

脉冲星风的多波段非热辐射

张 力

云南大学

2017 年1月



内容提要

一、引言

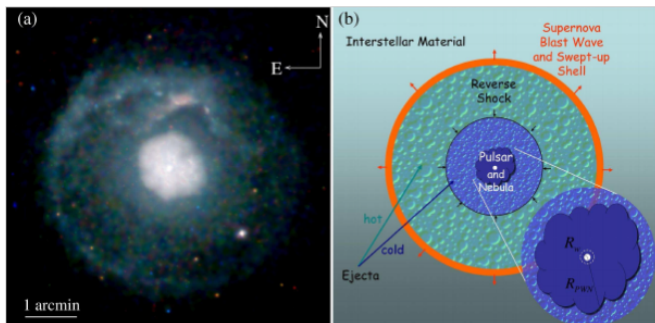
二、空间均匀的辐射模型

三、空间相关的辐射模型

四、结论

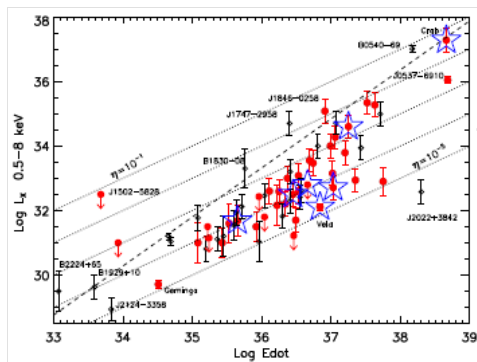
一、引言

脉冲星风云（PWNe）：当脉冲星的相对论性风与其环境相互作用时产生的被激波的相对论性粒子的一个气泡。（A bubble of shocked relativistic particles, produced when a pulsar's relativistic wind interacts with its environment）（Gaensler & Slane, 2006, ARAA, 44:17-47）。

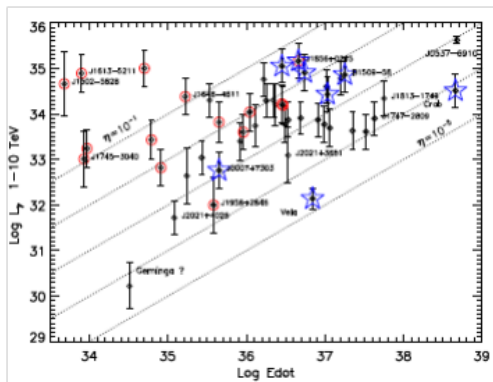


1. 近期重要观测结果：91个已知的PWNe和PWN候选者，大部分最初在X射线中被找到，X射线源，其中54个与银河VHE源成协，TeV源，（Kargaltsev et al.arXiv:1395.2552）。揭示了许多特征，如

- 较年轻的脉冲星有更亮的X射线PWNe。



- TeV PWN光度不显示与年龄的明显相关性。



- 5个高置信度的PWNe由Fermi LAT观测到，GeV 源(Acero et al. 2013,arXiv: 1306.5735)。

用大于10 GeV能量的Fermi-LAT数据，在银面的5度内寻找58个TeV PWNe 和UNIDs的位置符合，30个被探测到。其中

- 11是PWNe候选者。
- 3个被清楚地证认为PWNe: HESS J1825-137, HESS J1514-591 (MSH15-52)和HESS J1356-645。

为什么GeV PWNe那么少？

2. 理论聚焦：

加速机制：相对论性激波、磁重联，

Crab伽马射线耀发的起源：迷！

1D \rightarrow 2D \rightarrow 3D：磁流体动力学模拟。

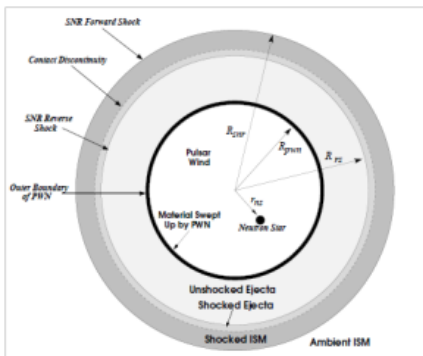
- 转动驱动的脉冲星（RPPs）和其脉冲星风云（PWNe）是最高能粒子的宇宙加速器。
- 通过对光子发射的模型，提供了具有能量直到几个PeV的电子和（可能的）正电子的证据。
- 超高能宇宙线的源。

3. 基本图像:

