

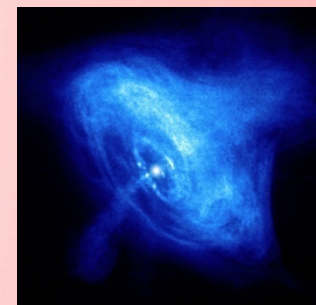
系外パルサー星雲からの TeVガンマ線放射

田中 周太

青山学院大学
(学振特別研究員)

パルサー星雲(PWN)

- 中心パルサー & ジェット+トーラス構造
=>回転駆動パルサーのエネルギー供給で輝く天体。
- 超新星残骸(SNR)の殻 & 膨張速度 $\sim 1000\text{km/s}$
=>SNRにより閉じ込められている。
- 広波長域の非熱的シンクロトロン放射
=>加速粒子と磁場で構成されている。



Chandra



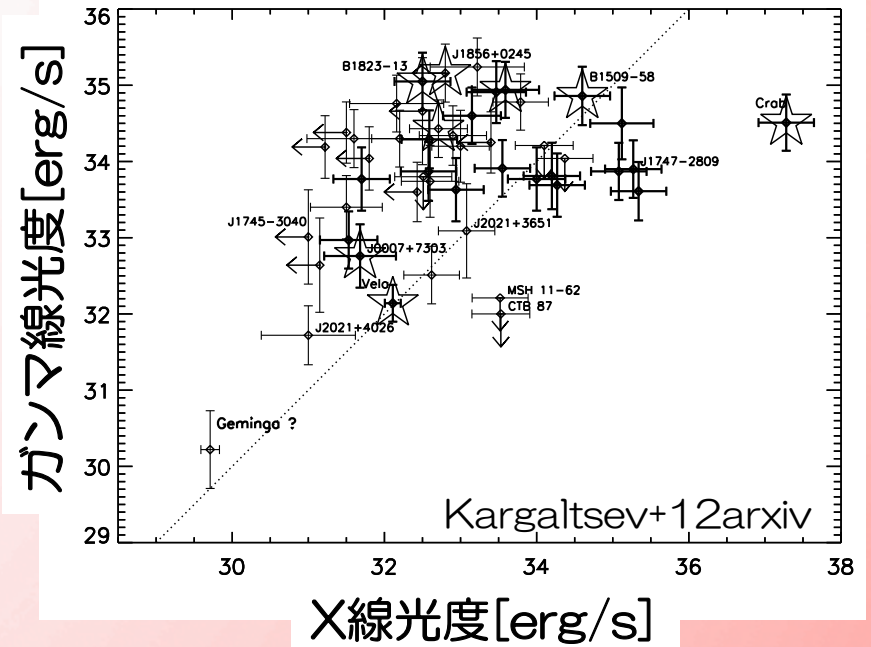
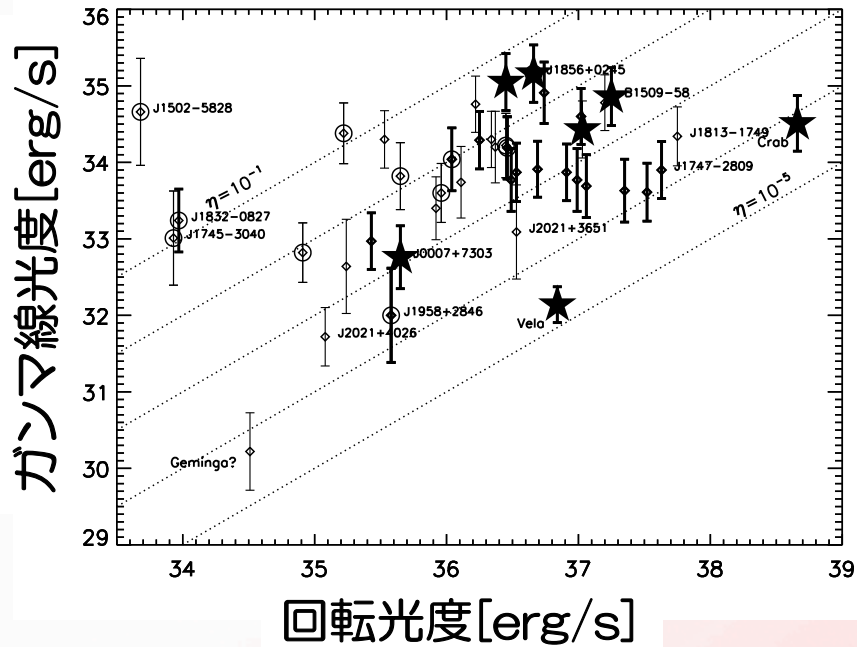
Hester 08

パルサー磁気圏での粒子生成、パルサー風の機構、粒子加速を理解するのが目標!!

