温度 $T_e=10000$ K, 电子密度 $n_e=3000 \text{ cm}^{-3}$, 大小 $\Delta l=0.1 \text{ pc}$

Figure 1 Optical depth vs observation frequency of typical HII region and planetary nebulae. The solid line is for HII with temperature $T_e=10000$ K, electron density $n_e=100 \text{ cm}^{-3}$, size $\Delta l=10 \text{ pc}$. The dashed line is for planetary nebulae with temperature $T_e=10000$ K, electron density $n_e=3000 \text{ cm}^{-3}$, size $\Delta l=0.1 \text{ pc}$.

其中 T_{HII} 表示电离氢区的温度, T_{bg} 表示背景同步辐射的温度, T_{fg} 表示前景同步辐射的温度. 当电离氢区为光学厚时 ($\nu < 100 \text{ MHz}$), 这个公式简化为

$$T_{\text{on}} = T_{\text{HII}} + T_{\text{fg}}. \quad (5)$$

在电离氢区的邻近方向, 得到

$$T_{\text{off}} = T_{\text{bg}} + T_{\text{fg}}. \quad (6)$$

一般情况下电离氢区的温度可以通过高频射电观测或者光学观测得到, 由上面两个公式就可以分别获得电离氢区背景和前景同步辐射的平均温度. 很多电离氢区的距离 (D) 可以通过运动学方法, 或者消光方法得到. 因此可以得到前景同步辐射的平均发射率 ($\epsilon_{\nu} = T/DK \text{ pc}^{-1}$) 和背景同步辐射的平均发射率 ($\epsilon_{\nu} = T/(L-D)K \text{ pc}^{-1}$, 其中 L 为视线方向上电离氢区到银河系边界的距离). 在一个电离氢区的邻近方向上有时会存在其他的电离氢区, 这样我们利用两个电离氢区之间的距离差在更小的距离间隔上计算

平均发射率, 从而得到宇宙线发射率的三维分布. 在多个波段重复上面的工作, 还可以进一步得到宇宙线发射率谱指数的三维分布. 由于同步辐射只与磁场和电子的密度和能量分布有关, 在已知银河系磁场的状况下, 理论上可以计算出宇宙线中电子的密度和能量随空间的变化 (比如, 在最简单的磁场强度大小已知且均匀分布的情况下, 发射率 $\propto \nu^{-q}$, 电子谱指数 $n = 2q + 1$).

电离氢区在低频波段对背景辐射的吸收最早在 1953 年就被探测到 [28], 之后的低频射电巡天发现了更多的吸收结构, 如 Clark Lake 30.9 MHz 银道面巡天, GEETEE 34.5 MHz 巡天, UTR-2 10–25 MHz 巡天等 [29–31]. 受到观测设备的限制, 这些巡天的分辨率都在约 $30'$ 以上. 在这一领域的最新进展出现在 2006 年. Nord 等人 [32] 使用分辨率为 $10'$ 的 VLA (Very Large Array) 74 MHz 数据, 在 $-15^\circ < l < 26^\circ$, $-5^\circ < b < 5^\circ$ 范围内, 测量到了 92 个来自于电离氢区的吸收特征, 其中 42 个电离氢区的距离已知. 在假设银河宇宙线分布在半径为 20 kpc, 高度为 2 kpc 的轴对称圆柱体内时, 他们给出 74 MHz 处, 宇宙线的发射率分布在 $0.3\text{--}1.0 \text{ K pc}^{-1}$. 如图 2 所示, 已知的电离氢区和候选体的角大小主要分布在 10 个角分以下. 然而已经开展的低频射电观测的分辨率都在 10

图 2 (网络版彩图) WISE 电离氢区的角大小分布. 图片取自文献 [35]. 棕色竖线表示的角大小为 $45''$, 红色竖线表示的角大小为 $100''$

Figure 2 (Color online) The angular size distribution of WISE HII region. The figure is from ref. [35]. The brown and red vertical lines represent the angular size of $45''$ and $100''$ respectively.

角分以上, 无法分辨绝大部分电离氢区. 已经在运行的 MWA(Murchison Widefield Array), LOFAR(Low Frequency Array), 在 100 MHz 左右都将有小于约 3' 的分辨率 [33,34]. 它们将对使用电离氢区的自由-自由吸收建立银河宇宙线中电子的三维分布研究带来明显进步.

由于电离氢区主要分布在银道面上(见图 3), 利用它们测量银河宇宙线在空间的分布是受限制的, 即很难应用到高银纬和银晕中宇宙线的测量上. 在银河系中存在一类与电离氢区性质十分相似的天体——行星状星云(中心星为白矮星, 而电离氢区中心是恒星). 相比电离氢区, 已知的行星状星云的数目更多(超过 3500 个), 在银河系中分布的区域也更为广阔(见图 3).

一个典型的行星状星云, 电子密度 $n_e = 3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, 大小 $\Delta l = 0.1 \text{ pc}$ [27]. 在图 1 中可以看到, 在电离氢区变成光学厚之前, 行星状星云就已经变成光学厚的了. 这些优点使得行星状星云可以在更宽的频率动态范围(对应宇宙线更宽的能量范围), 更广阔的区域(高银纬和银晕)内研究宇宙线的性质. 当然行星状星云也有它的不足, 包括距离很难精确确定 [36], 尺寸很小, 观测上要求设备有足够的空间分辨率. 相比目前正在运行的设备, 即将建设的 SKA(Square Kilometer Array) 会在灵敏度和分辨率上有数量级的提高. 当 SKA 运行后必将对本领域的研究带来重大进展.

