

# 超新星遗迹的多波段拟合

报告人：曾厚敦

合作导师：刘四明研究员

中科院紫金山天文台

2018. 8. 16

（首届LHAASO合作组会--南开大学）

# 主要内容

- 超新星遗迹的主要辐射机制（同步辐射、康普顿散射、韧致辐射及P-P相互作用）；
- 模型的介绍；
- 运用于三个超新星遗迹（HESS J1713-397, J1713-381 (CTB 37B), and J1714-385 (CTB 37A)）；
- 结论和讨论。

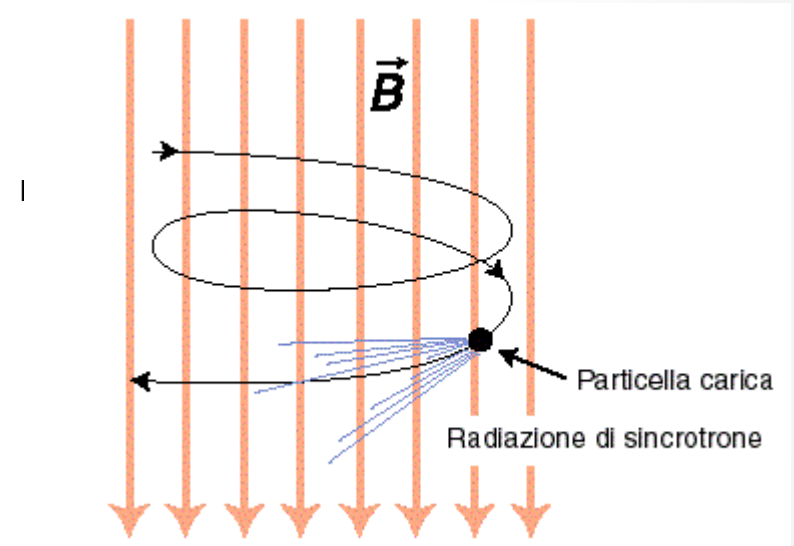
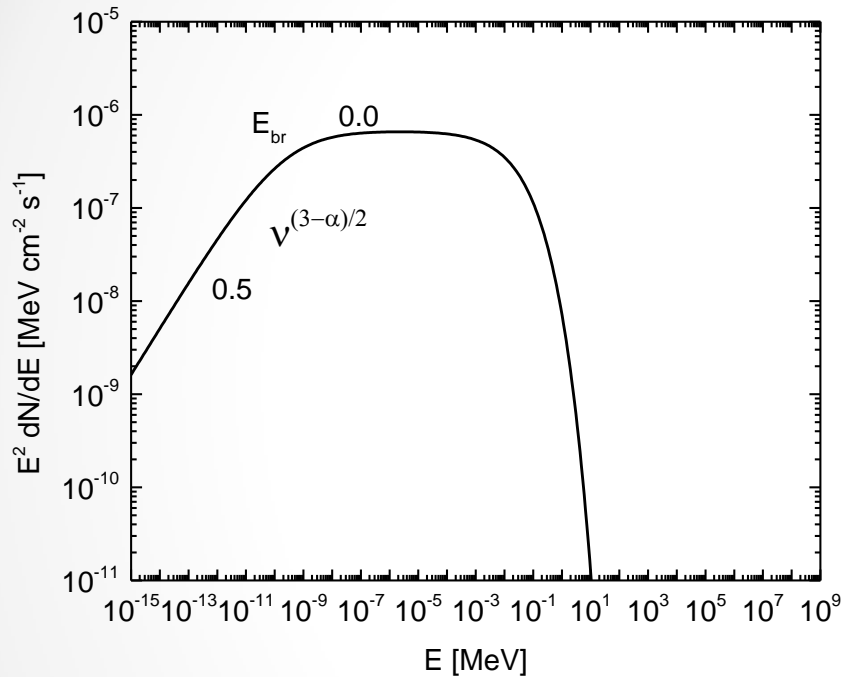
# 非热辐射

同步辐射

低能段

Fixed:  $D_1 = 10$  kpc,  $W_e = 10^{48}$  erg

$\alpha_1 = 2.0, \alpha_2 = 3.0, E_{br} = 10$  GeV  
 $E_{cut} = 100$  TeV,  $B = 50$   $\mu$ G



$$Q_\gamma(\omega) = \frac{\sqrt{3} B e^3}{2\pi m_e c^2} \int \frac{4\pi dN_e}{\beta c dE_e} R\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) dE_e$$