- 脉冲星产生由电子和正电子和可能的一个强子分量组成的高相对论性的风。脉冲星的磁场被冻结于外流的风。当风的ram压力等于周围介质的限制的压力时，一个终端激波被形成，其中荷电粒子被重新加速。
- 在终端激波的下流，电子（和正电子）与冻结的磁场相互作用，导致从射电到X射线波段被观测到的同步辐射。此外，电子也可IC散射周围光子到高能（HE）和甚高能（VHE）伽玛射线波段。
- 非热发射导致一个亮的星云，通常称为脉冲星风云(PWN)。

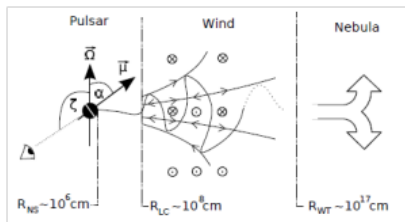
★ 脉冲星风云的演化:

- 自由膨胀阶段，当脉冲星风云遭遇遗迹的反向激波时，该阶段结束。
- 星风云在反向激波的影响下，经历膨胀与压缩的反复阶段，这阶段中心脉冲星可离开星风云，不再提供能量，使星风变为“残骸”星云，在脉冲星周围形成一新的脉冲星风云。
- 该过程的三个重要的区域：脉冲星、脉冲星风、星云。



★ 年轻PWNe的图示：反向激波和脉冲星自身速度的影响可略。

- **脉冲星和其磁层：** $R_{LC} = cP/2\pi$ ，从该区发射脉冲星风。
- **冷脉冲星风：** 在该区中脉冲星风是无辐射的流动，直到与超新星抛出物的相互作用在 R_{WT} 处结束。
- **同步辐射星云：** 该区从风终端点延伸到外部星云。



PWN非热发射的模型可允许人们限制周围压力、脉冲星-风电子密度、被注入的电子的SED的边界能量和形状、真实的PWN年龄、风中离子的份额和对产生多重性。

二、空间均匀的辐射模型

以脉冲星风云一维动力学及多波段辐射演化模型为例（Fang & Zhang, 2010, A&A）。

- PWN的演化：基于SNR内PWN的演化的流体动力学模型（Gelfand et al. 2009, ApJ）。
- 发射区粒子分布由下式确定：

$$\frac{\partial N(E, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial E} \left[\dot{E}(E, t) N(E, t) \right] + Q(E, t), \quad (2.1)$$

其中， \dot{E} 是能量为 E 的粒子的能量损失率：

$$\dot{E}(E, t) = \dot{E}_{\text{syn}}(E, t) + \dot{E}_{\text{ic}}(E) + \dot{E}_{\text{ad}}(E, t), \quad (2.2)$$

$\dot{E}_{\text{syn}}(E, t)$ 为粒子同步辐射损失率， $\dot{E}_{\text{ic}}(E)$ 为粒子的逆康普顿损失率，绝热辐射损失率 $\dot{E}_{\text{ad}}(E, t) = -v_{\text{pwn}}/R_{\text{pwn}}E$ 。

- 注入谱为非热幂律尾的相对论性的Maxwellian谱:

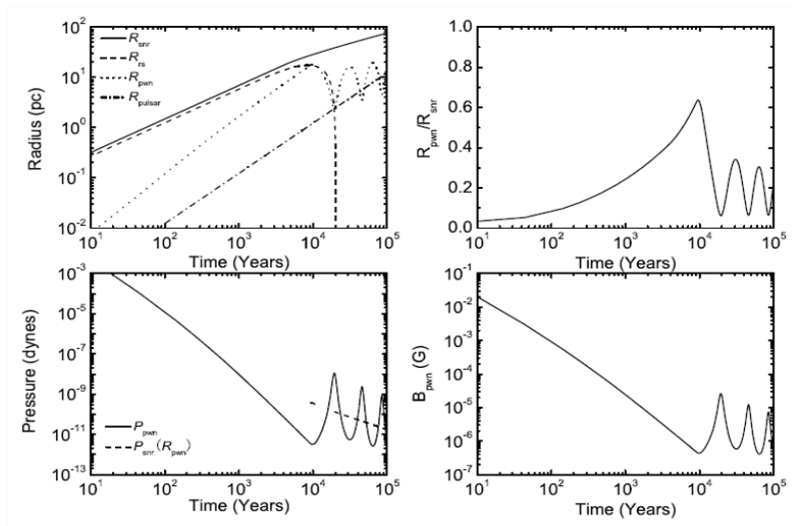
$$Q_{\text{II}}(E, t) = Q'_0(t) \begin{cases} \left(\frac{E}{E_{b1}}\right)^{-\alpha'_1} + g\left(\frac{E}{E_{b1}}\right) & E \leq E'_b, \\ g\left(\frac{E}{E_{b1}}\right) & E'_b < E \leq E_{\text{min}}, \\ \left(g\left(\frac{E}{E_{b1}}\right) + f\left(\frac{E}{E_{b1}}\right)^{-\alpha'_2}\right) & E_{\text{min}} < E \leq E_{\text{max}}, \end{cases} \quad (2.3)$$

