

若いパルサー星雲からの 高エネルギー放射について

田中 周太

大阪大学 宇宙進化グループ
共同研究者
高原 文郎

パルサー星雲の観測

- ✓ Jet – torus 構造

➡ パルサーからのエネルギー供給

- ✓ 膨張速度 $V_{\text{PWN}} \ll c$

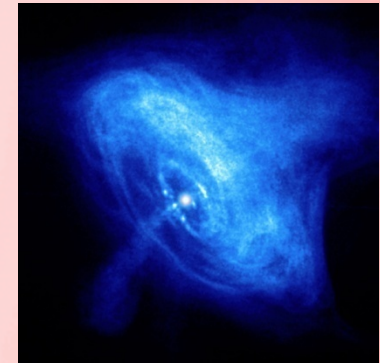
➡ SNRによる閉じ込め

- ✓ 非熱的スペクトル (syn. & IC)

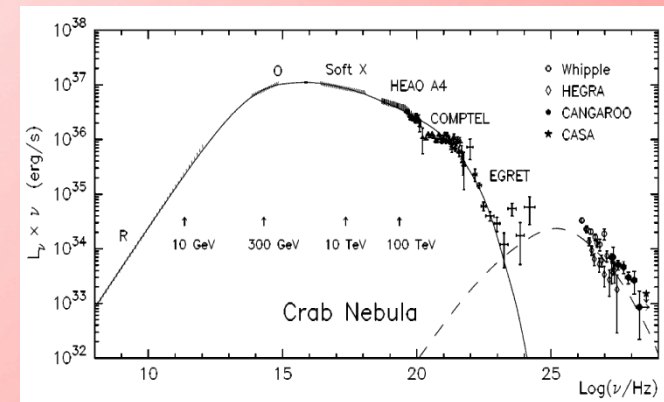
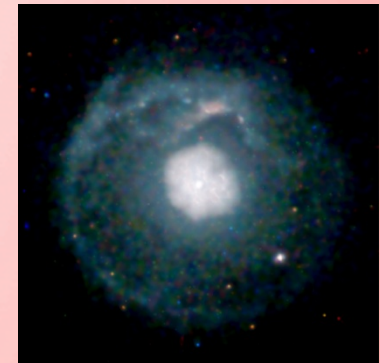
➡ 磁化した e^+e^- plasmaで構成

- ✓ Flat radio & steep X-ray スペクトル

➡ 折れ曲がった非熱的粒子の分布
syn. cooling breakでは説明不可



Chandra



Atoyan & Aharonian 96

問題点

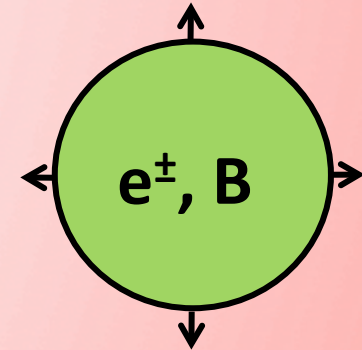
- ✓ **パルサー**: 回転 ($1/2 \Omega_0^2$) & 磁場 (B_{dipole}) エネルギー
パルサーの回転進化を $L_{\text{spin}}(t) = L_0(1 + t/\tau_0)^{-(n+1)/(n-1)}$ として
- ✓ **磁気圏**: 生成される電子陽電子 (pair multiplicity (κ))
かに星雲の電波観測より ($> 10^6 \dot{n}_{\text{GJ}}$)
- ✓ **パルサー風**: 磁化率 (magnetization parameter (σ))
光円柱では $\sigma > 1$ 、一方、終端衝撃波付近では $\sigma < 1$
(共回転プラズマ) (for strong dissipation)
- ✓ **終端衝撃波**: 加速粒子の分布
衝撃波加速などでは作れない折れ曲がったベキ分布

