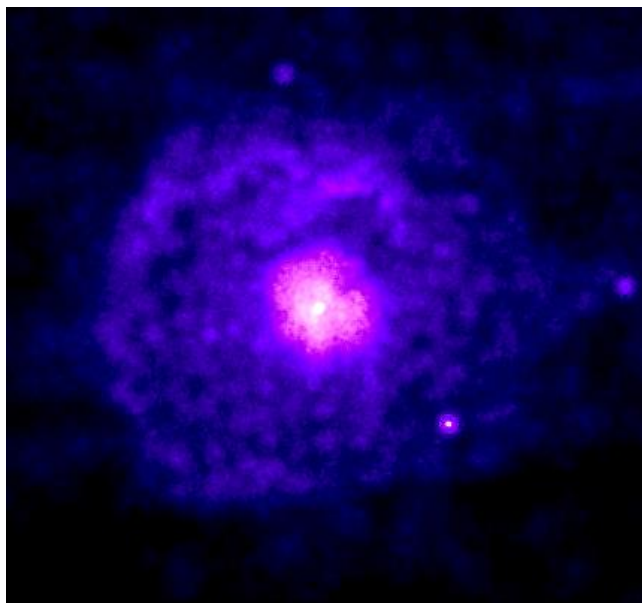


# パルサー-星雲放射の空間構造に関する 理論的研究



石崎 渉 (宇宙線研究所)

# Introduction –Pulsar Wind Nebulae–

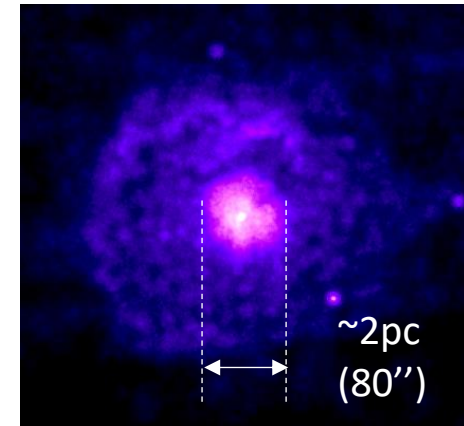
- パルサーの周囲に広がって光る天体
  - 大きさ: 数pc程度
  - 中の詰まった繭状の形状 (c.f. シェル型 超新星残骸)
  - (少なくとも若いうちは)超新星残骸に囲まれている
- 電波から $\gamma$ 線の非常に広い周波数帯で放射
  - パルサー風がISM(or SNR)との間に衝撃波を形成
  - 衝撃波で再加速された $e^\pm$ からの非熱的放射

3C 58 (Blue :X , Red : Radio)

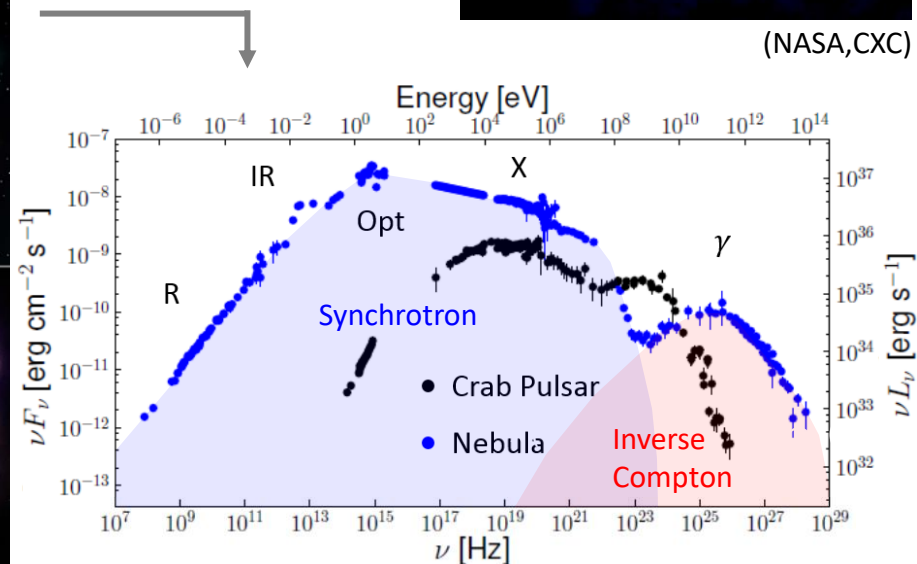
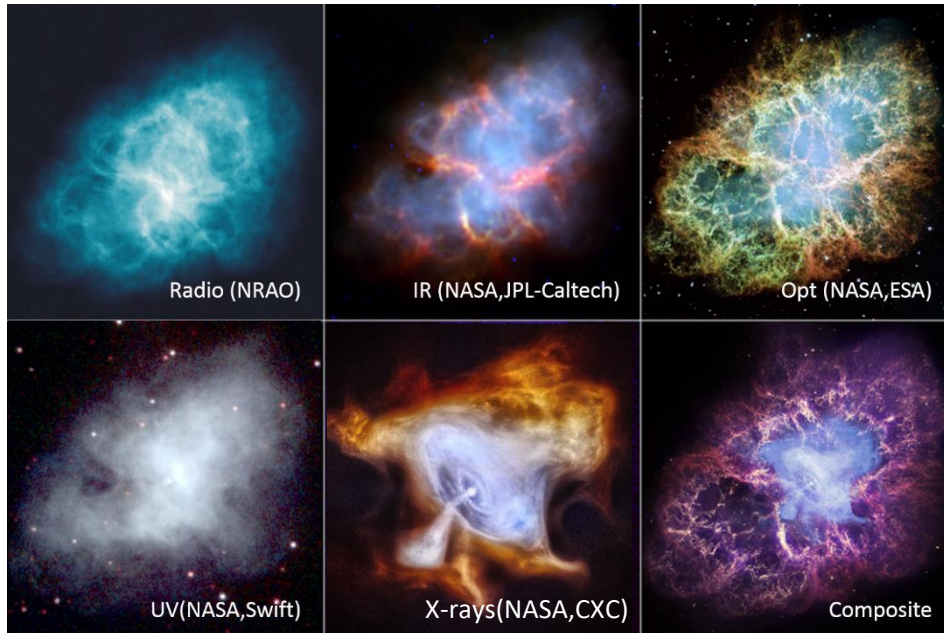


(X : NASA , radio : NCSU)

G21.5-0.9



(NASA,CXC)



(Buhler & Blandford , 2014)

# Introduction –Pulsar Wind Nebulae-

- 回転駆動型パルサー

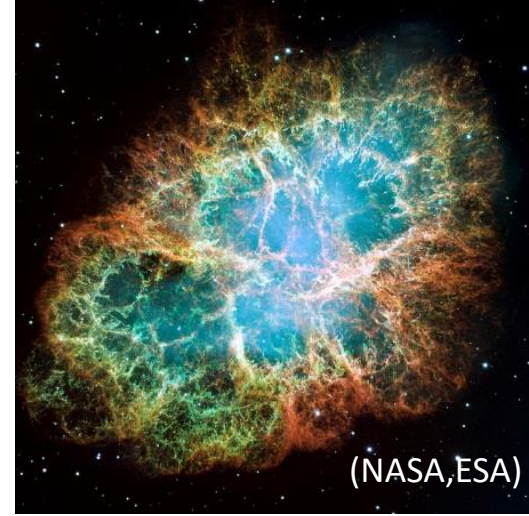
- 自転周期 :  $P \sim 1s$
- 強い磁場 ( $B \sim 10^{12}G$ ) による magnetic braking

- Spin-down

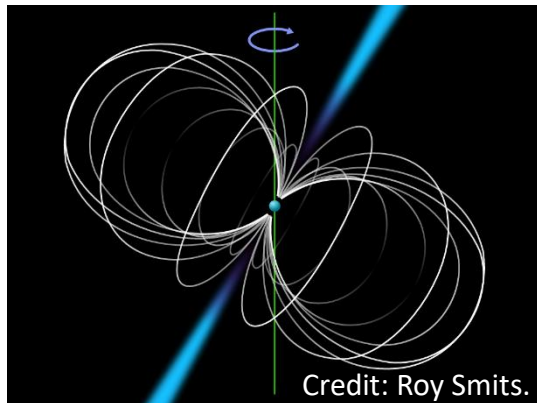
- パルサーの自転は時間とともに遅くなっている  $\dot{P} \sim 10^{-(12-13)} s s^{-1}$
- $L_{sd} = |I\Omega\dot{\Omega}| = 5 \times 10^{38} \text{ erg/s} \left(\frac{P}{33ms}\right)^{-3} \left(\frac{\dot{P}}{4.21 \times 10^{-13}}\right)$  (Crab pulsar)

- パルサー星雲

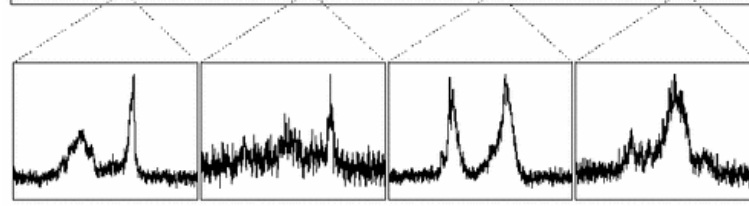
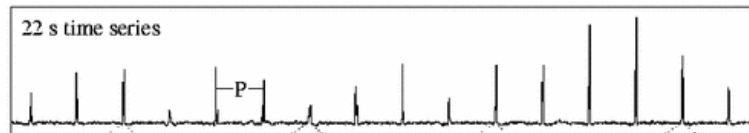
- パルス放射のエネルギー :  $\sim 1\% \times L_{sd} \ll L_{sd}$
- 星雲の放射・膨張の luminosity  $\sim L_{sd}$
- $L_{sd}$  はほぼすべてパルサー星雲につき込まれる



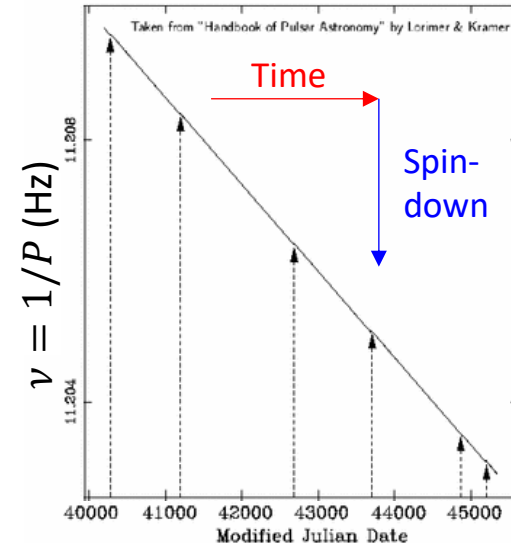
(NASA,ESA)



Credit: Roy Smits.