パルサー星雲の研究

- ✓ 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
- ✓ 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 ($>10^6 n_{\text{GJ}}$)
- ✓ パルサー風 : 磁化率 (magnetization (σ))
光円柱では $\sigma \gg 1$ 、一方、終端衝撃波付近では $\sigma \ll 1$
(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

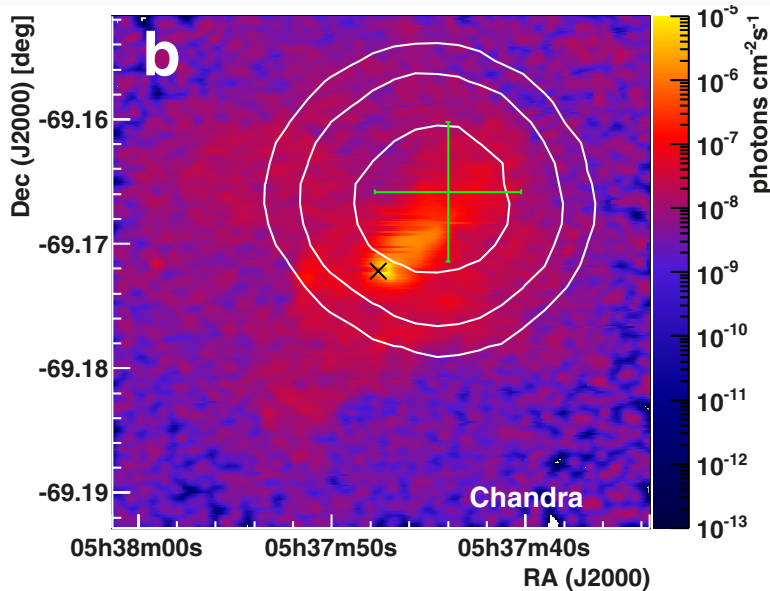
ガンマ線で見たパルサー星雲



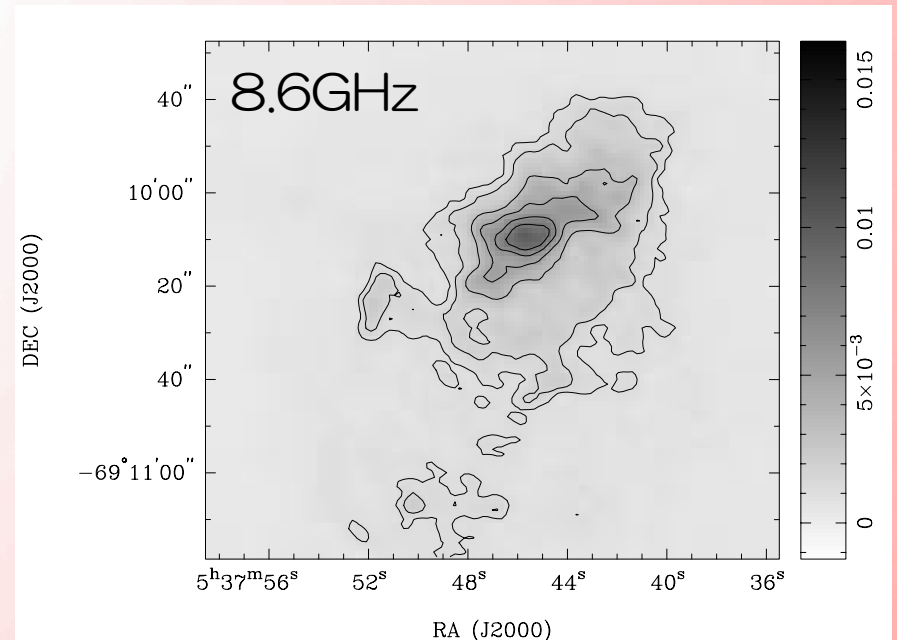
- 多くのPWNが観測されている。
- ガンマ線光度は他の観測量と明らかな相関がない。
- 次世代望遠鏡では非常に多くの天体が見つかるはず。

系外パルサー星雲(N157B)

