

# 老年超新星遗迹非热辐射性质 粒子注入含时演化模型

报告人：方军  
云南大学 物理系  
2010. 4. 18

# 超新星遗迹与银河宇宙线

## ● 银河系宇宙线粒子起源地

1. 超新星爆炸能量的10%用于加速宇宙线粒子，就可补偿宇宙线粒子能量的损失。

银河系宇宙线能量损失率  $- 10^{48} \text{erg yr}^{-1}$ ;

超新星爆炸能量  $- 10^{51} \text{erg}$ ，约100yr一次超新星爆发。

2. 超新星抛射物质产生激波，通过扩散激波加速机制加速粒子至相对论性能量。能量转化率可  $> 10\%$ ，粒子能谱指数  $\approx 2$ 。

粒子能谱由激波结构决定，

强激波而言，不考虑非线性效应，试验粒子近似下，压缩率  $r = 4$ ，粒子谱指数  $s = 2$ 。

## ● 银河系内重要的高能非热辐射源

### 1. X射线

**ROSAT, ASCA, Chandra, Suzaku, XMM-Newton。**

非热X射线：如RX J1713.7-3946 (G347.3-0.5)，RX J0852.0-4622 (G266.2-1.2)。

非热X射线与热X射线：SN 1006, RCW 86

### 2. $\gamma$ 射线

**EGRET (W28, W44, IC 443,  $\gamma$  Cyg, Monoceros)**

**Fermi LAT (W44, IC 443, W51C)**

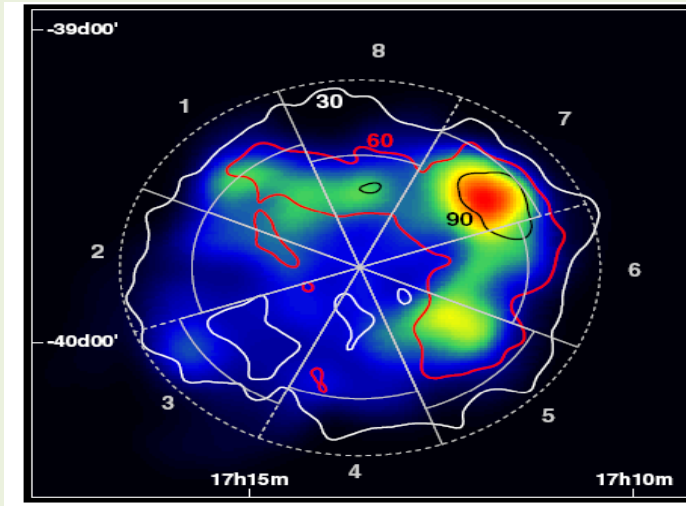
GeV波段没有观测到清晰的壳层结构。

**HESS, CANGAROO, MAGIC.**

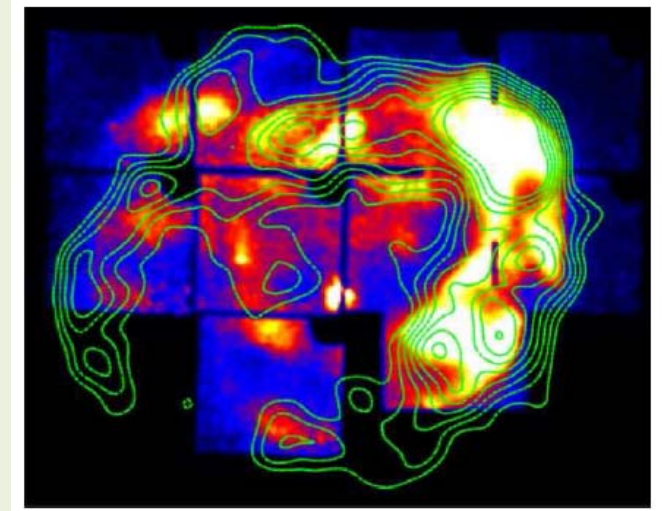
已观测多个对应超新星遗迹甚高能伽玛辐射源，其中对RX J1713.7-3946, RX J0852.0-4622, SN 1006, RCW 86 观测到壳层结构。