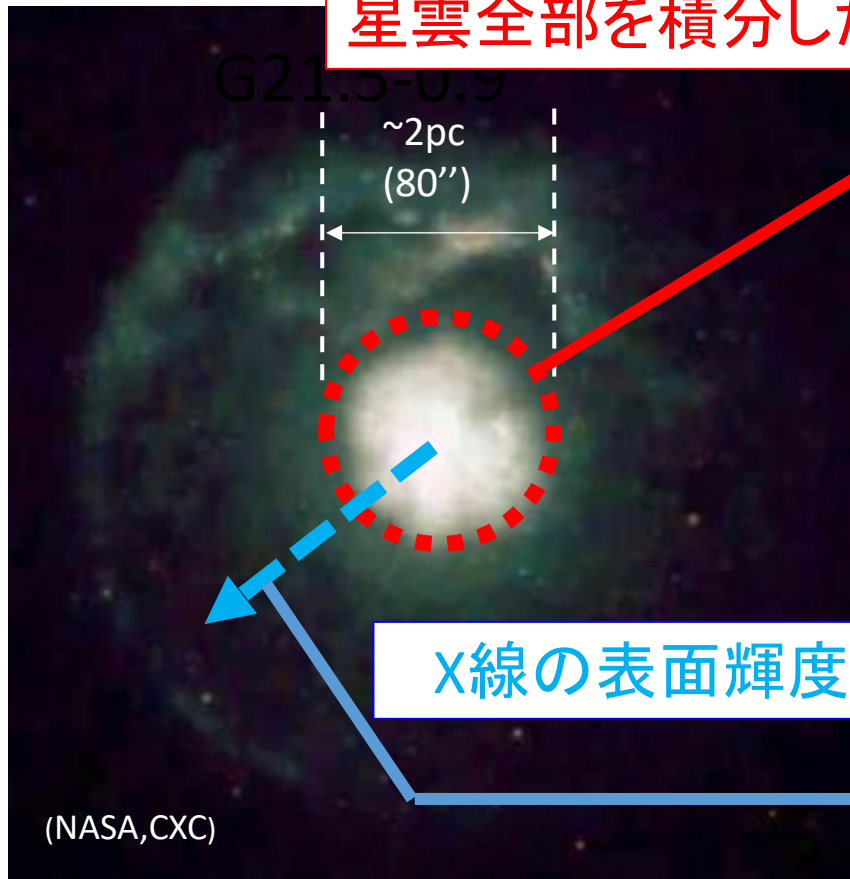
140 ms zoom in on individual pulses Taken from "Handbook of Pulsar Astronomy" by Lorimer & Kramer



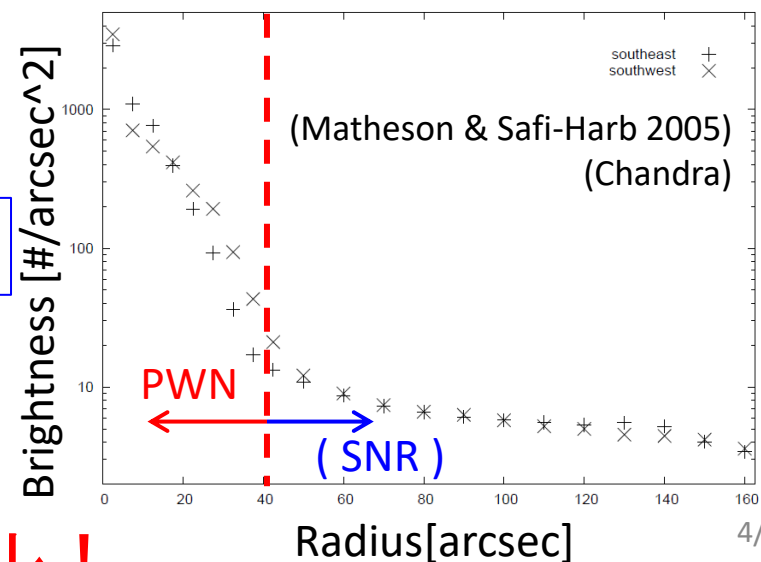
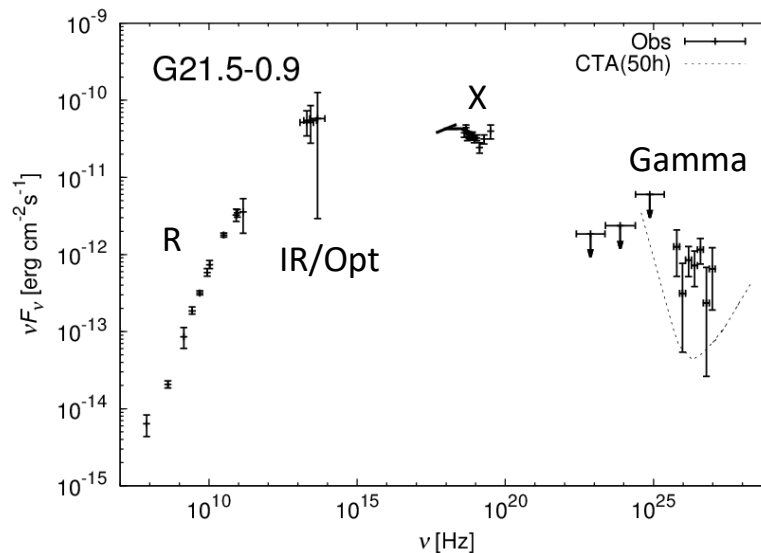
# 説明したい観測量

- eg. G21.5-0.9

星雲全部を積分したSED



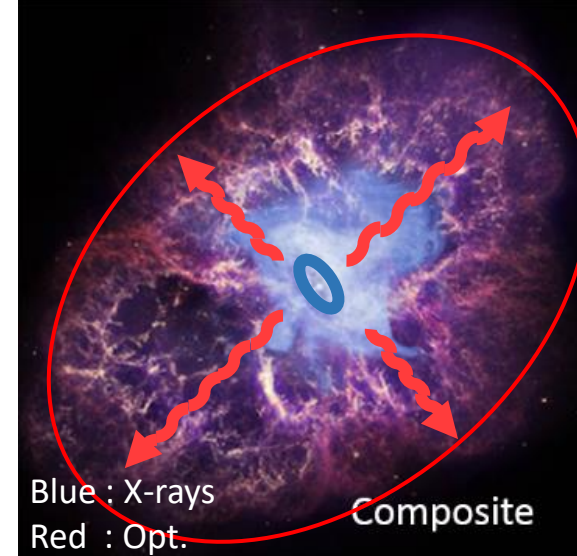
X線の表面輝度分布



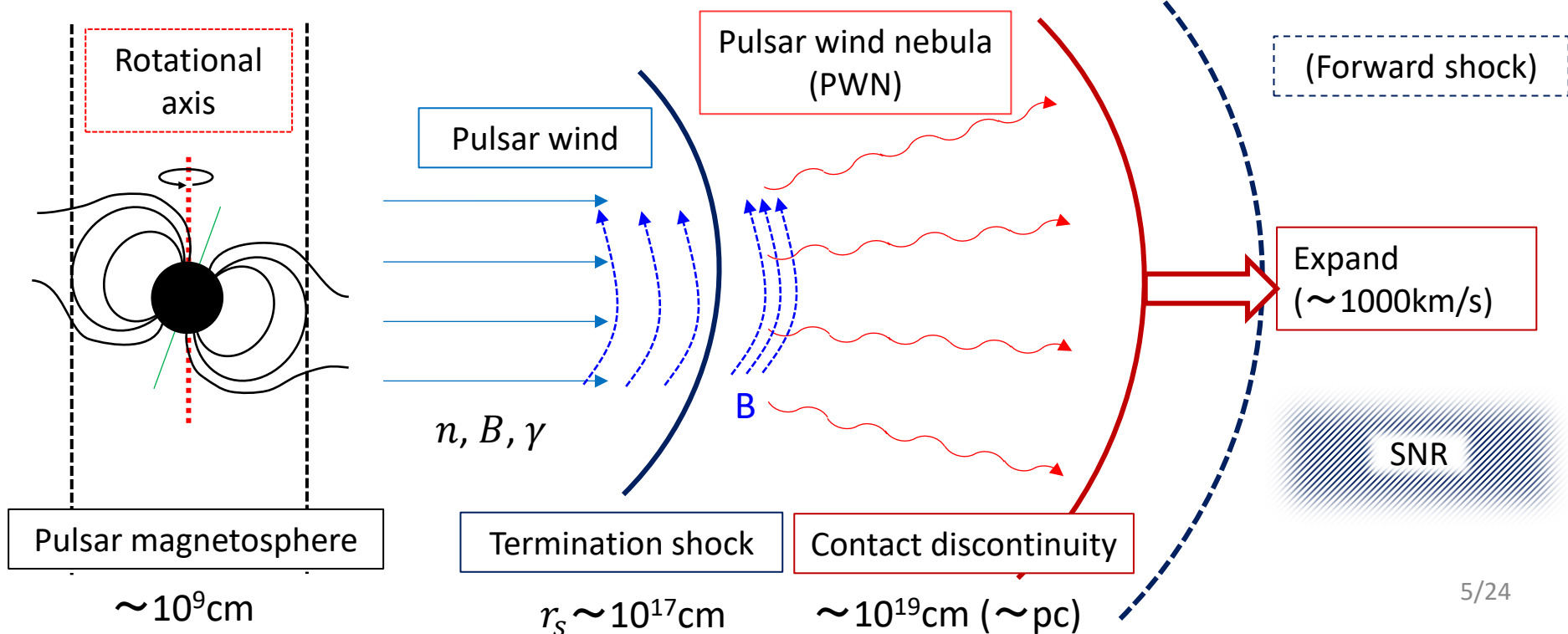
一番単純なモデル→1次元モデル！

# パルサー星雲の”標準理論”

- 一次元定常モデル Rees & Gunn (1974), Kennel & Coroniti (1984)
  - 磁場はトロイダルな磁場を仮定
  - 終端衝撃波での粒子加速を仮定
  - 加速粒子は放射冷却しながら流体とともに移流する



かに星雲のSED・膨張速度・放射領域の波長依存性をよく説明



# 1次元モデルの現状

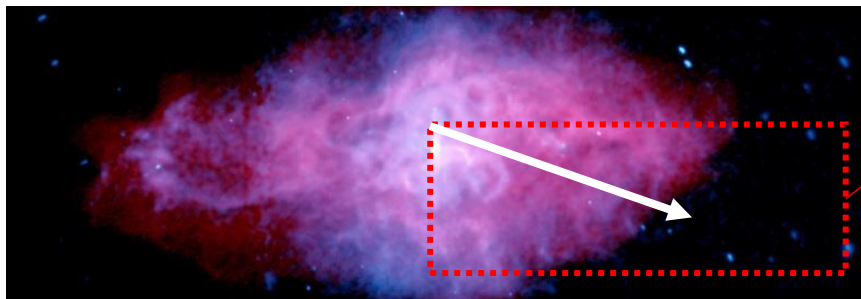
## • 1次元モデルの研究

- Kennel Coroniti (1984); 球対称・定常モデル
  - 終端衝撃波における衝撃波粒子加速を仮定し非熱的粒子の発展と放射を計算
- Atoyan & Aharonian (1996)
  - KC modelに逆コンプトン散乱まで考慮して、かに星雲の全スペクトルを再現