$\alpha = 2.4 \pm 0.1$, $E_b \sim 2.6 \times 10^5 \gamma_{\text{ts},6}$ MeV, $\gamma_{\text{ts},6}$ 为终端激波上游流的洛伦兹因子（以 10^6 为单位）， $E_{\text{min}} \sim 7E_b$ 。归一化系数为：

$$C(t) = \frac{\dot{E}_e(t)}{2E_b^2 + f \frac{E_b^2}{2-\alpha} \left[\left(\frac{E_{\text{max}}}{E_b}\right)^{2-\alpha} - \left(\frac{E_{\text{min}}}{E_b}\right)^{2-\alpha} \right]}. \quad (2.4)$$

1. 模型应用到G0.9+0.1 和Crab星云

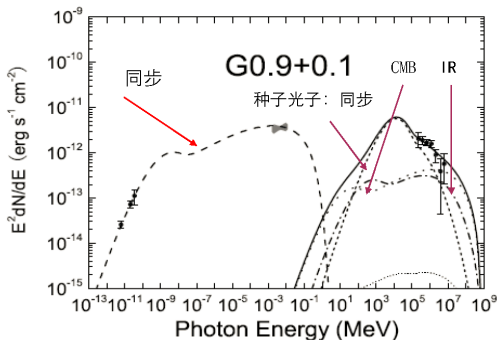
G0.9+0.1: 演化特征



谱特征

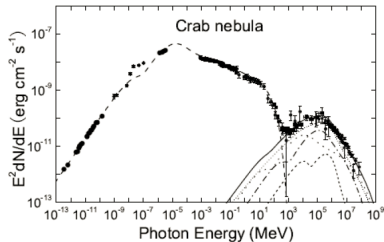
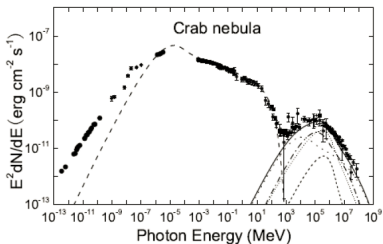
TABLE 1
INPUT PARAMETERS

PARAMETER	VALUE	PARAMETER	VALUE
Distance	8.5 kpc	$E^{\dot{}}$	$0.95 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$
E_{sn}	$3 \times 10^{51} \text{ erg}$	v_{psr}	120 km s^{-1}
M_{ej}	$16M_{\odot}$	η_e	0.4
n_{ism}	0.05 cm^{-3}	η_B	8×10^{-4}
n	3.00	E_{max}	900 TeV
τ_{sd}	300 yr	E_b	$3.5 \times 10^4 \text{ MeV}$



Crab星云:

- 注入谱: 非热幂律尾的相对论性的Maxwellian谱。不能解释射电发射!
- 注入谱: 非热幂律尾的相对论性的Maxwellian谱+ 射电电子合理解释整个发射谱!
- 需要低能电子!



年轻风云：Crab星云再研究(Zhu et al. 2015, MNRAS)

- 注入谱：双幂律

$$Q_0(t) = \begin{cases} \frac{(1-\eta_B)L(t)}{E_b^2} \frac{(2-\alpha_1)(2-\alpha_2)}{\alpha_1-\alpha_2} & \alpha_2 > 2 \\ \frac{(1-\eta_B)L(t)}{E_b^2} \left[\frac{1}{2-\alpha_1} + \log\left(\frac{E_{\max}}{E_b}\right) \right] & \alpha_2 = 2 \end{cases} . \quad (2.5)$$

$$(1-\eta_B)L(t) = \int_0^{E_{\max}} Q(E, t) E dE , \quad (2.6)$$

$$E_{\max} = \epsilon \kappa e \sqrt{\frac{\eta_B L(t)}{c}} \approx 3 \epsilon e \sqrt{\frac{\eta_B L(t)}{c}} , \quad (2.7)$$