# RX J1713.7-3946

ASCA

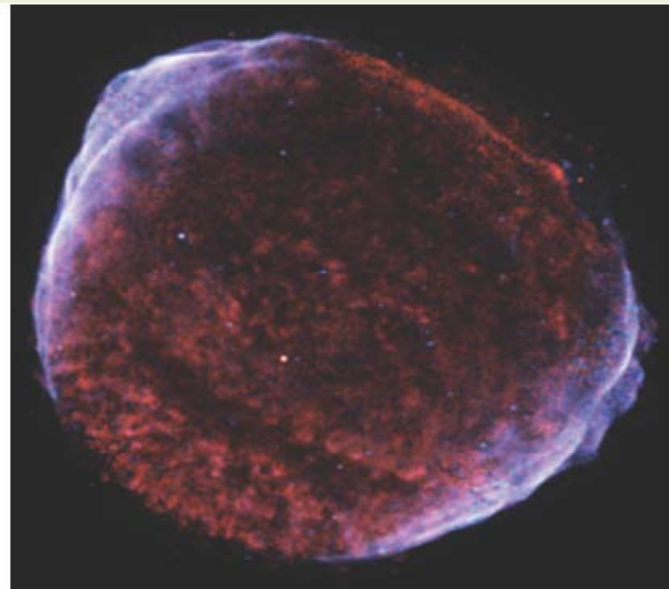


Suzaku



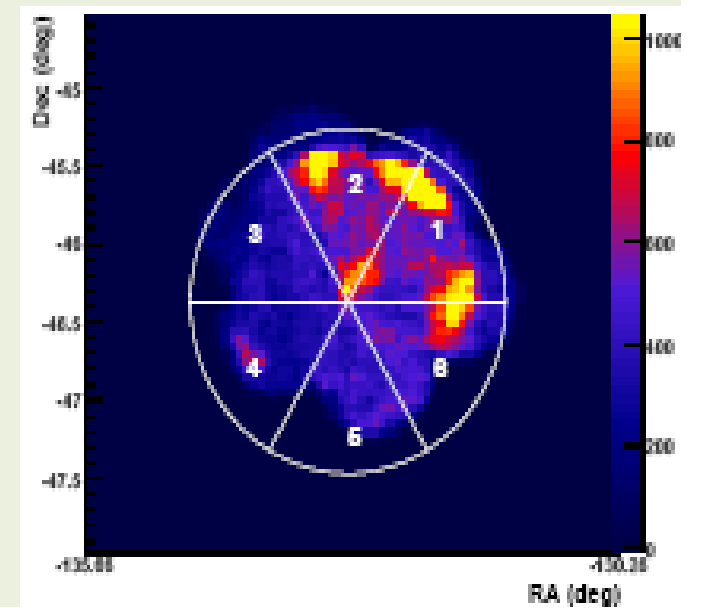
# SN 1006

Chandra

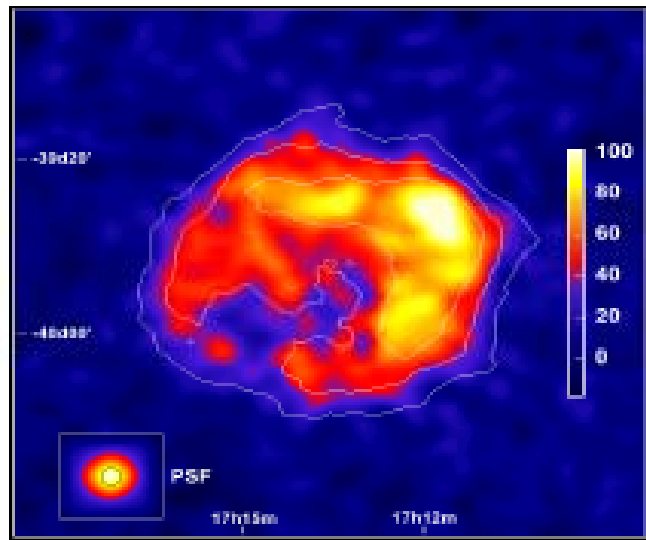


# RX J0852.0-4622

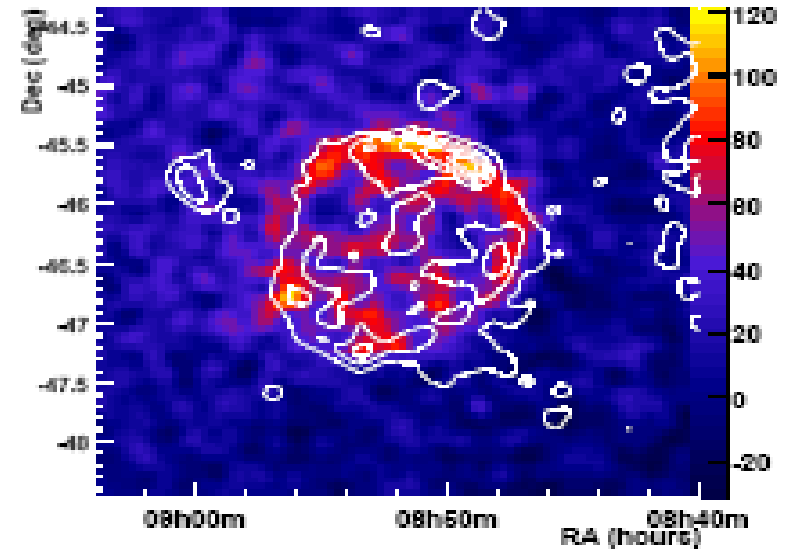
ASCA



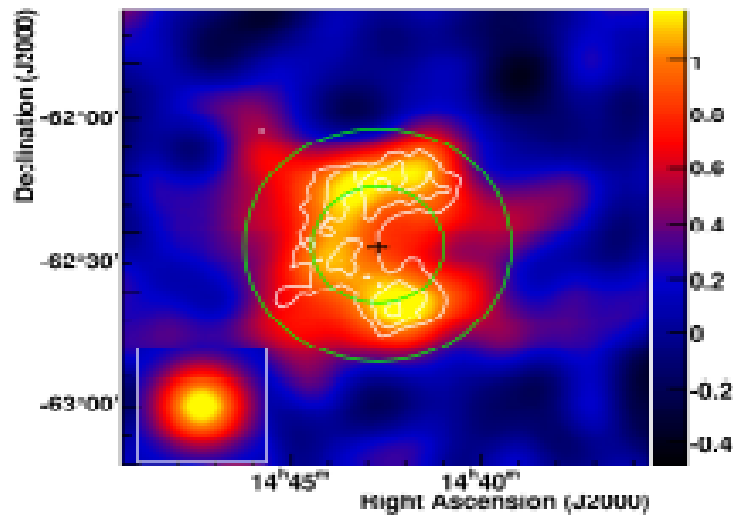
# RX J1713.7-3946 HESS



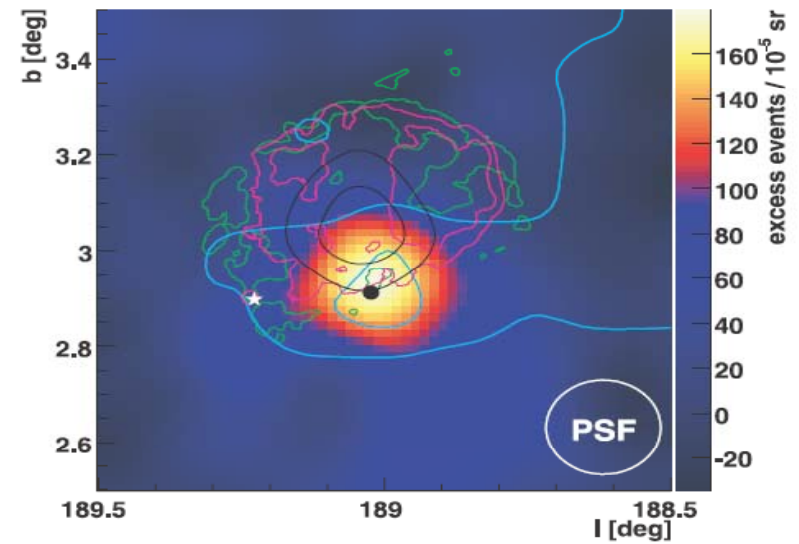
# RX J0852.0-4622 HESS

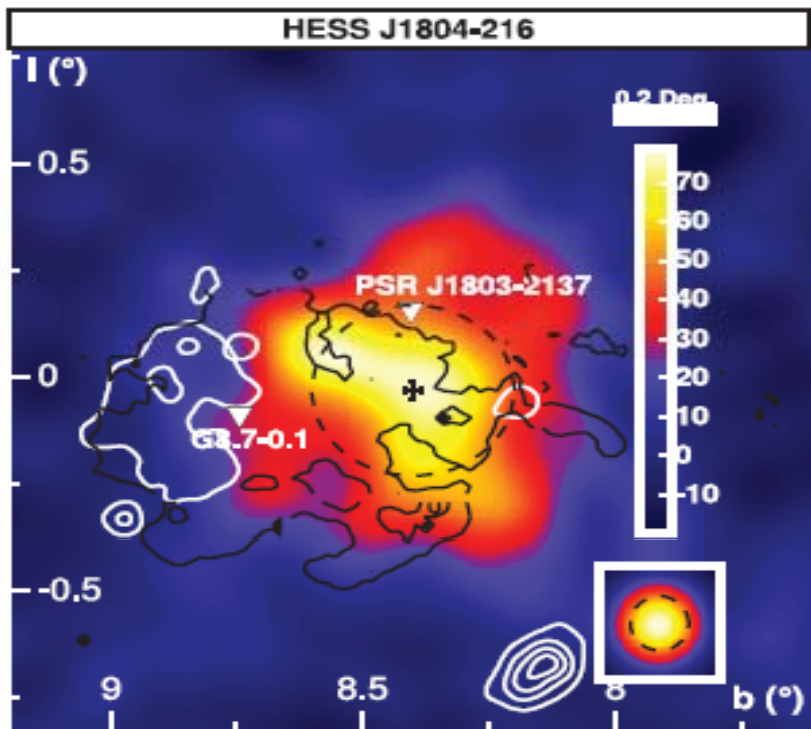


# RCW86 HESS

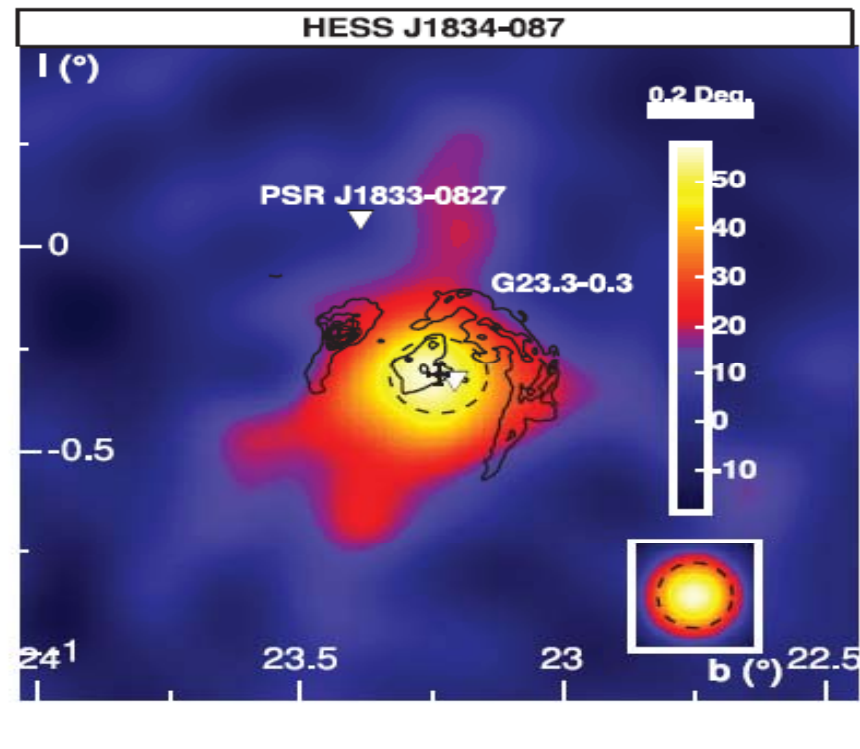


# IC 443 radio, ROSAT, EGRET, MAGIC





**G 8.7 – 0.1 HESS J1803-216**



**G 23.3 – 0.3 HESS J1834-087**

某些甚高能伽玛射线源还没有观测到X射线对应体，或者其X射线流量相比TeV辐射流量很小。

老年的超新星遗迹中由于激波减弱，加速初级电子效率降低，此时其X射线辐射强度降低。

# 超新星遗迹内发生的辐射过程

带电粒子（电子和质子）可被激波加速到相对论性能量，并通过同步辐射，逆康普顿散射，韧致辐射和**p-p**相互作用发出多波段非热辐射。

- **同步辐射** 射电 -- 几十keV
- **韧致辐射** keV -- TeV
- **逆康普顿散射**
- **p-p 相互作用** 被加速宇宙线粒子同周围热质子间发生非弹性碰撞， $\pi^0$ 衰变产生高能光子。同时**p-p**相互作用过程中产生次级 $e^\pm$ 。