3 米波射电观测 vs 弥散 γ -ray 辐射——银河宇宙线分布与传播

银河宇宙线一般可以通过 4 种过程示踪. 示踪电子的过程包括射电同步辐射 ($\propto N_{\text{CRE}} B^2$, 其中 N_{CRE} 表示宇宙线中电子的柱密度, B 表示磁场强度), 韧致辐射 ($\propto N_{\text{CRE}} N_{\text{H}}$, 其中 N_{H} 表示原子/分子氢的柱密度) 和逆康普顿散射 ($\propto N_{\text{CRE}} N_*$, 其中 N_* 表示背景光子柱密度). 示踪宇宙线中质子的过程是中性 π 介子衰变 ($\propto N_{\text{CRp}} N_{\text{H}}$, 其中 N_{CRp} 表示宇宙线中质子的柱密度); 在银河系磁场分布, 原子/分子氢分布和银河系背景光子场已知的情况下, 原则上可以通过射电和 γ -ray 多波段观测, 获得宇宙线各种成分的空间和能

图 3 电离氢区和行星状星云随银纬的分布. (a) 电离氢区的坐标来源于侯立刚等人 [37]; (b) 行星状星云的坐标来源于 Kohoutek(2001) [38], Parker 等人 (2006) [39], Miszalski 等人 (2008) [40], Viironen 等人 (2009) [41], Sabin 等人 (2014) [42]

Figure 3 The distribution of HII regions and planetary nebulae along Galactic latitude. (a) The coordinates of HII regions are from Hou et al. 2014 [37]; (b) the coordinates of planetary nebulae are from Kohoutek (2001) [38], Parker et al. (2006) [39], Miszalski et al. (2008) [40], Viironen et al. (2009) [41], Sabin et al. (2014) [42].

量分布.

银河系的弥散 γ -ray 辐射在 20 世纪 70 年代就已经被 OSO-3, SAS-2 和 COS-B 探测到 [43–45]. 之后的 INTEGRAL 和 Compton 望远镜在数据质量上(分辨率和灵敏度)进一步提高 [46,47], 并将探测范围扩展到了硬 X-ray 和 10 GeV 能段. 与观测相对应的银河弥散 γ -ray 模型也在很多人的努力下, 变得更加完备 [48–50]. 2008 年, Fermi γ -ray 太空望远镜发射成功并开始运行. 它工作在几十 MeV 到几百 GeV 的能段范围内, 拥有比以往太空 γ -ray 探测器高一个量级的灵敏度 [51], 对研究银河弥散 γ -ray 起到了至关重要的作用. 比如, 它在中银纬区域没有

探测到 EGRET(Compton 上的一个设备)“GeV 过量 (GeV Excess)”现象^[52]; 测量邻近太阳的中性氢气体的发射率为 $(1.63 \pm 0.05) \times 10^{-26} \text{ photons s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ H-atom}^{-1} (>100 \text{ MeV})$ 和 $(0.66 \pm 0.02) \times 10^{-26} \text{ photons s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ H-atom}^{-1} (>300 \text{ MeV})$ ^[53]; 在银河系太阳圈外探测到中性氢气体的发射率比预期更高^[54,55], 给出 X_{CO} 因子 (CO 谱线强度与分子氢柱密度的比值) 则比前人使用的更低^[50,54,55].

在最新的工作中, Ackermann 等人^[51] 使用 21 个月的 Fermi 望远镜的数据, 并结合 GALPROP 程序, 分析了银河系弥散 γ -ray 辐射的分布和组成. 在模型中, 他们采用了宇宙线的扩散再加速机制 (Diffusive-Reacceleration) 并假设了星际湍流符合没有热对流的柯尔莫夫谱 (Kolmogorov spectrum 是指谱指数为 $-11/3$ 的电子团块尺度分布谱). 超新星遗迹的分布被选为宇宙线的注入分布. 注入谱形和传播参数通过拟合观测到的宇宙线中核子, 正负电子的数据得到. 中性氢和分子氢的分布来自于 Moskalenko 等人的 2D 解析模型, 并用 Leiden-Argentine-Bonn 的中性氢数据^[56], Dame 等人的 CO(J=1-0) 数据^[58] 以及尘埃分布^[59] 进行了柱密度再校准. 电离氢分布使用了 NE2001 模型^[59]. 星际辐射场则来源于 FRANKIE 程序. 最佳拟合结果如图 4 所示. 在银河系银盘半径为 20 kpc, 垂直银盘高度为 4 kpc, 中性氢自旋温度为 150 K 的情况下, Ackermann 等人的模型可以在中高银纬处很好地再现 Fermi 望远镜观测到的主要结构. 在内银河系 (银纬在 $\pm 8^\circ$ 之间, 银经小于 80° 或大于 280° 的区域), 他们的模型低估了能量在几个 GeV 以上的观测结果. 引起低估的原因可能是部分辐射起源于未探测到的点源或者是银河宇宙线能谱的变化. 在外银河系 (银纬在 $\pm 8^\circ$ 之间, 银经在 80° 到 280° 之间的区域), 宇宙线源的分布比预想的更平坦. 总体上, 弥散 γ -ray 辐射主要来源于质子的中性 π 介子衰变. 在中高银纬, 电子主要通过逆康普顿散射产生 γ -ray 辐射. 在银道面附近 ($-5^\circ < b < 5^\circ$), 韧致辐射是电子在几十 MeV 到几个 GeV 能段辐射 γ -ray 的主要机制 (见图 5).