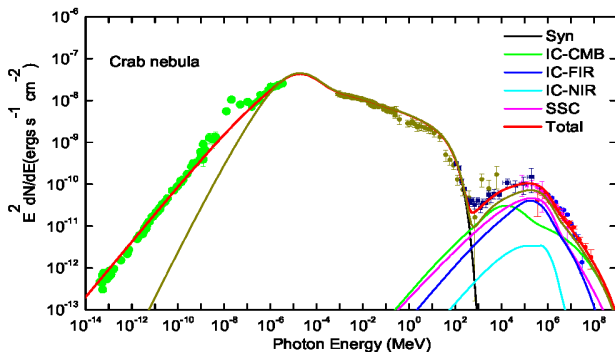
- 对于一颗给定周期 P ，周期导数 \dot{P} 、制动系数 n 和初始能损时标 τ_0 的脉冲星来说，其自转能损可以由下式给出

$$L(t) = L_0 \left(1 + \frac{t}{\tau_0} \right)^{-(n+1)/(n-1)} ,$$

$$\tau_0 = \frac{P_0}{(n-1)\dot{P}_0} = \frac{2\tau_c}{n-1} - t_{\text{age}} , \quad \tau_c = \frac{P}{2\dot{P}} .$$

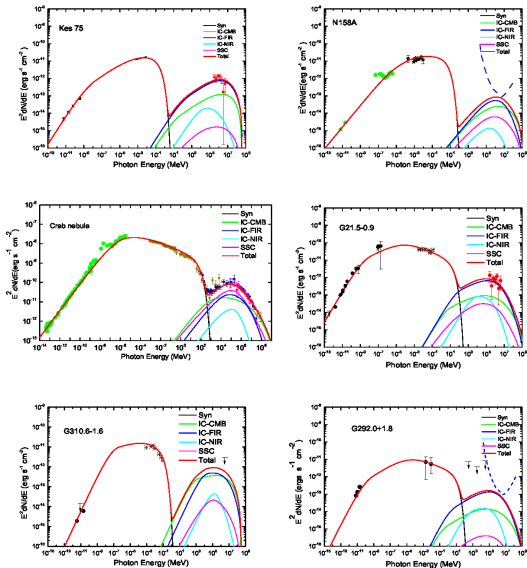
t_{age} 为脉冲星风云的年龄。

- 运用 Levenberg -Marquardt(LM)的多参数拟合方法： $\chi^2 = 2.1$
- 低能端电子的起源：脉冲星磁层的加速；或脉冲星风云中的相对论性磁重联的加速。

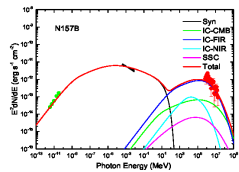
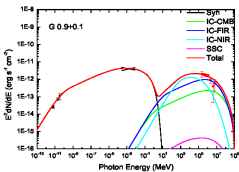
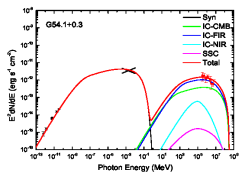
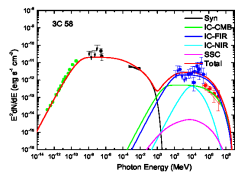
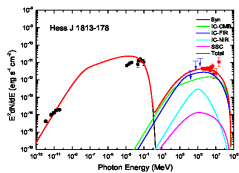
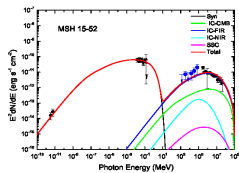


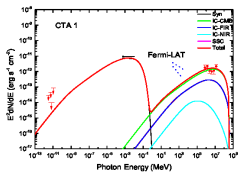
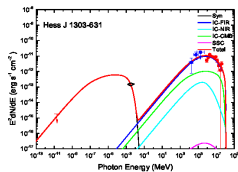
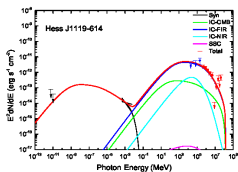
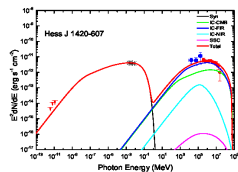
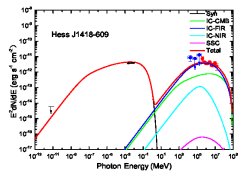
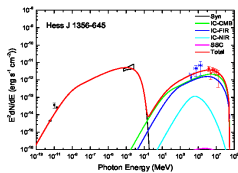
2. 模型应用到18个PWNe (Zhu, Fang, Zhang 2016, submitted)