# 粒子注入演化模型

超新星遗迹多波段非热辐射的粒子注入演化模型由**Sturmer et al. (1997)**提出。假定超新星在均匀星际介质中演化。粒子被激波加速后在超新星遗迹内部经历辐射损失，放出多波段非热辐射。电子和质子能量分布满足方程

$$\frac{\partial n_e(E_e, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial E_e} \left[ \dot{E}_e^{\text{tot}} n_e(E_e, t) \right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial E_e^2} [D(E_e, t) n_e(E_e, t)] + Q_e(E_e, t) - \frac{n_e(E_e, t)}{\tau_{\text{esc}}}, \quad (4.39)$$

$$\frac{\partial n_p(E_p, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial E_p} \left[ \dot{E}_p^{\text{tot}} n_p(E_p, t) \right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial E_p^2} [D(E_p, t) n_p(E_p, t)] + Q_p(E_p, t) - \frac{n_p(E_p, t)}{\tau_{\text{esc}}}.$$

电子：同步辐射，韧致辐射，逆康普顿散射，库仑碰撞，绝热膨胀  
质子：库仑碰撞，绝热膨胀，p-p相互作用。



**p-p**相互作用过程中，质子损失能量较大，因此把**p-p**相互作用过程当成逃逸过程处理。

$$\tau_{\text{pion}}(E_p) = [c\beta_p n_{\text{SNR}} \sigma_{\text{pp}}]^{-1}$$

$$\sigma_{\text{pp}}(E_p) = (34.3 + 1.88L + 0.25L^2) \left[ 1 - \left( \frac{E_{\text{th}}}{E_p} \right)^4 \right] \text{ mb} ,$$

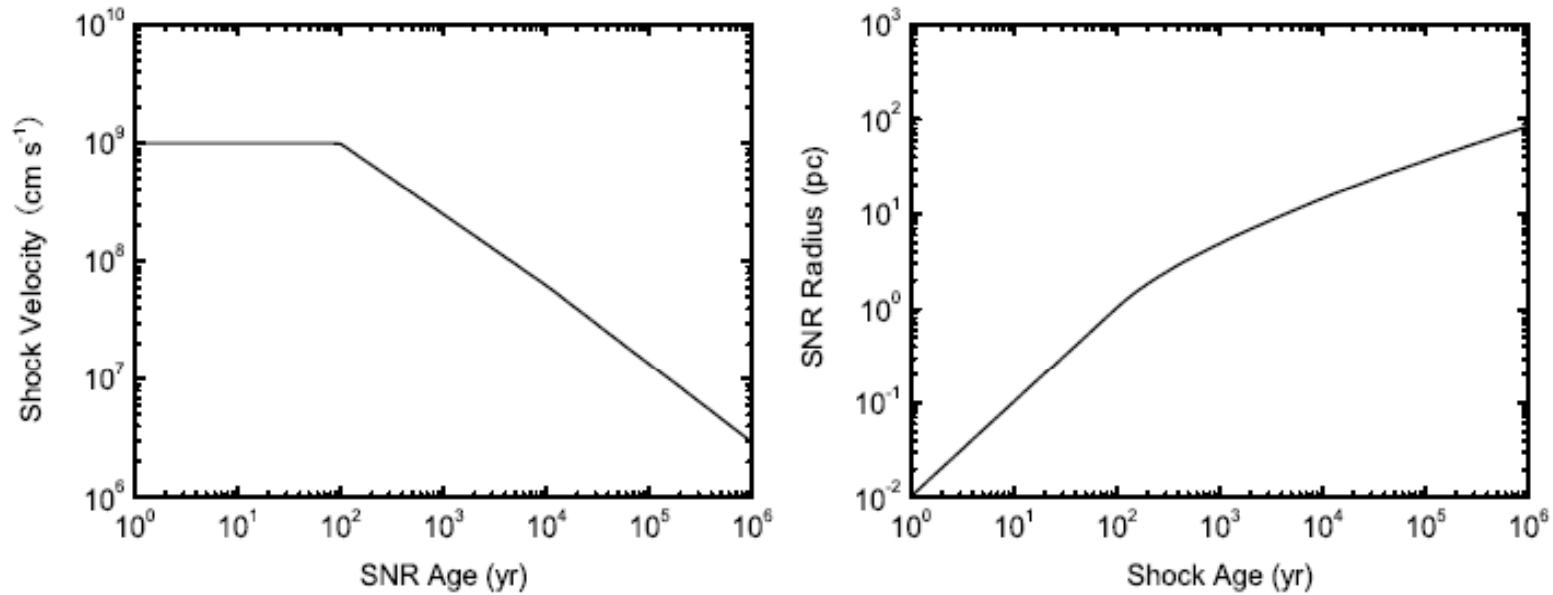
超新星遗迹演化过程：自由膨胀相，绝热相（**Sedov**相），辐射相。激波速度演化公式为

$$v_S(t) = \begin{cases} v_0 & t < t_{\text{Sed}}, \\ v_0 \left( \frac{t}{t_{\text{Sed}}} \right)^{-3/5} & t_{\text{Sed}} \leq t < t_{\text{rad}}, \\ v_0 \left( \frac{t_{\text{rad}}}{t_{\text{Sed}}} \right)^{-3/5} \left( \frac{t}{t_{\text{rad}}} \right)^{-2/3} & t_{\text{rad}} \leq t . \end{cases}$$

则激波半径为

$$R_S(t) = \begin{cases} v_0 t & t < t_{\text{Sed}} \\ v_0 t_{\text{Sed}} \left[ 2.5 \left( \frac{t}{t_{\text{Sed}}} \right)^{\frac{2}{5}} - 0.6 \right] & t_{\text{Sed}} \leq t < t_{\text{rad}} \\ v_0 t_{\text{Sed}} \left[ 3 \left( \frac{t_{\text{rad}}}{t_{\text{Sed}}} \right)^{\frac{2}{5}} \left( \frac{t}{t_{\text{rad}}} \right)^{\frac{1}{3}} - 0.5 \left( \frac{t_{\text{rad}}}{t_{\text{Sed}}} \right)^{\frac{2}{5}} - 1.5 \right] & t_{\text{rad}} < t . \end{cases}$$

激波速度与半径示意图



粒子在超新星遗迹激波中被加速，加速率为

$$\dot{E}_{\text{shock}} = 100 \frac{B_0 v_8^2(t)}{f R_J} \text{ MeV s}^{-1}$$

$B_0$ 为周围介质内磁场， $v_8$ 为激波速度， $f=10$ ,  $R_J=1$ 。则由激波年龄决定的粒子截断能量为

$$E_{\text{max1}}(t) \approx 3.15 \times 10^9 \int_0^t \frac{dt}{\text{yr}} \frac{B_{\text{ISM}} v_8^2(t)}{f R_J} \text{ MeV}$$

对被加速的电子而言，同步辐射损失在高端显著，则由同步辐射损失决定的截断能量为

$$E_{\text{max2}}(t) = 2 \times 10^5 (f R_J B_0)^{-0.5} v_8(t) \text{ MeV}$$

由逃逸过程决定的截断能量为

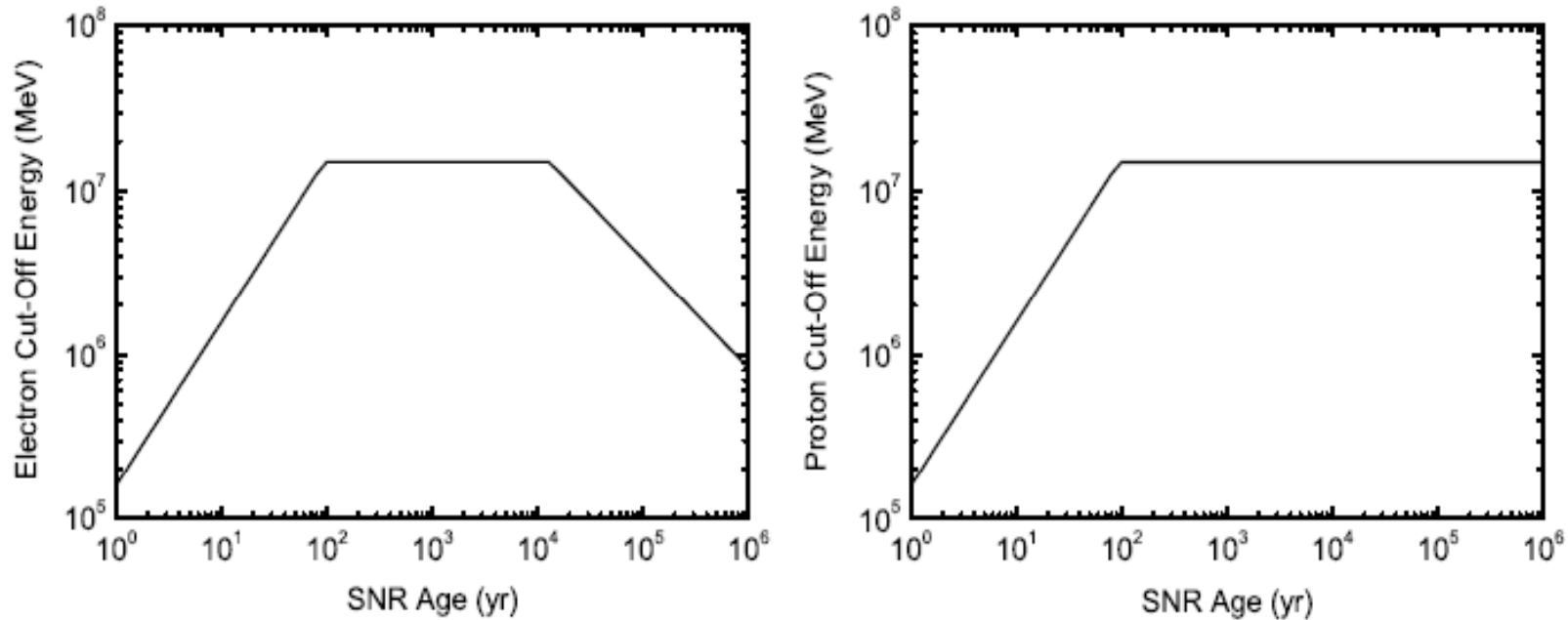
$$E_{\text{max3}}(t) = \frac{e B_0 \lambda_{\text{max}}}{f}$$