HESS: Contour, Chandra: Color



Abramowski+12ApJ



Lazendic+00ApJ

- LMC (50kpc) 内のパルサー星雲
- 電波、X線で観測されている。
- パルサーは最高の回転光度 ($4.9e38\text{erg/s}$)
- OB association (LH99) 近傍で、大きく広がっている。

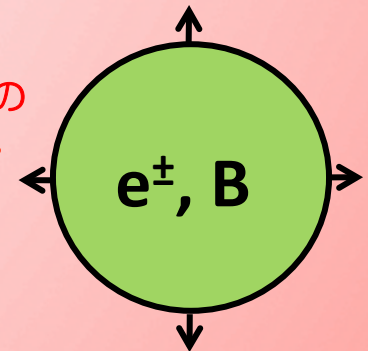
パルサー星雲のスペクトル進化

- 若いパルサー星雲のスペクトルを加速された電子陽電子からのシンクロトロン放射、逆コンプトン散乱で説明する。
- 一様な球状のパルサー星雲内の粒子エネルギー分布関数の進化 ⇒ スペクトルの進化。

パルサーからのエネルギー供給、膨張による断熱冷却、シンクロトロン放射などによる放射冷却

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

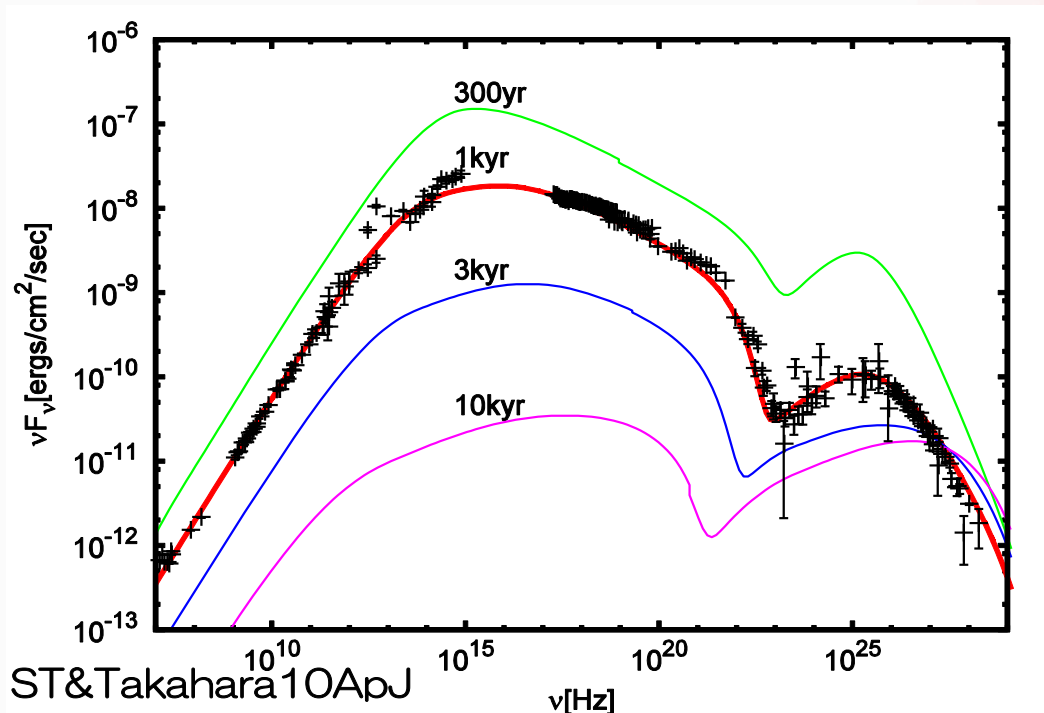
パルサー近傍での粒子加速の情報。



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

磁場の見積もり

かに星雲



□観測をよく再現する。

□1 kyrで磁場は $\sim 85 \mu\text{G}$

□ $\eta = 5 \times 10^{-3}$

□ガンマ線はSSC優勢。

□シンクロトロン光度は
逆コンプトン散乱成分
よりも早く減衰。
($\sim 100\text{TeV}$ で増光)

□電波や可視光の減光率
を説明できる。

電波減光 [%/yr]

可視減光 [%/yr]