6个年轻的PWNe: $T_{\text{age}} \leq 1500$ yr

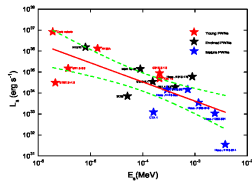
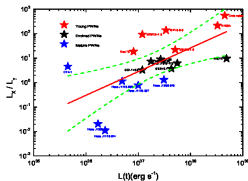
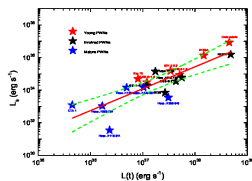
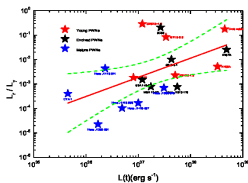


6个中年的PWNe: $1500 < T_{\text{age}} < 5000 \text{ yr}$

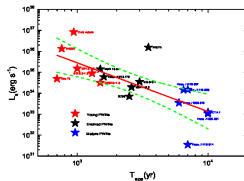
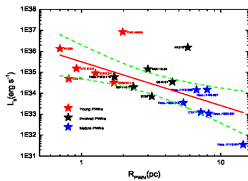
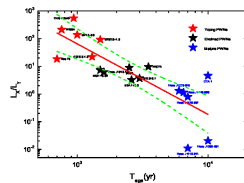
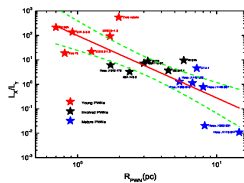
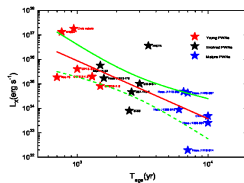
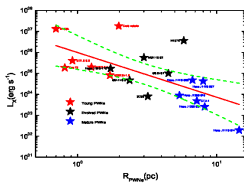


6个老年的PWNe: $T_{\text{age}} \geq 5000 \text{ yr}$ 

相关性分析：例子1



相关性分析：例子2



- 电子最大能量和PWN尺寸尺寸尺寸与势降和自转变慢功率相关；
- 自转变慢功率与射电、X射线和同步辐射光度相关，但与伽马射线光度无关；
- 年轻PWNe:

$$F_X/F_\gamma \geq 10$$

中年PWNe:

$$1 < F_X/F_\gamma < 10$$

老年PWNe:

$$F_X/F_\gamma \leq 1$$

三、空间相关的辐射模型

Lu, Gao, Zhang, 2017, ApJ; 2017, MNRAS, submitted

- 起因：X-射线观测发现一些PWNe的表面光度和谱指数随星云的距离变化：3C 58、G21.5-0.9、MSH 15-52。
- 自洽的空间相关的辐射模型：球对称假定，一维PWN动力学演化模型（Bucciantini et al. 2011, MNRAS）。
- 电子演化方程：对流、扩散、辐射损失、光子-光子对产生过程
光子演化方程：同步辐射、同步辐射自吸收、逆康普顿、对产生过程
数值求解两个耦合方程。

1. 基本方程

电子和光子演化方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} = & \kappa \frac{\partial^2 n_e}{\partial r^2} + \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \kappa) - V \right] \frac{\partial n_e}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 V] n_e \\ & + \frac{\partial}{\partial \gamma} [\dot{\gamma} n_e] + Q_e^{\gamma\gamma} + Q_{\text{inj}}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial n_\gamma}{\partial t} + \frac{n_\gamma}{\tau_{\text{esc}}} = Q_\gamma^{\text{syn}} + Q_\gamma^{\text{ics}} + L_\gamma^{\text{ssa}} + L_\gamma^{\gamma\gamma}, \quad (3.2)$$

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{\text{ad}} + \dot{\gamma}_{\text{syn}} + \dot{\gamma}_{\text{ics}}, \quad (3.3)$$

- 扩散系数

$$\kappa(r, \gamma, t) = \kappa_0(t) \left(\frac{\gamma m_e c^2}{1 \text{ TeV}} \right) \left[\frac{rv(r)}{r_0} \right]. \quad (3.4)$$

- 磁场:

$$B(r, t) = B_0(t) \frac{r_0}{rv(r)}, \quad (3.5)$$

其中 $B_0(t)$ 由 $W_B(t) = \int_{r_0}^{R_w(t)} B^2(r, t) r^2 dr / 2$ 计算, $W_B(t)$ 为磁能, r_0 为终端激波的半径。