则最后电子和质子的截断能量分别为

$$E_{e, \max}(t) = \min(E_{\max1}(t), E_{\max2}(t), E_{\max3}(t)) \quad ,$$

$$E_{p, \max}(t) = \min(E_{\max1}(t), E_{\max3}(t)) \quad .$$

不同年龄时超新星遗迹内被注入的电子与质子的截断能量



$$E_{51} = 1.5, M_{\text{ej}} = 1.5M_{\odot}, n_{\text{ISM}} = 10 \text{ cm}^{-3}, B_{\text{ISM}} = 5 \mu\text{G}, \lambda_{\text{max}} = 10^{17} \text{ cm}.$$

初级粒子注入率为

$$Q_e^{\text{pri}}(E, t) = Q_e^0 G(t) [E(E + 2m_e c^2)]^{-[(\alpha+1)/2]} (E + m_e c^2) \exp\left(-\frac{E}{E_{e, \max}(t)}\right)$$

$$Q_p^{\text{pri}}(E, t) = Q_p^0 G(t) [E(E + 2m_p c^2)]^{-[(\alpha+1)/2]} (E + m_p c^2) \exp\left(-\frac{E}{E_{p, \max}(t)}\right).$$

**G(t)**是为保证激波单位表面积上加速的粒子数一定而引入的因子

$$G(t) = \begin{cases} [R_S(t_{\text{Sed}})/R_S(t)] & t \leq t_{\text{rad}} \\ 0 & t > t_{\text{rad}} \end{cases} \quad K_{\text{ep}} = Q_e^0/Q_p^0$$

认为激波在辐射相到来以前注入粒子的能量为**E<sub>par</sub>**，则有

$$E_{\text{par}} = \int_0^{t_{\text{rad}}} dt V_{\text{SNR}}(t) \left( \int_0^{E_{e, \max}} dE E Q_e(E, t) + \int_0^{E_{p, \max}} dE E Q_p(E, t) \right),$$

则可确定出  $Q_e^0$   $Q_p^0$

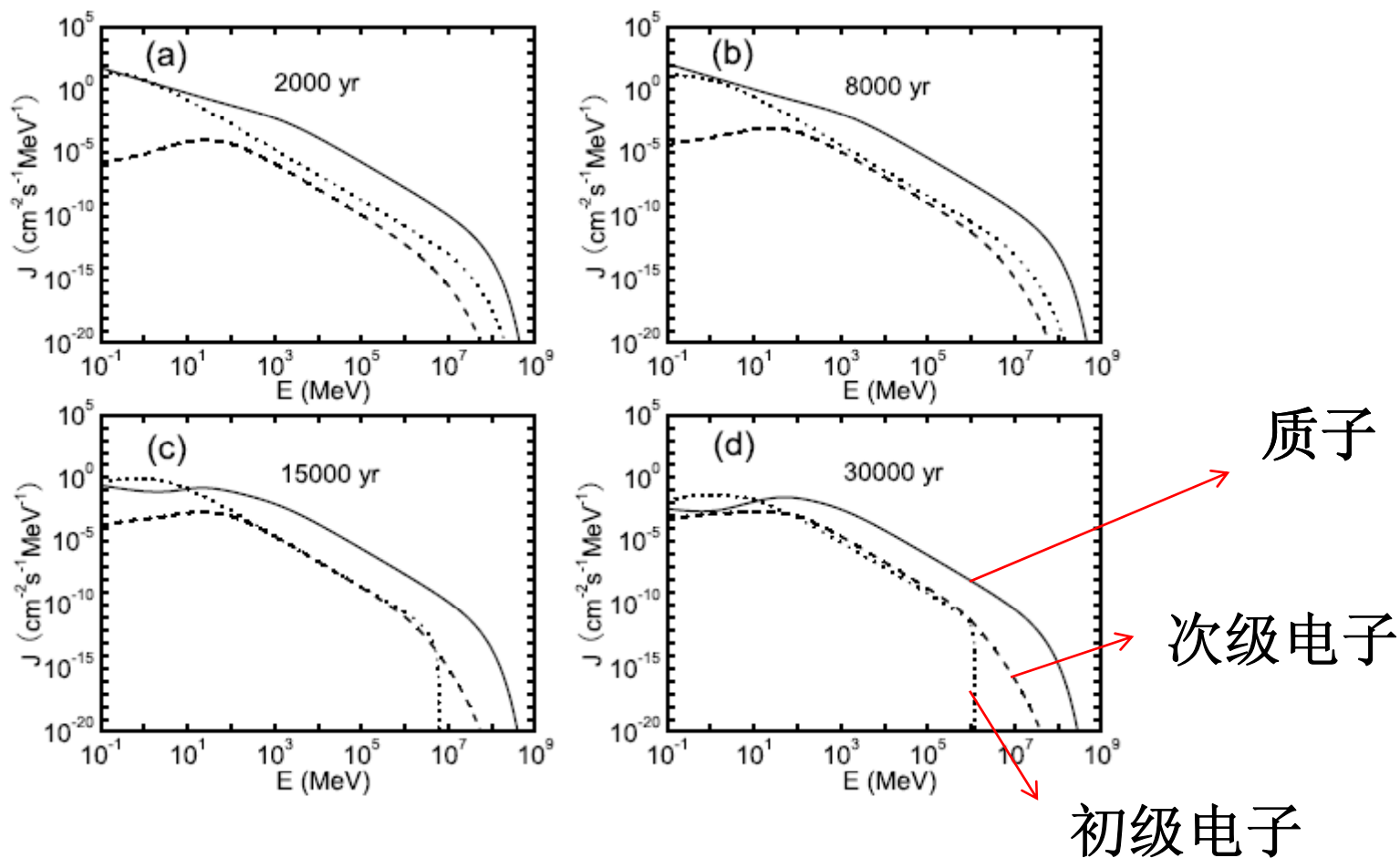
被激波加速的质子可与周围物质发生**p-p**相互作用，可产生次级正负电子，因此电子的源项应加入这些次级正负电子的贡献。

$$Q_e(E, t) = Q_e^{\text{pri}} + Q_{e^+}^{\text{sec}}(E, t) + Q_{e^-}^{\text{sec}}(E, t) ,$$

$$Q_{e^+}^{\text{sec}}(E, t) = 4\pi n_{\text{SNR}} \int dE_p J_p(E_p, t) \frac{d\sigma(E_{e^+}, E_p)}{dE_{e^+}} ,$$

$$Q_{e^-}^{\text{sec}}(E, t) = 4\pi n_{\text{SNR}} \int dE_p J_p(E_p, t) \frac{d\sigma(E_{e^-}, E_p)}{dE_{e^-}} ,$$