パルサー星雲のスペクトルから調べる

パルサー星雲のスペクトル進化

- ✓ 等速膨張するパルサー星雲スペクトルを
synchrotron + IC(SSC + **ISRF**)で説明する。

CMB, dust IR & star light



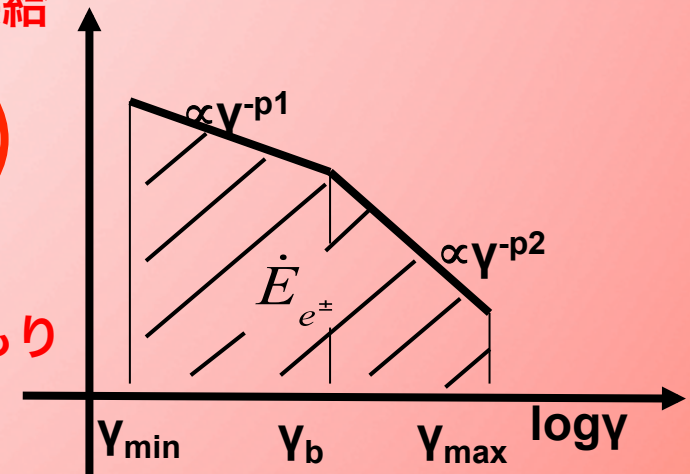
- ✓ 粒子分布の進化、パルサーからのエネルギー収支を考慮。

$$\frac{\partial}{\partial t} N(\gamma, t) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \dot{\gamma}(\gamma, t) N(\gamma, t) = Q_{inj}(\gamma, t)$$

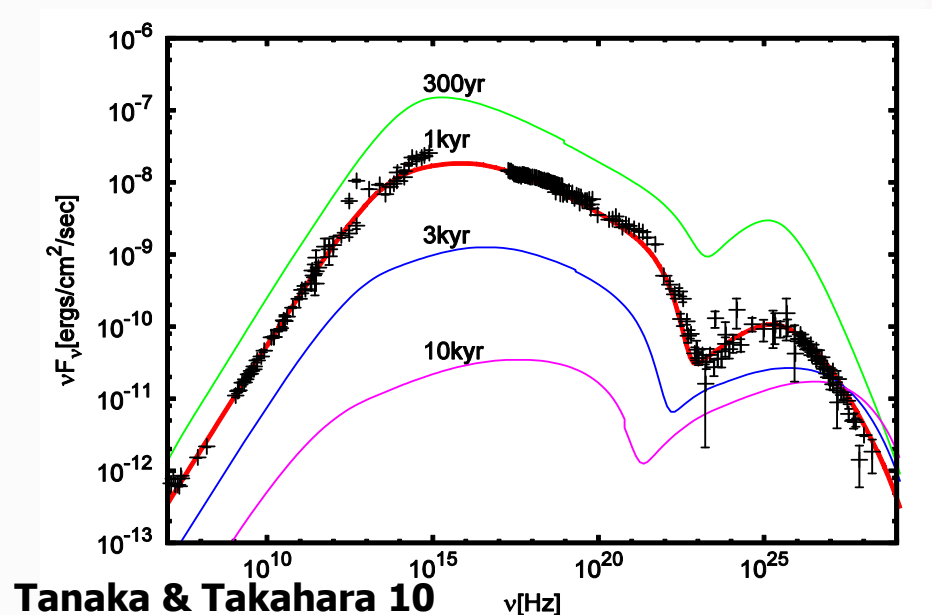
放射+断熱冷却 パルサーから供給

$$\eta \int_0^t L(t') dt' = \frac{4\pi}{3} R_{PWN}^3 \frac{B^2(t)}{8\pi}$$

磁場の見積もり



かに星雲への適用



✓観測をよく再現、
γ線はSSCでよい。
(モデルの妥当性)

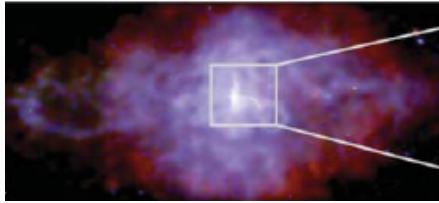
✓今、85μG($\eta=0.005$)
(粒子エネルギー優勢)

	radio[%/yr]	Opt.[%/yr]
モデル	-0.16	-0.24
観測	-0.17	-0.55

Vi;nyaikin 07 (radio), Smith 03 (opt.)