- 注入率:

$$Q_{\text{inj}}(\gamma, t) = Q_0(t) \begin{cases} (\gamma/\gamma_b)^{-\alpha_1} & \text{for } \gamma < \gamma_b \\ (\gamma/\gamma_b)^{-\alpha_2} & \text{for } \gamma \geq \gamma_b \end{cases}, \quad (3.6)$$

2. MSH 15-52

Table: MSH 15-52参数值。

Input parameters	Symbol	Value
Ejected mass(M_{\odot})	M_{ej}	4.0
SN explosion energy (10^{51} erg)	E_{SN}	15.0
Period (ms)	P	150
Period derivative ($s \cdot s^{-1}$)	\dot{P}	1.5×10^{-12}
Initial spin-down power (erg s^{-1})	L_0	3.9×10^{39}
Initial spin-down timescale (yr)	τ_0	290
Braking Index	n	2.839
Age (yr)	T_{age}	1450
Distance (kpc)	d	5.2
Shock radius fraction	ε	0.4
Fitted parameters		
Magnetic fraction	η	0.04
Low energy power-law index	α_1	1.65
High energy power-law index	α_2	2.45
Break energy	γ_b	4.0×10^5
Initial diffusion coefficient($cm^2 s^{-1}$)	κ_0	1.7×10^{20}

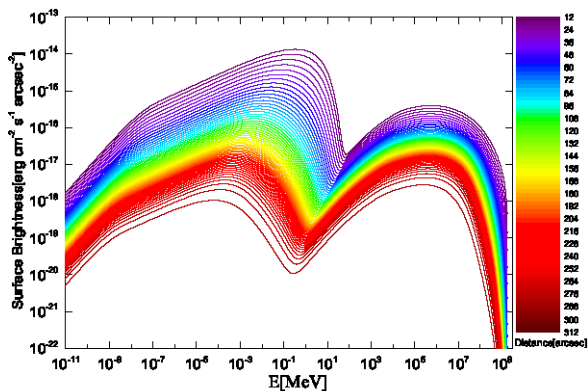


Figure 4. The distributions of the surface brightness of the PWN in MSH 15-52. The different color lines correspond to the surface brightness at different positions and E is the energy of photons.

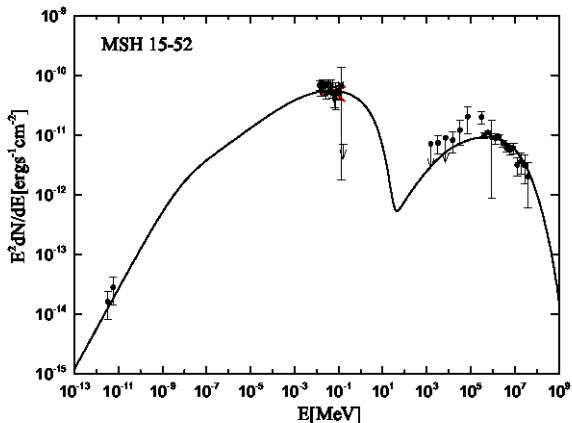
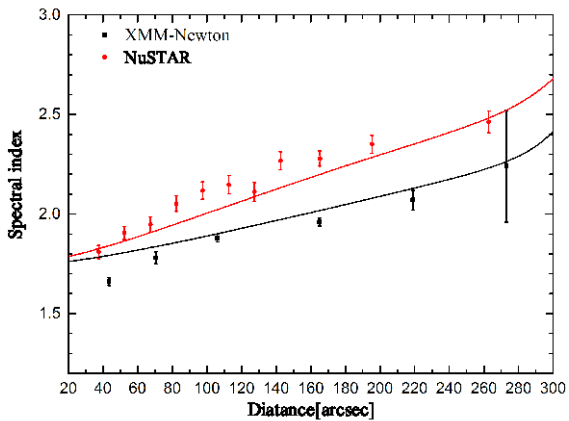
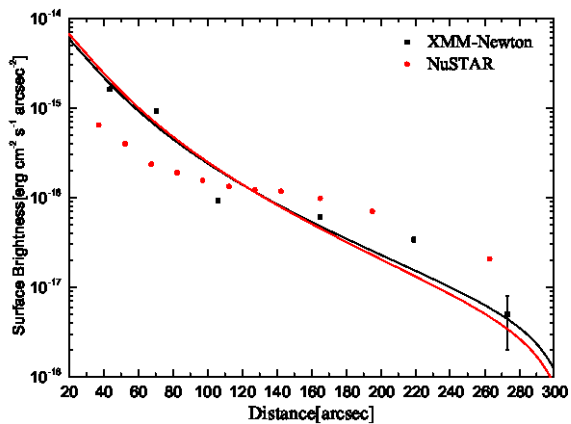
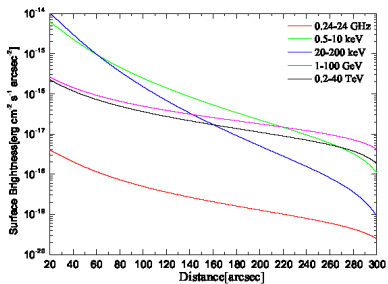
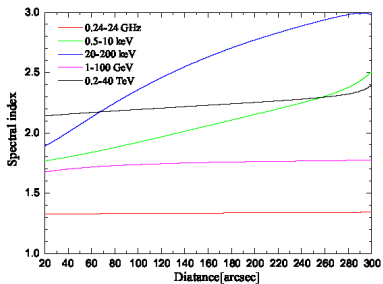