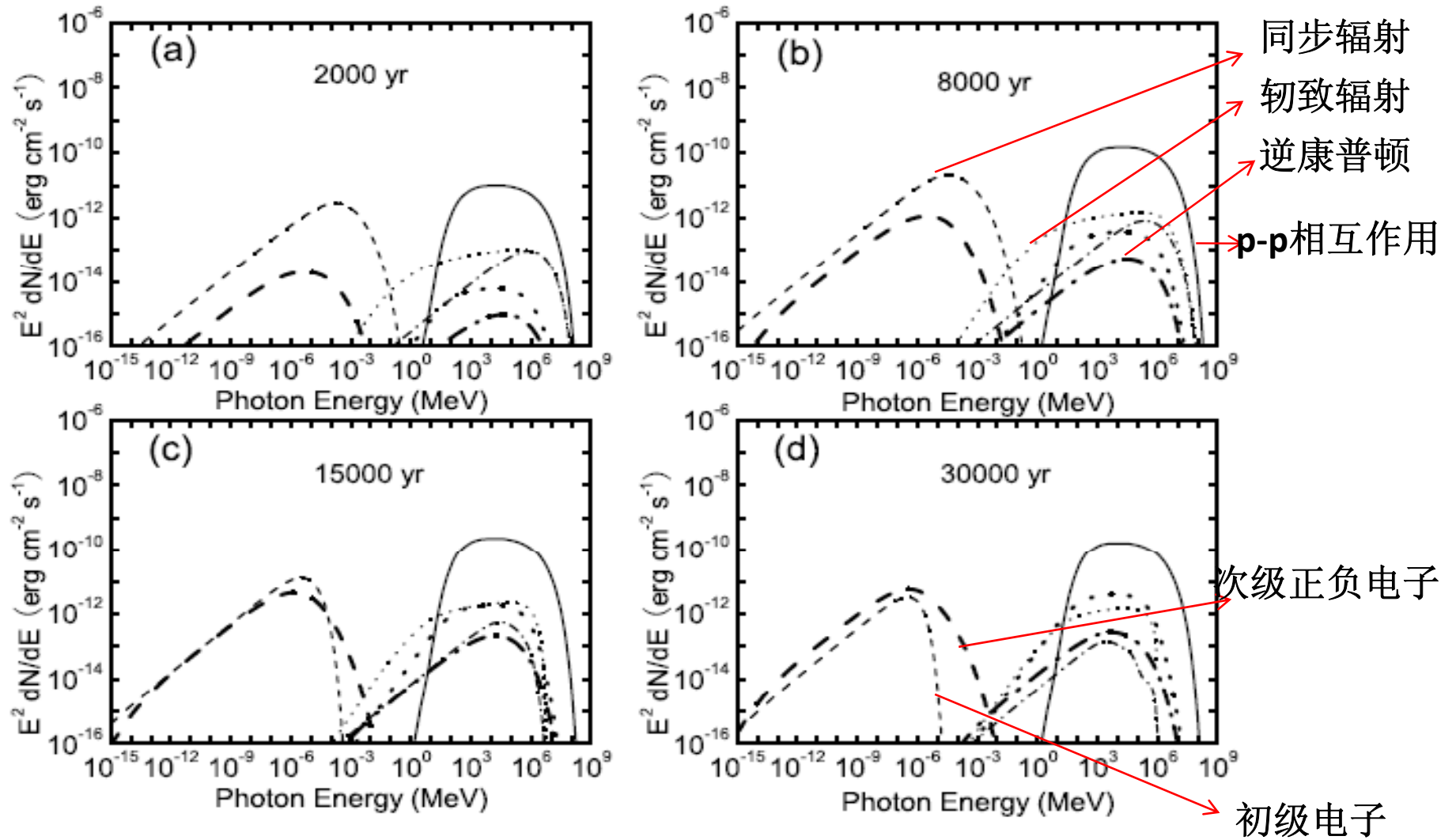
通过解粒子的演化方程，可得到不同年龄时超新星遗迹内电子与质子的能量分布，进而得到来自遗迹的多波段非热辐射。



不同年龄时质子（实线），初级电子（点线）与次级电子（虚线）的能量分布强度。

$$M_{\text{ej}} = 8M_{\odot}, n_0 = 10 \text{ cm}^{-3}, \alpha = 2.0, B_0 = 5\mu\text{G}, K_{ep} = 1 \times 10^{-3}.$$





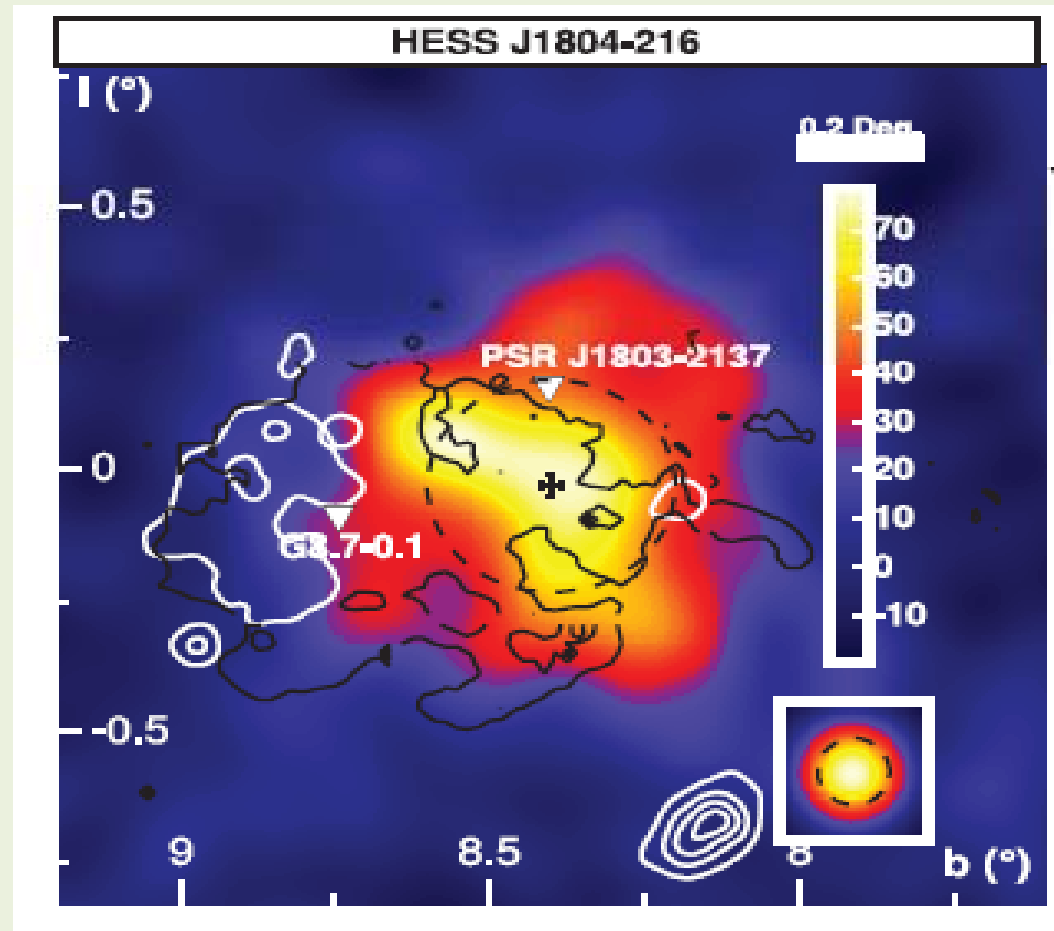
同步辐射：虚线；逆康普顿散射：点虚线；韧致辐射：点线；**p-p**相互作用，实线。其中粗线表示次级正负电子的辐射。

