第 46 卷 第 2 期 天 文 学 报 Vol.46 No.2
2005 年 4 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Apr., 2005

伴有 OH 1720 MHz 脉泽发射的混合形态超新星遗迹的 X 射线特征研究*

俞志尧

(中国科学院上海天文台 上海 200030)
(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘要 在银河系中，超新星遗迹的射电巡视揭示了 19 个伴有 OH 1720 MHz 脉泽发射的超新星遗迹. 在从超新星遗迹膨胀到分子云的激波波面的后面产生了这一类不寻常的脉泽源. 这个模型的重要点是从超新星遗迹来的 X 射线促使产生 OH 分子. 研究伴有 OH 1720 MHz 脉泽发射的混合形态超新星遗迹的 X 射线特征是很重要的. 研究了这 19 个伴有 OH 1720 MHz 脉泽发射的混合形态超新星遗迹的 X 射线特征. 得到了这些源的 X 射线物理参数之间的一些相关关系和反相关关系. X 射线电离率 ζ 与 θ 、 D 、 r 、 r^2 等物理量均不相关，而与 L_x 之间存在着正相关关系. 另外超新星遗迹的 X 射线光度与相伴的 OH 1720 MHz 脉泽的最弱的束流量密度之间存在着紧密的正相关关系. 这些都说明从超新星遗迹来的 X 射线发射足够在激波波阵面后面分解水分子并产生 OH 1720 MHz 脉泽.

关键词 星际介质：超新星遗迹，微波激射：超新星遗迹， X 射线：星际介质
中图分类号： P 155.2; **文献标识码**： A

1 引言

超新星遗迹与分子云之间的相互作用是组成银河系形态的重要因素. 这种相互作用在银河系中是很普遍的，因为巨星在它们的短暂生命期间没有离开其母本星系迁移到远的地方去. 超新星爆发时会驱动激波到其周围的分子云中去. 这种激波是热的和移动的，它可以改变云的化学演化和可能触发恒星形成.

OH 1720 MHz 脉泽的呈现提供了超新星遗迹与分子云之间相互作用的有力证据 [1,2]. 那种脉泽能够在温度为 50—125 K 、密度约为 $10^5\,\mathrm{cm}^{-3}$ 的气体中发生. 这样的条件可在激波分子气体中产生 [3,4]. 在激波气体中 OH 丰度必须满足以下条件 $\mathrm{OH/H_2}\geq 10^{-6}$, 因为充满超新星遗迹邻空间的 X 射线会分解包含在热气体中的水分子而生成足够的 OH 脉泽分子. 到目前为止有 19 个超新星遗迹中包含了 OH 1720 MHz 脉泽 [5−8]. 当超新星遗迹向着分子云膨胀时在激波阵面的后面会产生这种 OH 1720 MHz 的脉泽.

超新星遗迹的 X 射线的形态也使得我们相信它是与分子云或致密的原子气体相互作用的结果 [9]. 超新星遗迹的 X 射线形态可以划分为壳状、蟹状和包含菊状的壳状 (有时

2004-07-22 收到原稿， 2004-08-19 收到修改稿
* 国家自然科学基金 (19673013) 资助项目

被称为混合状)[10], 上面所叙述的模型预示了从超新星遗迹来的 X 射线会加速 OH 分子的产生. 研究伴有 OH 1720 MHz 脉泽发射的混合形态的超新星遗迹的 X 射线的特征是非常重要的.

2 X 射线观测特征的研究

从超新星遗迹来的 X 射线在 C 型激波后分解出水分子而产生 OH 1720 MHz 脉泽. 具体的气相反应的方程如下:

$$\mathrm{H} + \mathrm{H_2O} \xrightarrow{\text{X 射线}} \mathrm{OH} + \mathrm{H_2}\,.$$

X 射线分解水分子产生足够的 OH 柱密度生成 OH 脉泽. 这种分解过程的电离率 ζ 必须满足以下的条件 $\zeta \geq 10^{-16}\mathrm{s}^{-1}$[11]. 在超新星遗迹边缘处的 X 射线电离率可以引用下式来估计: $\zeta = Ne\sigma F_x$[12], 其中 $Ne = 30\,\mathrm{KeV}^{[-1]}$ 是每单位能量 X 射线的湮灭而产生的电子平均数, $\sigma \approx 2.6 \times 10^{-22}\,\mathrm{cm}^2$ 是 1 KeV 的 X 射线光子被吸收的横截面积, F_x 是 X 射线在超新星遗迹边缘处的强度.

伴有 OH 1720 MHz 脉泽发射的 19 个超新星遗迹的 X 射线的物理参数在表 1 中给出[13].