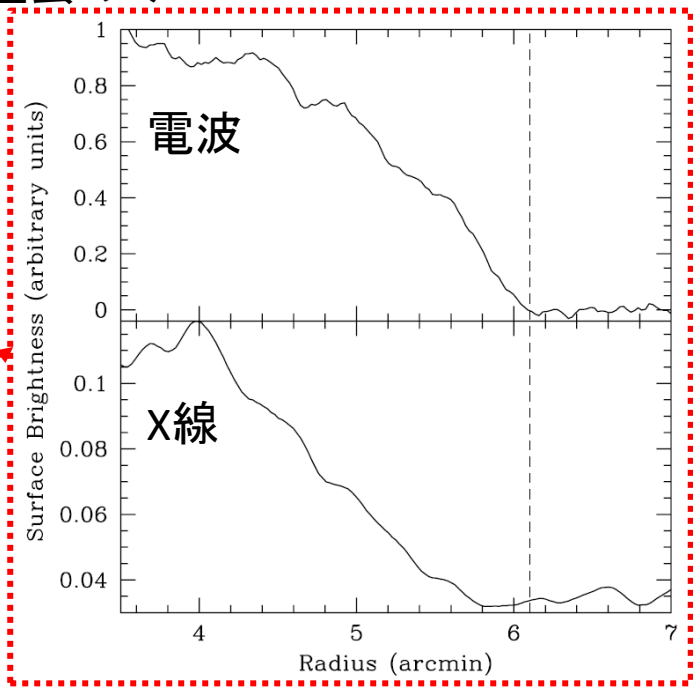
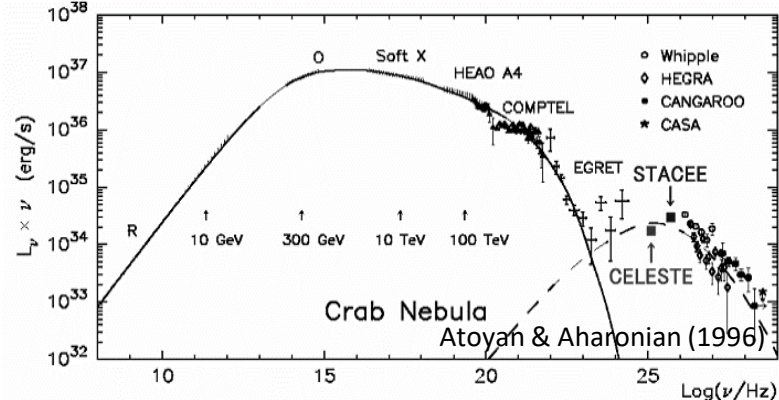
## • 1次元モデルの課題

- KC modelが実際の天体に適用された例は、かに星雲のみ
- X線の放射領域が電波と同程度に広がっている  
パルサー星雲の存在

星雲全体での放射スペクトル  
+  
放射の空間的な構造  
を同時に検証



↑3C58 (X(青): NASA, radio(赤): NCSU)



Model

• パル

$$\frac{\partial n_0}{\partial t} + u \frac{\partial n}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial E} (Q_{\text{syn}} E^2 n) + \frac{\partial}{\partial E} (Q_{\text{IC}} E^2 n) + \frac{\partial}{\partial E} \left( \frac{c}{3r^2} \frac{d}{dr} (ur^2) En \right) - \frac{c}{r^2} \frac{d}{dr} (ur^2) n$$

対流微分

シンクロトロン冷却

逆コンプトン散乱冷却

断熱冷却

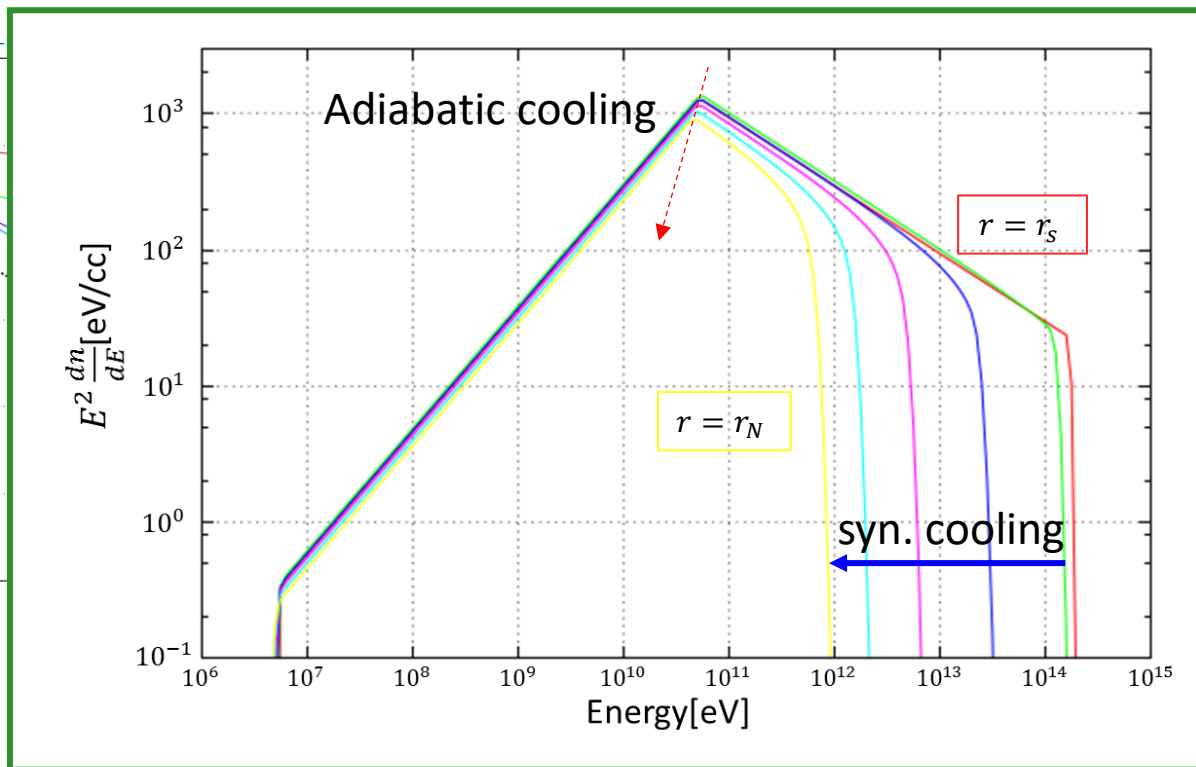
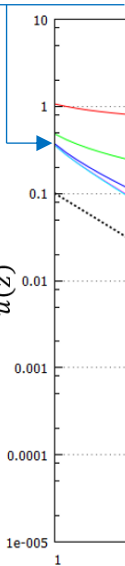
体積変化の項

Flow solution given by MHD model

条件

$$v \sim \frac{c}{3}$$

四元速度  $u(z)$



の発展

100km/s

SNR

パルサー磁気圏

$\sim 10^9 \text{cm}$

終端衝撃波

$r_s \sim 10^{17} \text{cm}$

接触不連続面

$\sim 10^{19} \text{cm} (\sim \text{pc})$

(先進衝撃波)

# Application -target-

- 選択基準

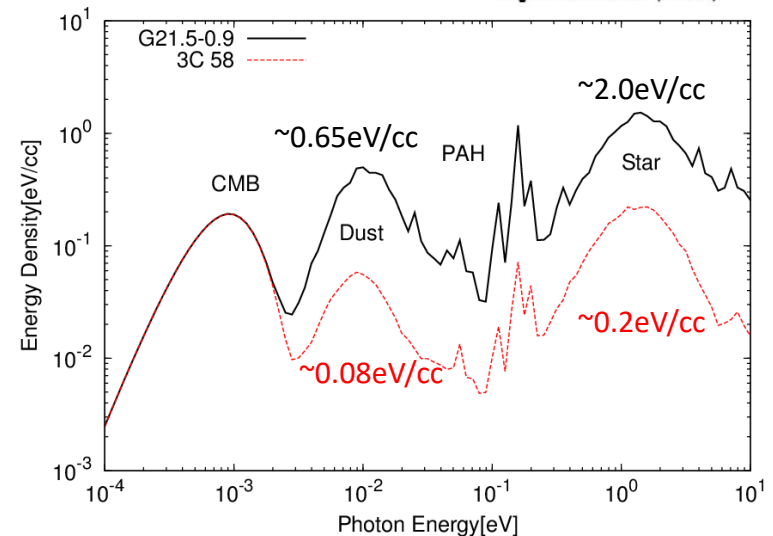
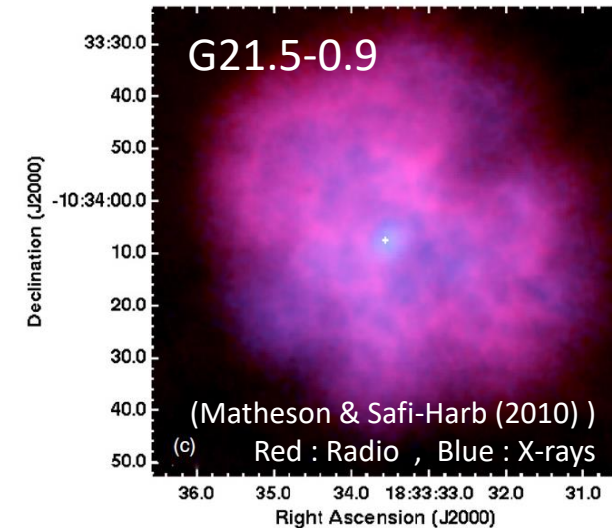
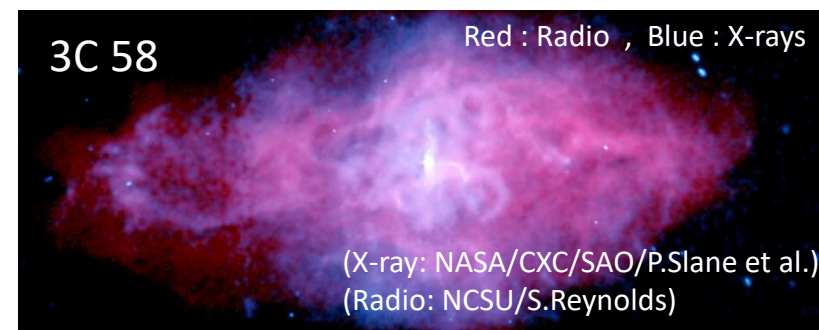
- 星雲のスペクトルの観測が充実しているもの
- X線放射が星雲の縁まで広がっているもの