Figure 5. Spectral fitting result of MSH 15-52. The observational data are obtained from Gaensler et al. (1999, 2002) for the radio band; Mineo et al. (2001) and Forot et al. (2006) for the X-rays; Aharonian et al. (2005) and Abdo et al. (2010) for the γ -rays.







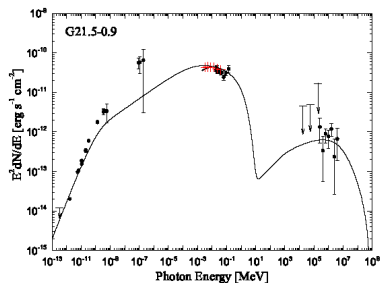
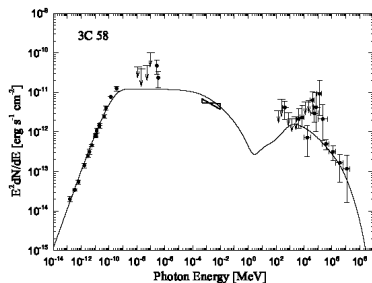
- 电子和光子的SED都是距离的函数。
- 很好解释了X射线波段谱指数和表面亮度的空间变化。
- MSH 15-52在终端激波处的当前的扩散系数为 $\kappa_0 = 6.6 \times 10^{24} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ，空间平均的值： $\bar{\kappa} = 1.4 \times 10^{25} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ，磁场 $B_0 = 26.6 \mu\text{G}$ ，平均磁场 $\bar{B} = 14.9 \mu\text{G}$ 。

3. 3C 58和G21.5-0.9

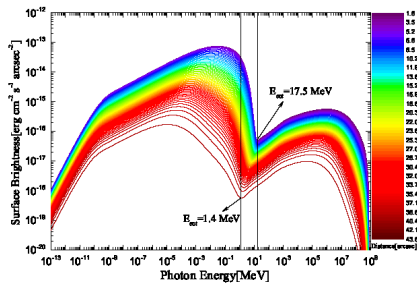
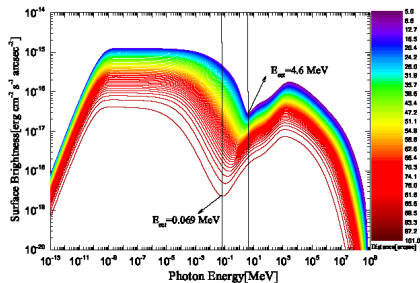
参数:

Input parameters	Symbol	3C 58	G21.5-0.9
Ejected mass (M_{\odot})	M_{ej}	4.7	10.0
SN explosion energy (10^{51} erg)	E_{SN}	1.0	2.9
Period (ms)	P	65.7	61.86
Period derivative ($\text{s} \cdot \text{s}^{-1}$)	\dot{P}	1.94×10^{-13}	2.0×10^{-13}
Initial spin-down power (erg s^{-1})	L_0	1.0×10^{38}	1.1×10^{38}
Initial spin-down timescale (yr)	τ_0	4548	3985
Braking index	n	3.0	3.0
Age (yr)	T_{age}	830	870
Distance (kpc)	d	2.0	4.7
Shock radius fraction	ε	0.3	0.25
Fitted parameters			
Magnetic fraction	η	0.0035	0.0054
Low energy power-law index	α_1	1.0	1.05
High energy power-law index	α_2	3.0	2.48
Break energy	γ_b	4.0×10^4	3.3×10^4
Initial diffusion coefficient at shock ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)	κ_0	4.5×10^{20}	3.8×10^{20}