表 1 伴有 OH 1720 MHz 脉泽发射的 19 个超新星遗迹的 X 射线的物理参数 [13]

Table 1 The physical parameters of X ray of the 19 supernova remnants accompanied by OH maser emission at 1720 MHz[13].

名称 name	θ (arcmin)	D (kpc)	r (pc)	L_x ($10^{35}\mathrm{ergs\,s^{-1}}$)	F_x ($10^{-5}\,\mathrm{ergs\,s^{-1}\,cm^{-2}}$)	ζ ($10^{-16}\,\mathrm{s^{-1}}$)
G0.0+0.0 (SgrA East)	2.5	8.5	3	0.8	8	3.9
G6.4-0.1 (W28)	42	1.8	22	0.6	4.7	2.3
G31.9-0.0(3C391)	8	9	10.5	17	13	6.3
G34.7-0.4(W44)	30	3	13	19	9.3	4.5
G49.2-0.7(W51C)	23	6	20	86	18	8.8
G189.1 + 3.0(IC443)	50	1.5	11	11	7.5	3.6
G359.1-0.5	10	8.5	12	2	1.2	0.6
G1.05-0.1(Sgr D)	8	8.5				
G16.7+0.1	2	2/14				
G21.8-0.6(Kes 69)	14	11.2				
G349.7+0.2	2	>11				
G357.7+0.3(Square)	24	6.4				
G357.7-0.1(Tornado)	5	>6				
G337.8-0.1(Kes 41)	5	12.3				
G346.6-0.2	8	5.5/11				
G1.4-0.1	10	8.5				
G32.8-0.1(Kes 78)	20	5.5/8.5				
G337.0-0.1(CTB33)	3	11				
G348.5+0.1(CTB37A)	10	11				

表 1 把 19 个超新星遗迹分成 3 组. 其中第 1 组 7 个超新星遗迹有混合型态的对应物，它们有详细的 X 射线的观测资料，第 2 组 8 个超新星遗迹虽然已有 X 射线观测，但没有详细的 X 射线观测资料，需要作进一步观测，第 3 组为其余 4 个超新星遗迹则还没有经过 X 射线观测. 在表 1 中 θ 为这些源的 X 射线角直径的平均几何值， D 为超新星遗迹的距离， r 为这些源的 X 射线线半径 ($r = 0.5D \times \theta$), L_x 为这些源的 X 射线光度， F_x 为在超新星遗迹边缘处的 X 射线强度， $F_x \approx L_x/(4\pi r^2)$. ζ 为被估计的电离率 $\zeta = 30/\mathrm{KeV} \times 2.5 \times 10^{-22} \times F_x$. 现在我们研究表 1 中这些超新星遗迹的物理参数之间的相关关系.

图 1 给出 $\theta \sim D$ 之间存在着反相关关系，反相关系数为 0.84. 它表明 X 射线角直径 θ 与超新星遗迹的距离成反相关关系. 图 2 给出 $D \sim r$ 之间存在着反相关关系，反相关系数为 0.50. 由于图 2 给出的反相关系数的值比较小，因此它的可信度也很小的. 图 2 研究 X 射线半径 r 与超新星遗迹的距离关系，由于 $r \equiv 0.5D\theta$, 而 θ 和 D 反相关， $r \sim D$ 之间关系难以论断. 图 3 给出 $\zeta \sim L_x$ 之间存在着正相关关系，正相关系数为 0.85. 图 3 超新星遗迹边缘处的 X 射线电离率 ζ 与 L_x 的正相关支持了文 [12] 的 $\zeta \propto F_x$ 的推论. 图 4 给出 $L_x \sim F_x$ 之间存在着正相关关系，正相关系数为 0.84. 图 4 的 X 射线光度 L_x 与超新星遗迹边缘处的 X 射线强度的正相关应是预料中的， $F_x \approx L_x/(4\pi r^2)$.