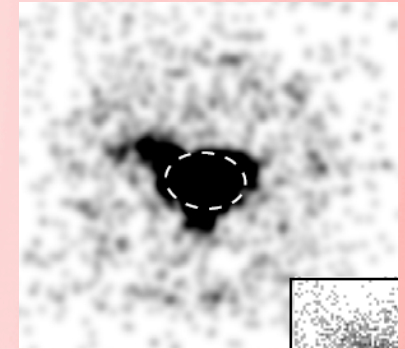
✓電波や可視光の減光率
を説明できる。
(進化も説明可)

電波、X線(+γ線)の観測がある天体に適用。



Chandra

3C58 & G310.6-1.6



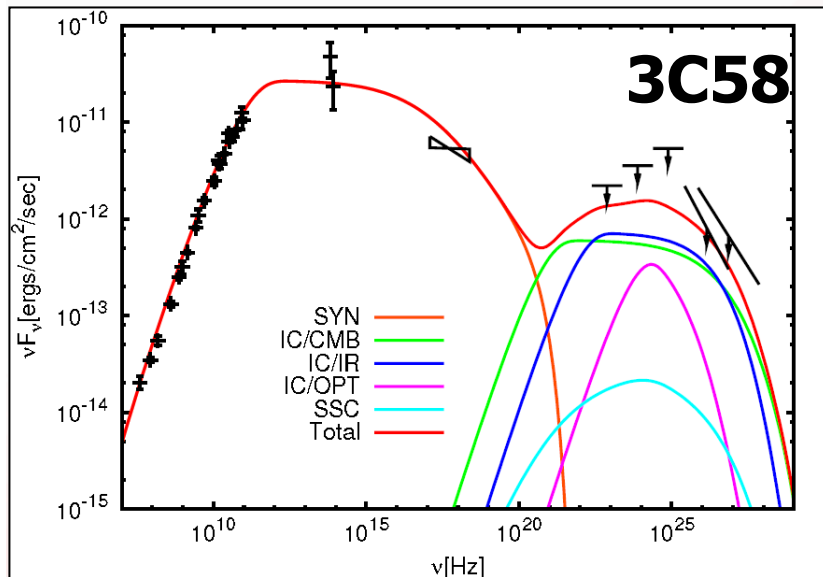
Renaud+10

γ 線フラックスの上限



η の上限 + 年齢(供給される全エネルギー)がわかる。

$$P_{syn}/P_{IC} = U_B/U_{ph} \propto \eta E_{total}(t_{age}) U_{ph} \quad E_{total}(t_{age}) = \int_0^{t_{age}} L_{spin}(t) \approx E_e (\eta \ll 1)$$



Tanaka & Takahara 11 in prep.

For 3C58,

$$\eta > 3 \times 10^{-3} \quad (B > 18 \mu\text{G})$$

$$t_{age} < 2.5 \text{ kyr} \quad (E_{total} < 4 \times 10^{48} \text{ erg})$$

For G310.6-1.6,

$$\eta > 5 \times 10^{-4} \quad (B > 15 \mu\text{G})$$

$$t_{age} < 1.2 \text{ kyr} \quad (E_{total} < 2 \times 10^{48} \text{ erg})$$

Young (< 3kyr) & small η (?)

若いTeVパルサー星雲との比較

TeVガンマ線で見つかっているパルサー星雲は、

Peculiar
object

	Crab	G21.5-0.9	G54.1+0.3	G0.9+0.1	Kes75
η	5×10^{-3}	8×10^{-3}	2×10^{-3}	3×10^{-3}	0.05×10^{-3}
t_{age}	0.95kyr	1.0kyr	1.7kyr	2kyr	0.7kyr

Tanaka & Takahara 11 accepted

3C58 (若いnon-TeVパルサー星雲)の年齢は、

1. SN1181によって形成された？ (0.8kyr)



2. 膨張速度の観測から~2.5kyr old

2.5kyrを採用すると、 $\eta = 3 \times 10^{-3}$!!

(磁化率 σ が小さいのとconsistent?)