$$\omega_c = 1.5 B p^2 / (mc)^3$$

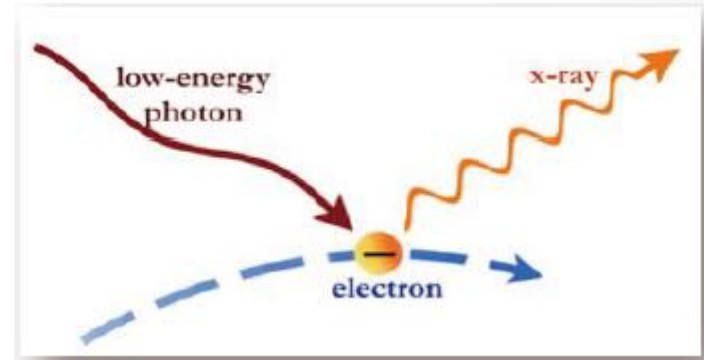
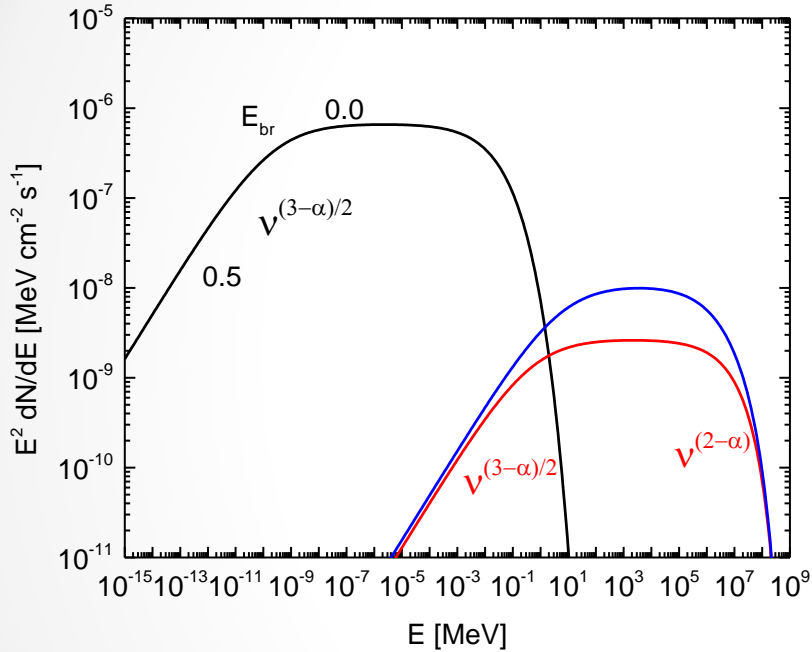
R. Blumenthal and R. J. Gould. In: Rev. Mod. Phys. 42 (1970).

# 非热辐射

逆康普顿散射 高能段

Fixed:  $D_1 = 10 \text{ kpc}, W_e = 10^{48} \text{ erg}$

$\alpha_1 = 2.0, \alpha_2 = 3.0, E_{br} = 10 \text{ GeV}$   
 $E_{cut} = 100 \text{ TeV}, B = 50 \mu\text{G}$



KN 散射截面

$$Q_\gamma(E_\gamma) = \int \frac{dN_e}{dE_e} dE_e \int n(E_s) \sigma_{K-N}(E_s, E_e, E_\gamma) dE_s$$

CMB 谱 (0.275 K, 0.25 eV/cm<sup>3</sup>)

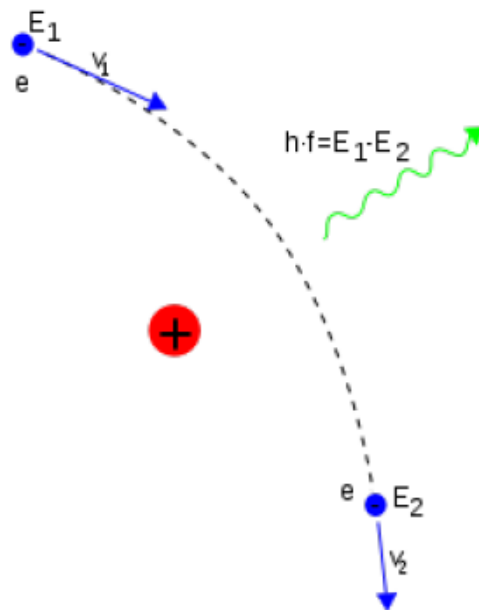
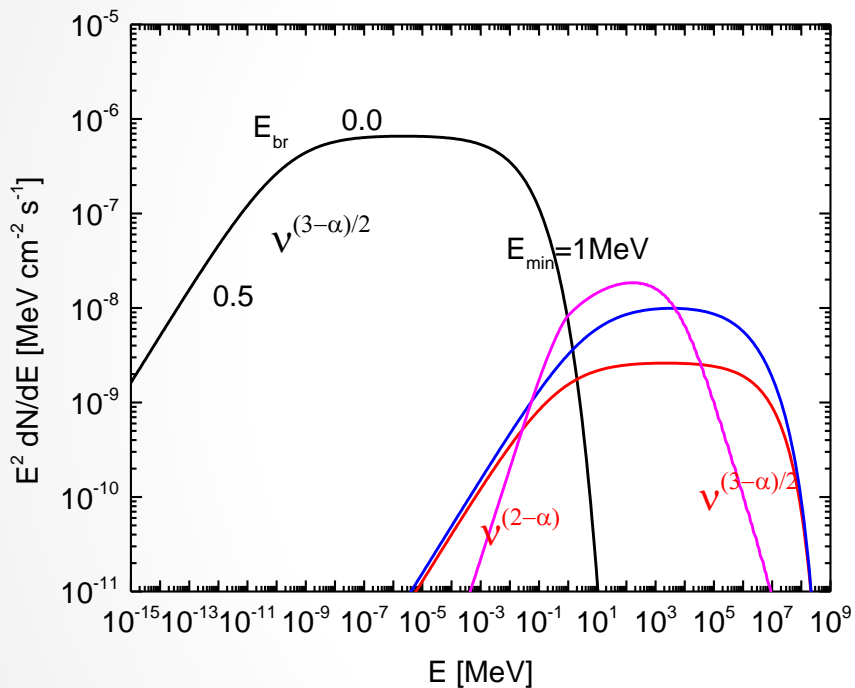
来自尘埃辐射的IR谱 (30 K, 1 eV/cm<sup>3</sup>)