Ackermann 等人的工作在整体上很好地展示了弥散 γ -ray 的组成与分布. 但是正如本章开头所示, 这些通过逆康普顿散射和韧致辐射产生 γ -ray 的电

子, 也在通过同步辐射产生射电辐射. Ackermann 等人并没有考虑模型中产生 γ -ray 辐射的电子是否能够再现已观测到的由这些电子产生的射电同步辐射. Strong 等人^[60] 在同时考虑射电和 γ -ray 辐射的模型拟合中指出, 标准的再加速模型在拟合射电同步辐射数据时, 比纯扩散模型遇到更多的困难. 可以说射电和 γ -ray 数据并行研究是未来研究这一课题的必然. 然而目前常用的天区覆盖完整的频率在几十到一百 MHz 的射电巡天分辨率都在 1° 以上^[61-63]. 这样的空间分辨率无法探测到点源对弥散辐射的影响, 甚至无法和 Fermi 望远镜的分辨率相比对 (Fermi 在几个 GeV 能段的分辨率在几个角分到十几个角分). 未来分辨率在角分量级的米波射电巡天与 Fermi 望远镜的数据结合, 将使人们对银河宇宙线分和组成的认识更进一步.

图 4 (网络版彩图) Fermi 在 200 MeV–100 GeV 的观测结果 (a) 与模型拟合的比较 (b). 图片取自文献 [51]. 图中坐标采用银道坐标, 银心位于图片中心

Figure 4 (Color online) (a) Fermi observed counts in the energy range of 200 MeV to 100 GeV. (b) The model predicted counts in the same energy range. The maps are in Galactic coordinates with the Galactic center in the middle. The figures are from ref. [51].

图 5 (网络版彩图) 银道面上, Fermi 观测到 200–1600 MeV 的 γ -ray 和模型给出的各组分与模型拟合出的各个组分在银经方向的分布. 图片取自文献 [51]. 图中带误差棒的点代表实际观测值, 红色长虚线代表中性 π 介子衰变, 青色点虚线代表轫致辐射, 绿色虚线代表逆康普顿散射, 蓝色虚线代表这三种成分的总和, 紫色实线代表考虑点源和各项同性背景后的结果

Figure 5 (Color online) Fermi observed profile in the energy range of 200 MeV to 1600 MeV along the Galactic longitude. The points with error bar: the observed profile, red long dashed line: emission of ϕ -decay, cyan dash-dotted line: emission of bremsstrahlung, green dashed line: emission of Inverse Compton scattering, blue dashed line: total diffuse γ -ray emission, magenta solid line: total emission including point source emission and isotropic background emission. The figure is from ref. [51].

4 宇宙线的激波加速过程

4.1 电子的注入问题

在扩散激波加速模型的计算中, 试验粒子 (test-particle) 被直接放入到激波中进行加速. 但是在真实的激波中, 并不是所有的粒子都能从激波下游穿越到激波上游, 从而得到有效加速. 激波过渡区的厚度一般在几个质子的回旋半径的量级 [64]. 质子的回旋

半径可以表示为

$$r_g = \frac{\sqrt{E_k^2 + 2E_k mc^2}}{eB}, \quad (7)$$

其中, E_k 表示动能, m 为离子的质量, B 表示磁场强度. 对于质子来说, 位于麦克斯韦分布高能尾端的质子的回旋半径大于激波过渡区的厚度, 可以多次从激波下游回到激波上游获得加速. 这些质子就组成了宇宙线的低能种子粒子 (Seed Particle), 这种粒子的注入方式被称为“热泄漏注入”(Thermal Leakage Injection). 目前通过热泄漏注入的质子占有所有质子的百分比还不能确定. 有模拟表明这一比例不会超过约 10^{-4} [64]. 它是当今被广泛接受的主流注入理论.

对于电子来说, 如何注入的问题更为复杂. 由上面的回旋半径公式可以看到热泄漏注入依赖于粒子的能量. 电子的质量是质子的 ~ 1800 分之一, 要达到与质子相同的能量需要远高于质子的速度, 使得电子热泄漏注入的效率远远小于质子 [64]. 种种迹象表明, 电子在注入之前需要一个提前加速的过程 (Pre-acceleration). 近年来, 许多数值模拟显示非平面效应, 如小尺度磁场起伏和小尺度扰动 (Ripples), 可以明显增强电子的加速, 哨激波可能在其中扮演着重要角色 [65–67]. 在观测中, 准垂直哨激波加速电子的证据已经被发现 [68,69]. Guo 和 Giacalone [70] 在他们最新的模拟工作中发现, 当激波上游的磁场扰动达到介质背景磁场的 10 倍时, 准平行激波 (类似年轻超新星遗迹的激波) 同样可以有效加速电子. 在这种情况下, 电子会在经过激波前被多次反射直到它们的能量达到注入所需的要求. Guo 和 Giacalone 的工作为解释电子的注入问题提供了一个很好的可能性, 但距离问题的最终解决仍未到时间 [70,71].