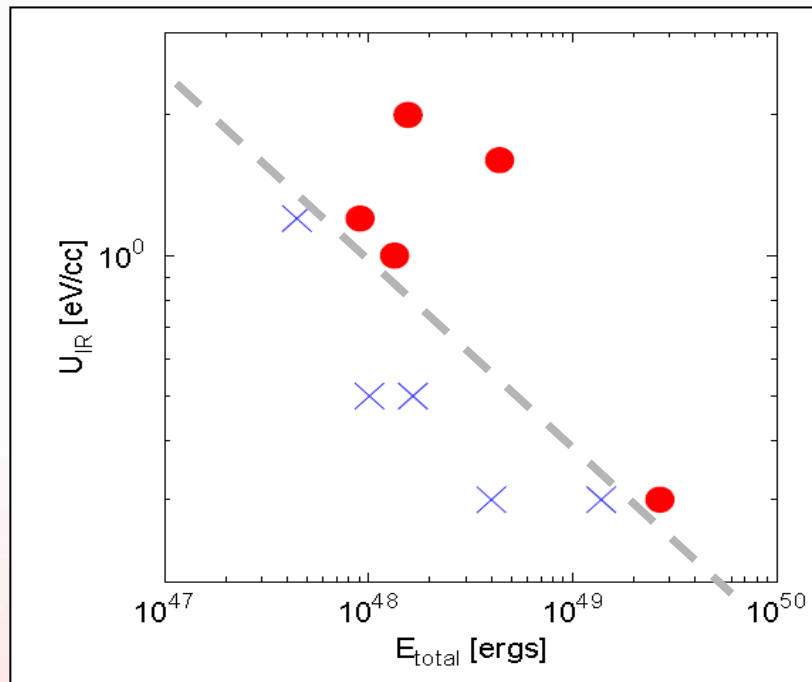
若いパルサー星雲は $\eta = \text{a few} \times 10^{-3}$

パルサー星雲からのガンマ線

ガンマ線で見えるものと見えないものは何が違うのか。

**TeV PWN: Crab, G21.5-0.9,
● G54.1+0.9, Kes75,
G0.9+0.1**

**non-TeV: 3C58, G310.6-1.6
× G292.0+1.8, G11.2-0.3
SNR B0540-69.3
($\eta \sim \text{a few} \times 10^{-3}$ とした)**



Tanaka & Takahara 11 in prep.

パルサーから供給されたエネルギーと

予想される星間光子場の密度
に相関している。

ほとんどのパルサー星雲は

$$10\mu\text{G} < B_{\text{PWN}} < 20\mu\text{G}$$

(Crab, G21.5-0.9 & B0540-69.3以外)

Non-TeV パルサー星雲は銀河面から遠い。

パルサーの回転進化

$\dot{P}$, P , n , t_{age} が与えられると $L_{\text{spin}}(t)$ を決めることができる。

$$L_{\text{spin}}(t) = L_0 \left(1 + t/\tau_0\right)^{-\frac{n+1}{n-1}}$$



回転進化は L_0 と τ_0 で決まる。

(慣性モーメントを仮定)



initial spin energy E_{spin}

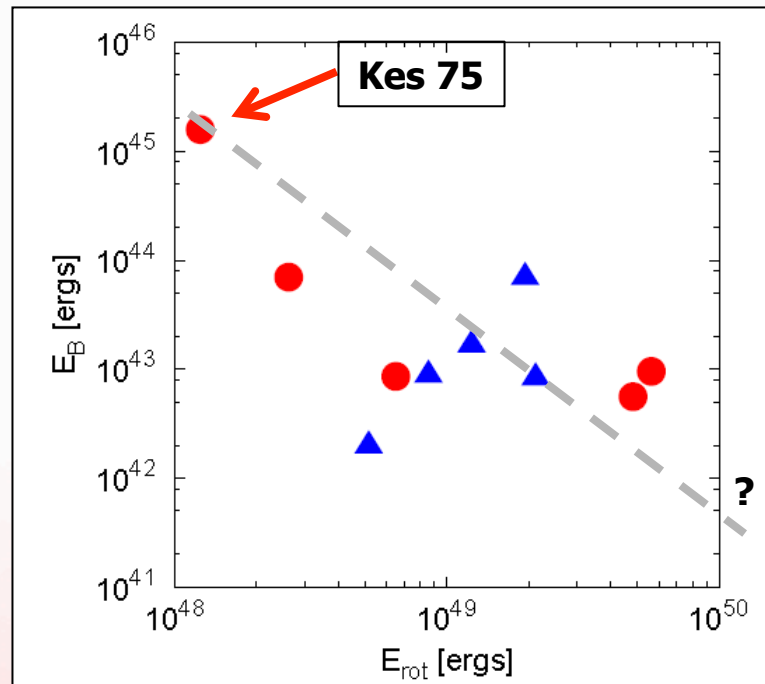
と

magnetic energy E_B

に対応している。

Anticorrelation ?