- G21.5-0.9

- 星雲の半径 :  $r_N = 0.9\text{pc}$
- 距離 :  $D=4.8\text{kpc}$  (Tian & Leahy 2008)
- 中心のパルサー : PSR J1833-1034
- $P=61.9\text{ms}$  ,  $\dot{P} = 2.02 \times 10^{-13}\text{ss}^{-1}$   
 $\rightarrow L_{sd} = 3.3 \times 10^{37}[\text{erg/s}]$

- 3C 58

- 星雲の半径 :  $r_N = 2.0\text{pc}$
- 距離 :  $D=2.0\text{kpc}$  (Kothes et al.,2013)
- 中心のパルサー : PSR J0205+6449
- $P=65.7\text{ms}$  ,  $\dot{P} = 1.94 \times 10^{-13}\text{ss}^{-1}$   
 $\rightarrow L_{sd} = 2.7 \times 10^{37}[\text{erg/s}]$





# Result -SED-

- Fitting

- 星雲全体のスペクトルから4つのパラメータを一意に決められる

- 結果

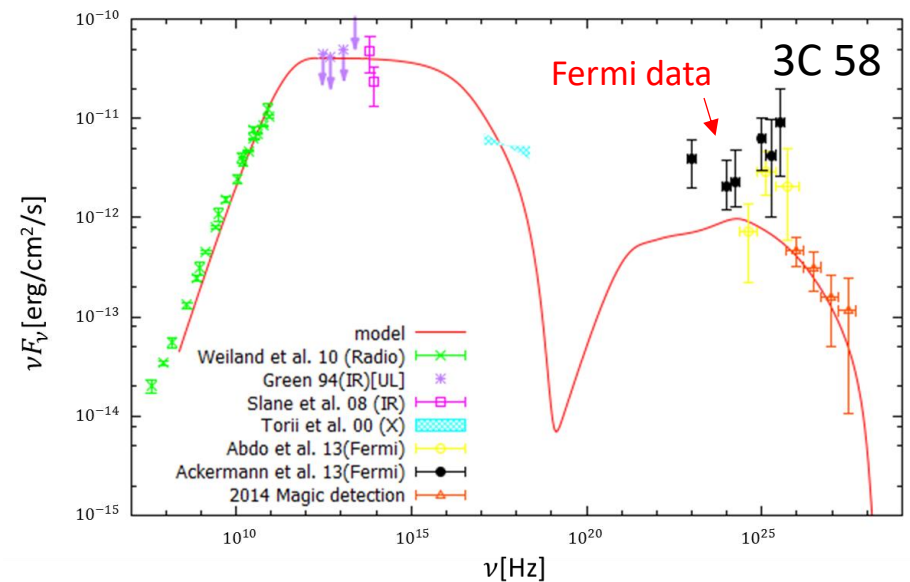
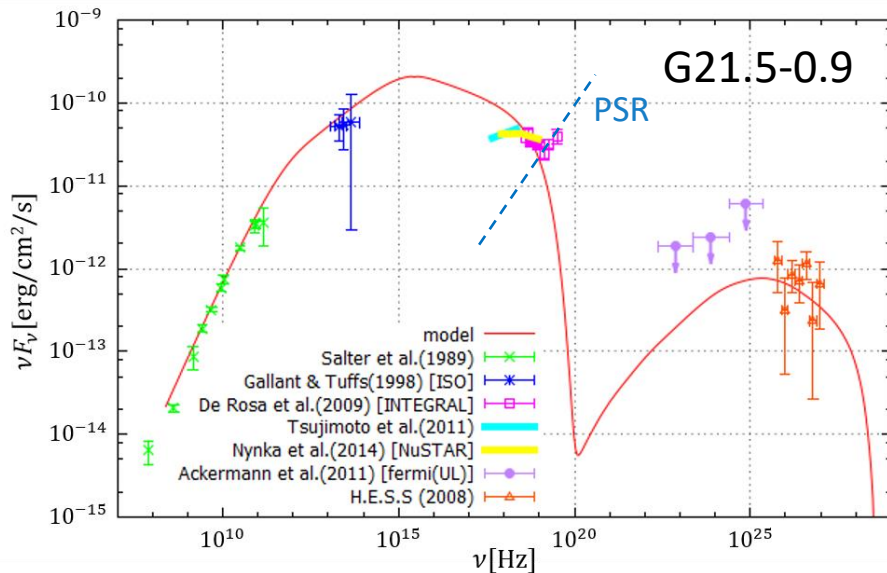
- Flux

- おおむね観測を再現
    - X線のベキ指数を合わせられる自然なパラメータは存在しない → Fluxの絶対値のみをfit

- 表面輝度分布・photon index

- 表面輝度分布：放射領域は星雲の縁まで達していない
    - Photon index：観測と明らかに矛盾するような急激なsofteningが見られた

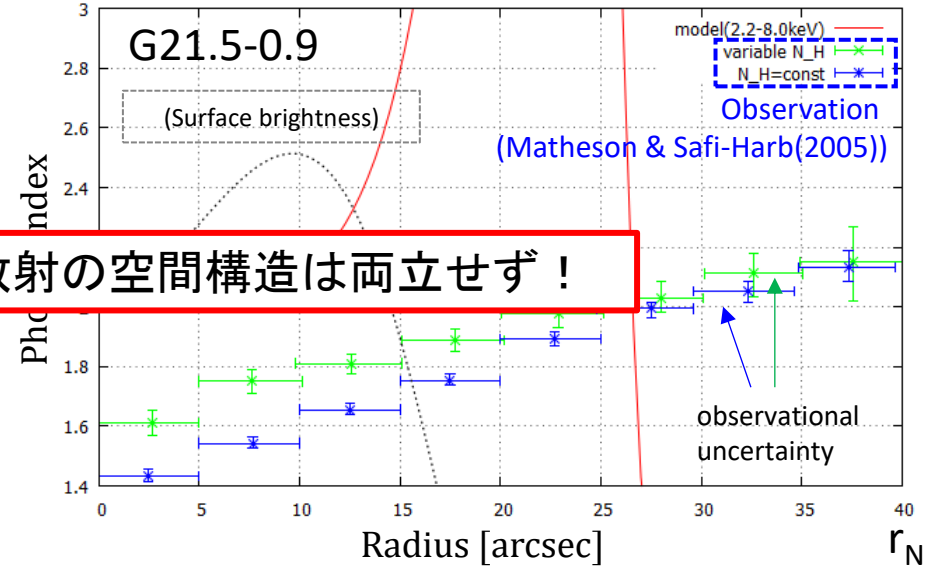
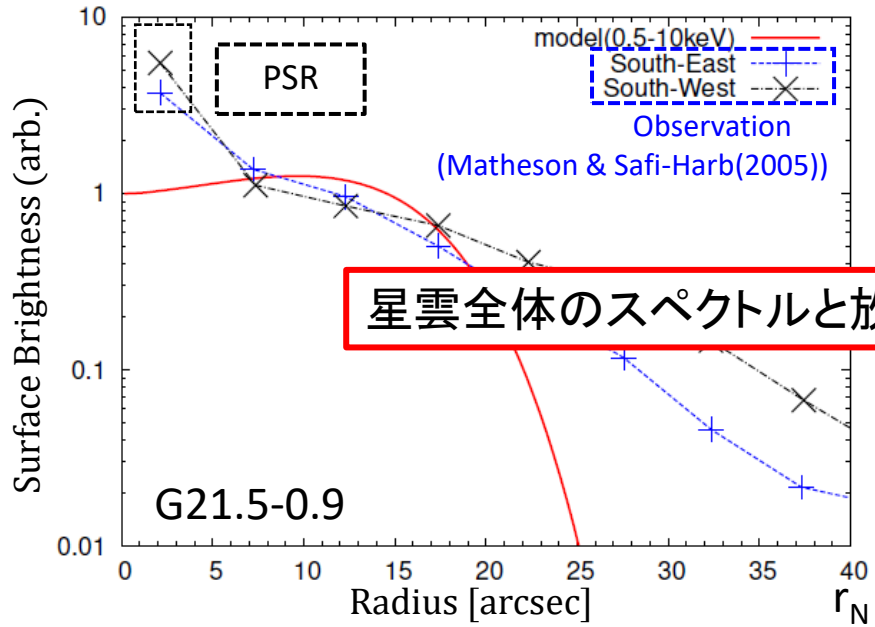
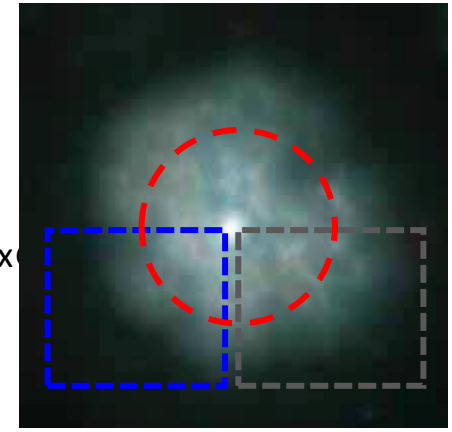
	G21.5-0.9	3C 58
$\sigma$	$2.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$
$r_s$	0.05 pc	0.13 pc
$E_b$	$5.0 \times 10^4 mc^2$	$6.0 \times 10^4 mc^2$
$p_2$	2.3	3.0



# Result -Surface brightness-

	G21.5-0.9	3C 58
$\sigma$	$2.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$
$r_s$	0.05 pc	0.13 pc
$E_b$	$5.0 \times 10^4 mc^2$	$6.0 \times 10^4 mc^2$
$p_2$	2.3	3.0

- Fitting
  - 星雲全体のスペクトルから4つのパラメータを一意に決められる
- 結果
  - Flux
    - おおむね観測を再現
    - X線のベキ指数を合わせられる自然なパラメータは存在しない → Flux
  - 表面輝度分布・photon index
    - 表面輝度分布：放射領域は星雲の縁まで達していない
    - Photon index：観測と明らかに矛盾するような急激なsofteningが見られた