計算

-0.16

-0.24

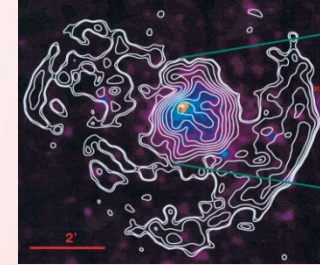
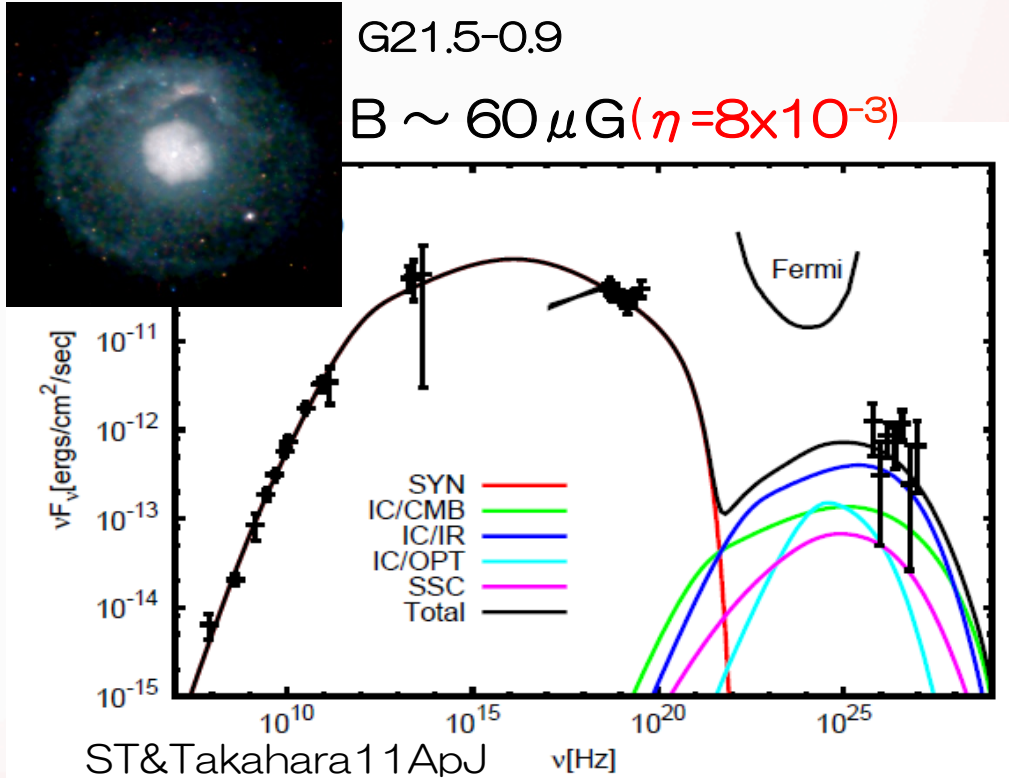
観測

-0.17

-0.55

Vinyaikin 07 (radio), Smith 03 (opt.)

