# 关于年轻实心型超新星遗迹和 $L_x$-$\dot{E}$ 统计关系*

陈 阳 曲钦岳 汪珍如

(南京大学天文系，南京 210008)

**关键词** 超新星遗迹、蟹状星云、X射线源

## 一、引 言

类蟹状星云型(实心型)超新星遗迹是含有中子星或脉冲星的一类遗迹. 它的膨胀演化，普遍认为是由它的脉冲星驱动的[1-3].

汪珍如和 Seward[4-6] 对 Einstein 天文台的观测资料做了分析，发现脉冲星和同步加速云的软X射线光度 $L_x$ (0.2—4keV) 与脉冲星的能损率 $\dot{E}$ 之间，存在一个统计关系:

$$\log L_x = \alpha \log \dot{E} + \beta, \tag{1}$$

式中 $\alpha$ 在 1.3—1.4 之间，$\beta$ 在 −13.2——16.6 之间. $L_x$ 和 $\dot{E}$ 的单位均为 $10^{-7}$W.

Reyonolds 和 Cheva lier[7](简称 RC)对这类遗迹的演化提出了如下的理论模型: II 型超新星爆发抛射向外膨胀的快速壳层和慢速核. 脉冲星不断注入的相对论性粒子和磁场构成一个泡，其注入能量与时间的关系是[7,8]

$$L(t) = L_0(1 + t/\tau)^{-p}, \tag{2}$$

式中 $L_0$ 为初始注入能量，$p = (n+1)/(n-1)$ 而 $n = \Omega\ddot{\Omega}/\dot{\Omega}^2$ 为脉冲星的制动指数，$\tau$ 是脉冲星的特征减速时标～300—700 年. 泡因同步加速辐射和膨胀做功而损失能量，其演化分下述四个相:(1)泡膨胀进入慢速核，直到扫光慢速核或 $t = \tau$;(2)若核先于 $t = \tau$ 被扫光，则泡的壳层以不变的质量继续得到能量并加速;(3)从 $t = \tau$ 开始，脉冲星注入的能量开始锐减;(4)当 $t = t_r$($\sim 1.3 \times 10^4$年)，反激波从快速壳层传回. 在能量不均分的情形下，RC 解释了五个遗迹的射电 $\Sigma$-$D$ 关系. 然而不能据此同时拟合X射线光度和谱型.

本文引进二流模型，采用 RC 的电子能谱演化理论，就较年轻的实心型遗迹近似地得到 $L_x$-$\dot{E}$ 关系，而且预言了这些遗迹在高能波段的谱指数.

## 二、二流模型及高能辐射

RC 建议引入双流模型. 一支粒子流由中子星加速，影响泡的动力学演化，发出射电辐射;另一支是在脉冲星风带或脉冲星风激波上加速，谱指数～2 或更大，基本上不影响动力学演化，发出X射线辐射. 沿用 Pacini、Salvati[8] 和 RC[7] 的想法，假设这两支电子流分别为·

本文 1991 年 1 月 25 日收到. 1991 年 6 月 30 日收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目.

$$J_1(t,E) = J_{10}\left[\frac{L(t)}{L_0}\right]E^{-(2z_r+1)}$$

$$\left(m_e c^2 < E < E_{1\max},\ 0 < z_r < \frac{1}{2}\right), \tag{3}$$

$$J_{11}(t,E) = J_{110}\left[\frac{L(t)}{L_0}\right]E^{-2z_x}$$

$$(E_{11\min} < E < E_{11\max},\ 2z_x \gtrsim 2). \tag{4}$$

而且，$E_{1\max} \sim 1 \times 10^{-7}$J[7]，第一支的同步加速辐射终止于光学波段。在能量不均分的情形下，假设注入的电子能量与磁场能量有固定比值：$R_{e1} = L_{e1}/L_B$。两支电子流的能谱及光度应各自满足 RC 得到的演化规律，泡的动力学演化则与单流情形一样。

汪珍如和 Seward[4-6] 用以确立统计关系(1)的遗迹，年龄正处于 $\tau$ 和 $t_r$ 之间即第三相，如 Crab、LMC 0540、MSH 15—52 和 Vela，它们的特征时标的常用对数值分别为 3.09、3.22、3.19 和 4.05[9]；CTB80 的年龄也小于 $10^4$ 年[10-14]。鉴于 Einstein 和 EXOSAT 天文台已观测过的遗迹中，第三相的样本比较齐全，本文只讨论处于第三相的遗迹。