正如公式 (1) 所示, 不同能量的电子同步辐射的峰值频率是不一样的. 在 GHz 的观测已经很好地示踪了加速高能电子的激波的位置. 理论上, 若加速注入前电子的区域与加速已注入电子的区域不同 (模拟工作显示注入前电子的加速可能在激波上游或激波前完成), 极低频与 GHz 频段的图像和能谱指数应该有所差异. 这些差异与模拟工作的对比, 有可能为电子注入问题解决提供重要帮助. 由于地球电离层的影响, 低于 10 MHz (对应的电子能量约为 250 MeV, 假设磁场强度为 $10 \mu\text{G}$) 的观测在地面是无法完成的.

未来的太空低频射电阵可能是观测电子注入过程的最好选择, 如绕月干涉卫星阵列^[72].

4.2 探测超新星遗迹激波中的湍流

我们已经知道在光学观测中地球大气的湍动会造成星像的模糊. 在射电观测中, 点源同样会因为电波所经过介质的湍动而变得模糊, 更确切地说是由点源变成有限大小的“展源”, 只不过这个湍动的介质不是来源于地球大气, 而是来源于电离层和星际介质.

假设湍动的尺寸大小为 a , 电子的密度起伏为 Δn_e , 湍动介质存在的厚度为 D , 观测波长为 λ , 则平面波穿越这层介质后的相位变化可以表示为^[73]

$$\Delta\phi = \left(\frac{D}{a}\right)^{0.5} r_e \Delta n_e \lambda. \quad (8)$$

其中, r_e 表示电子的经典半径. 则散射角可以写成

$$\theta_{\text{scat}} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \frac{\lambda}{a} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{D}{a}\right)^{0.5} r_e \Delta n_e \lambda^2. \quad (9)$$

可以看到, 散射角正比于波长的平方. Duric^[74] 计算了典型的银道面环境下, 河外点源经散射后的大小. 在 300 MHz 频率处, 点源经散射后的角大小约为 $0.01''$, 在 30 MHz 频率处, 散射角大小就增加到 $3''$, 当频率为 10 MHz 时, 散射角可以达到 $30''$. 扩散激波加速理论预言了湍动和磁场的放大, 湍动的密度变化可以达到背景密度的量级, 甚至更大^[75,76]. 由于散射角的大小正比于电子的密度起伏, 观测散射角的大小也许可以用来检验扩散激波加速理论的湍动预言. 因为射电望远镜的分辨率反比于波长的一次方, 而散射角正比于波长的二次方, 因此在低频射电波段研究激波湍流产生的散射更有优势. 比如在 30 MHz 处, 银河系典型的散射角大小为 $3''$, 望远镜阵列的基线长度在约 700 km 时, 分辨率就能达到这个量级. 同一个望远镜阵列, 在 300 MHz 观测, 分辨率会提高到 $0.3''$, 但是相应的典型银河系散射角已经下降到了 $0.01''$. 利用 VLBI 技术, Spangler 等人^[77] 探测到了与超新星遗迹 G74.9+1.2 位置重叠的河外源 2013+370 的明显散射展宽. 遗憾的是在这个方向上存在一个电离氢区, 因而无法判断这个展宽是由 G74.9+1.2 还是电离氢区引起. 对另一个河外源 1849+005 的观测同样探

测到了明显的散射, 但是它到超新星遗迹 G33.6+0.1 的角距离有 $10'$. 由于没有探测到干涉条纹 (Fringe), 1849+005 散射的来源更可能是星际介质.

脉冲星的星际闪烁和散射是探测星际空间电子团块物理特性的重要手段. 我们已经知道, 观测到的脉冲星流量强度的长时标变化 (月到年的量级) 主要由折射散射引起, 因此可以用来探测较大尺度的团块 (几个 AU 的量级), 见图 6^[78]. 而小尺度的电子团块可以通过脉冲星的时间频率动态谱进行探测 (见图 7)^[78]. 当一个脉冲星刚好位于超新星遗迹的背面, 甚至刚好与激波区域相重叠的时候, 我们有可能通过对它们星际闪烁和散射的观测去探测激波中的湍动尺度有多大, 以及是否符合 Kolmogorov 幂率谱.

5 寻找高能 γ -ray 源的低频射电对应体

在第 3 节的开头部分, 我们已经讲到高能宇宙线可以通过 3 个过程产生 γ -ray——电子的逆康普顿散射, 韧致辐射以及质子的中性 π 介子衰变. 对于前两个与电子相关过程, 在电子谱没有低能段截止的情况下, 这些电子应该在 X-ray 和射电波段发射明显的同步辐射. 对于与质子相关的过程, 质子-质子碰撞过程中产生的次级电子同样会产生较弱的 X-ray 和

图 6 脉冲星 PSR B1937+21 的流量密度随时间的变化. 图片取自文献 [78]

Figure 6 Measured flux density of pulsar PSR B1937+21 as a function of time. The figure is from ref. [78].