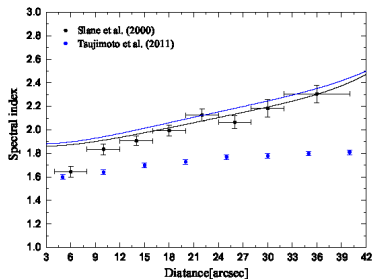
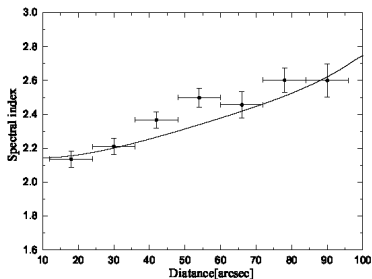
计算的3C 58和G21.5-0.9的SEDs与观测的比较。



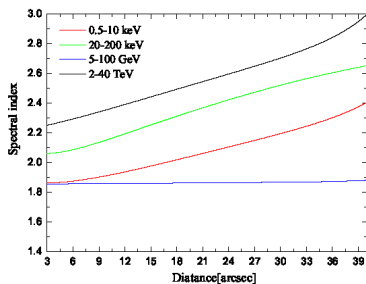
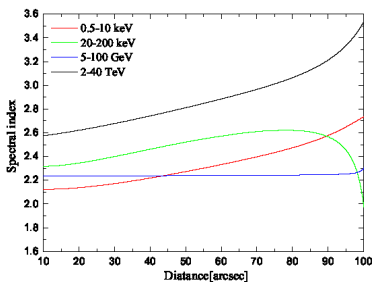
计算的3C 58和G21.5-0.9的不同位置处的表面亮度。



计算的3C 58和G21.5-0.9的X射线波段的谱指数与观测的比较。



预期的3C 58和G21.5-0.9的不同波段的谱指数。



导出的参数与其他工作的比较:

PVLE - Porth等基于MHD模拟导出的值,

PKC - Porth等 (2016) 基于Kennel & Coroniti (1984)模型导出值,

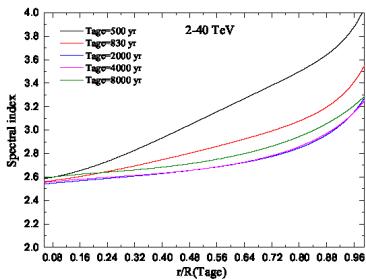
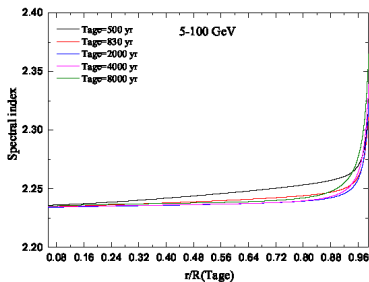
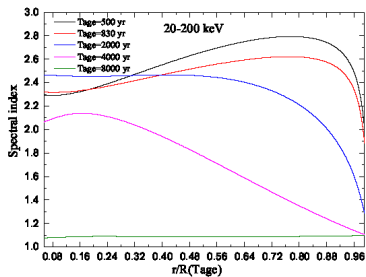
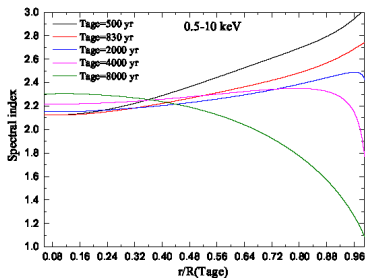
SSM - 我们模型导出的值。

Parameters	3C 58			G21.5-0.9		
	PVLE	PKC	SSM	PVLE	PKC	SSM
Magnetic field at shock B_0 (μG)	300	8	10.1	283	33	18.5
Velocity at shock V_0 (units of c)	0.51	0.35	0.36	0.51	0.36	0.36
Diffusive coefficient at shock κ_0 ($10^{25} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)	133	278	0.50	57	85	0.52
Ratio of magnetic to particle energy σ (10^{-3})	...	0.6	3.5	...	1.3	5.4
Spatial averaged magnetic field \bar{B} (μG)	46	63	28.2	43	158	39.4
Spatial averaged diffusion coefficient $\bar{\kappa}$ ($10^{25} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)	133	18	0.19	57	12	0.25

四、结论

- 均匀的辐射模型可以很好地解释多波段谱。
- 双幂律注入谱适用于所有的PNWe.
- 空间相关的辐射模型是更为实际的模型。
- HXMT观测和LHAASO观测可以检验我们的结果。

预期的3C 58的不同波段的谱指数随时间的变化。



谢 谢!