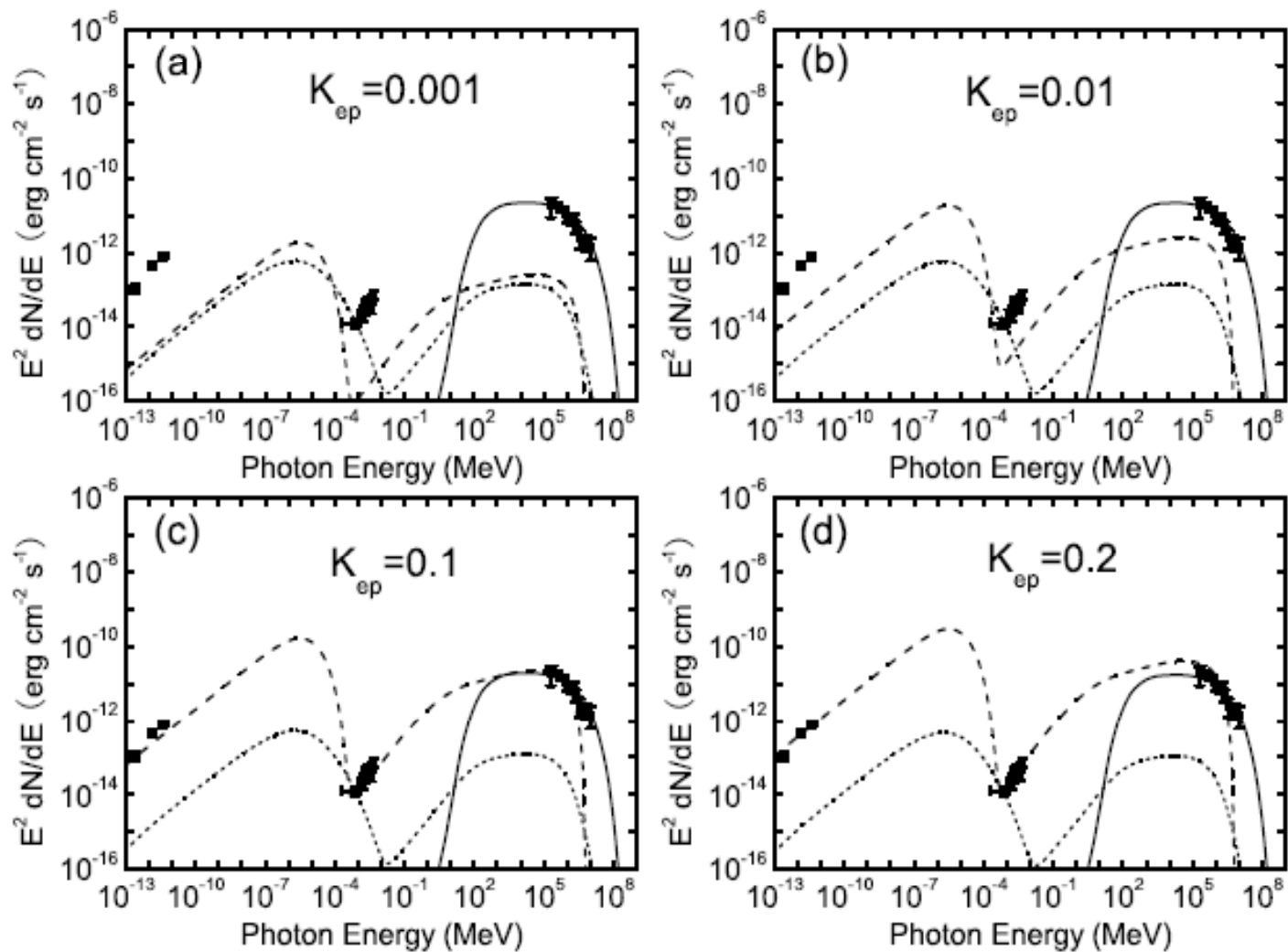
# G8.7-0.1

距离 $6 \pm 1$  kpc，年龄  
约为15000 yr。

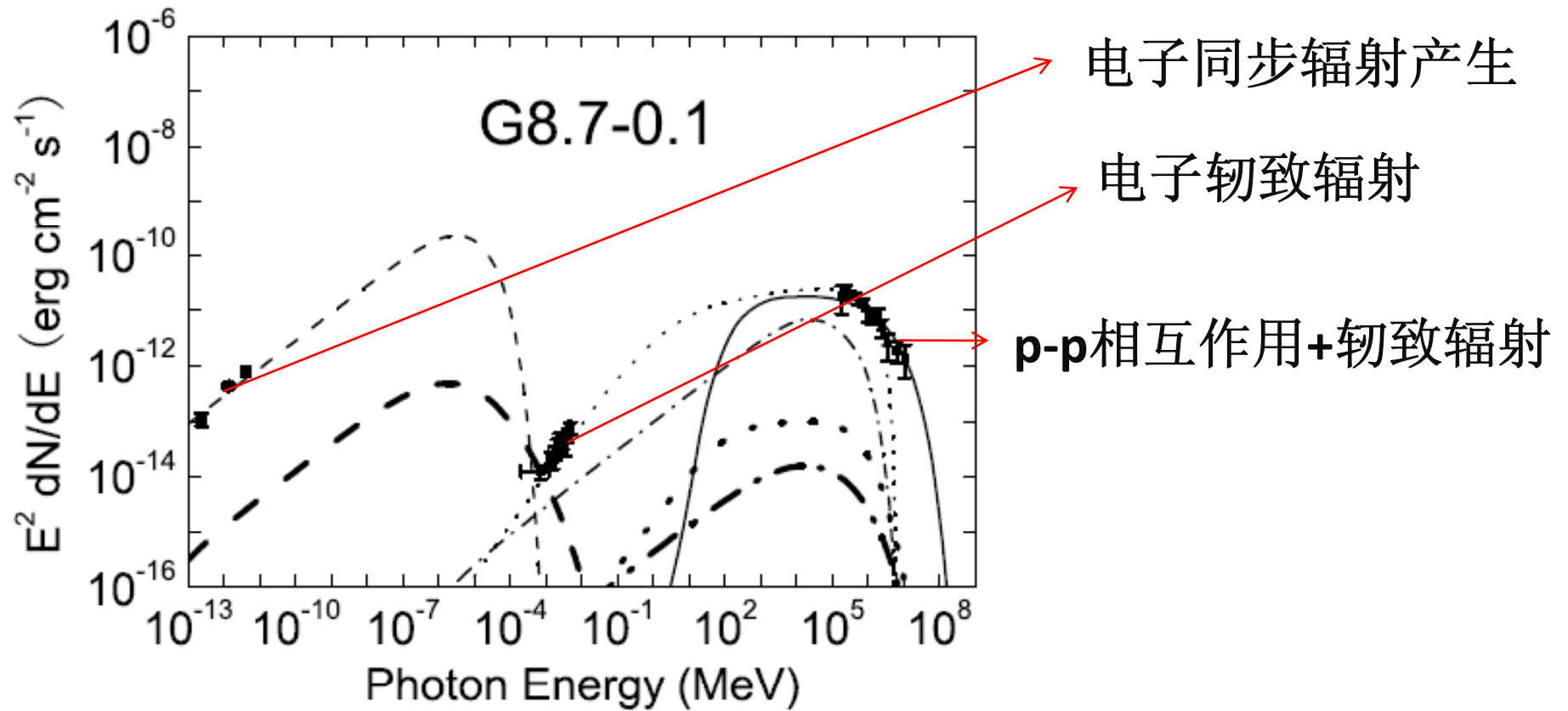
**HESS J1804-216** HESS  
巡天新发现源中最亮  
的一颗，光指数  
 $2.72 \pm 0.06$ 。

Chandra 扩展源CXOU  
J180351.4-213707，  
很可能为甚高能源  
**HESS J1804-216** 的X射  
线对应体，光指数1.2。





$$d = 6 \text{ kpc}, T = 15000 \text{ yr}, n_0 = 8 \text{ cm}^{-3}, \alpha = 2.0, B_0 = 6 \mu\text{G}.$$



同步辐射（虚线），逆康普顿散射（点虚线），  
韧致辐射（点线），**p-p**相互作用（实线）。  
次级粒子辐射（粗线）。

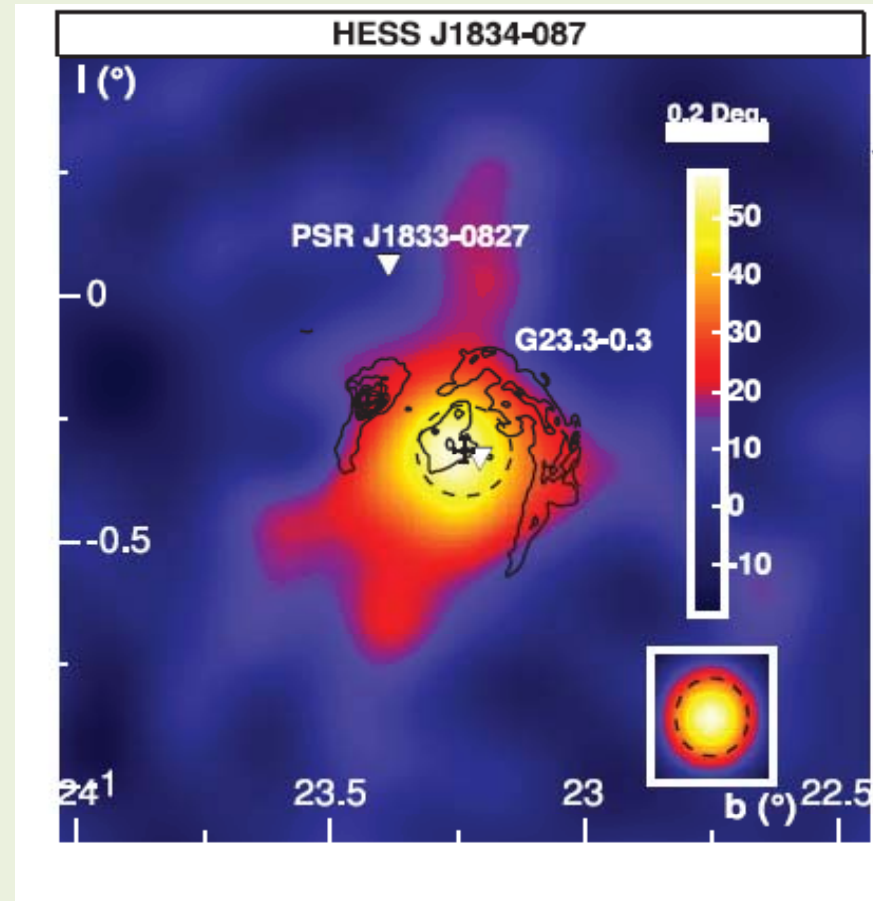
# G23.3-0.3 (W41)

