

超新星遗迹G1.9+0.3射电流量密度的时间演化*

陈欣[†] 孙晓辉[‡]

(云南大学物理与天文学院 昆明 650500)

摘要 对年轻超新星遗迹的射电观测有助于理解超新星遗迹的早期演化. 选取银河系最年轻的超新星遗迹G1.9+0.3进行了研究. 收集了已有的射电流量密度测量, 转化到同一频率, 从而获得了G1.9+0.3的流量密度在过去近50 yr的演化. 发现流量密度在2008年之前几乎一直在增加, 随后开始减小, 流量密度达到峰值的年龄约为150–155 yr. 流量密度的增加可能由磁场放大或者粒子加速效率提高产生的高能电子增多导致. 根据流量密度达到峰值的年龄, 结合前人的数值模拟, 讨论了超新星抛射物的质量和超新星爆发释放的动能.

关键词 星际介质: 超新星遗迹, 射电连续谱: 星际介质, 辐射机制: 非热, 激波, 粒子加速

中图分类号: P160; **文献标识码:** A

1 引言

超新星遗迹是非常明亮的射电延展源, 现在已知的约300个超新星遗迹中, 约95%都有射电辐射^[1]. 超新星遗迹的射电辐射来自相对论电子在磁场中的同步加速辐射, 对超新星遗迹进行射电观测, 有助于我们理解超新星遗迹的演化.

G1.9+0.3由Green等人首次证认为超新星遗迹^[2]. 基于Very Large Array (VLA)在C波段的观测, 他们得出这个超新星遗迹的角直径只有约1', 即使距离达到20 kpc, 大小也只有约10 pc, 由此推断G1.9+0.3是一个非常年轻的超新星遗迹. Green等人从1985年开始对G1.9+0.3进行监测, 到2008年发现大小扩张了约15%, 意味着这个超新星遗迹的年龄约为150 yr^[3]. 通过比较Chandra X射线卫星和射电波段的观测数据获得的G1.9+0.3角直径, Reynolds等人估计其年龄约为140 yr^[4]. 这些观测意味着G1.9+0.3是银河系中最年轻的超新星遗迹. 在本文中, 我们假定该超新星遗迹在2008年

的年龄为150 yr.

对年轻超新星遗迹的观测研究有两个重要意义. 首先是银河系年轻超新星遗迹缺失问题. 银河系超新星暴发率约为每40 yr 1个^[5], 由此推断银河系中年龄小于2000年的超新星遗迹约有50个^[6], 但是目前只证认了不到10个^[4], 所以需要搜寻更多的年轻超新星遗迹. 其次是超新星遗迹的演化问题. 一般认为, 超新星遗迹的演化可以分为4个阶段: 自由膨胀、绝热膨胀(或者Sedov-Taylor阶段)、辐射和耗散^[1, 7]. 其中自由膨胀阶段持续的时间只有约几百年, 所以需要观测年轻超新星遗迹来理解其早期演化.

超新星遗迹G1.9+0.3由于年龄小, 是研究自由膨胀阶段的理想天体. Green等人发现G1.9+0.3在1.4 GHz频率上的流量密度在2008年之前的13 yr里, 增加了约2%^[3]. Murphy等人分析了Molonglo Observatory Synthesis Telescope (MOST)从1988年到2007年在843 MHz频率上的观测, 发现流量密

2021-07-17收到原稿, 2021-09-23收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11763008)资助

[†]chenxin_@mail.ynu.edu.cn

[‡]xhsun@ynu.edu.cn

度以每年约1.2%的速率在增加^[8]. 本文中, 我们收集了以前的测量并结合最新的观测, 研究了G1.9+0.3流量密度随时间的演化.

2 数据分析

我们收集了从1969年到2017年对超新星遗迹G1.9+0.3的射电流量密度测量, 列于表1. 其中第1

列为观测所用的望远镜, 包括VLA、MWA (Murichison Widefield Array)、MOST和ATCA (Australia Telescope Compact Array); 第2列为观测时间, 如果文献中未注明确切的观测时间, 我们就采用文献发表时间; 第3列为观测频率(ν); 第4列和第5列分别为该频率下的流量密度(S_ν)和误差(σ_{S_ν}). 我们将得到的1425 MHz频率上的流量密度 S_{ν_0} 以及误差 $\sigma_{S_{\nu_0}}$ 分别列于表1的第6列和第7列.