TeV パルサー星雲



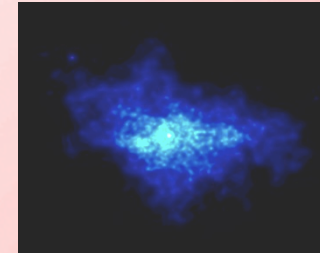
G0.9+0.1

$B \sim 15 \mu\text{G}$
 $(\eta = 3 \times 10^{-3})$



Kes 75

$B \sim 20 \mu\text{G}$
 $(\eta = 5 \times 10^{-5})$



G54.1+0.3

$B \sim 10 \mu\text{G}$
 $(\eta = 2 \times 10^{-3})$

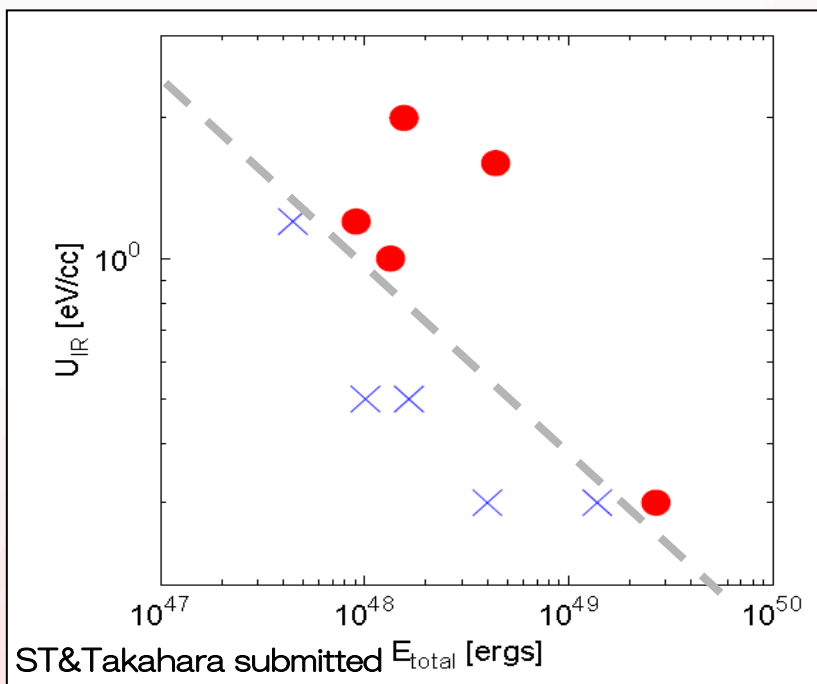
星間光子場の寄与を考慮すると、
 かに星雲と同じモデルでよく説明される。

Non-TeV パルサー星雲

ガンマ線での観測可能性を決めるものは？

TeV PWN: Crab, G21.5-0.9,
● G54.1+0.9, Kes 75,
 G0.9+0.1

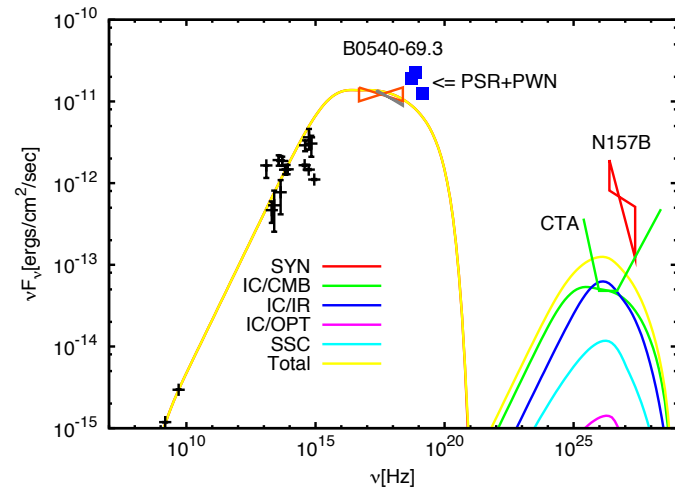
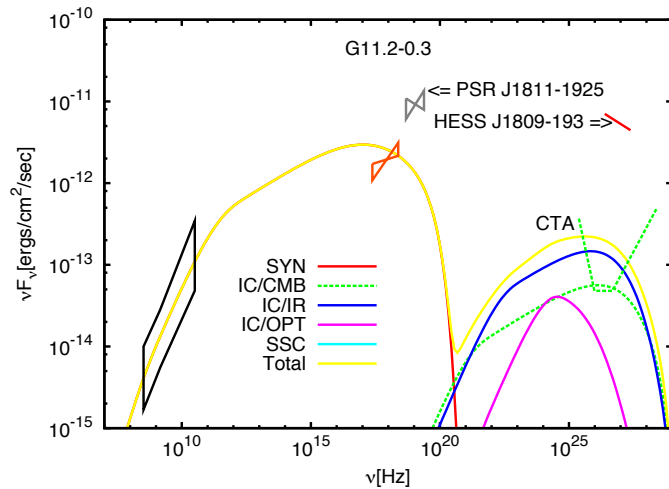
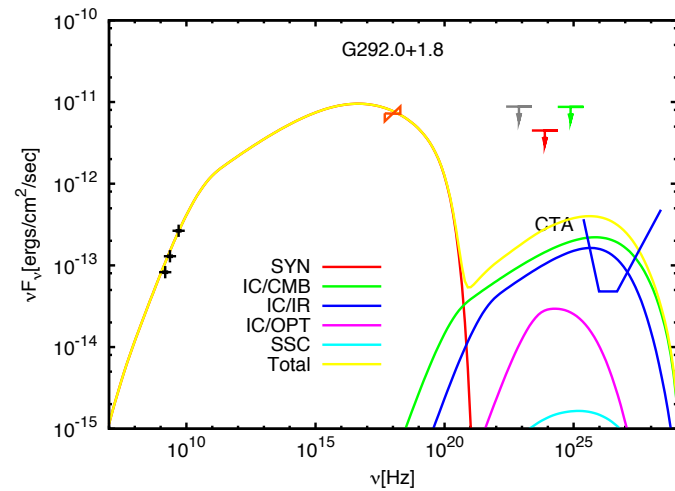
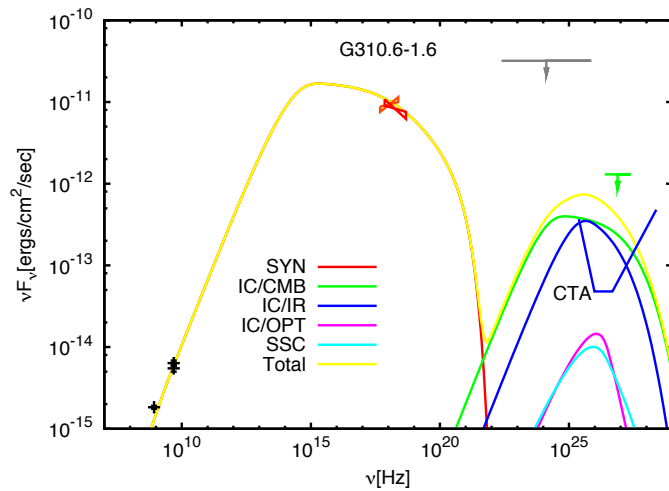
non-TeV: 3C58, G310.6-1.6
× G292.0+1.8, G11.2-0.3
SNR B0540-69.3
 ($\eta = 3 \times 10^{-3}$ とした)