# 非热辐射

韧致辐射 高能段

Fixed:  $D_1 = 10 \text{ kpc}$ ,  $n = 1 \text{ cm}^{-3}$   
 $W_e = 10^{48} \text{ erg}$

$\alpha_1 = 2.0$ ,  $\alpha_2 = 3.0$ ,  $E_{br} = 10 \text{ GeV}$   
 $E_{cut} = 100 \text{ TeV}$ ,  $B = 50 \mu\text{G}$



$$Q_\gamma(\epsilon) = 4\pi n_H \int \frac{dN_e}{dE_e} \frac{d\sigma_{B-H}}{d\epsilon} dE_e$$

Bethe-Heitler cross section

# 非热辐射

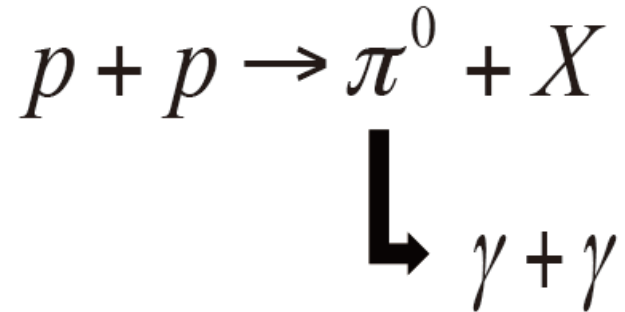
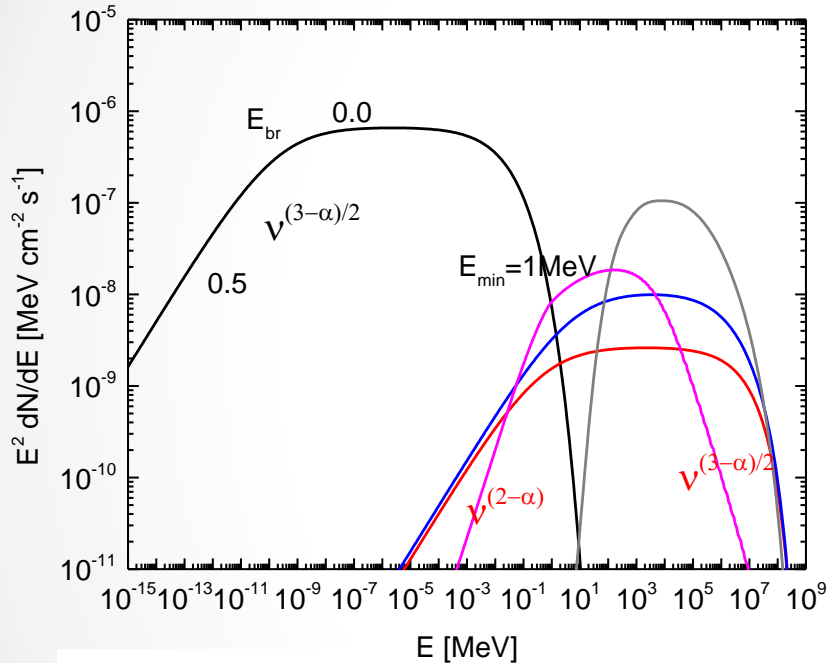
高能段

Fixed:  $D_1 = 10 \text{ kpc}$ ,  $n = 1 \text{ cm}^{-3}$

$W_p = 10^{50} \text{ erg}$

$\alpha_{1,p} = 2.0$ ,  $\alpha_{2,p} = 3.0$ ,  $E_{br,p} = 5 \text{ TeV}$

$E_{cut,p} = 100 \text{ TeV}$



**Photon emissivity**

$$Q_\gamma(E_\gamma) = \int \frac{4\pi}{\beta c} n_H \frac{dN_p}{dE_p} \frac{1}{E_\gamma} \frac{d\sigma(E_p / E_\gamma)}{d \log(E_\gamma)} dE_p$$

← Parametrization from  
Kamae et al. (2006)

# 模型描述

- 模型：（原则上，参数尽量少的少）  
固定  $K_{ep} = 0.01$  （1 GeV 处，观测）  
根据X射电的观测，估算出气体的密度（ $N_H$ ）  
距离（ $D_1$ ）被确定（文献）

粒子谱：

$$N(R_i) = N_{0,i} \begin{cases} (R_i/R_{\min})^{-\alpha} \exp(\frac{-R_i}{R_{i,\text{cut}}}) H(R_i - R_{\min}) & \text{for } R_{\min} \leq R_i < R_{i,\text{cut}} \\ (R_i/R_{\min})^{-\alpha-1} (R_{\text{br}}/R_{\min}) \exp(\frac{-R_i}{R_{i,\text{cut}}}) & \text{for } R_i > R_{\text{br}} \end{cases}$$