表 1 超新星遗迹G1.9+0.3的射电流量密度
Table 1 The radio flux densities of the supernova remnant G1.9+0.3

Telescope	Date	ν /MHz	S_ν /Jy	σ_{S_ν} /Jy	S_{ν_0} /Jy	$\sigma_{S_{\nu_0}}$ /Jy	Reference
VLA	1969—1971	408	1.18	0.07	0.492	0.029	[9]
VLA	1974—1975	4875	0.2	0.05	0.473	0.118	[10]
VLA	≤ 1975	5000	0.20	0.03	0.482	0.072	[11]
VLA	1981—1984	2695	0.440	0.044	0.687	0.069	[12]
VLA	1985—1991	843	1.0	0.05	0.693	0.035	[13]
VLA	1986—1989	332	2.84	0.10	1.024	0.036	[14]
VLA	1990	4850	0.236	0.016	0.556	0.038	[15]
VLA	1993—1996	1400	0.748	0.038	0.739	0.037	[16]
VLA	1997—2007	843	0.986	0.031	0.683	0.022	[17]
MOST	2005	843	1.23	0.088	0.852	0.061	[8]
VLA	2008	1425	0.935	0.047	0.935	0.047	[3]
VLA	2008	4860	0.437	0.022	1.032	0.052	[3]
MWA	2013—2014				0.965	0.014	[18]
ATCA	2016—2017	2100	0.645	0.065	0.846	0.085	[18]
ATCA	2016—2017	5000	0.249	0.025	0.600	0.060	[18]
ATCA	2016—2017	9000	0.181	0.018	0.658	0.065	[18]

为了研究流量密度随时间的演化, 我们把所有的测量都转换到 $\nu_0 = 1425$ MHz频率上, 流量密度为 $S_{\nu_0} = S_\nu(\frac{\nu_0}{\nu})^\alpha$, 流量密度的误差为 $\sigma_{S_{\nu_0}} = \sigma_{S_\nu}(\frac{\nu_0}{\nu})^\alpha$, 其中 α 为谱指数. 我们采用Green等人的结果^[3], 取 $\alpha = -0.7$. 我们注意到LaRosa等人得到的谱指数为 -0.93 ^[14], Luken等人得到的谱指数为 -0.81 ^[18], 但是谱指数在 $[-0.7, -0.93]$ 这个区间的取值不影响其整体流量密度随时间的变化趋势, 因

而不影响我们下面的讨论.

Green等人2008年估计超新星遗迹G1.9+0.3的年龄约为150 yr^[3]. 结合表1中的数据, 我们获得了G1.9+0.3在1425 MHz频率上流量密度随时间演化, 时间跨度接近50 yr, 如图1所示. 如果观测跨越连续多个年份, 我们取年份的平均值获得对应的年龄; 如果相同年份对应多个流量密度测量值, 我们取这些值的平均值, 并把弥散包含到误差中. 从

图1中我们可以看到, 当年龄约为130 yr时, 观测得到的流量密度最大, 显著高于此前和此后的观测. 该流量密度来自于1986—1989年在332 MHz频率上的观测^[14], Green等人认为这次测量的不确定性比较大, 因而在他们的分析中没有包括这个测量^[3]. 我们在下面的分析中, 也把这个数据排除在外.

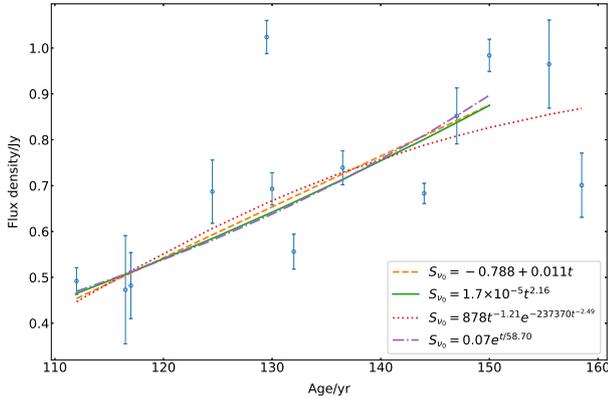


图 1 超新星遗迹G1.9+0.3在频率为1425 MHz上的流量密度随年龄的演化. 其中黄色虚线、绿色实线、红色点线和紫色点划线分别表示线性、幂函数、考虑吸收和指数的拟合.