设辐射损失时标等于泡的动力学时标的电子能量称为折点能量 $E_b$。$E_b = (c_1 B^2 t)^{-1}$，$c_1 = \frac{4e^4}{9m_e^4c^7}$[7]。折点频率 $\nu_b = 1.82 \times 10^{18}E_b^2 B$。对蟹状星云，$B \sim 10^{-7}$T[15]，$t = 937$年，则 $\nu_b \sim 10^{12}$Hz，远小于软X射线频率。设第二支电子流的电子能量 $E > E_{11\min} > E_b$，用同步加速辐射的损失，数密度为 $N_{11}(E,t) \propto E^{-(2z_x+1)}$。第三相的X射线光度为[7]

$$L_{x\nu} = A_x t^{l_x} \nu^{-z_x}, \tag{5}$$

其中

$$l_x = b(1 - z_x) - p, \tag{6}$$

$$A_x = \frac{+\pi c_i J_{110} c^{p-2b} A_B^{z_x+1}}{c_1(2z_x - 1)B^2(\tau)}, \tag{7}$$

$b$、$A_B$ 由磁场演化公式 $B(t) = A_B t^{-b}$ 给出，$c_i = 1.35 \times 10^{-22}(6.26 \times 10^{18})^{z_x} a_{2z_x+1}$，$a_{2z_x+1}$ 可在一般的同步加速辐射公式中查到。

由第二支电子流发出的频率在$(\nu_1, \nu_2)$间的X射线光度为

$$L_x' = A_x\left(\int_{\nu_1}^{\nu_2} \nu^{-z_x} d\nu\right)t^{l_x}. \tag{8}$$

另一方面，在第三相 $t > \tau$，(2)式可写成

$$\dot{E} = L(t) \approx L_0(t/\tau)^{-p}. \tag{9}$$

从(8)、(9)两式得到。

$$\log L_x \simeq \log L_x' = \left[1 + \frac{b}{p}(z_x - 1)\right]\log \dot{E} + k, \tag{10}$$

式中

$$k = \log A_x + \log \int_{\nu_1}^{\nu_2} \nu^{-z_x} d\nu - [p + b(z_x - 1)]\log(L_0^{\frac{1}{p}}\tau). \tag{11}$$

(8)式中的 $L_x'$ 是泡的辐射，在实心型遗迹X射线的辐射中占统治地位，例如蟹状星云、Vela、1055-52 等的脉冲辐射比总的 $L_x$ 小两个量级或更多[9]，可以认为 $L_x \simeq L_x'$。比较(10)和(11)式，得

$$1+\frac{b}{p}(z_x-1)\simeq\alpha, \tag{12}$$

$\alpha$ 可取平均值 1.35[4-6]，对第三相有 $b=2$[7]。对纯偶极辐射的脉冲星，$p=2$；实际上 $p$ 一般也在 2 附近[16]。从(12)式可以得到谱指数 $z_x\sim 1.3$—1.4。实测的谱指数是：蟹状星云，1.05—1.15；3c 58，1.04—1.56；Vela，1.09—1.34[17]；MSH 15—52，$1.5\pm1.3$[18,19]；CTB80，$0.9\pm0.5$[20] 或 $1.7^{+0.2}_{-0.6}$[11]。这些值及其算术平均值～1.3，均与上述结果基本符合。由激波加热的电子预计出现 $\sim E^{-2}$ 或更陡的幂律谱，即 $2z_x\gtrsim 2$[7]，这也与本结论吻合。

比较(10)与(1)式，还可知 $k\sim\beta$ 约为常数。(11)式中，谱指数 $z_x\sim 1.3$—1.4，$b=2$ 和 $\nu_1$、$\nu_2$ 均为常数，故统计关系(1)的确立表明 $p$、$\tau$、$L_0$ 和 $A_x$ 等均与各自的典型值偏离不大。因此，对于年龄在 $10^2$—$10^4$ 年之间的实心型遗迹，理论关系(10)就对应于实测的统计关系(1)。