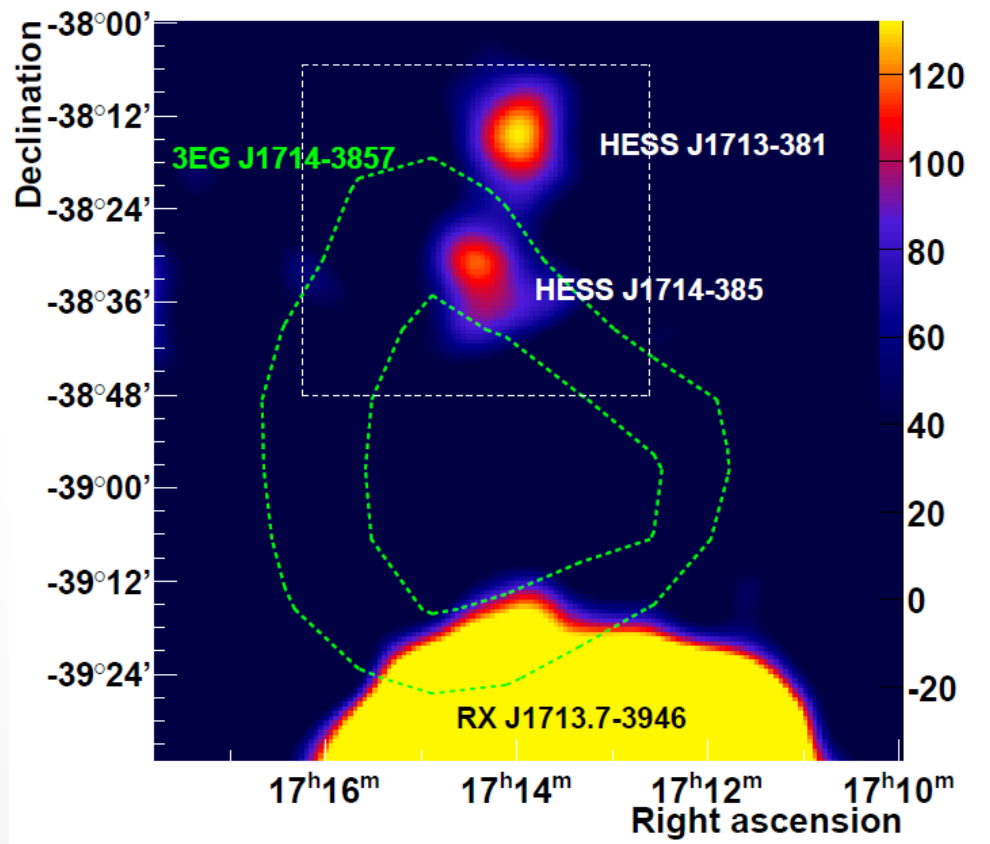
$R_{\min} = 1 \text{ GeV}$       where  $R_i = p_i/q_i$

6个参数(5+1):  $\alpha, E_{\text{cut},e}, E_{\text{cut},p}, B, W_p, + E_{\text{br}},$