图 7 脉冲星 PSR B 1133+16 的时间频率动态谱. 图片取自文献 [79]

Figure 7 Dynamic spectra of PSR B 1133+16. The figure is from ref. [79].

射电同步辐射. 一般来讲, 探测到弱的射电和 X-ray 辐射倾向于同类粒子产生的 γ -ray 主要由中性 π 介子衰变产生. 因此寻找高能 γ -ray 的低能段对应体可能会给银河宇宙线的起源带来意想不到的进展. 当然, 具体到某个源, 最终的成分组成还需要通过多波段的能谱分析确定. 现阶段, 在已知的 TeV γ -ray 源中仍然有三分之一没有找到低能段对应体 [80].

寻找低能段对应体的一个很好的例子是 HESS J1731+347. 它最早在 2008 年由 Aharonian 等人 [81] 报道, 当时, 在 HESS J1731+347 所在天区并没有已知的射电天体可以作为它的对应体. 稍后, Tian 等人 [82] 重新分析了南银道面巡天 (SGPS) 的 1420 MHz 射电连续谱和 21 cm 中性氢数据. 他们发现实际上在 HESS J1731+347 的视线方向上存在一个与其形态完美对应的较暗弱的超新星遗迹 G353.7-0.6 (见图 8). 后续的 X-ray 和 γ -ray 观测表明 G353.6-0.7 属于非常稀有的一类具有强 TeV 辐射的超新星遗迹 [83]——拥有非热的 X-ray 辐射且 TeV 辐射呈现壳层型 (这类超

新星遗迹迄今只找到 5 个). 目前银河系内已知的超新星遗迹的数目只有 294 个, 远小于理论给出的预期 (大于 1000 个) [84]. 缺失的部分可能主要由最年轻的超新星遗迹和年老的超新星遗迹组成. 年轻的超新星遗迹由于尺寸太小而不容易分辨出, 年老的超新星则是由于射电辐射比较暗弱. Yamazaki 等人 [85] 推测与分子云相互作用的年老超新星遗迹可以辐射 TeV γ -ray. 因此, 这些超新星遗迹有可能是那些未找到低能段辐射的 TeV γ -ray 源的候选体. 超新星遗迹的射电辐射是幂率谱, 随着频率的降低, 亮度迅速增加. 在米波波段观测有助于寻找到这些暗弱且年老的超新星遗迹. 不过米波观测仍然存在一些挑战, 因为观测中发现一些超新星遗迹受到自由-自由吸收的影响, 能谱会在几十 MHz 处出现转折 [86].

6 总结

在宇宙线研究的早期, 射电观测对我们认识宇

图 8 (网络版彩图) 超新星遗迹 G353.6-0.7 在 1420 MHz 的图像. 红色的等高线来自 ROSAT, 绿色的等高线来自于 HESS. 图片取自文献 [82]

Figure 8 (Color online) The 1420 MHz image of G353.6-0.7 with ROSAT image contours (red) and HESS J1731-347 image contours (green) overlaid. The figure is from ref. [82].

宙线的物理性质起到了重要的作用. 近些年来, 众多大型 X-ray 和 γ -ray 望远镜相继开始运行. 它们的观测结果大大推进了我们对银河宇宙线起源的认知, X-ray 和 γ -ray 是目前超新星遗迹和银河宇宙线起源研究的前沿领域. 但是射电观测对我们进一步完善对银河宇宙线的认识 (尤其是其中的电子成分) 仍然至关重要. 米波段有可能在以下几个方面推动我们对银河宇宙线分布, 传播和起源的认识: (1) 利用电离氢区和行星状星云的米波段变成光学厚的特性, 研究宇宙线中电子组分的空间分布和能谱分布, 帮助我们建立银河宇宙线的三维结构; (2) 结合高分辨率米波段的射电辐射和高能波段的 γ -ray 辐射, 研究宇宙线的空间分布, 完善宇宙线传播理论; (3) 高分辨米波观测直接示踪电子在注入前的预加速位置, 帮助解决电子的注入问题和再加速问题; 利用河外点源和脉冲星的闪烁开展散射观测, 能够验证扩散激波加速理论中的湍流问题; (4) 低频观测寻找 TeV γ -ray 源在低能段的对应体.

致谢 感谢课题组成员: 崔晓红, 王灵芝, 杨媛媛, 张孟飞等人在日常生活和科研中的支持和帮助.