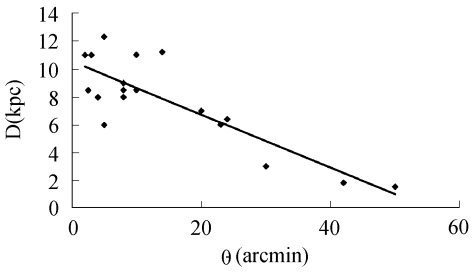

图 1　$\theta \sim D$ 之间的关系

Fig. 1　Relationship between θ and D

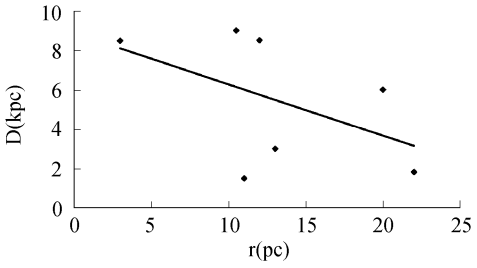

图 2　$D \sim r$ 之间的关系

Fig. 2　Relationship between D and r

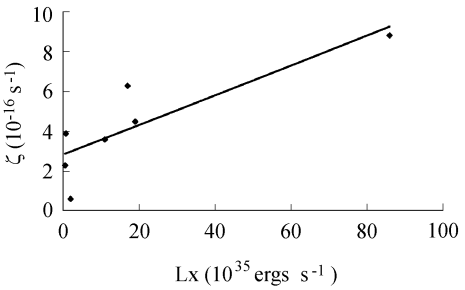

图 3　$\zeta \sim L_x$ 之间的关系

Fig. 3　Relationship between ζ and L_x

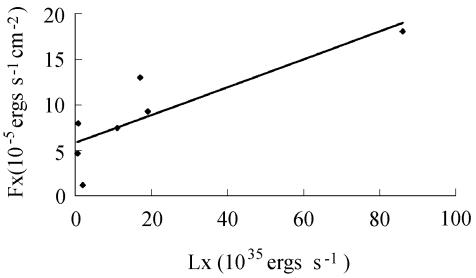

图 4　$L_x \sim F_x$ 之间的关系

Fig. 4　Relationship between L_x and F_x

3 OH 1720 MHz 脉泽和 X 射线

在表 1 中第 1 组的 7 个超新星遗迹伴有 OH 1720 MHz 脉泽发射. 同时具有较完整的 X 射线的观测数据, 文 [5,6,8,14] 用 VLA 等高分辨率观测设备对表 1 第 1 组 7 个超新星遗迹除 G359.1-0.5 以外的 6 个超新星遗迹所伴随的 OH 1720 MHz 脉泽发射进行了高分辨率观测, 得到了上述 6 个超新星遗迹所伴随的 OH 1720 MHz 脉泽的许多谱征的物理参数.

根据脉泽辐射的转移理论, 我们知道脉泽发射强度与脉泽分子的密度及相干长度有关, 观测得到这 6 个 OH 1720 MHz 脉泽源的谱征来自于各脉泽源的不同位置, 因此形成这些谱征的脉泽分子密度和相干长度各不相同, 假设由 X 射线分解水分子而产生的 OH 脉泽分子的密度对于各脉泽生成区来说变化不大的话, 那么这些谱征的强度的不同主要是由于谱征所形成的区域的相干长度不同而引起的. 那些强的谱征的相干长度长, 反之弱的谱征的相干长度短. 所以弱谱征的强度的相干长度比较小可能主要取决于 OH 脉泽分子的密度. 我们研究的 6 个与超新星遗迹相伴 OH 1720 MHz 脉泽的最弱的谱征可能从另一角度反映 X 射线分解水分子产生 OH 1720 MHz 脉泽分子的能力.

表 2 相关源的 OH 1720 MHz 最弱谱征与相应的 X 射线的物理参数 [5,6,8,14]

Table 2 The physical parameters of the weakest feature of OH 1720 MHz maser and the corresponding X ray of relative sources[5,6,8,14]

源名称 source name	OH 1720 MHz 最弱谱征的束流量 beam flux of the weakest feature of OH 1720 MH_2 (Jy/beam)	X 射线光度 Luminosity of X-ray $L_x(10^{35}\,\mathrm{ergs\,s^{-1}})$
G0.0+0.0(SgrA East)	0.12	0.8
G6.4-0.1(W28)	0.12	0.6
G31.9-0.0(3C391)	0.028	17
G34.7+0.4(W44)	0.04	19
G49.2-0.7(W51C)	1.4	86
G189.1+3.0(IC443)	0.045	11

根据表 2, 图 5 给出超新星遗迹的 X 射线光度与其相伴的 OH 1720 MHz 脉泽的最弱谱征的束流量密度之间存在着正相关关系, 正相关系数为 0.95.