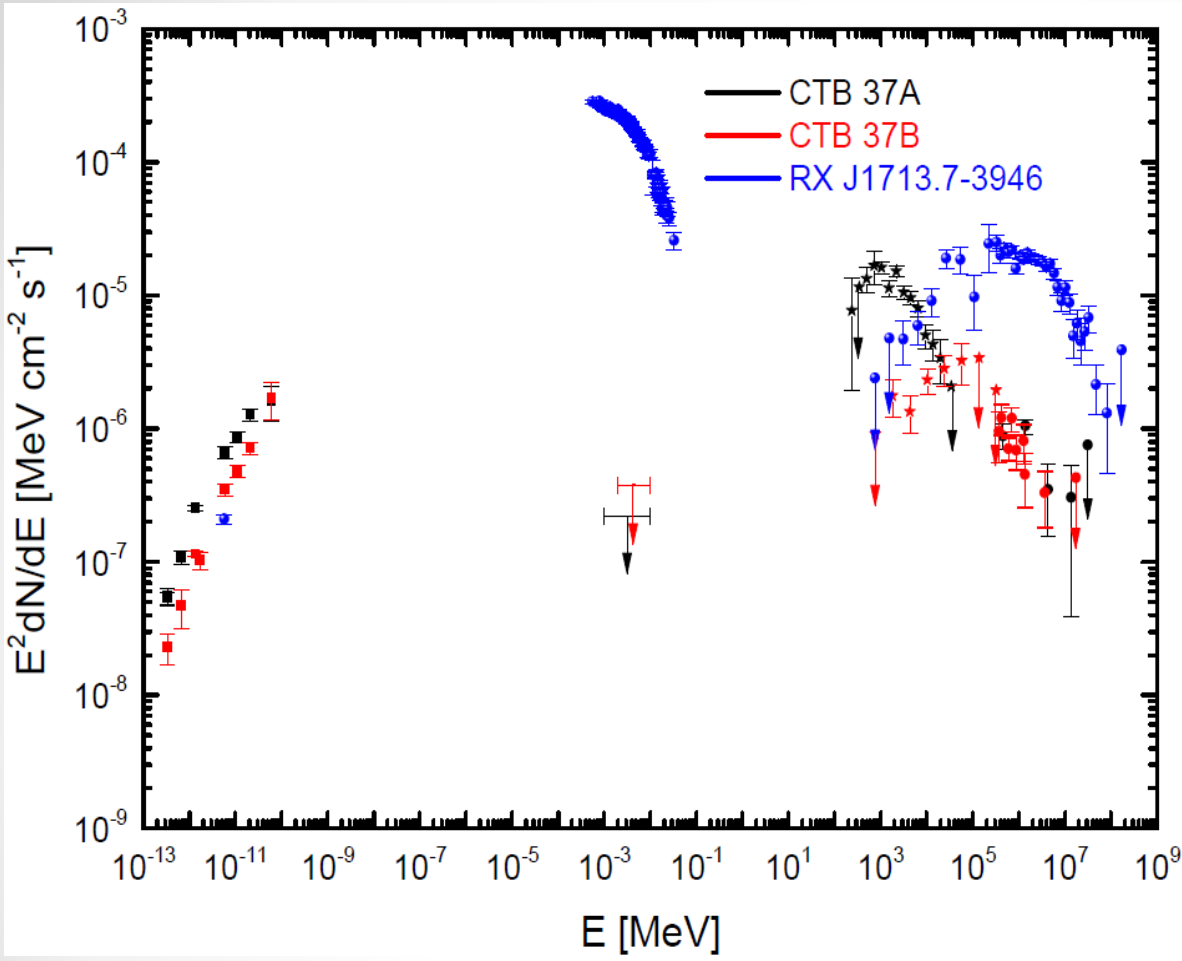
- 拟合技术：MCMC方法

# 模型的运用

- 选取空间位置相近的三个超新星遗迹
  - HESS J1713-397, HESS J1713-381 (CTB 37B),  
和 HESS J1714-385 (CTB 37A)







CTB 37A已确定与分子云相互作用

观测上的特点：  
射电，x-ray，GeV和TeV  
(X-ray存在上限)

X-ray：  
确定J1713-397是个  
同步辐射主导的SNRs

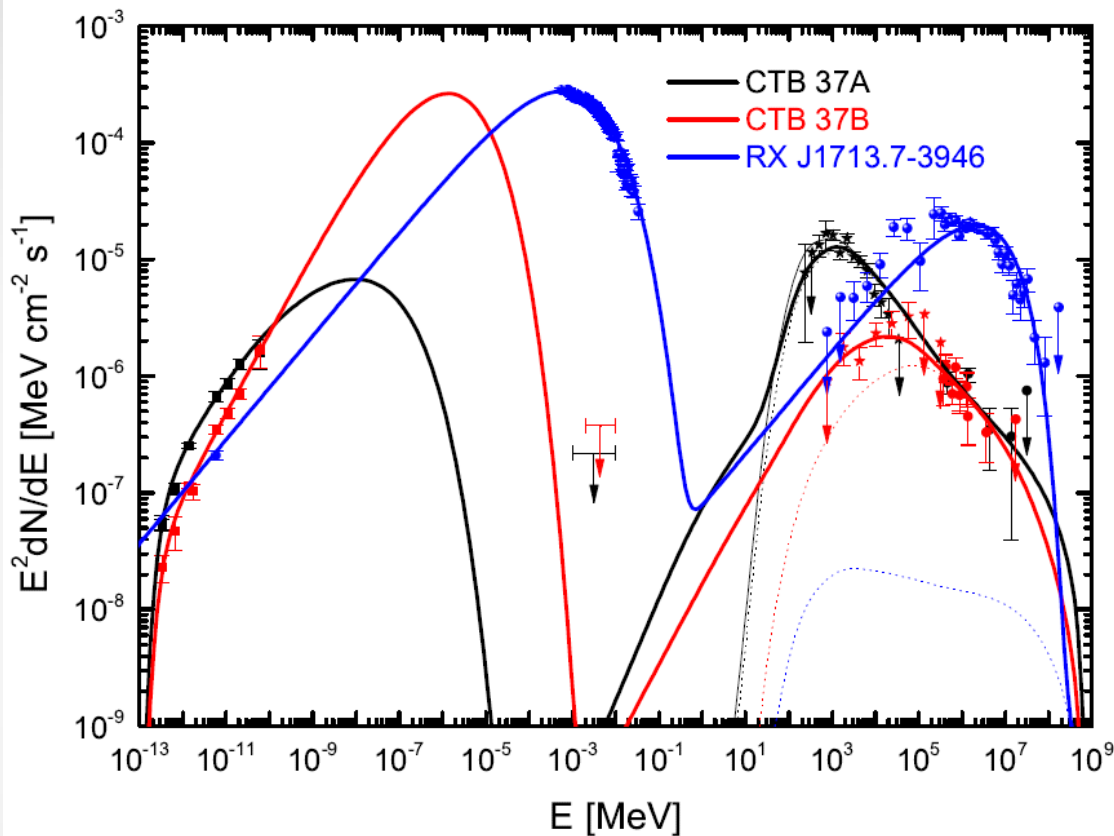
GeV波段：  
谱指数变软 (顺序)

TeV波段：  
CTB 37A比CTB 37B的谱更硬

射电波段：  
对比CTB37B， CTB 37A的  
谱在高端出现明显的软化。

。

# 分析结果



CTB 37A:

GeV和TeV是由p-p相互作用主导，  
需要双幂律的粒子谱才能拟合好。

P-P: 黑点线: RPL 1.50  
细黑实线: PL 2.50

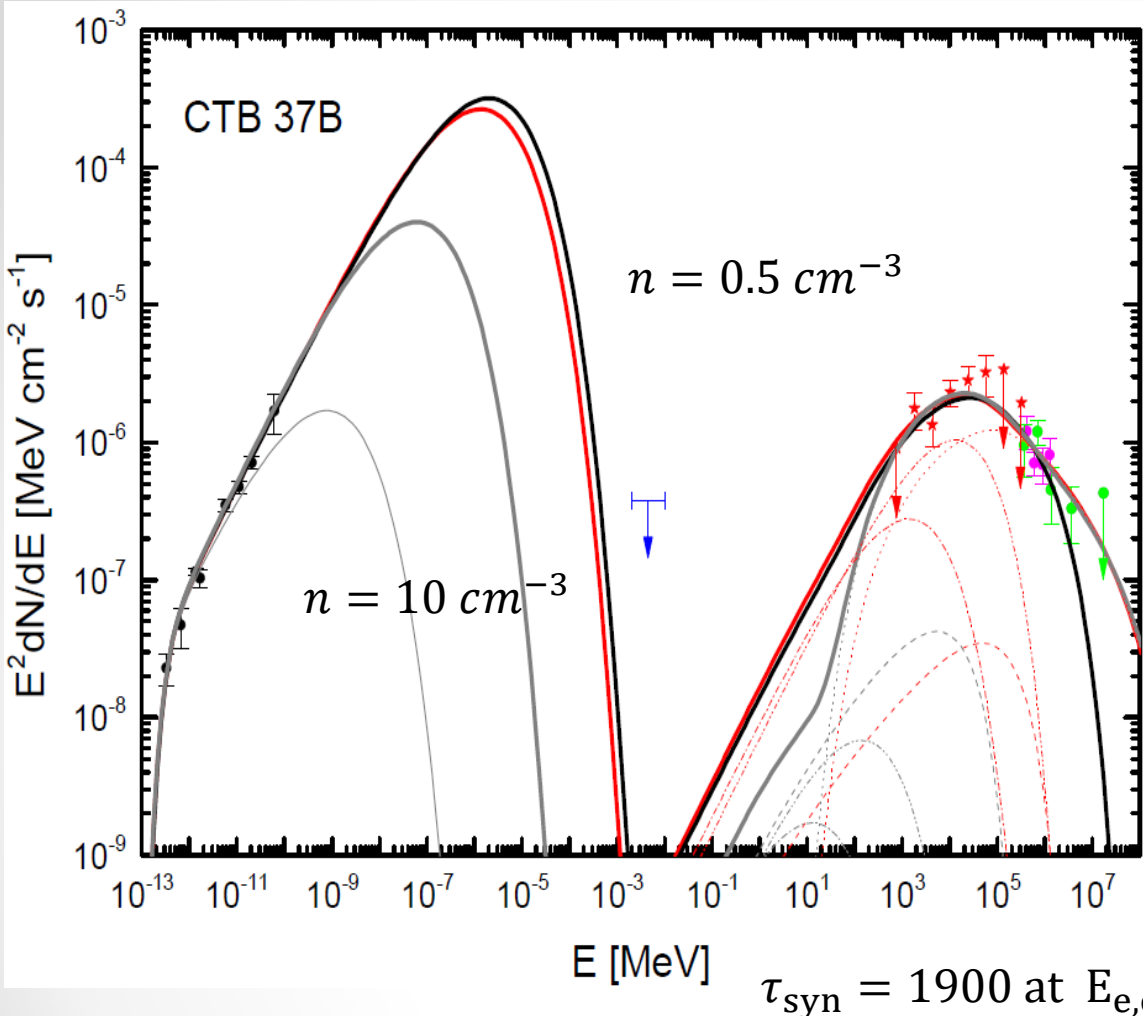
J1713.7-3946:

轻子主导的模型，  
单幂律粒子谱。

$$\tau_{\text{syn}} = 1.25 \times 10^3 (E/1\text{TeV})^{-1} (B/100\mu\text{G})^{-2} \text{ years.}$$

$$\tau_{\text{syn}} = 1340 \text{ at } E_{\text{e,cut}} = 32 \text{ TeV} \leq \text{age: } 1600$$