参考文献

- Blasi P. The origin of galactic cosmic rays. *Astron Astrophys Rev*, 2013, 21: 70
- Gaisser T K. The cosmic-ray spectrum: From the knee to the ankle. *J Phys-Confer Ser*, 2006, 47: 15–20
- Bednarek W, Bartosik M. Cosmic rays from Galactic pulsars. *Astron Astrophys*, 2004, 423: 405–413
- Fabbiano G, Trinchieri G. A statistical analysis of the Einstein normal galaxy sample. I - Spiral and irregular galaxies. *Astrophys J*, 1985, 296: 430–457
- Guo Y Q, Feng Z Y, Yuan Q, et al. On the Galactic center being the main source of galactic cosmic rays as evidenced by recent cosmic ray and gamma ray observations. *New J Phys*, 2013, 15: 013053
- Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. A cocoon of freshly accelerated cosmic rays detected by Fermi in the Cygnus superbubble. *Science*, 2013, 333: 1103–1107
- Baase W, Zwicky F. Cosmic rays from super-novae. *Proce Nat Acad Sci*, 1934, 20: 259–263
- Berezhko E G. Origin of Galactic cosmic rays from supernova remnants. *Nucl Phys B*, 2014, 256: 23–35
- Krymsky G F. A regular mechanism for the acceleration of charged particles on the front of a shock wave. *Akademiia Nauk SSSR Doklady*, 1977, 234: 1306–1308
- Axford W I, Leer E, Skadron G. The acceleration of cosmic rays by shock waves. In: *Proceedings of 15th International Cosmic-Ray Conference*, 1977, 11: 132–137
- Bell A R. The acceleration of cosmic rays in shock fronts. I. *Mon Not R Astron Soc*, 1978, 182: 147–156
- Blandford R D, Ostriker J P. Particle acceleration by astrophysical shocks. *Astrophys J*, 1978, 221: L29–L32
- Moffett D A, Reynolds S P. Multifrequency studies of bright radio supernova remnant. II. W49B. *Astrophys J*, 1994, 437: 705–726
- Urošević D. On the radio spectra of supernova remnants. *Astrophys Space Sci*, 2014, 354: 541–552
- Bozzetto L M, Filipović M D, Urošević D, et al. Radio-continuum study of large magellanic cloud supernova remnant J0509-6731. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 440: 3220–3225

- 16 Green D A. A revised Galactic supernova remnant catalogue. *Bull Astron Soci India*, 2009, 37: 45–61
- 17 Koyama K, Petre R, Gotthelf E V, et al. Evidence for shock acceleration of high-energy electrons in the supernova remnant SN 1006. *Nature*, 1995, 378: 255–258
- 18 Vink J, Laming J M. On the magnetic fields and particle acceleration in Cassiopeia A. *Astrophys J*, 2003, 584: 758–769
- 19 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Observation of supernova remnant IC 443 with the Fermi large area telescope. *Astrophys J*, 2010, 712: 459–468
- 20 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Fermi large area telescope observations of the supernova remnant W28 (G6.4-0.1). *Astrophys J*, 2010, 718: 348–356
- 21 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Gamma-Ray Emission from the shell of supernova remnant W44 revealed by the Fermi LAT. *Science*, 2010, 327: 1103–1106
- 22 Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants. *Science*, 2013, 339: 807–811
- 23 Morlino G, Bandiera R, Blasi P, et al. Collisionless shocks in a partially ionized medium. II. Balmer emission. *Astrophys J*, 2012, 760: 137–149
- 24 Ceccarelli C, Hily-Blant P, Montmerle T, et al. Supernova-enhanced cosmic-ray ionization and induced chemistry in a molecular clouds of W51C. *Astrophys J*, 2011, 740: L4–L8
- 25 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. PAMELA measurements of cosmic-ray proton and helium spectra. *Science*, 2011, 332: 69–72
- 26 Sun X H, Reich W, Waelkens A, et al. Radio observational constraints on Galactic 3D-emission models. *Astron Astrophys*, 2008, 477: 573–592
- 27 Osterbrock D E, Ferland G J. *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*. Sausalito: University Science Books, 2006
- 28 Scheuer P A G, Ryle M. An investigation of the H II regions by a radio method. *Mon Not R Astron Soc*, 1953, 113: 3–17
- 29 Kassim N E. The clark lake 30.9 MHz Galactic plane survey. *Astrophys J Suppl Ser*, 1988, 68: 715–733
- 30 Dwarakanath K S, Udaya S N. A synthesis map of the sky at 34.5 MHz. *Astrophys Astron*, 1990, 11: 323–410
- 31 Kassim N E, Perley R A, Erickson W W, et al. Subarcminute resolution imaging of radio sources at 74 MHz with the very large array. *Astron J*, 1993, 106: 2218–2228
- 32 Nord M E, Henning P A, Rand R J, et al. 74 MHz discrete H II absorption regions toward the inner Galaxy. *Astrophys J*, 2006, 132: 242–252
- 33 Bowman J D, Cairns I, Kaplan D L, et al. Science with the murchison widefield array. *Publ Astron Soc Austr*, 2013, 30: 31–58
- 34 de Vos M, Gunst A W, Nijboer R. The LOFAR telescope: System architecture and signal processing. *IEEE*, 2009, 97: 1431–1437
- 35 Anderson L D, Bania T M, Balser D S, et al. The WISE catalog of Galactic H II regions. *Astrophys J Suppl*, 2014, 212: 1–17
- 36 Hajian A R. Distance to planetary nebulae. *IAUS. Planetary Nebulae in our Galaxy and Beyond*, 2006, 234: 41–48
- 37 Hou L G, Han J L. The observed spiral structure of the Milky Way. *Astron Astrophys*, 2014, 569: 125–145
- 38 Kohoutek L. Version 2000 of the catalogue of Galactic planetary nebulae. *Astron Astrophys*, 2001, 378: 843–846
- 39 Parker Q A, Acker A, Frew D J, et al. The macquarie/AAO/strasbourg H α planetary nebula catalogue: MASH. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 373: 79–94
- 40 Miszalski B, Parker Q A, Acker A, et al. MASH-II: More planetary nebulae from the AAO/UKST H α survey. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 384: 525–534
- 41 Viironen K, Greimel R, Corradi R L M, et al. Candidate planetary nebulae in the IPHAS photometric catalogue. *Astron Astrophys*, 2009, 504: 291–301
- 42 Sabin L, Parker Q A, Corradi R L M, et al. First release of the IPHAS catalogue of new extended planetary nebulae. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 443: 3388–3401
- 43 Kraushaar W L, Clark G W, Garmire G P, et al. High-energy cosmic-ray observations from the OSO-3 satellite. *Astrophys J*, 1972, 177: 341–363
- 44 Fichtek C E, Hartman R C, Kniffen D A, et al. High-energy gamma-ray results from the second small astronomy satellite. *Astrophys J*, 1975, 198: 163–182
- 45 Bignami G F, Boella G, Burger J J, et al. The COS-B experiment for gamma-ray astronomy. *Space Science Instrumentation*, 1975, 1: 245–268
- 46 Hunter S D, Bertsch D L, Catelli J R, et al. EGRET observations of the diffuse gamma-ray emission from the Galactic plane. *Astrophys J*, 1997, 481: 205–240
- 47 Bouchet L, Jourdain E, Rogues J P, et al. INTEGRAL SPI all-sky view in soft gamma rays: A study of point-source and Galactic diffuse emission. *Astrophys J*, 2008, 679: 1315–1326
- 48 Stecker F W, Solomon P M, Scoville N Z, et al. Molecular hydrogen in the Galaxy and galactic gamma rays. *Astrophys J*, 1975, 201: 90–97
- 49 Strong A W, Bloemen J B G M, Dame T M, et al. The radial distribution of galactic gamma rays. IV - The whole galaxy. *Astron Astrophys*, 1988, 208: 1–15
- 50 Strong A W, Moskalenko I V, Reimer O. Diffuse Galactic continuum gamma rays: A model compatible with EGRET data and cosmic-ray