4 讨论

(1) X 射线所诱发的气体电离的电离率 ζ 是一个重要的物理量. 我们研究了 ζ 与 θ 、D 、r 、r^2 等物理量均不相关. 而唯独图 3 给出的 ζ 与 L_x 之间存在着正相关关系. 这表明, 在 L_x 大的超新星遗迹周围的分子云气体中电离率高, 产生的 OH 脉泽分子的柱密度大, 反之亦然. 根据 Wardle[12] 的研究结果, X 射线所诱发的气体的电离率 ζ 必须满足下列条件 $\zeta \geq 10^{-16}\,\mathrm{s^{-1}}$, 表 2 和图 3 的结果显示了在假设的条件下, 那些已观测到伴

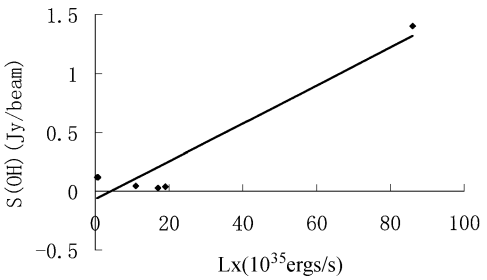

图 5　超新星遗迹的 X 射线光度与其相伴的 OH 1720 MHz 脉泽的最弱谱征的束流量密度之间的关系

Fig. 5　The relationship between X ray luminosity and beam flux density of the weakest feature of OH maser emission at 1720 MHz accompanied by SNRs

有 OH 1720 MHz 的超新星遗迹的气体电离率多数超过 $10^{-16}\mathrm{s}^{-1}$, 图 3 的结果是可以理解的. 当 L_x 越大时每单位时间内 X 光子的能量越多. 由 X 光子分解水分子产生的 OH 分子的气相反应, 从 (1) 式可知, 每单位时间内电离能力越强, 电离率就越大. 反之亦然.

(2) 从表 1 和图 5 可知超新星遗迹的 X 射线光度与其相伴的 OH 1720 MHz 脉泽的最弱谱征的束流量密度之间存在着紧密的正相关关系. X 射线加热分子气体可以在温暖的尘埃介质中提高脉泽的碰撞激发. 同时 X 射线可以分解水分子而产生 OH 1720 MHz 脉泽分子. 所以 X 射线起着两种作用：一是可以分解水分子而产生 OH 1720 MHz 脉泽分子；二是可以加热气体使得分子气体在温暖的尘埃介质中增加碰撞的几率, 从而提高抽运 OH 脉泽分子的能力.

(3) 由于具有详细 X 射线观测资料的样品只有 7 个, 统计的可靠性会受制约. 进一步加强对伴有 OH 1720 MHz 脉泽发射的超新星遗迹的 X 射线的观测是必要的.

参 考 文 献

1　Frail D A, Goss W M, Slysh V I. ApJ, 1994, 424: L111
2　Wardle M, Yusef-Zadeh F. Science, 2002, 296: 2350
3　Elitzur M. ApJ, 1976, 203: 124
4　Lockett P, Gauthier E, Elitzur M. ApJ, 1998, 511: 235
5　Frail D A, Goss W M, Reynoso E M, et al. AJ, 1997, 11: 1651
6　Green A J, Frail D A, Goss W M, et al. AJ, 1997, 114: 2058
7　Koralesky B, Frail D A, Goss W M, et al. AJ, 1999, 116: 1323
8　Yusef-Zadeh F, Roberts D A, Goss W M, et al. ApJ, 1999, 512: 230
9　Rho J, Petre R. ApJ, 1998, 503: L167
10　Seward F D. Comments Astrophys, XI, 1995, 1: 15
11　Rho J. Ph D thesis, Univ Maryland, 1995
12　Wardle M. ApJ, 1999, 525: L101
13　Yusef-Zadeh F, Wardle M, Rho J, et al. ApJ, 2003, 585:319
14　Claussen M J, Frail D A, Goss W M. ApJ, 1997, 489: 143

A study of X-ray characteristics of mixed -morphology supernova remnants accompanied by OH maser emission at 1720 MHz

YU Zhi-yao
(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200030)
(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

Abstract Radio surveys of supernova remnants (SNRs) in the Galaxy have discovered 19 SNRs accompanied by OH maser emission at 1720 MHz. These unusual maser sources are suggested to be produced behind a shock front from the expansion of a supernova remnant running into a molecular cloud. An important ingredient of this model is that X-ray emission from the remnant enhances the production of OH molecules. To study X-ray characteristics of mixed-morphology supernova remnants accompanied by OH maser emission at 1720 MHz is very important. The X-ray characteristics have been studied. Some corrlations and anti-correlations among the X-ray physical parameters have been obtained. The ionization rate of X-ray is not correlated with θ, D, r, r^2, respectively, but it is correlated with X-ray luminosity L_x. Meantime L_x is correlated with the beam flux density of the weakest feature of OH maser emission at 1720 MHz accompanied by SNRs very well. These mean that the X-ray emission from the SNRs is sufficient to dissociate water molecules behind a shock front and produce the OH 1720 MHz masers.

Key words ISM: supernova remnant, masers: supernova remnant, X-ray: ISM