获得的参数值与 Liu et al. 2008 和 Yang & Liu 2013 得到参数相一致

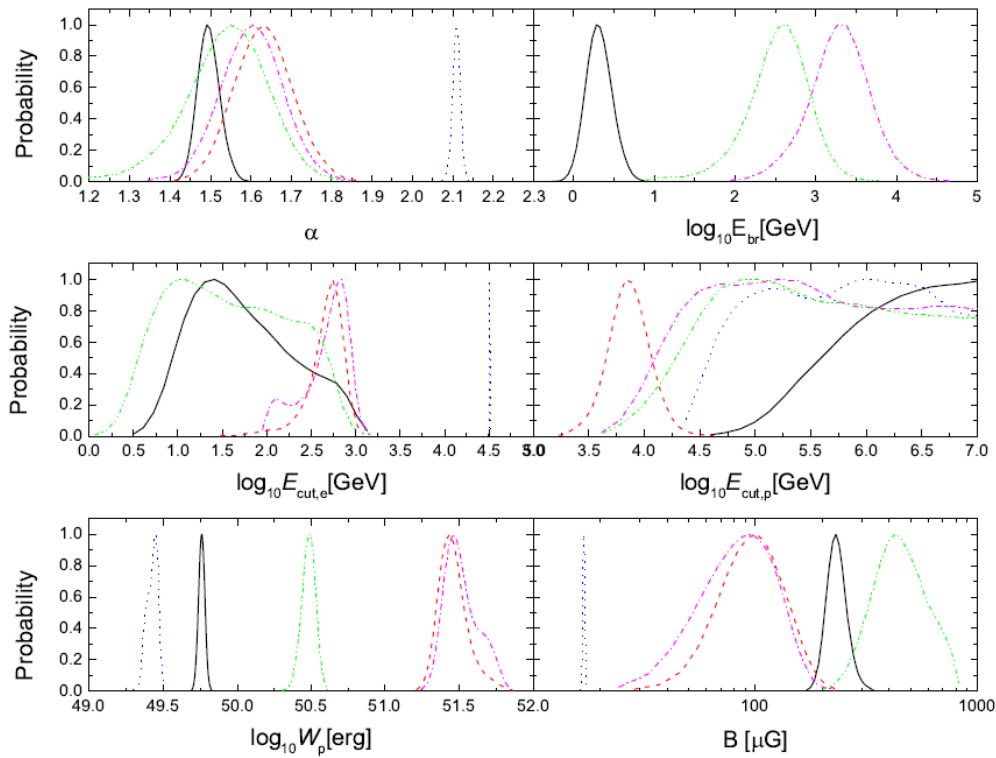


CTB 37B:  
 TeV由强子主导,  
 GeV由IC和pp共同主导;

单幂律(黑线)和双幂律(红线)  
 都能较好的解释全波段能谱

与分子云相互作用的一个证据:  
 提高密度:  $n = 10 \text{ cm}^{-3}$   
 GeV和TeV将由强子主导。

年龄的顺序: RX J1713-3946比较年轻的SNR (轻子主导GeV)  
 CTB 37A 比较年老的SNR (强子主导GeV)  
 CTB 37B处于两者之间 (轻子和强子共同主导)



实线，虚线，点线，虚点线，虚点点线  
 分别对应CTB 37A (RPL, 0.5)、  
 CTB 37B (PL, 0.5)、  
 CTB 37B (RPL, 0.5)、  
 CTB 37B (RPL, 10)、  
 J1713-3946 (PL, 0.01)。

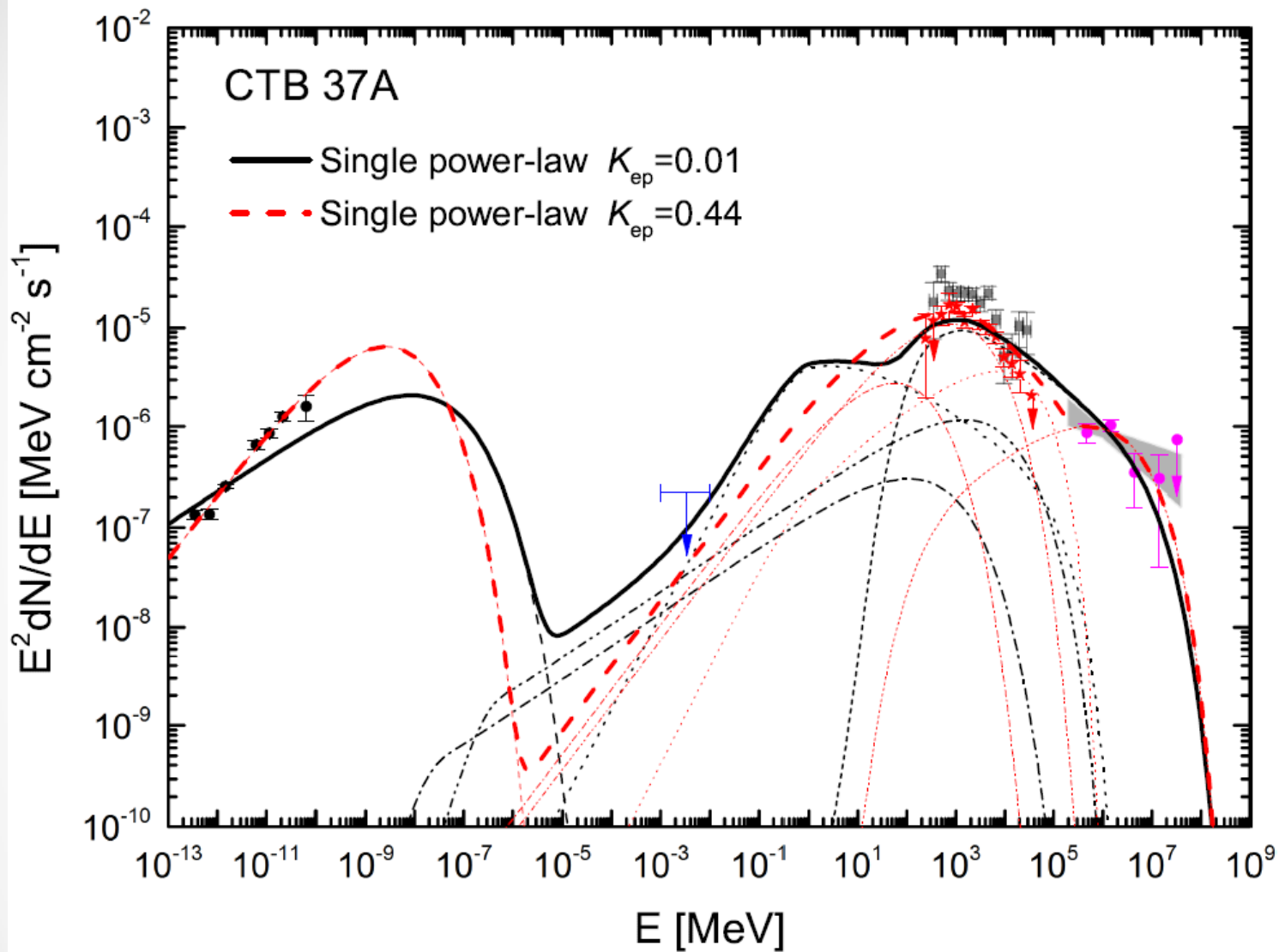
Table 1: Spectral fitting parameters.