星雲全体のスペクトルと放射の空間構造は両立せず！

# 時間発展モデル

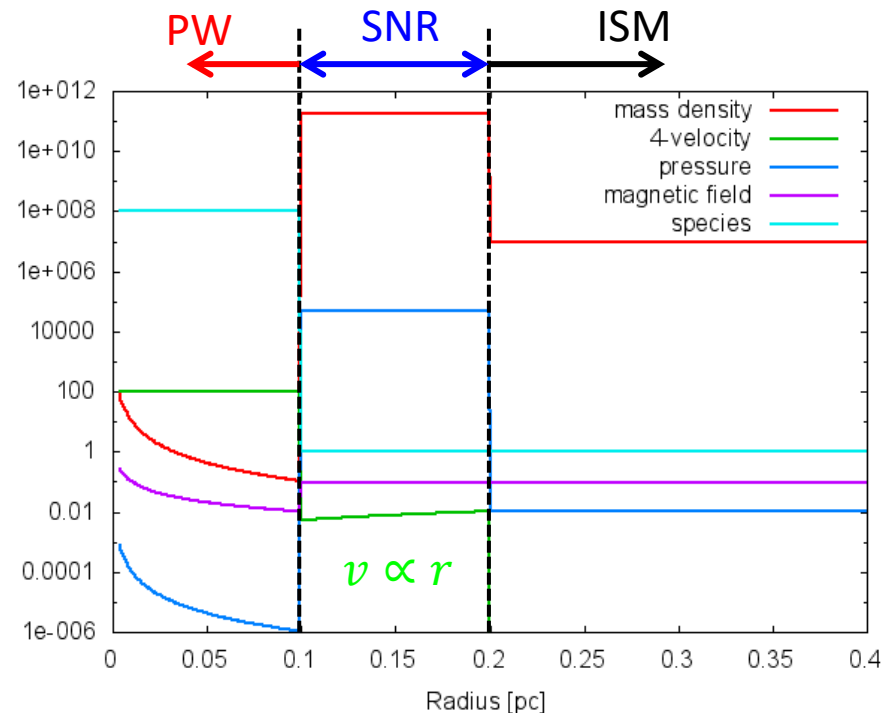
- KCモデルの仮定

- 定常
- 球対称
- 磁場がトロイダル磁場のみ

⇒ 時間発展+1次元の計算でKCモデルの定常の仮定がどれくらい正しいか調べる

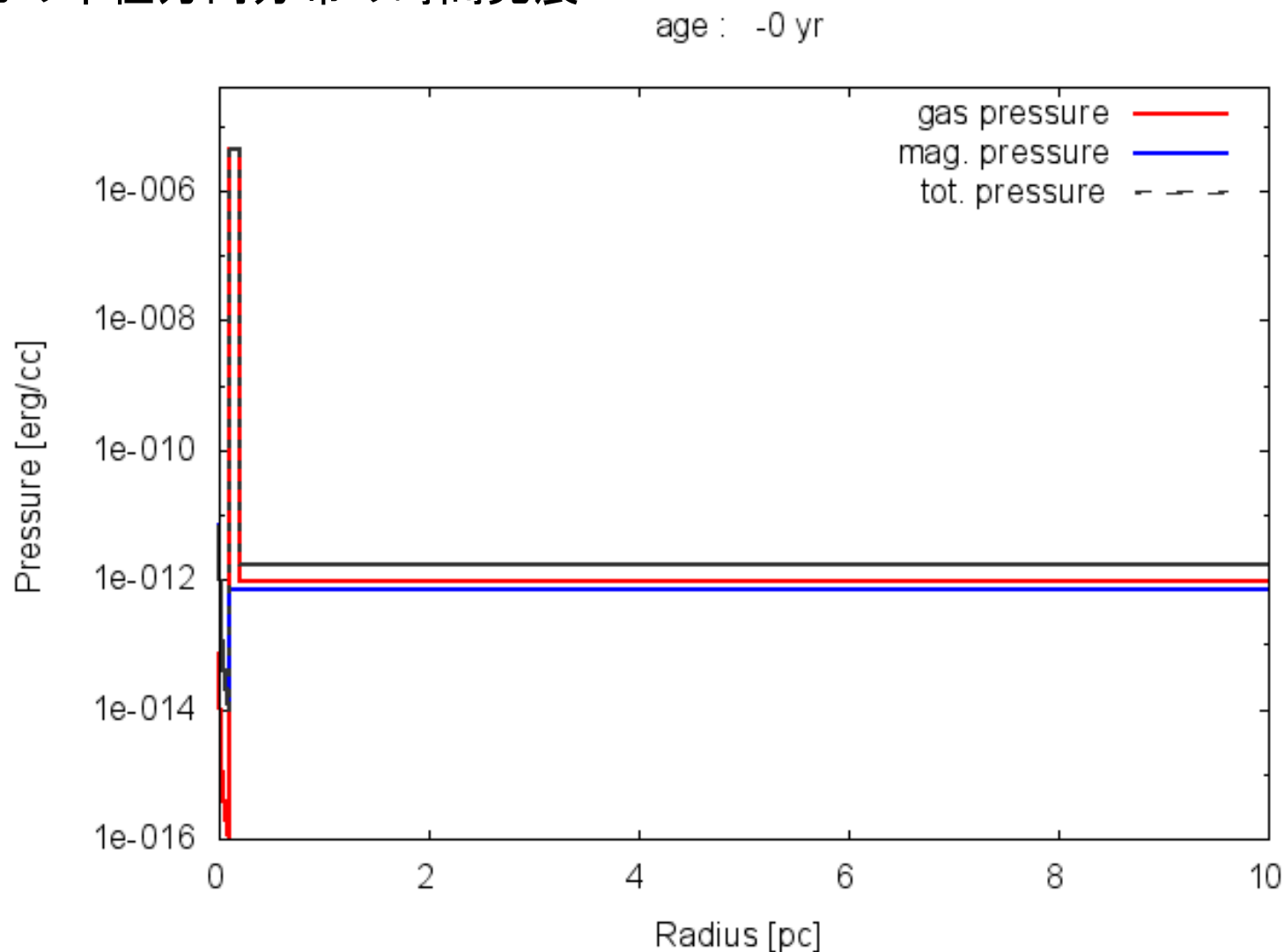
- 計算設定

- かに星雲を模した計算
  - $r_s \sim 0.1 \text{ pc}$ ,  $r_N \sim 2 \text{ pc}$ ,  $t_{\text{age}} \sim 950 \text{ yr}$
- 中心パルサーのSpin-down
- 周囲の超新星残骸も同時に計算
  - Homologous Expansionするejectaを置く
  - Mass ... 8.5 Msun
  - Kinetic Energy ...  $5 \times 10^{50} \text{ erg}$
  - 950 yrにおける $r_s$ ,  $r_N$ を再現する値
- パルサー風の初期条件
  - 速度一定のcold wind
  - $\rho \propto r^{-2}$ ,  $B \propto r^{-1}$ ,  $p \ll \rho c^2$



# 計算結果 -時間発展モデル 流体の構造-

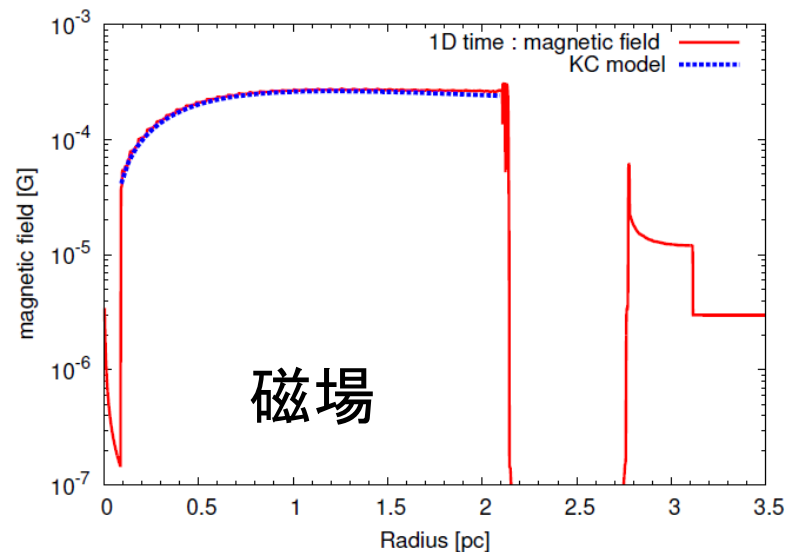
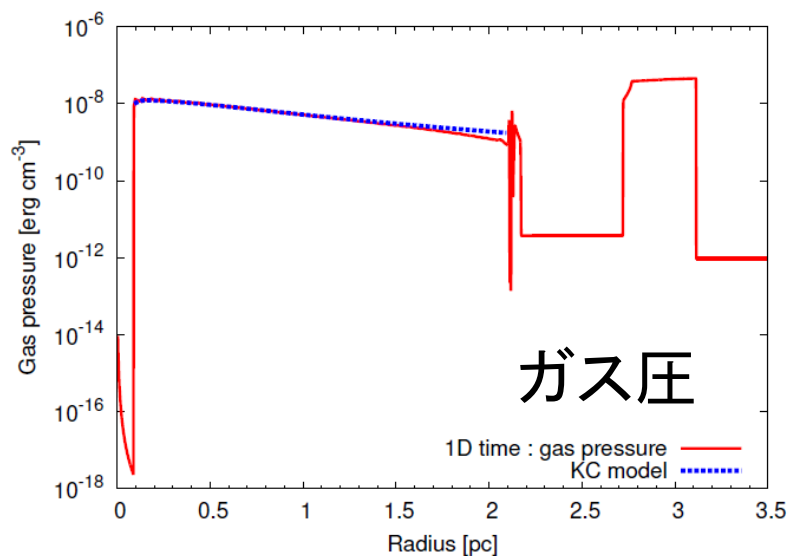
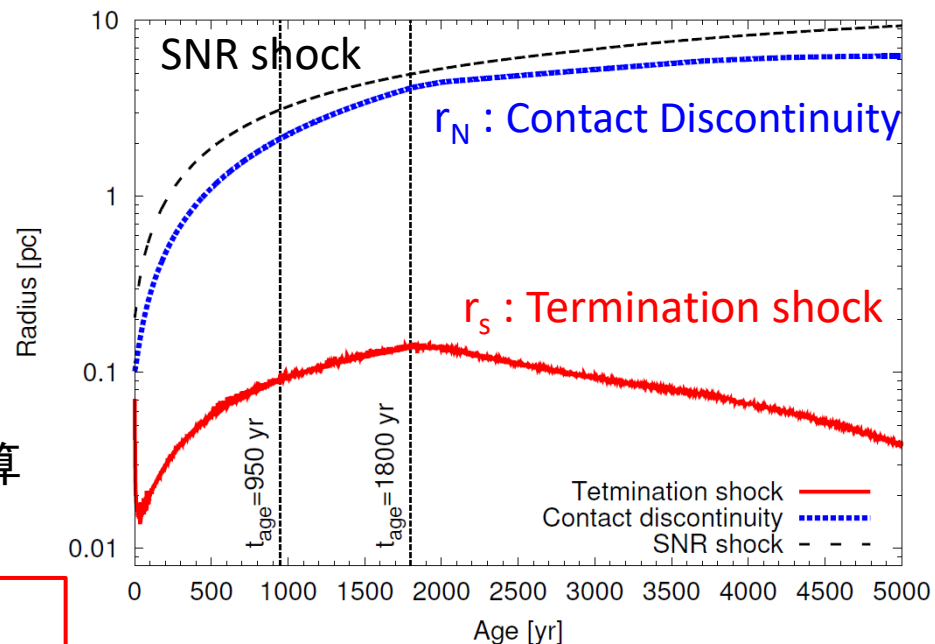
- 圧力の半径方向分布の時間発展