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
 に関連している。

$$P_{IC} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma_c^2 U_{ph} N_{e^\pm}(\gamma_c)$$

CTAで見るパルサー星雲



系内の若いパルサー星雲の性質

□かに星雲を除いて逆コンプトン散乱の種光子は星間ダストからの赤外線放射が優勢。

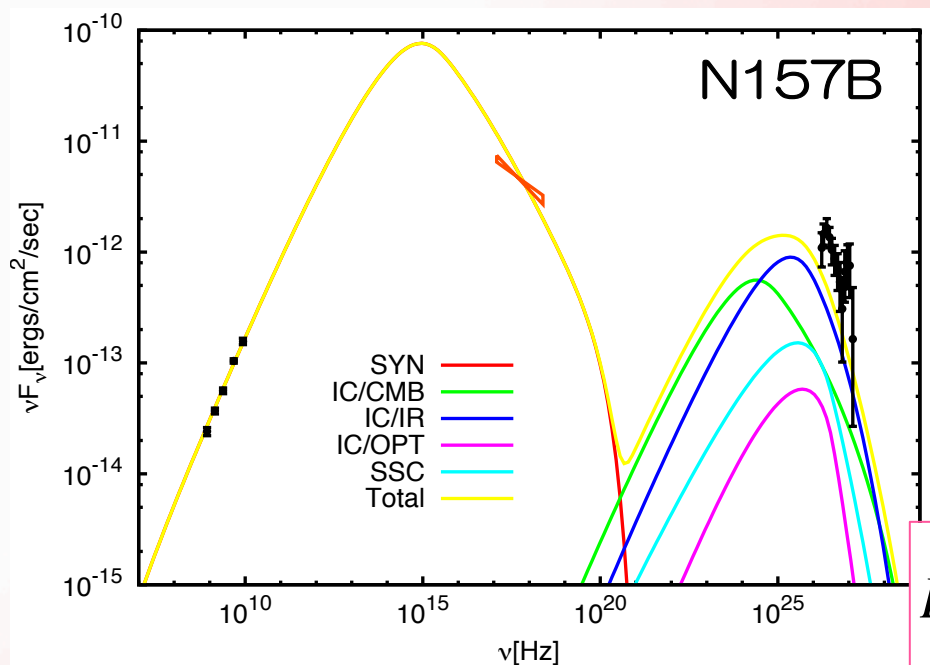
□パルサーが供給された回転エネルギーの大部分を粒子のエネルギーとして保持し、磁場のエネルギーは1000分の1程度しかない($\eta \sim 10^{-3}$)。

$$\frac{B^2}{8\pi} \frac{4\pi}{3} R_{PWN}^3 \approx 10^{-3} \int_0^{t_{age}} L_{spin} dt$$