- measurements. *Astrophys J*, 2004, 613: 962–976
- 51 Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. Fermi-LAT observations of the diffuse γ -ray emission: Implications for cosmic rays and the interstellar medium. *Astrophys J*, 2012, 750: 3–37
- 52 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Fermi large area telescope measurements of the diffuse gamma-ray emission at intermediate Galactic latitudes. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 251101
- 53 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Fermi LAT observation of diffuse gamma rays produced through interactions between local interstellar matter and high-energy cosmic rays. *Astrophys J*, 2009, 703: 1249–1256
- 54 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Fermi observations of cassiopeia and cepheus: Diffuse gamma-ray emission in the outer galaxy. *Astrophys J*, 2010, 710: 133–149
- 55 Ackmann M, Ajello M, Baldini L, et al. Constraints on the cosmic-ray density gradient beyond the solar circle from Fermi γ -ray observations of the third galactic quadrant. *Astrophys J*, 2011, 726: 81–95
- 56 Kalberla P M W, Burton W B, Hartmann D, et al. The Leiden/Argentine/Bonn (LAB) Survey of Galactic HI. Final data release of the combined LDS and IAR surveys with improved stray-radiation corrections. *Astron Astrophys*, 2005, 440: 775–782
- 57 Dame T M, Hartmann D, Thaddeus P. The milky way in molecular clouds: A new complete CO survey. *Astrophys J*, 2001, 547: 792–813
- 58 Schlegel D J, Finkberner D P, Davis M. Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and cosmic microwave background radiation foregrounds. *Astrophys J*, 1998, 500: 525–553
- 59 Cords J M, Lazio T J W. NE2001.I. A new model for the Galactic distribution of free electrons and its fluctuations. arXiv:astro-ph/0207156
- 60 Strong A W, Orlando E, Jaffe T R. The interstellar cosmic-ray electron spectrum from synchrotron radiation and direct measurements. *Astron Astrophys*, 2011, 534: 54–66
- 61 Roger R S, Costain C H, Landecker T L, et al. The radio emission from the Galaxy at 22 MHz. *Astron Astrophys Suppl*, 1999, 137: 7–19
- 62 Guzman A E, May J, Alvarez H, et al. All-sky Galactic radiation at 45 MHz and spectral index between 45 and 408 MHz. *Astrophys*, 2011, 525: 138–147
- 63 Landecker T L, Wielebinski R. The Galactic metre wave radiation: A two-frequency survey between declinations +25° and -25° and the preparation of a map of the whole sky. *Austr J Phys Suppl*, 1970, 16: 1–30
- 64 Jones T W. Particle acceleration at shocks: Insights from supernova remnant shocks. *J Astrophys Astron*, 2011, 32: 427–435
- 65 Riguelme M A, Spitkosky A. Electron injection by whistler waves in non-relativistic shocks. *Astrophys J*, 2011, 733: 63–77
- 66 Umeda T, Yamao M, Yamazaki R. Electron acceleration at a low Mach number perpendicular collisionless shock. *Astrophys J*, 2009, 695: 574–579
- 67 Yang Z W, Lembege B, Lu Q M. Impact of the rippling of a perpendicular shock front on ion dynamics. *J Geophys Res*, 2012, 117: A07222
- 68 Oka M, Terasawa T, Seki Y, et al. Whistler critical Mach number and electron acceleration at the bow shock: Geotail observation. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L24104
- 69 Wilson L B III, Koval A, Szabo A, et al. Observations of electromagnetic whistler precursors at supercritical interplanetary shocks. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: L08109
- 70 Guo F, Giacalone J. The acceleration of electrons at collisionless shocks moving through a turbulent magnetic field. *Astrophys J*, 2015, 802: 97–104
- 71 Hellinger P, Travnicek P, Lembege B, et al. Emission of nonlinear whistler waves at the front of perpendicular supercritical shocks: Hybrid versus full particle simulations. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L14109
- 72 Chen X L. The space low frequency radio astronomy in China (in Chinese). In: Proceeding of the second academic conference of the Committee of Deep Space Exploration Technology, Chinese Society of Astronautics, 2005, 49–53 [陈学雷. 关于开展我国空间低频射电天文学研究的一些设想. 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第2届学术年会会议文集, 2005, 49–53]
- 73 Lyne A, Graham-Smith F. Pulsar astronomy fourth edition. Cambridge: Cambridge university Press, 2012
- 74 Duric N. Low-frequency radio astronomy and the origin of cosmic rays. *Geophys Monograph Ser*, 2000, 119: 277–285
- 75 Bell A R. Turbulent amplification of magnetic field and diffusive shock acceleration of cosmic rays. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 353: 550–558
- 76 Schure K M, Bell A R. Magnetic field amplification by cosmic rays in supernova remnants. *ASP Conf Ser*, 2013, 470: 209–212
- 77 Spangler S R, Cords J M. VLBI measurements of plasma turbulence associated with the Cygnus OB1 association. *Astrophys J*, 1998, 505: 766–783
- 78 Ramachandran R, Demorest P, Backer D C, et al. Interstellar plasma weather effects in long-term multifrequency timing of pulsar B1937+21. *Astrophys J*, 2006, 645: 303–313
- 79 Stinebring D R. Scintillation arcs: Probing turbulence and structure in the ISM. *Chin J Astron Astrophys Suppl*, 2006, 6: 204–210
- 80 Tian W W, Zhang J L. Exploration of Galactic γ -ray supernova remnants. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2013, 56: 1443–1453
- 81 Aharonian F, Akhperjanian A G, Barres de Almerda U, et al. HESS very-high-energy gamma-ray sources without identified counterparts. *Astron*