# 流体計算の結果

- 不連続面の半径
  - 1800 yrで、reverse shockと相互作用
  - それまでは、自由膨張
- 定常KCモデルとの比較
  - 950 yrの瞬間での $r_s$ ,  $r_N$ ,  $L_{sd}$ を使って計算
  - 非常に良い一致

⇒ 流体の構造は、定常近似で十分良い

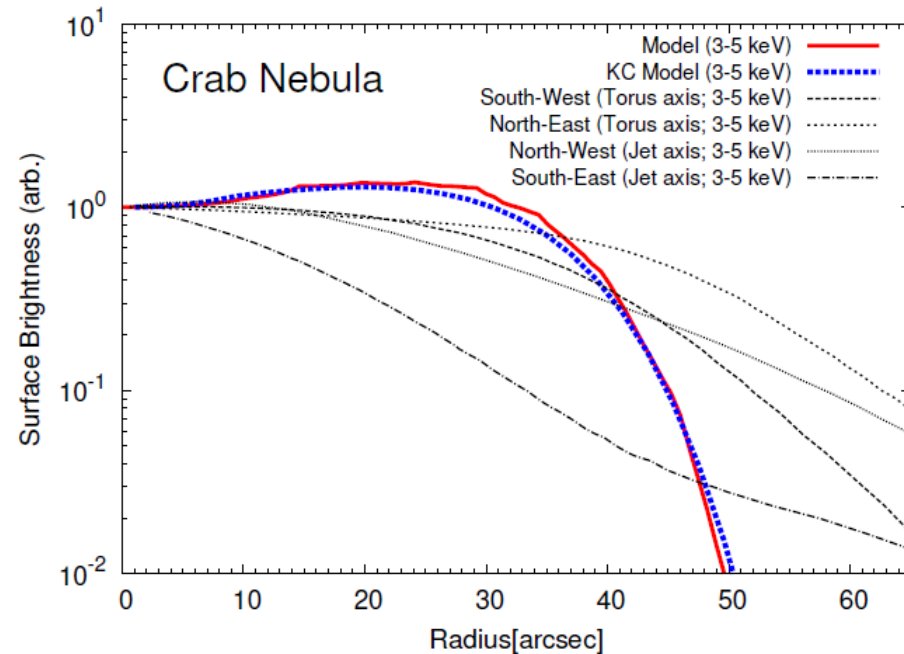
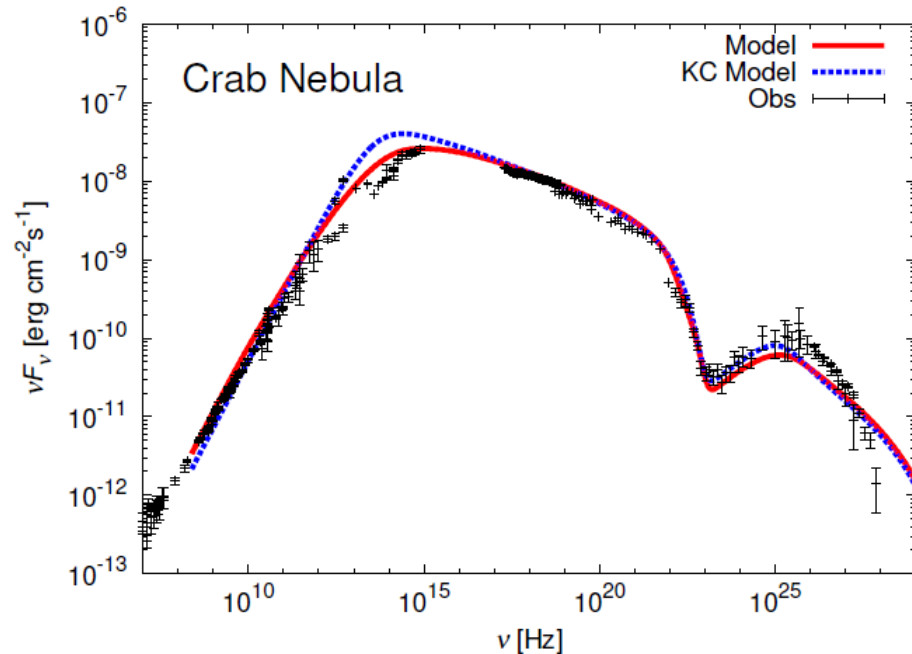


# 1dtime放射

- 放射の計算
  - SEDとX線の表面輝度分布を計算
  - 非常によく一致

⇒ 流体構造だけではなく、放射についても定常近似でよい

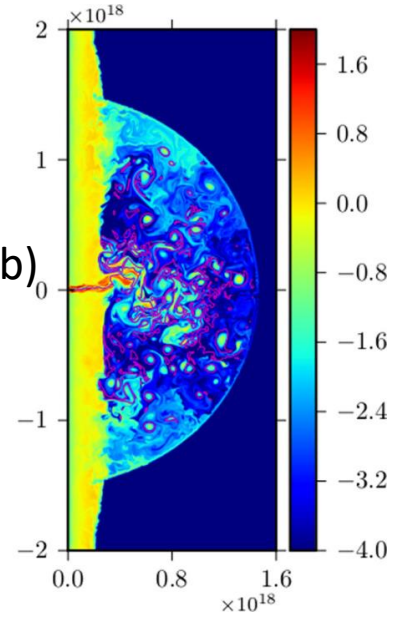
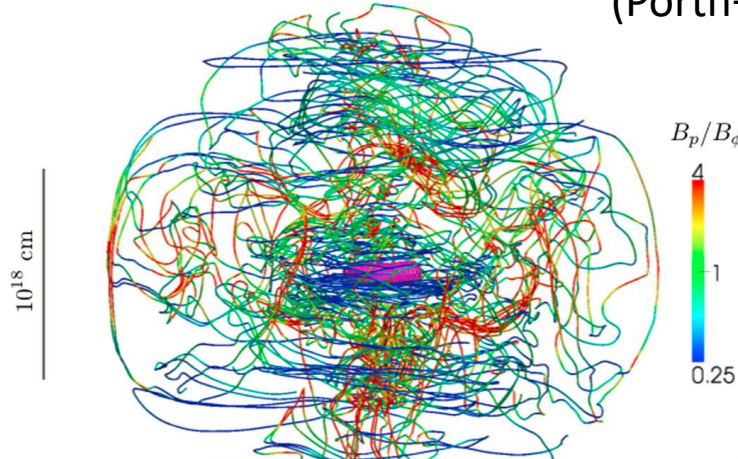
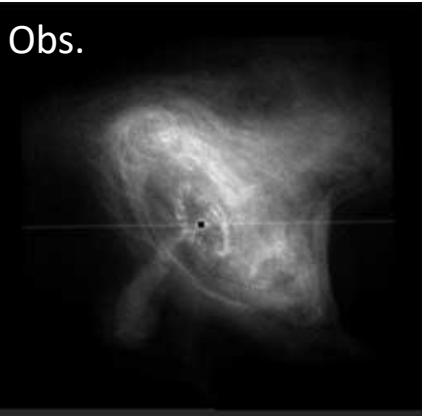
⇒ X線の拡がりの問題は、非定常性を考慮してもうまく説明できない...



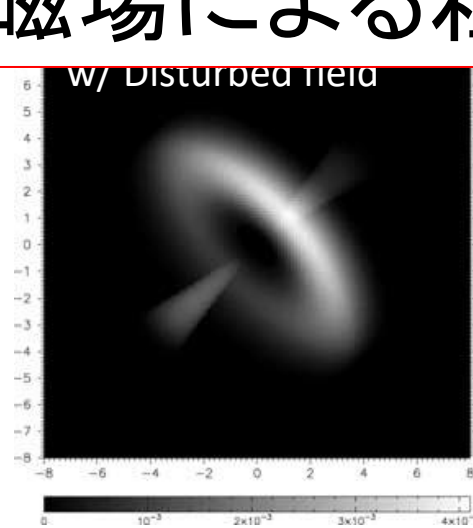
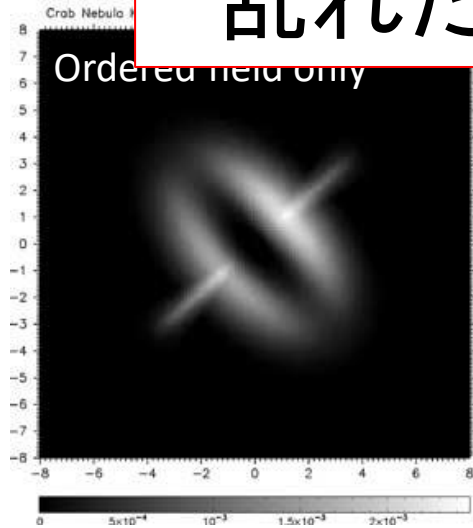
# Turbulent magnetic field in PWNe

Semi-analytical study

2-D, 3-D simulation (Porth+ 2014b)

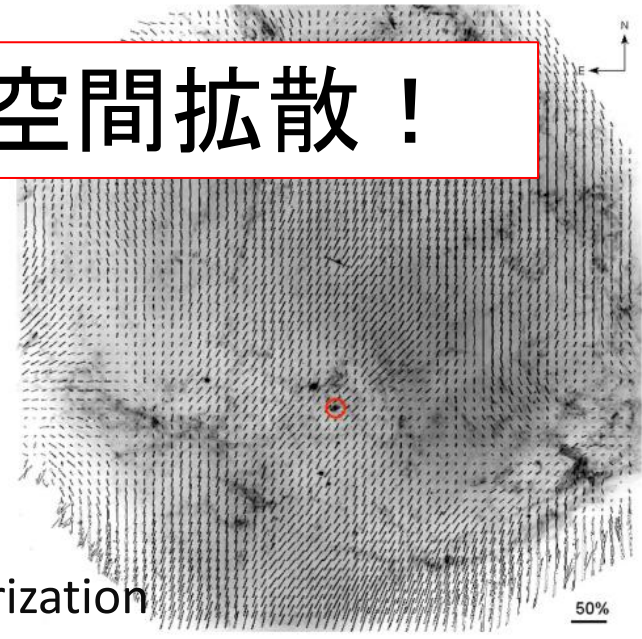


乱れた磁場による粒子の空間拡散！



(Shibata+ 2003)