(dominated by Kes 75)



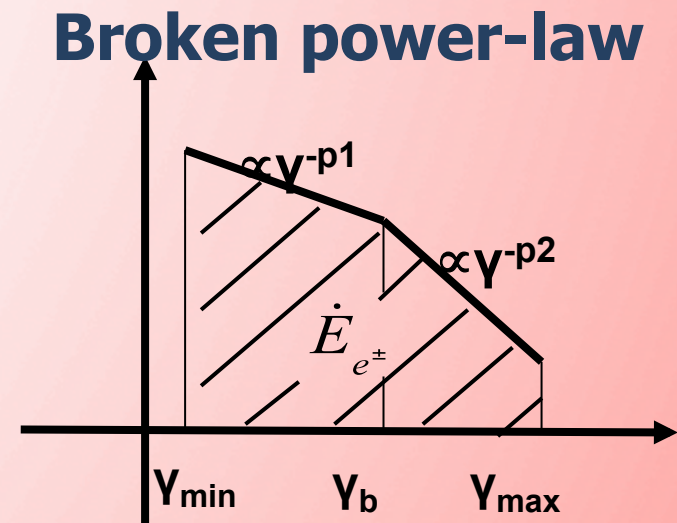
Tanaka & Takahara 11 in prep.

パルサー星雲内の粒子数

パルサー星雲に注入された粒子数を数える。

典型的な 'p1' と 'p2' は、
($1 < p1 < 2 < p2 < 3$)

$$\begin{cases} \dot{E}_{e^\pm} = \int Q_{inj} \gamma mc^2 d\gamma \approx \dot{N}_{e^\pm} \gamma_b mc^2 \\ \dot{N}_{e^\pm} = \int Q_{inj} d\gamma \approx \gamma_{min} Q_{inj}(\gamma_{min}) \end{cases}$$



Particle dominated pulsar wind

$$L_{spin} \approx \Gamma_{wind} \dot{N}_{e^\pm} m_e c^2$$

For Crab, Kes 75, 3C58 & B0540-69.3, $\Gamma_w \ll \gamma_b$ & $\kappa \gg 10^4$.

For G0.9+0.1 & G292.0+1.8, safely $\Gamma_w \sim \gamma_b$ & $\kappa \sim 10^4$.
(because of single power-law injection)

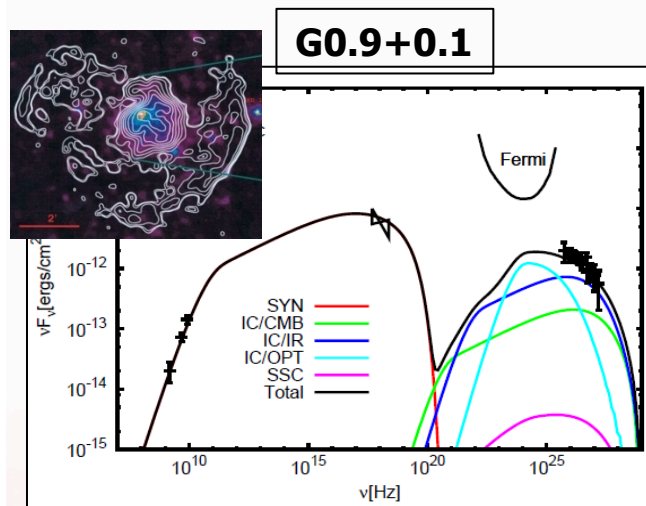
Broken Power-law Injection

スペクトルを説明するためにはbroken power-lawが必要。

(加速機構は不明)