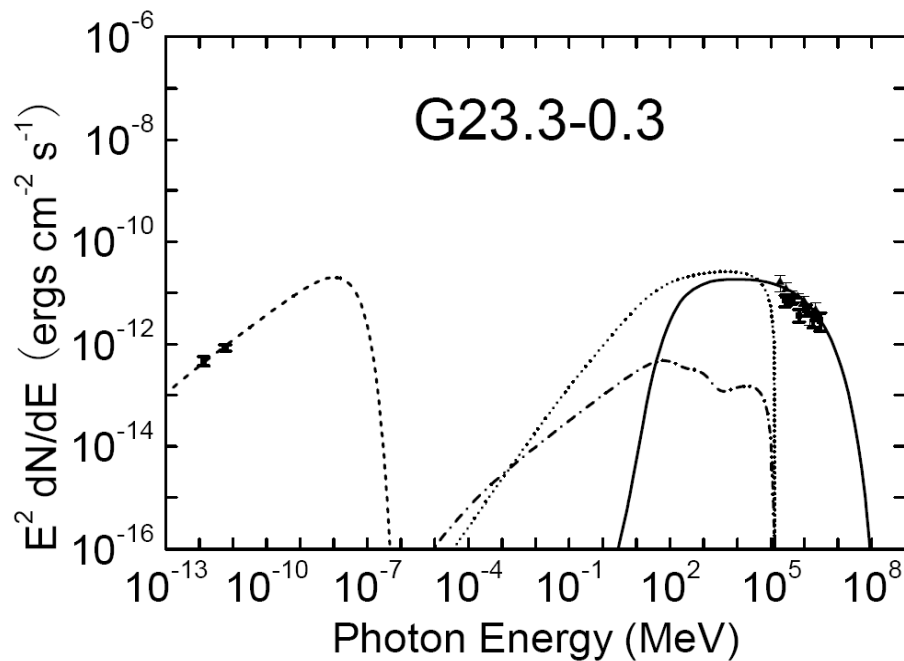
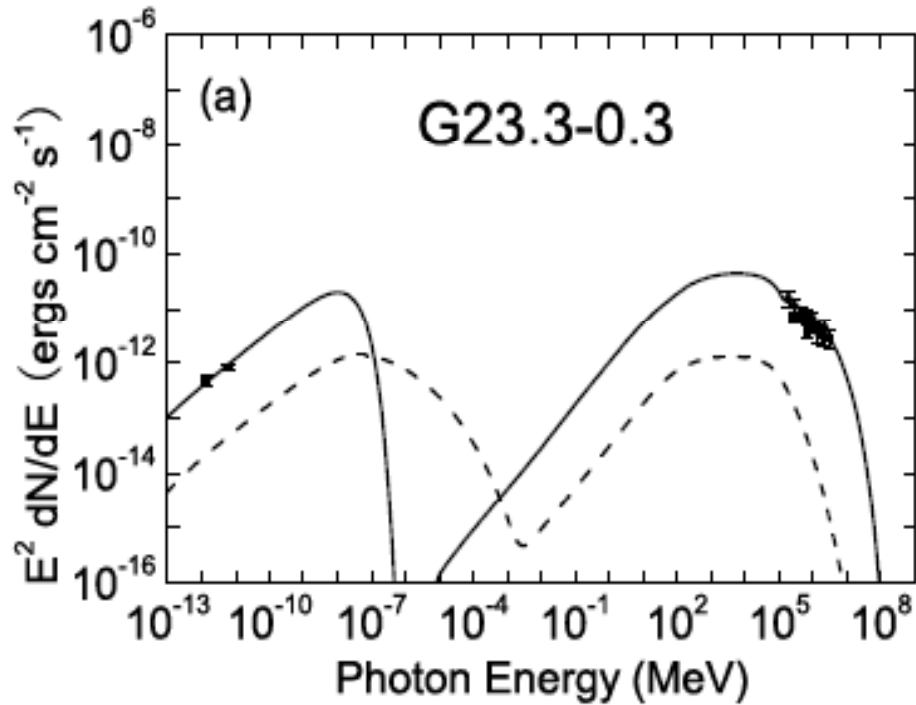
射电波段具有不对称壳层结构，距离 $4.0 \pm 0.2$  kpc，年龄约为 $10^5$ 。