Polarization  
measurement

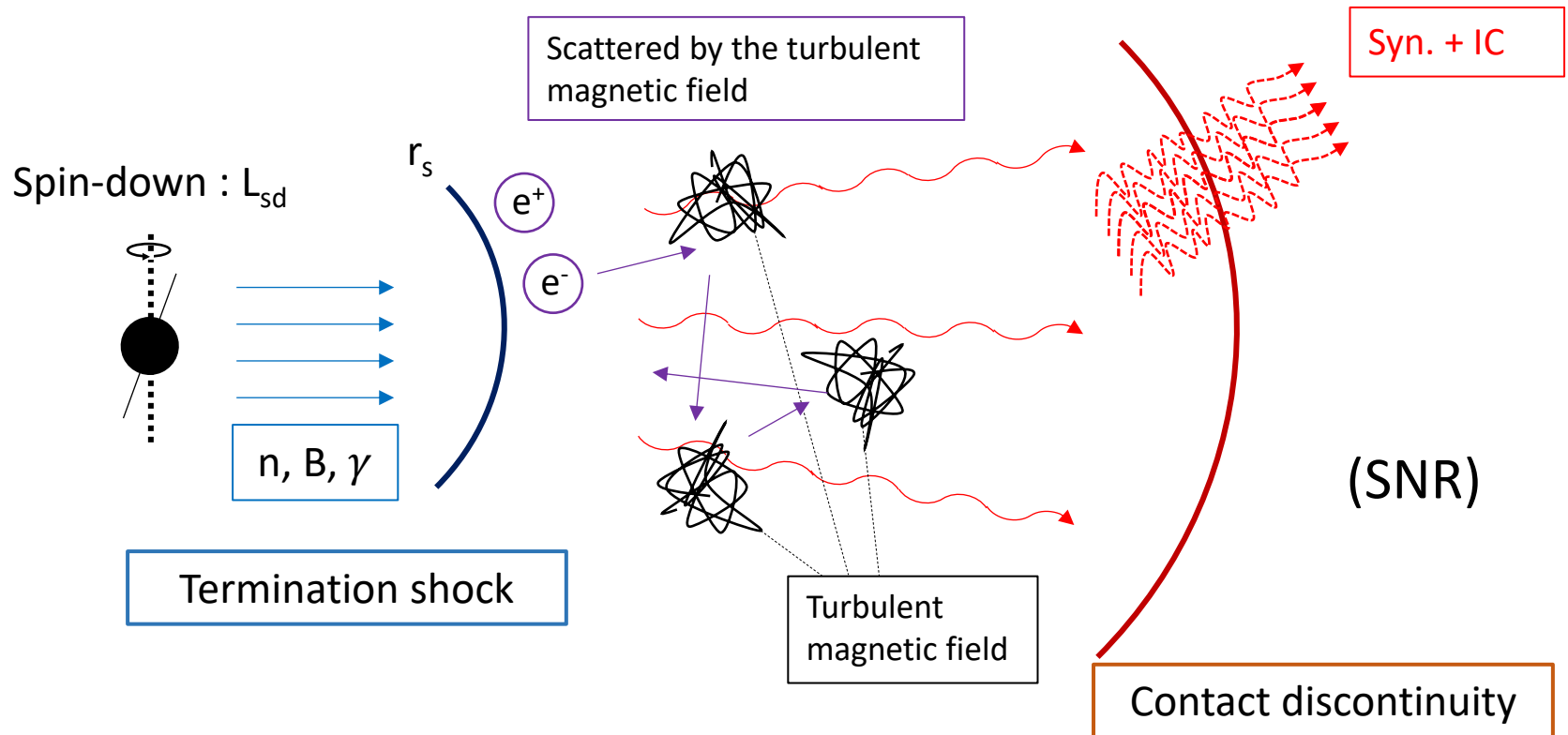


(Moran+ 2013)

# 空間拡散モデル

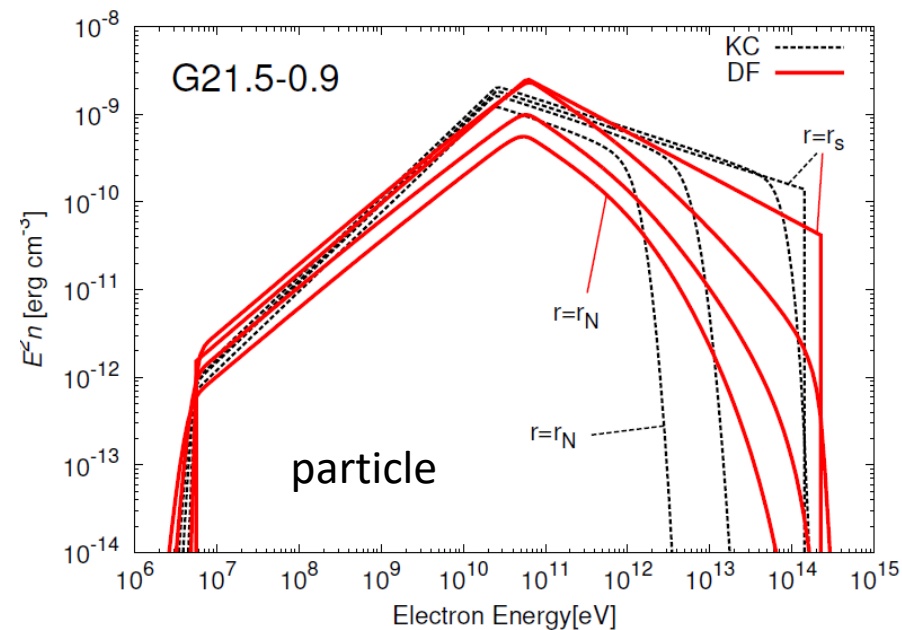
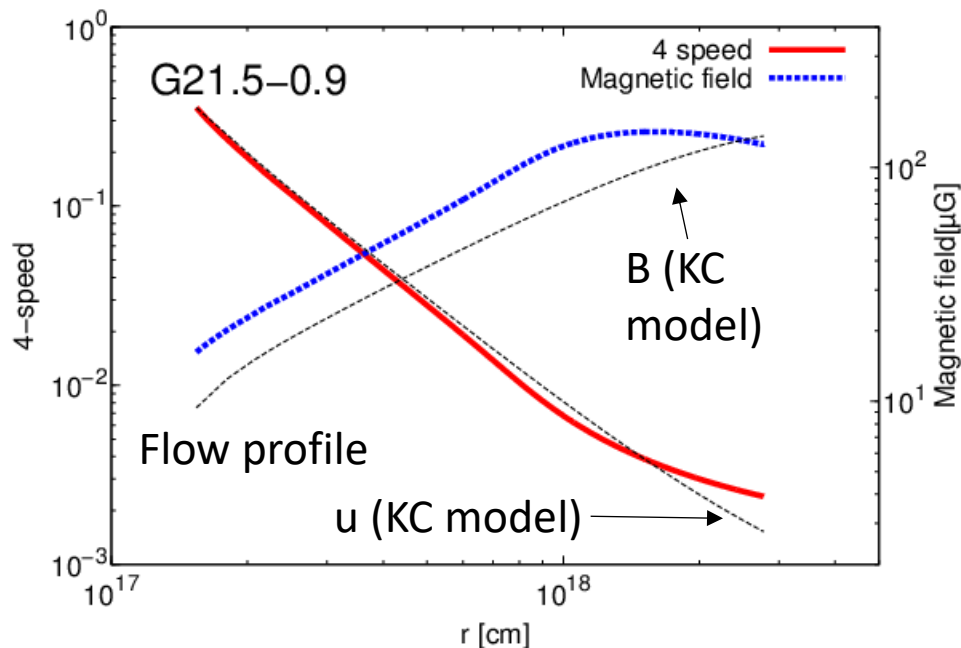
$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \left( u(r)f - \kappa \frac{\partial f}{\partial r} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial E} \left[ \langle \dot{E} \rangle n \right] = 0$$

- 乱れた磁場による空間拡散があるモデル
  - 磁場構造は 大局的なトロイダル磁場 + 微視的な乱れた磁場 を考える
  - 流れは 半径方向
  - 非熱的粒子は、流体に乗って移流しながら、さらにrandom-walk(拡散)する
  - さらに、拡散過程が流体構造に及ぼす反作用も計算している