Astrophys, 2008, 477: 353–363

- 82 Tian W W, Leahy D A, Haverkorn M, et al. Discovery of the radio and X-Ray counterpart of TeV γ -ray source HESS J1731-347. *Astrophys J*, 2008, 679: L85–L88
- 83 Abramowski A, Acero F, Aharonian F, et al. A new SNR with TeV shell-type morphology: HESS J1731-347. *Astron Astrophys*, 2011, 531: 81–89
- 84 Case G L, Bhattacharya D. A new Σ -D relation and its application to the Galactic supernova remnant distribution. *Astrophys J*, 1998, 504: 761–772
- 85 Yamazaki R, Kohri K, Bamba A, et al. TeV γ -rays from old supernova remnants. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 371: 1975–1982
- 86 Lacey C K, Lazio T, Joseph W, et al. Spatially resolved thermal continuum absorption against supernova remnant W49B. *Astrophys J*, 2001, 559: 954–962

Studying the distribution and the origin of Galactic cosmic rays by meter wavelength radio observation

ZHU Hui^{1,2}, TIAN WenWu^{1*}, SU HongQuan^{1,2} & WU Dan^{1,3}

¹ Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, 19A Yuquan Road, Shijingshan District, Beijing 100049, China;

³ College of Information Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

The origin, propagation and distribution of Galactic cosmic rays is one of the important fields of cosmic ray study even after more than 100 years since its discovery. Although great progress has been made, It is still far from the final answer. In recent years, joint observations of radio, optical, X-ray and γ -ray play an important role in understanding the Galactic cosmic rays. These observations provide a lot of evidences supporting that Galactic cosmic rays are mainly accelerated in the shock of supernova remnant through the mechanism of diffusive shock acceleration. Our knowledge about the distribution and composition of Galactic cosmic rays is also improved by analyzing the high sensitivity diffuse γ -ray data of *Fermi*. Meterwave radio observation may promote the studies of Galactic cosmic rays distribution, propagation (absorption observation of HII and planetary nebulae, high sensitivity and resolution meter wavelength sky survey) and origin (observation of supernova remnants' shock region, scintillation and scattering observation of extragalactic point sources and pulsars, searching the lower energy counterparts of TeV γ -ray sources).

cosmic ray, supernova remnant, interstellar medium, shock

PACS: 98.70.Sa, 98.38.Mz, 98.38.-j, 52.35.Tc

doi: 10.1360/SSPMA2015-00158