Power-law index of low energy component $1.0 < p_1 < 1.7$

気になるのはlow energy componentの存在

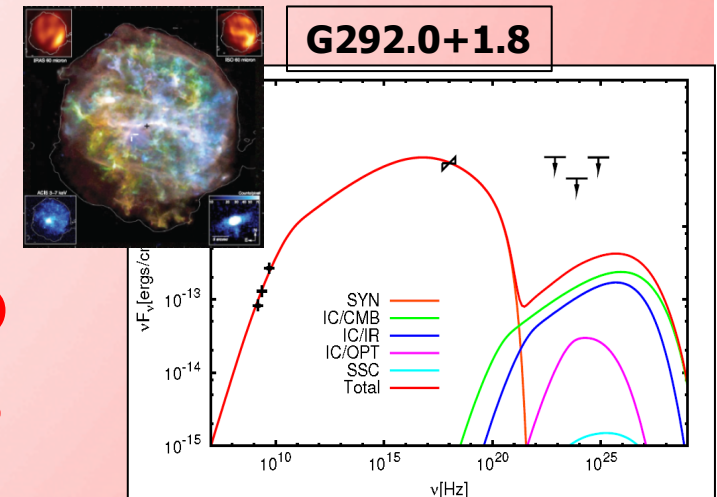


Very simple case

$$\frac{\partial}{\partial t} N - \frac{\partial}{\partial \gamma} \frac{\gamma}{t} N = \delta(\gamma - \gamma_0) \quad \Rightarrow \quad N \propto \gamma^{-1}$$

Two exception

断熱冷却が電波の
スペクトルを作る



まとめ

- ✓ **One-zone** スペクトル進化のモデル。
 - ✓ 若いパルサー星雲(TeV, non-TeV)に適用した。
- ✓ 若いパルサー星雲 (< 3kyr) は $\eta = \text{a few} \times 10^{-3}$ でよさそう。
 - ✓ 3C58のTeVフラックス上限と膨張速度の議論。
- ✓ ガンマ線で見えるかどうかは E_{total} と U_{ISRF} に相関。
- ✓ 中心パルサーの回転、磁場のエネルギーを調べられる。
 - ✓ 半相関?(Kes 75がdominantな相関)
- ✓ **Broken power-law spectrum & wind Lorentz factor.**
 - ✓ 粒子数の下限より、 Γ_w の上限が $\Gamma_w \sim \gamma_b$ or $\Gamma_w \ll \gamma_b$

Lower limit of η & Upper limit of t_{age}

$$P_{IC} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma_c^2 U_{ph} N_{e^\pm}(\gamma_c) \propto U_{ph} \cdot (1 - \eta) E_{total}(t_{age}) / \gamma_b$$

For $(1-\eta) \sim 1$, we get upper limit of E_{total} .

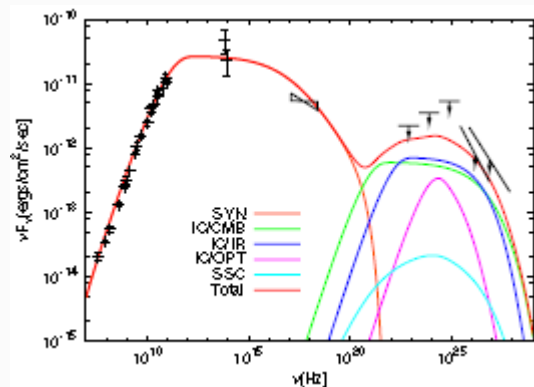
**Because E_{total} is increasing function of t_{age} ,
we also get upper limit of t_{age} .**

$$P_{syn} / P_{IC} = U_B / U_{ph} \propto \eta E_{total}(t_{age}) U_{ph}$$

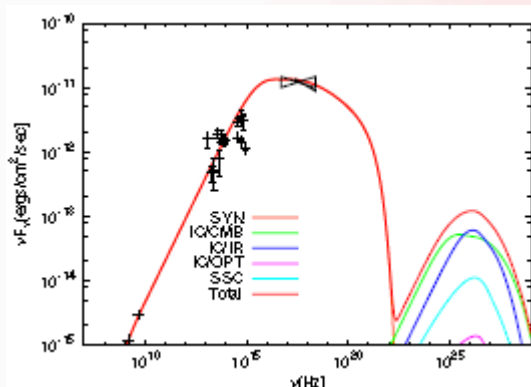
For given upper limit of E_{total} , we get lower limit of η .