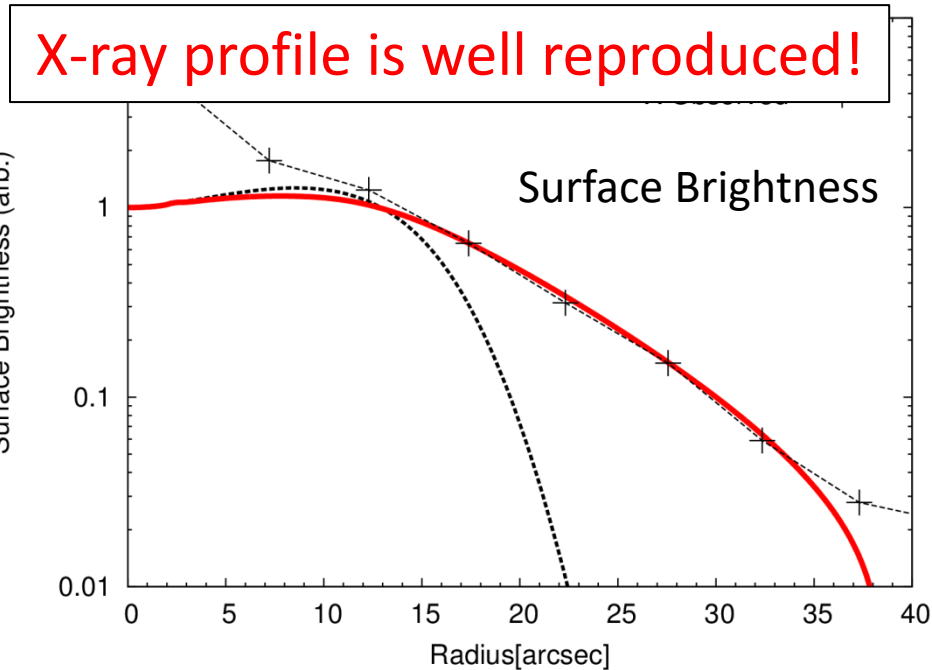
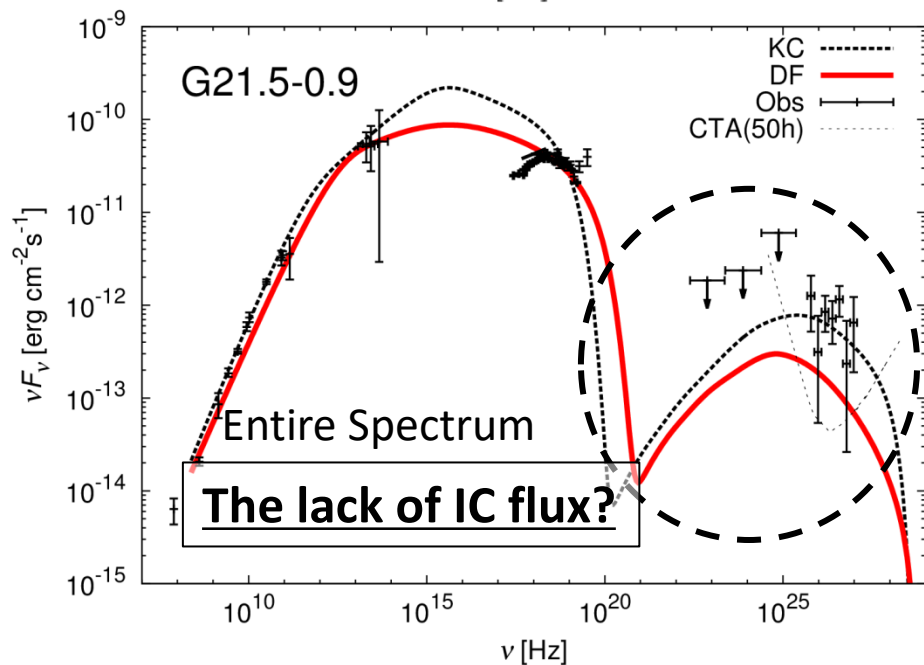
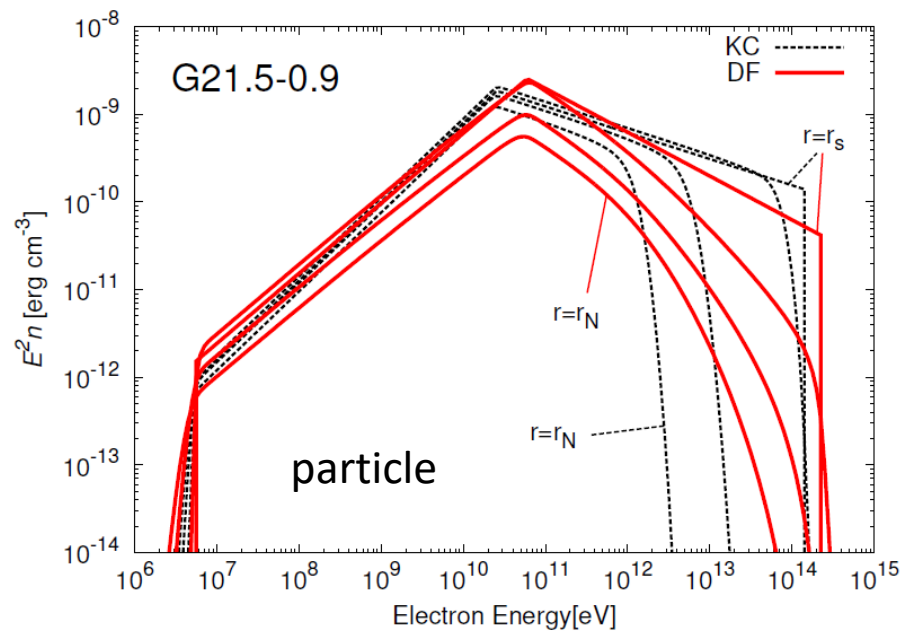
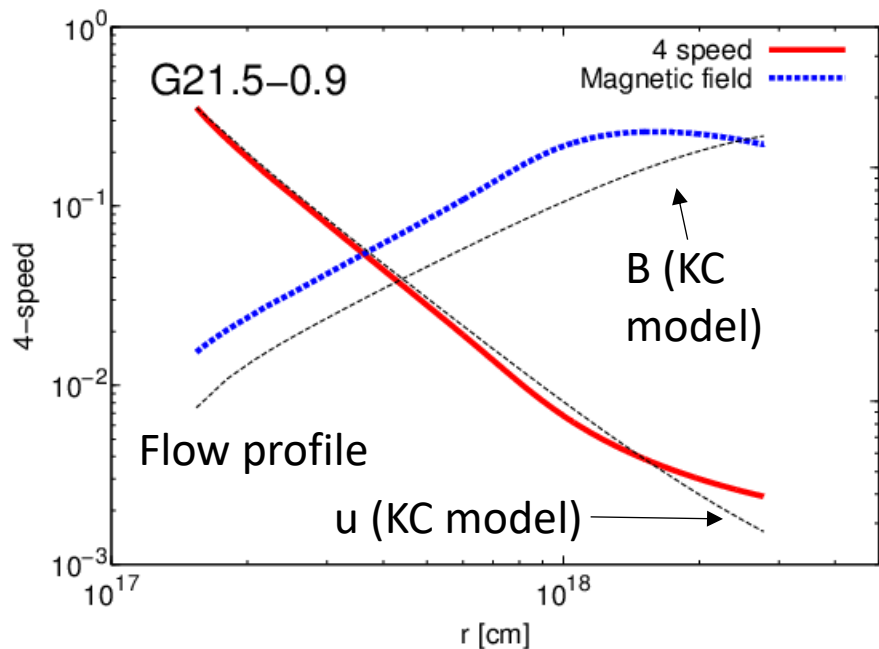


# Application to G21.5-0.9



Given Parameters	Symbol	G21.5-0.9	
		KC <sup>a</sup>	DF
Spin-down Luminosity ( $\text{erg s}^{-1}$ )	$L_{\text{sd}}$	$3.5 \times 10^{37}$	
Distance (kpc)	$D$	4.8 <sup>c</sup>	
Radius of the nebula (pc)	$r_{\text{N}}$	0.9	
Fitting Parameters			
Break Energy (eV)	$E_{\text{b}}$	$2.6 \times 10^{10}$	$6.0 \times 10^{10}$
Low-energy power-law index	$p_1$	1.1	1.2
High-energy power-law index	$p_2$	2.3	2.5
Radius of the termination shock (pc)	$r_{\text{s}}$	0.05	0.05
Magnetization parameter	$\sigma$	$2.0 \times 10^{-4}$	$6.0 \times 10^{-4}$
Diffusion coefficient at $E_{\text{b}}$ ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )	$\kappa_0$	-	$1.0 \times 10^{26}$

# Application to G21.5-0.9



# Escaped particles...?

$10^{32}$  erg/s @ 1TeV  
 $\rightarrow \sim 10^{14}$  erg/s/cm<sup>2</sup> (for G21.5-0.9)

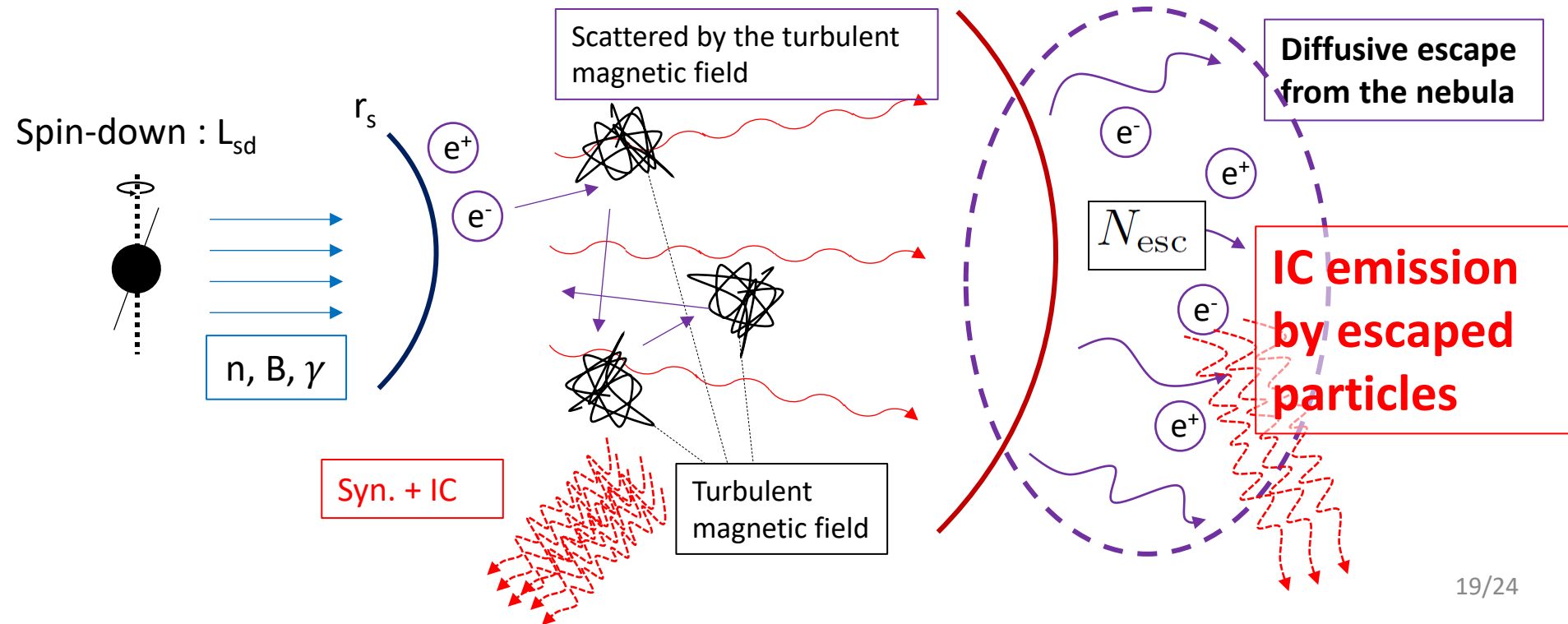
- 乱れた磁場による粒子の空間拡散
  - 星雲から逃げた粒子からの放射

CMB光子を逆コンプトン散乱  
 $e^\pm + \gamma(\text{CMB})$

$$N_{\text{esc}} \sim 4\pi r_N^2 (\kappa(E_{\text{VHE}})/r_N) E_{\text{VHE}} n(r_N, E_{\text{VHE}}) t_{\text{adv}} \sim 10^{43}$$

$$r_N + \sqrt{\kappa t_{\text{adv}}} \sim 2 \text{ pc } (90'')$$

( For G21.5-0.9 )



# Summary

- “標準模型”のKCモデルは、X線が電波と同程度に広がっているパルサー星雲の観測事実を説明できない
- 非定常の1次元MHD方程式を解いて、KCモデルの定常近似の妥当性を確かめた結果、流体構造と放射の両面で近似が妥当であることが分かった
- 空間拡散を考慮した定常拡散モデルで、SEDとX線の拡がりを同時に説明できることを示した
- 星雲外部の拡散係数が、星雲の中と同じとすると、星雲のTeV  $\gamma$ 線放射は低周波の放射領域よりも広がって見えることを示唆した

## 課題：

- 得られた拡散係数  $\kappa(E = 10^{14} \text{ eV}) \sim 10^{27} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  の物理的意味。宇宙線の“標準理論”からするとこの値は大きすぎる。
- 電子・陽電子がPWNから逃げ出す過程のより詳細な扱い
- 時間発展モデルを使った、Middle-aged PWNeのモデル構築  
CTA  $\rightarrow$  ソース数  $\times 10$ , 角度分解能  $\times 3$ , ガンマ線放射の拡がりについて調査