HESS J1834-087 光指数  $2.45 \pm 0.16$ 。

MAGIC 光指数  $2.5 \pm 0.2$ 。

XMM-Newton 弥散X射线辐射，强烈吸收，光指数  $2.0 \pm 0.7$ 。





**80000 yr, 4.2 kpc**

**nISM: 10  $\text{cm}^{-3}$**

**BISM: 7  $\mu\text{G}$**

**Ke $p$ : 0.2**

次级电子的辐射明显超过初级粒子的。

TeV光子为强子起源。  
射电来自初级电子的同步辐射。

# IC443

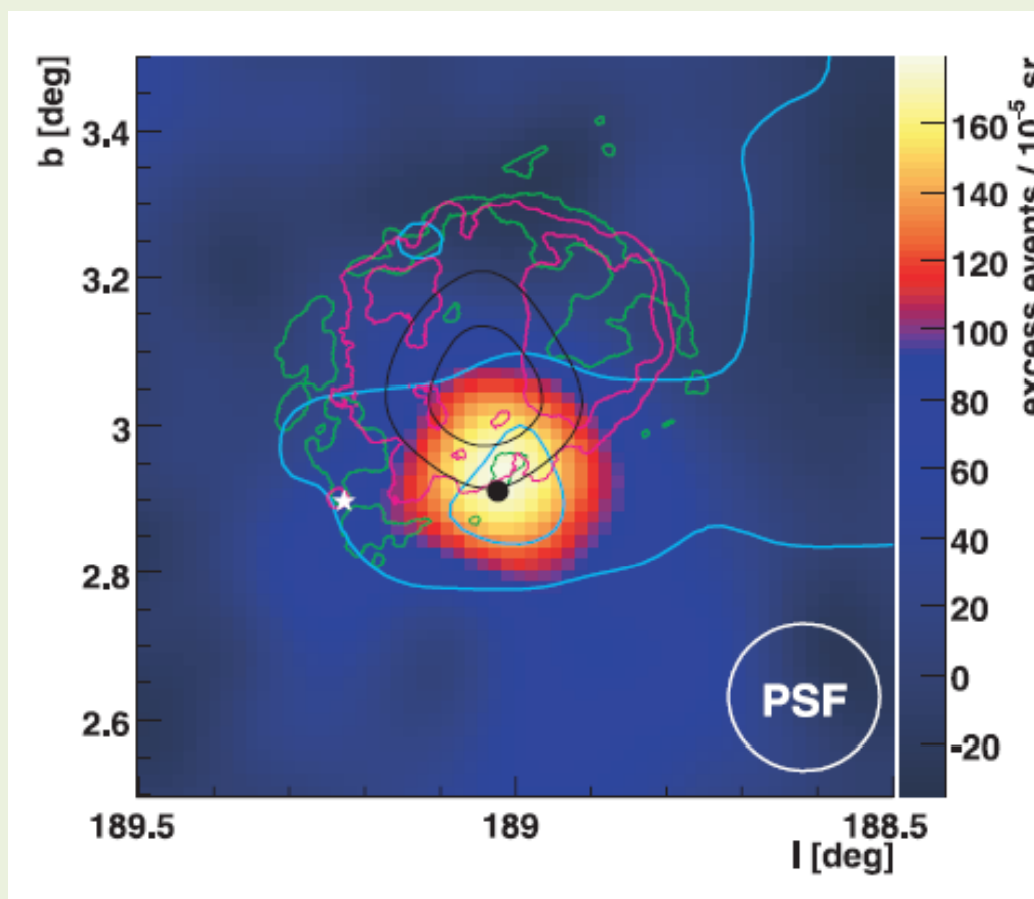
射电壳型，年龄 **30000 yr**  
距离约**1.5 kpc**。

**OH**脉泽辐射，遗迹与分子云相互作用。

**EGRET**发现遗迹中心存在伽玛射线辐射。

**MAGIC**发现来自**IC 443**方向的甚高能伽玛射线辐射，光指数**3.1**。源偏向遗迹南部，与分子云位置一致。

最近**Fermi LAT**的观测到的辐射谱与**EGRET**基本一致。





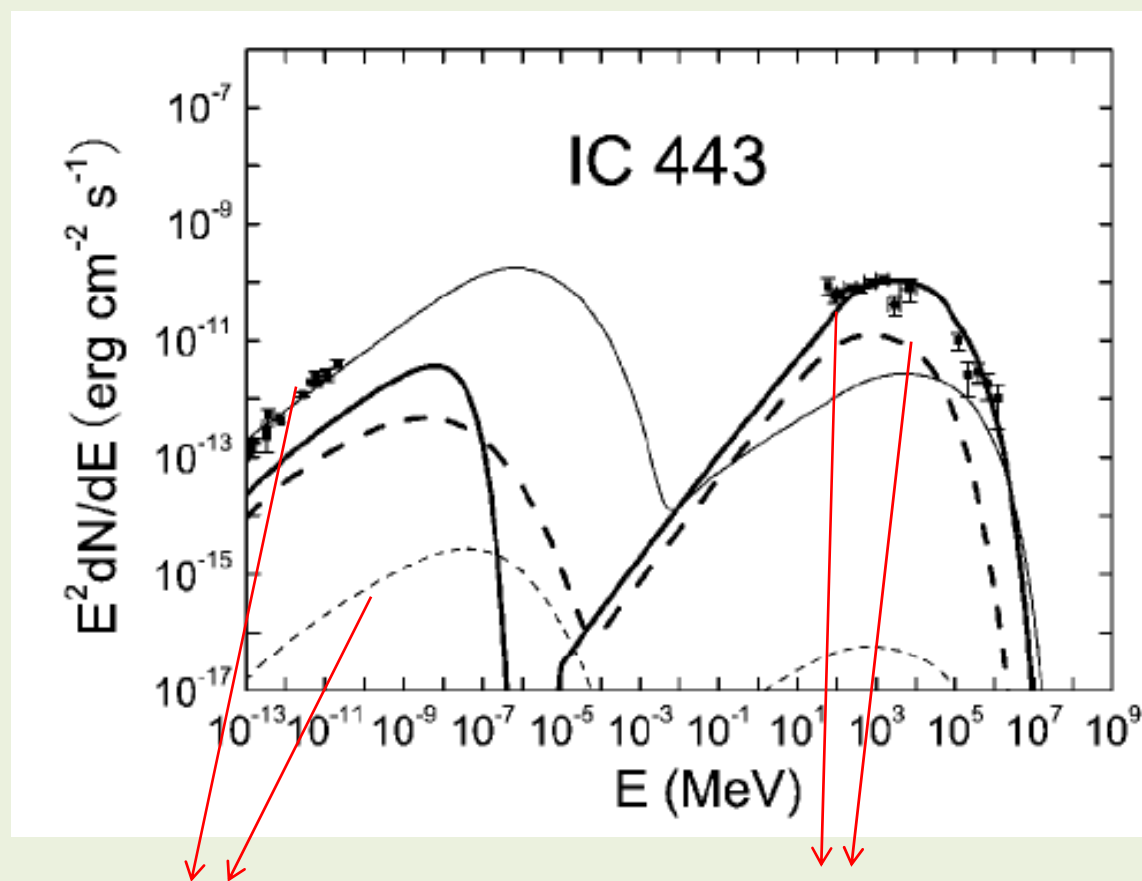
认为IC 443的壳层有一部分与稠密的分子云碰撞，观测到的伽玛射线辐射来自于这部分壳层。

另一部分壳层在较为稀薄的空间中膨胀，观测到的射电辐射来源于这部分壳层。

$f=0.05$ ,  $B=10\mu\text{G}$ ,

$N_{\text{ism}}=0.1\text{ cm}^{-3}$

$N_{\text{MC}}=100\text{ cm}^{-3}$

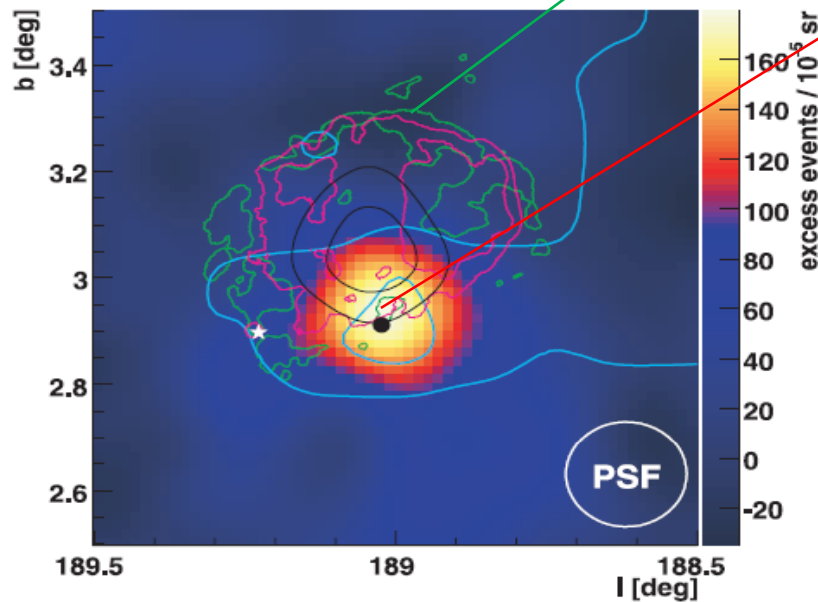
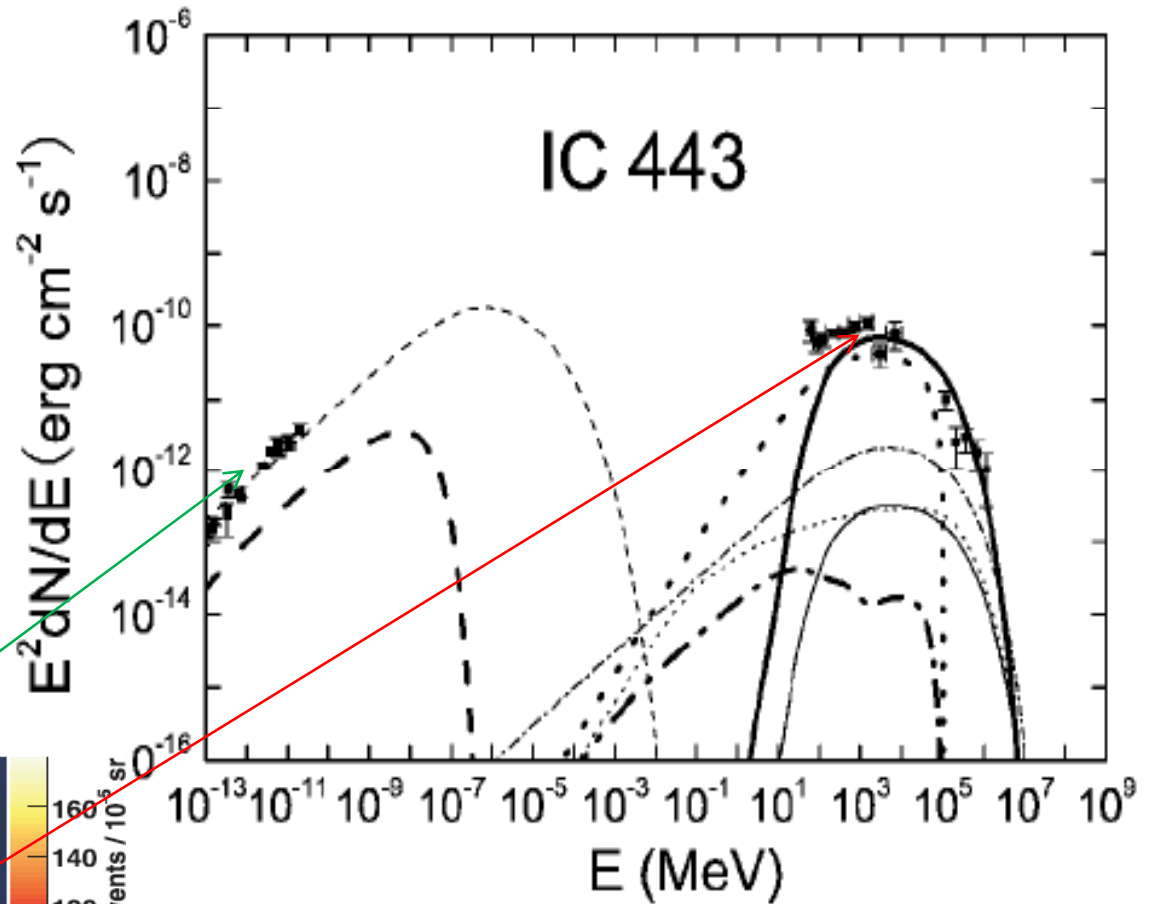


未与分子云相互作用的壳层部分

与分子云相互作用的壳层部分

实线：初级粒子；虚线：次级粒子。  
粗线：与分子云作用的壳层部分。

观测到的射电辐射来自未与分子云相互作用的壳层部分，通过电子同步辐射产生。



高能伽玛射线辐射来自与分子云相互作用的壳层部分，通过电子轫致辐射与质子p-p相互作用产生。

# 总结

对老年超新星遗迹而言，激波减弱，加速粒子效率降低，高能电子经历强烈的同步辐射损失能量。电子损失能量严重，质子通过p-p相互作用产生高能伽玛射线的比重增加。因此，观测到的一些没有X射线对应体或者X射线辐射很弱的甚高能射线源很有可能是年老的超新星遗迹。

p-p相互作用时标很长，在相当长一段时间内次级正负电子都可源源不断产生，因此次级电子相对初级电子对超新星遗迹非热辐射的贡献越来越大。

IC 443 有一部分壳层与稠密的分子云碰撞，观测到的伽玛射线辐射来自于与分子云相互作用的壳层部分，通过p-p相互作用以及韧致辐射产生。

谢谢！