Fig. 1 Time evolution of the flux densities of supernova remnant G1.9+0.3 at 1425 MHz. Yellow dashed, green solid, red dotted and purple dot-dashed lines indicate linear, power function, absorption and exponential fitting, respectively.

超新星遗迹G1.9+0.3在年龄小于150 yr时, 流量密度一直在增加. 在从约110–150 yr的近40 yr内, 流量密度从约0.5 Jy增加到了约1 Jy. 我们用直线、指数函数和幂函数分别拟合了流量密度(S_{ν_0})和年龄(t)之间的关系, 结果展示在图1中. 从直线拟合, 得到流量密度增加率约为 $0.011 \text{ Jy}\cdot\text{yr}^{-1}$, 与Murphy等人的结果^[8]基本一致. 从指数函数拟合, 得到特征时标约为58.70 yr, 对应的流量密度增加率($\Delta S/\Delta t$)/ S 约为 $1.7\% \text{ yr}^{-1}$. 从幂函数拟合, 得到 $S \propto t^{2.16}$, 即幂指数约为2.16, 拟合的误差为0.15.

在年龄约150–155 yr后, 超新星遗迹G1.9+0.3的流量密度开始下降. 在约150–158 yr的8 yr内, 流量密度从约1 Jy减小到约0.7 Jy, 平均每年下降约0.04 Jy, 下降率远大于流量密度增加率. 由于数据点少, 我们没有做拟合.

3 讨论与总结

一般认为, 超新星遗迹是PeV (10^{15} eV)及以下能量宇宙线的起源^[19]. 超新星遗迹的激波扫过星际介质, 把电子和其他粒子加速到接近光速. 这些相对论运动的电子在磁场中运动产生的同步辐射是超新星遗迹射电辐射的来源, 其流量密度可以表示为^[20–21]:

$$S_{\nu} \propto KVB^{1-\alpha}\nu^{\alpha}, \quad (1)$$

其中 K 正比于高能电子的能量密度, $V \propto R^3$ 为辐射区域体积, R 为超新星遗迹半径, B 为磁场强度.

3.1 年龄小于约150 yr之前的射电流量密度增加

一般认为, 高能电子能量和磁场能相当, 即能量均分, 能量都正比于激波后的介质能量密度, 即 $K \propto B^2 \propto \rho v^2$, 其中 $\rho \propto \dot{M}/R^2$ 为星周物质密度, \dot{M} 为前身星质量损失率, $v = dR/dt$ 为膨胀速度. 这里我们只考虑了有前身星星风的情况, Borkowski等人认为G1.9+0.3来自Ia型超新星爆发^[22], 但是Sarbadhicary等人基于数值模拟认为该遗迹不可能起源于Ia型超新星^[23]. 如果考虑 \dot{M} 为常量, 则 $\rho v^2 \propto t^{-2}$, 相应地有 $K \propto t^{-2}$ 和 $B \propto t^{-1}$. 半径随时间的演化可以写为 $R \propto t^m$, 其中 $m = (n-3)/(n-2)$, n 为超新星爆发前星周介质密度幂律分布的谱指数, 典型值在7–12之间^[21]. m 的取值与超新星遗迹的演化阶段有关: 对自由膨胀阶段, m 在0.8–0.9之间; 对绝热阶段, $m = 2/5$. 把各个参量对时间的依赖关系代入(1)式可以得到流量密度 $S_{\nu} \propto t^{\alpha-3+3m}$. 通过拟合Luken等人测得的半径^[18]与年龄, 我们得到 $m = 0.83$, 而 $\alpha = -0.7$, 故 $S \propto t^{-1.2}$, 显然与观测不符.

有几种物理图像可以解释流量密度随时间的增加. 一种是如Green等^[3]和Murphy等^[8]建议的, 磁场随时间增加, 但并没有给出磁场如何随时间增加. 假定磁场随时间的变化写为 $B \propto t^{\beta}$, 其中 $\beta > 0$. 如果磁场和相对论电子能量均分, 则有 $S \propto t^{3\beta+3m-\alpha}$, 把 $m = 0.83$ 和 $\alpha = -0.7$ 代入得 $S \propto t^{3.7\beta+2.49}$, 幂指数总是大于观测得到的(2.16 \pm 0.15) (图1), 所以无法解释观测. 如果不存在能量均分, 则 $S \propto t^{\beta-2+3m-\alpha}$, 根据观测的 $S \propto t^{2.16}$ 得

到 $\beta \approx 0.98$. 数值模拟显示, 当超新星遗迹在湍流星际介质中膨胀时, 磁场确实会增加^[24]. 我们的观测为将来的数值模拟提出了限制, 从而为更准确地理解超新星遗迹的早期演化提供参考.