于是有一个明显的推论：如果在第二支电子流的辐射频率范围，在不同于 0.2—4keV 的其他波段观测上述遗迹，得到的 $\log L_x-\log\dot{E}$ 曲线将有基本相同的斜率，因为确定斜率 $\alpha$ 的(12)式与观测波段无关。

第二支电子流是否影响泡的动力学演化，取决于电子的能量密度。电子密度为[7]

$$N_{\mathrm{II}}(E,t)=\frac{3J_{\mathrm{II}0}\tau^{p-2b}}{4\pi c_1(2z_x-1)B^2(\tau)A_3^R}E^{-(2z_x+1)}t^{2b-p-3}, \tag{13}$$

其中 $A_R$ 来自泡的半径 $R=A_Rt$。对应的能量密度

$$\begin{aligned}u_{\mathrm{II}0}&=\int_{E_{\mathrm{II}\min}}^{E_{\mathrm{II}\max}}N_{\mathrm{II}}(E,t)E\,dE\\&\simeq\frac{3J_{\mathrm{II}0}\tau^{p-2b}}{4\pi c_1(2z_x-1)^2B^2(\tau)A_R^3}E_{\mathrm{II}\min}^{1-2z_x}t^{2b-p-3}.\end{aligned} \tag{14}$$

要使第二支电子流不影响泡的演化，须 $u_{\mathrm{II}0}\ll u_B=B^2(t)/8\pi$，故得限制条件：

$$E_{\mathrm{II}\min}\gg\left[\frac{6J_{\mathrm{II}0}\tau^{p-2b}t^{2b-p-3}}{c_1(2z_x-1)^2B^2(\tau)B^2(t)A_R^3}\right]^{\frac{1}{2z_x-1}}. \tag{15}$$

本文对第二流的假设是满足上述限制的。

## 三、结　论

(1) 在双电子流情形下，对于年龄为 $10^2$—$10^4$ 年的实心型遗迹，近似地得到汪珍如和 Seward 给出的 $L_x$-$\dot{E}$ 关系。

(2) 在动力学上不影响泡演化的第二支电子流完全具备存在的可能性。

(3) 预计这些较年轻的实心型遗迹在其它高能波段的辐射，都有一个谱指数为～1.35 的陡谱和斜率近似为 1.35 的 $\log L-\log\dot{E}$ 关系。

## 参　考　文　献


[1] Chevalier, R. A., *Ap. J.*, 207(1976), 872.

[2] Weiler, K. W., *The Crab Nebula and Related Supernova Remnants* (Eds. Kafatos, M. & Henry, R.), Cambridge Univ. Press, London, 1985, 265.

[3] Weaver, T. A. & Woosley, S. E., *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 336(1980), 335.

[4] Wang, Z. R. & Seward, F. D., *Vistas in Astronomy*, 31(1988), 271.

[5] ————, *Acta Astronomica Sinica*, 29(1988), 33.

[6] Seward, F. D. & Wang, Z. R., *Apl. J.*, 332(1988), 199.

[7] Reynold, S. P. & Chevalier, R. A., *ibid*., **278**(1984), 630.
[8] Pacini, F. & Salvati, M., *ibid*., **186**(1973), 249.
[9] Seward, F. D., *Spa. Sci. Rev*., **49**(1989), 385.
[10] Strom, R. G., Angerhofer, P. E. & Dickel, J. R., *Astron. Astrophys*., **139**(1984), 43.
[11] Wang, Z. R. & Seward, F. D., *Ap. J*., 285(1984), 607.
[12] Blair, W. P. et al., *Ap. J*., 282(1984), 161.
[13] Strom, R. G. & Blair, W. P., *Astron. Astrophys*., 148(1985), 259.
[14] Ögelman, H. & Buccheri, R., *ibid*., **186**(1987), L17.
[15] Fazio, G. G. et al., *Ap. J*., 175(1972), L117.
[16] Manchester, R. N. & Peterson, B. A., *ibid*., 342(1989), L23.
[17] Davelaar, J. & Smith, A., *The Crab Nebula and Related Supernova Remnants* (Eds. Kafatos, K. & Henry, R.), Cambridge Univ. Press, London, 1985, 219.
[18] Seward, F. D. et al., *Ap. J*., 281(1984), 650.
[19] Chiappetti, L. & Bell-Burnell, S. J., *M. N. R. A. S*., 201(1982), 1025.
[20] Angelini, L. et al., *Ap. J*., 330(1988), L43.