Source Name	$\alpha$	$\log_{10} \left( \frac{E_{br}}{\text{GeV}} \right)$	$\log_{10} \left( \frac{E_{e,cut}}{\text{GeV}} \right)$	$\log_{10} \left( \frac{E_{p,cut}}{\text{GeV}} \right)$	$\frac{B}{\mu\text{G}}$	$\tau_{80}$	$\log_{10} \left( \frac{W_p}{\text{erg}} \right)$	$\frac{W_B}{W_e}$
HESS J1713-39	$2.11^{+0.01}_{-0.009}$	NA	$4.51^{+0.004}_{-0.004}$	$> 5.98$	$17^{+0.17}_{-0.18}$	NA	$49.43^{+0.04}_{-0.04} + \log_{10} \left( \frac{n}{0.01 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{D}{1 \text{kpc}} \right)^2$	$5.23 \left( \frac{D}{1 \text{kpc}} \right)^{-2} \left( \frac{R}{10 \text{pc}} \right)^3$
CTB 37B	$1.63^{+0.07}_{-0.07}$	NA	$2.66^{+0.17}_{-0.16}$	$3.86^{+0.18}_{-0.17}$	$111^{+34}_{-34}$	$0.83^{+0.36}_{-0.36}$	$51.46^{+0.09}_{-0.09} + \log_{10} \left( \frac{n}{0.5 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{D}{13.2 \text{kpc}} \right)^2$	$49.06 \left( \frac{D}{13.2 \text{kpc}} \right)^{-2} \left( \frac{R}{20 \text{pc}} \right)^3$
	$1.60^{+0.07}_{-0.07}$	$2.29^{+0.34}_{-0.35}$	$2.65^{+0.24}_{-0.31}$	$> 5.72$	$100^{+33}_{-35}$	$0.78^{+0.34}_{-0.34}$	$51.52^{+0.13}_{-0.11} + \log_{10} \left( \frac{n}{0.5 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{D}{13.2 \text{kpc}} \right)^2$	$34.88 \left( \frac{D}{13.2 \text{kpc}} \right)^{-2} \left( \frac{R}{20 \text{pc}} \right)^3$
	$1.54^{+0.10}_{-0.09}$	$2.52^{+0.34}_{-0.33}$	$1.58^{+0.77}_{-0.71}$	$> 5.77$	$498^{+148}_{-132}$	$0.75^{+0.36}_{-0.36}$	$50.48^{+0.05}_{-0.05} + \log_{10} \left( \frac{n}{10.0 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{D}{13.2 \text{kpc}} \right)^2$	$1.73 \times 10^5 \left( \frac{D}{13.2 \text{kpc}} \right)^{-2} \left( \frac{R}{20 \text{pc}} \right)^3$
CTB 37A	$1.50^{+0.03}_{-0.03}$	$0.31^{+0.15}_{-0.15}$	$1.73^{+0.64}_{-0.57}$	$> 6.49$	$237^{+23}_{-24}$	$0.72^{+0.12}_{-0.12}$	$49.76^{+0.02}_{-0.02} + \log_{10} \left( \frac{n}{100 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{D}{7.9 \text{kpc}} \right)^2$	$671 \left( \frac{D}{7.9 \text{kpc}} \right)^{-2} \left( \frac{R}{10 \text{pc}} \right)^3$

# 结果讨论

- 1、超新星遗迹的粒子分布会随着年龄的增加而硬化，暗示着粒子正处在持续加速的过程；
- 2、在 高能截断处的同步损失时标总是小于 SNRs 的年龄，需要连续性的粒子加速；
- 3、一个高能截断的单幂律粒子分布-----HESS J1713-397 的能谱，而双幂律的质子分布-----CTB 37B 的能谱，双幂律的高能截断的粒子分布-----CTB 37A 的能谱。
- 4、激波与分子云相互作用可能产生一个双幂律的粒子分布。

谢谢!



红虚线与Brandt et al. 2013的结果是一致的。

- Photo-pair production

$$p + \gamma \rightarrow p + e^- + e^- .$$

Photon threshold  $E'_\gamma = \Delta mc^2(1 + \Delta m/m_p) = 1 \text{ MeV}$  (proton restframe)

- Photo-pion production

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0 ,$$

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^+ + \pi^- .$$

Photon threshold  $E'_\gamma = \Delta mc^2(1 + \Delta m/m_p) = 145 \text{ MeV}$  (proton restframe)

- Photo-disintegration

$$A + \gamma \rightarrow (A - 1) + n/p .$$