□電波とX線の放射を説明するにはBroken Power-Lawの粒子分布が必要。

これらを踏まえて
系外PWN(N157B)のスペクトルを調べる。

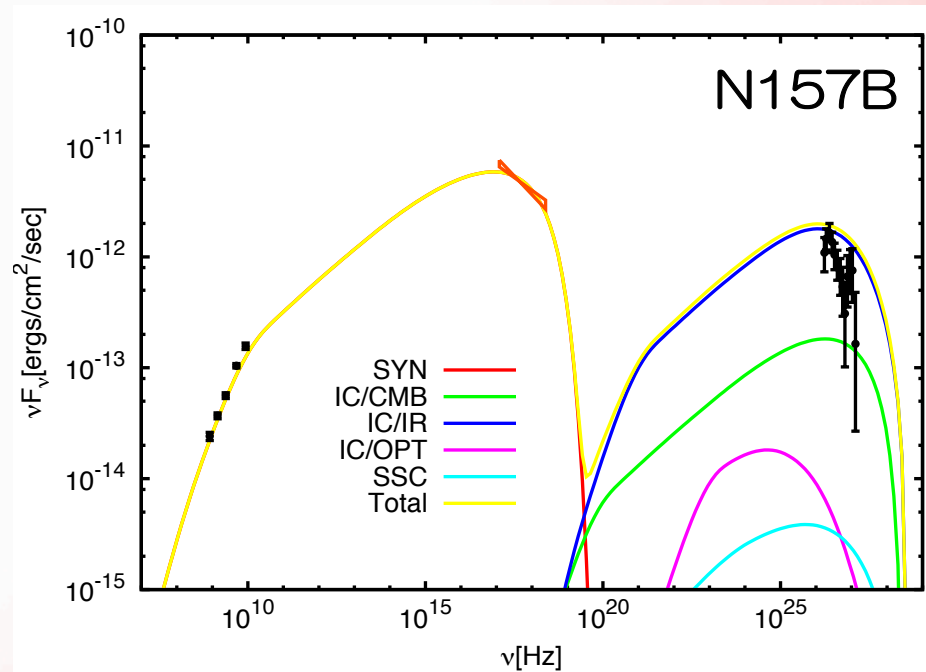
太陽近傍程度の光子場



$$P_{IC} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma_c^2 U_{ph} N_{e^\pm}(\gamma_c)$$

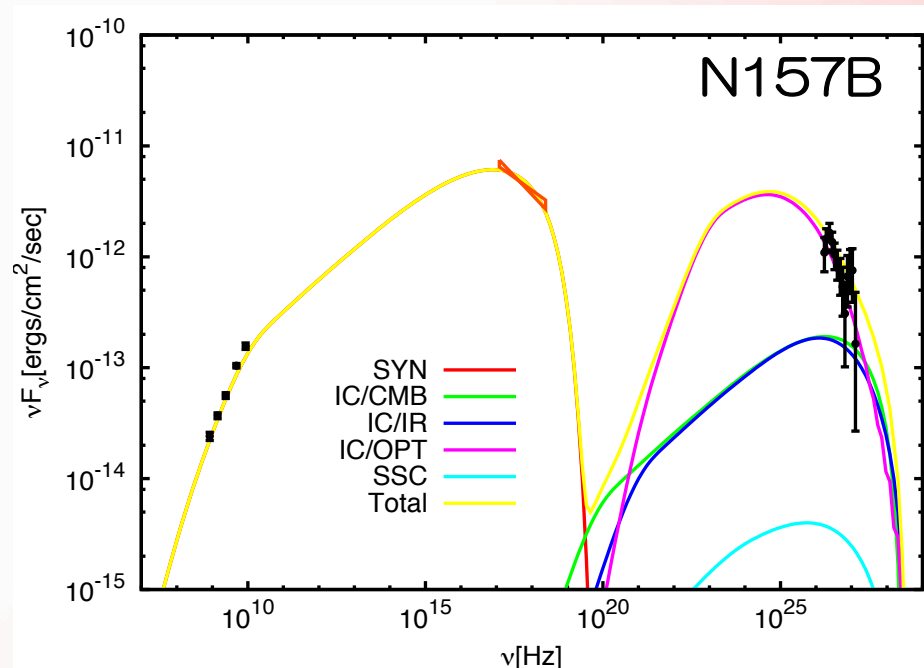
- 太陽近傍程度の光子場(0.5eV/ccとした)
- 初期回転エネルギー(1/2 I Ω²) = 1.0e51 (P₀ = 4.4msec)
- B = 30 μG
- ガンマ線光度は少し足りない。