Spectrum of non-TeV PWNe

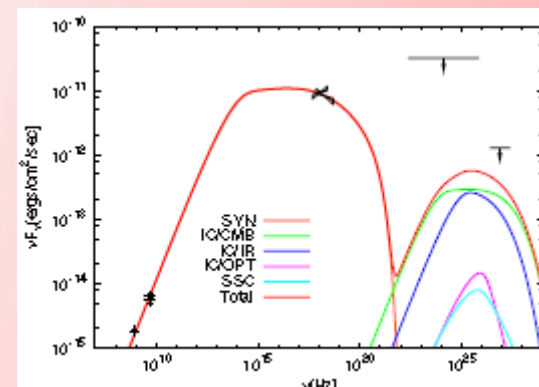
3C58



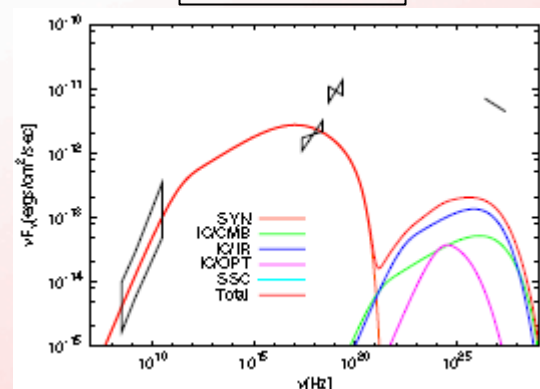
SNR B0540-69.3



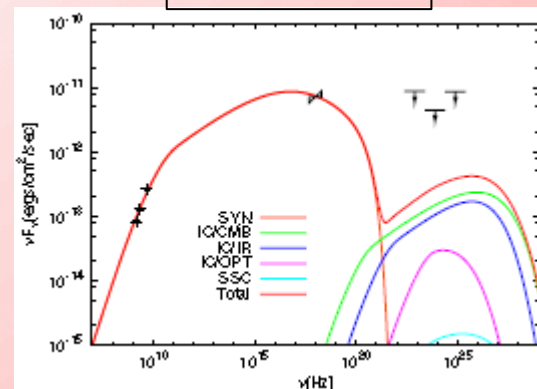
G310.6-1.6



G11.2-0.3



G292.0+1.8



Time Dependent & non-Constant Velocity Expansion

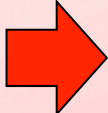
$$\frac{\partial}{\partial t}G(\gamma, t) - \alpha \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{\gamma}{t} G(\gamma, t) \right) = q_0 (t/t_1)^{-\beta} \delta(\gamma - \gamma_1) \Theta(t - t_1)$$

consider the particles suffered from adiabatic cooling

α : accelerated ($\alpha > 1$) & decelerated ($\alpha < 1$) expansion

β : time dependence of injection rate

$$N(\gamma, t) = \frac{q_0 t}{\alpha \gamma_1} \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_1} \right)^{\frac{1-\beta}{\alpha}-1} \left(\frac{t}{t_1} \right)^{-\beta} \Theta(\gamma_1 - \gamma) \Theta \left(\gamma - \left(\frac{t_1}{t} \right)^{\alpha} \gamma_1 \right)$$


$$N(\gamma, t) \propto \gamma^{\frac{1-\beta}{\alpha}-1}$$

Characteristic Age & True Age

TeV PWNe

	Crab	G21.5-0.9	G54.1+0.3	G0.9+0.1	Kes75
τ_c	1.2kyr	4.9kyr	2.7kyr	5.3kyr	0.7kyr
t_{age}	0.95kyr	1.0kyr	1.7kyr	2kyr	0.7kyr

non-TeV PWNe

	3C58	G310.6-1.6	B0540-69.3	G292.0+1.8	G11.2-0.3
τ_c	5.4kyr	13kyr	1.7kyr	2.9kyr	23kyr
t_{age}	2.5kyr	0.6kyr	0.7kyr	2.7kyr	2.0kyr

τ_c & t_{age} do not need to be much.

$$\tau_c = \frac{n-1}{2}(\tau_0 + t_{age})$$