宇宙线粒子加速也可以解释射电流量密度增加. 当磁场很强时, 粒子束缚在激波中的时间变长, 从而加速效率提高, 使得壳层中高能电子增多、流量密度增加. Pavlović^[25]的数值模拟显示, 超新星遗迹G1.9+0.3的磁场达到约280 μGs , 周围星际介质的数密度约为 0.02 cm^{-3} 时, 可以使得射电流量密度增加, 并且在约600 yr后达到最大值. Chakraborti等人的数值模拟则表明只有超新星爆发的前身为双筒并星的时候射电流量密度才会增加^[26], 但是他们所取的 n 为0或者2, 远远偏离典型值.

另外一种物理图像是超新星遗迹周围的热电离气体吸收同步辐射所导致的消光^[20-21]. 光学厚度 $\tau \propto N_e^2 R$, 其中 $N_e \propto R^{-2}$, 为星周物质柱密度. 这样 $\tau \propto R^{-3} \propto t^{-3m}$, 而流量密度可以写为 $S \propto t^{\alpha-3+3m} \exp(-\tau) = t^{\alpha-3+3m} \exp(-At^{-3m})$, 其中 A 为常数. 这个模型成功地解释了很多河外超新星的射电流量密度变化, 如SN 1983 N^[27]. 但是, 这些射电超新星的流量密度一般在爆发后几十天到上百天就达到峰值, 而G1.9+0.3的流量密度在约150 yr之前一直增加. 我们尝试用该模型拟合G1.9+0.3的流量密度随时间的变化. 在拟合的时候, 我们固定 α 和 m , 结果展示在图1中.

3.2 年龄大于约150–155 yr之后的射电流量密度减小

图1显示, 流量密度在 $t_0 \approx 150\text{--}155 \text{ yr}$ 时达到峰值. 流量密度变化的转折点 t_0 与超新星遗迹的演化密切相关. 电离气体吸收模型给出的流量密度一直在增加(图1), 可以预期当年龄很大时, 吸收项 $\exp(-\tau)$ 将趋于1, 流量密度将减小. 用该模型拟合给出的 t_0 远大于观测值, 所以不适用于超新星遗迹G1.9+0.3.

对于粒子加速效率提高导致高能电子增多的模型, Pavlović^[25]通过模拟给出的 t_0 约为600 yr, 与观测不符. 基于Cowsik等人的理论模型, 达到流量

密度峰值的时间即流量密度变化转折点 t_0 可以表示为^[28]:

$$t_0 \sim 100 \text{ yr} \left(\frac{n_0}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{E_0}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{M_{\text{ej}}}{10^{33} \text{ g}} \right)^{\frac{5}{6}}, \quad (2)$$

其中 n_0 为周围星际介质数密度, E_0 为超新星爆发释放的动能, M_{ej} 为超新星抛射物的质量. Sarbadhichary等人结合G1.9+0.3的年龄、大小、膨胀速度和射电流量密度等观测特征, 利用数值模拟限制超新星的物理参数^[23]. 他们发现, 星际介质的数密度约为 $n_0 = 0.18 \text{ cm}^{-3}$, 释放的动能 E_0 和抛射物的质量 M_{ej} 取值范围分别为 $E_0 = (0.8 - 1.4) \times 10^{51} \text{ erg}$ 、 $M_{\text{ej}} = 0.6 - 1.5 M_{\odot}$ 或者 $E_0 = (1 - 1.3) \times 10^{51} \text{ erg}$ 、 $M_{\text{ej}} = 1 - 1.4 M_{\odot}$, 但是并不能排除更小的 E_0 和 M_{ej} . 根据他们模拟的几种情况, 当 $M_{\text{ej}} = 0.2 M_{\odot}$ 、 $E_0 = 0.32 \times 10^{51} \text{ erg}$ 时, 达到流量密度峰值的年龄 $t_0 \lesssim 200 \text{ yr}$, 与观测结果相符合. 把这组参数代入(2)式得到 $t_0 \approx 150 \text{ yr}$, 与数值模拟结果和观测一致.