赤外線(ダスト)光子場を強く



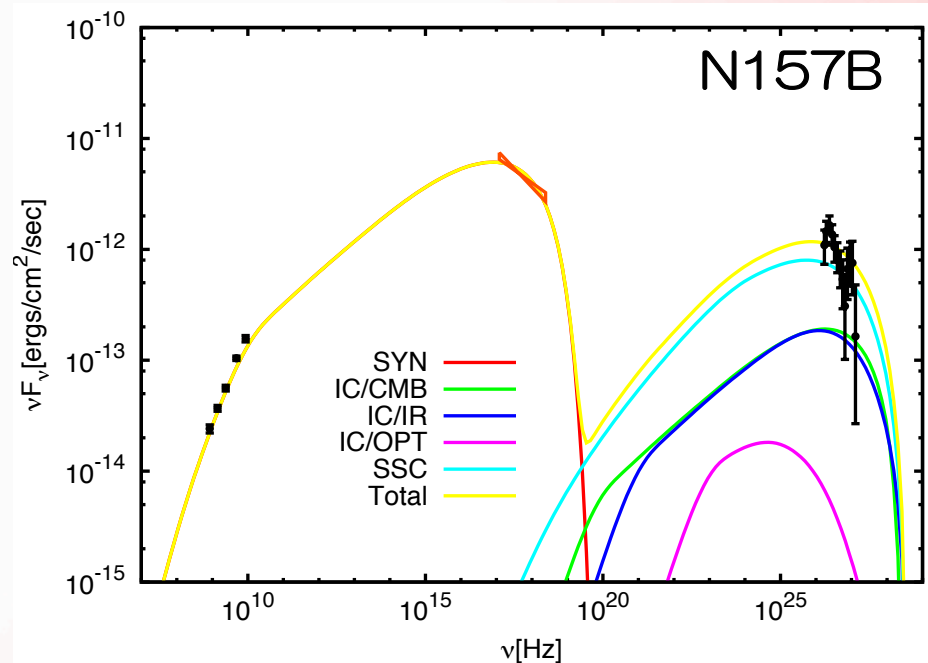
- ガンマ線光度を説明するのに赤外線光子場を強くする($\times 10$)。
- 初期回転エネルギー ($1/2 I \Omega^2$) = $2.6e50$ ($P_0 = 8.7\text{msec}$)
- $B = 13 \mu\text{G}$
- ガンマ線のベキ指数が合わない。

可視光(星の光)光子場を強く



- ガンマ線光度を説明するのに可視光光子場を強くする($\times 10^2$)。
- 初期回転エネルギー ($1/2 I \Omega^2$) = $2.6e50$ ($P_0 = 8.7$ msec)
- $B = 13 \mu\text{G}$

シンクロトロン光子密度を大きく



- ガンマ線光度を説明するのにシンクロトロン光子場の密度を強くする。
- 初期回転エネルギー ($1/2 I \Omega^2$) = $2.6e50$ ($P_0 = 8.7$ msec)
- $B = 13 \mu G$
- ガンマ線のベキ指数が合わない。

議論

Model	Erot	IR	OPT	SSC
Large E	1.0e51	0.5eV/cc	0.5eV/cc	x 1
IC/IR	2.6e50	5eV/cc	0.5eV/cc	x 1
IC/OPT	2.6e50	0.5eV/cc	50eV/cc	x 1
SSC	2.6e50	0.5eV/cc	0.5eV/cc	x 300

- 特殊な環境を設定しない限り、超新星爆発程度のエネルギーを必要とする。
- スペクトルからはN157B周辺の可視光場が大きいことが示唆される。

まとめ

N157Bのスペクトルを調べた

- PSR J0537-6910の初期回転エネルギーは異常に大きい
- N157B周辺の環境は特殊(OB association)であることが必要
- CTAでは系内でさらに多くのパルサー星雲が見つかる。
- 系外のパルサー星雲もCrab同様のエネルギーを持っているものは観測できる。

Fail in Adiabatic Cooling: The Crab Nebula Case

Radio Obs. ($\alpha = -0.299$, $F(12.6\text{MHz}) = 5300\text{Jy}$, ($d = 2\text{kpc}$))
と磁場の値から、少なくとも12.6MHzを放射するのに必要な粒子数は、

$$\gamma_{\min} N(\gamma_{\min}) = 1.81 \times 10^{51} (B / 100 \mu\text{G})^{-0.4} \text{ 個}$$

この粒子が元々 $\gamma_b mc^2$ のエネルギーでinjectionされて断熱冷却したとすると、($\gamma_b \gg \gamma_{\min}$ として)

$$\gamma_b mc^2 \gamma_{\min} N(\gamma_{\min}) = 1.48 \times 10^{50} (B / 100 \mu\text{G})^{-0.4} (\gamma_b / 10^5) \text{ ergs}$$

Crabの回転エネルギー = 4×10^{39} ergs を優に越える。