我们在本文中整理了超新星遗迹G1.9+0.3的射电观测获得的流量密度, 转换到同一频率, 从而获得了该超新星遗迹的流量密度在近50 yr内的演化. 我们发现G1.9+0.3的流量密度先增加后减小, 转折点发生在年龄为150–155 yr左右. 结合理论和数值模拟, 我们讨论了超新星抛射物的质量和超新星爆发释放的动能.

参 考 文 献

- [1] Dubner G, Giacani E. A&ARv, 2015, 23: 3
- [2] Green D A, Gull S F. Nature, 1984, 312: 527
- [3] Green D A, Reynolds S P, Borkowski K J, et al. MNRAS, 2008, 387: L54
- [4] Reynolds S P, Borkowski K J, Green D A, et al. ApJL, 2008, 680: L41
- [5] Tammann G A, Löffler W, Schröder A. ApJS, 1994, 92: 487
- [6] Cappellaro E. Supernova rates//Weiler K W. Supernovae and Gamma-Ray Bursters. Berlin: Springer, 2003: 37-46
- [7] Woltjer L. ARA&A, 1972, 10: 129

- [8] Murphy T, Gaensler B M, Chatterjee S. MNRAS, 2008, 389: L23
- [9] Clark D H, Crawford D F. AuJPh, 1974, 27: 713
- [10] Altenhoff W J, Downes D, Pauls T, et al. A&A, 1979, 35: 23
- [11] Caswell J L, Haynes R F, Clark D H. AuJPh, 1975, 28: 633
- [12] Reich W, Fuerst E, Haslam C G T, et al. A&AS, 1984, 58: 197
- [13] Gray A D. MNRAS, 1994, 270: 835
- [14] LaRosa T N, Kassim N E, Lazio T J, et al. AJ, 2000, 119: 207
- [15] Griffith M R, Wright A E, Burke B F, et al. ApJS, 1994, 90: 179
- [16] Condon J J, Cotton W D, Greisen E W, et al. AJ, 1998, 115: 1693
- [17] Murphy T, Mauch T, Green A, et al. MNRAS, 2007, 382: 382
- [18] Luken K J, Filipović M D, Maxted N I, et al. MNRAS, 2020, 492: 2606
- [19] Hillas A M. APh, 2013, 43: 19
- [20] Chevalier R A. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1996, 93: 125
- [21] Rohlfs K, Wilson T L. 射电天文工具. 姜碧涛, 译. 北京: 北京师范大学出版社, 2008: 236-241
- [22] Borkowski K J, Gwynne P, Reynolds S P, et al. ApJ, 2017, 837: L7
- [23] Sarbadhicary S K, Chomiuk L, Badenes C, et al. ApJ, 2019, 872: 191
- [24] Peng Q Y, Bao B W, Yang C Y, et al. ApJ, 2020, 891: 75
- [25] Pavlović M Z. MNRAS, 2017, 468: 1616
- [26] Chakraborti S, Childs F, Soderberg A. ApJ, 2016, 819: 37
- [27] Weiler K W, Sramek R A, Panagia N, et al. ApJ, 1986, 301: 790
- [28] Cowsik R, Sarkar S. MNRAS, 1984, 207: 745

The Evolution of Radio Flux Densities of Supernova Remnant G1.9+0.3

CHEN Xin SUN Xiao-hui

(School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650500)

ABSTRACT Radio observations of young supernova remnants (SNRs) can shed light on the early evolution of SNRs. We selected G1.9+0.3 which is the youngest SNRs in the Milky Way Galaxy for a study. We compiled the radio flux densities currently available and converted them to the same frequency, which leaves us the evolution of the flux densities for the past nearly 50 years. We found that the flux densities increase before 2008 and decrease afterwards, meaning the flux densities reaching the maximum at an age of about 150–155 yr. We attributed the brightening of the SNR to the increase of either magnetic field or the accelerated high energy electrons. Based on the age at which the flux density reached the peak, combined with the previous numerical simulation, we discussed the ejecta mass of the supernova and kinetic energy released by the supernova explosion.

Key words ISM: supernova remnants, radio continuum: ISM, radiation mechanisms: non-thermal, shock waves, acceleration of particles