

# 拡散過程の反作用を考慮した パルサー星雲の1次元流体モデル

---

---



Wataru Ishizaki

( Department of Physics, Graduate School of Science,  
The University of Tokyo )

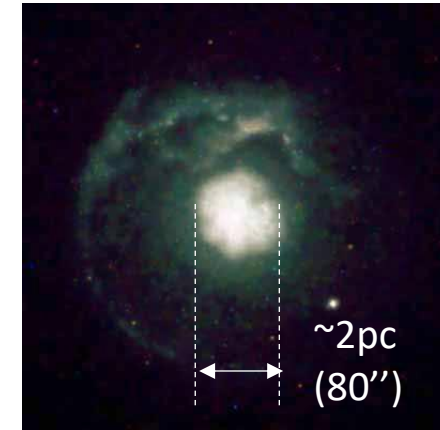
# Introduction -パルサー星雲-

- 回転駆動型パルサーの周囲に広がる天体
  - 数pc程度に広がって存在
  - 中の詰まった繭状の構造
- 電波からγ線まで広がる非常にbroadなspectrum
  - パルサー風がISM( or SNR)と相互作用して衝撃波を形成
  - パルサー風の $e^{\pm}$ が加速され非熱的放射
- 例: メシエ天体 M1「かに星雲」(SN1054)

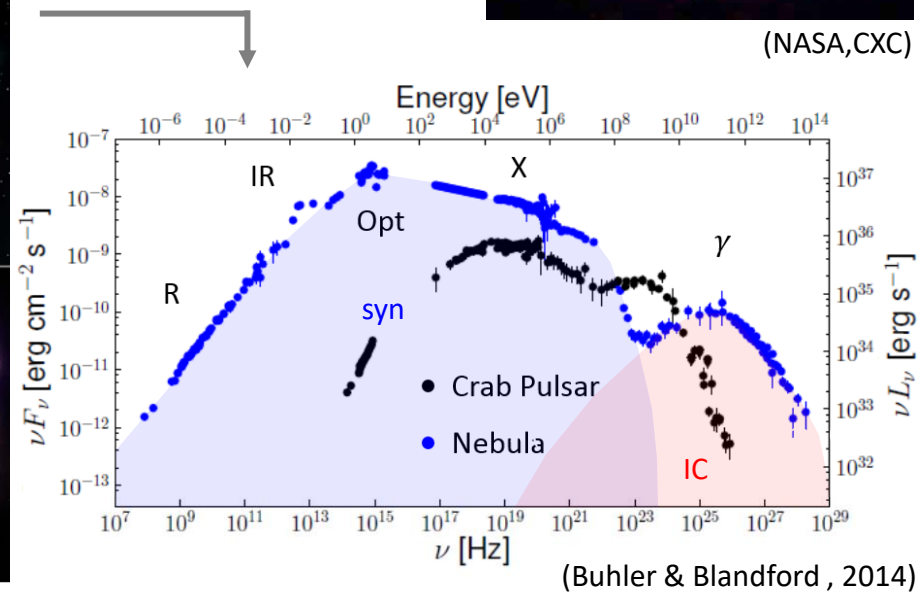
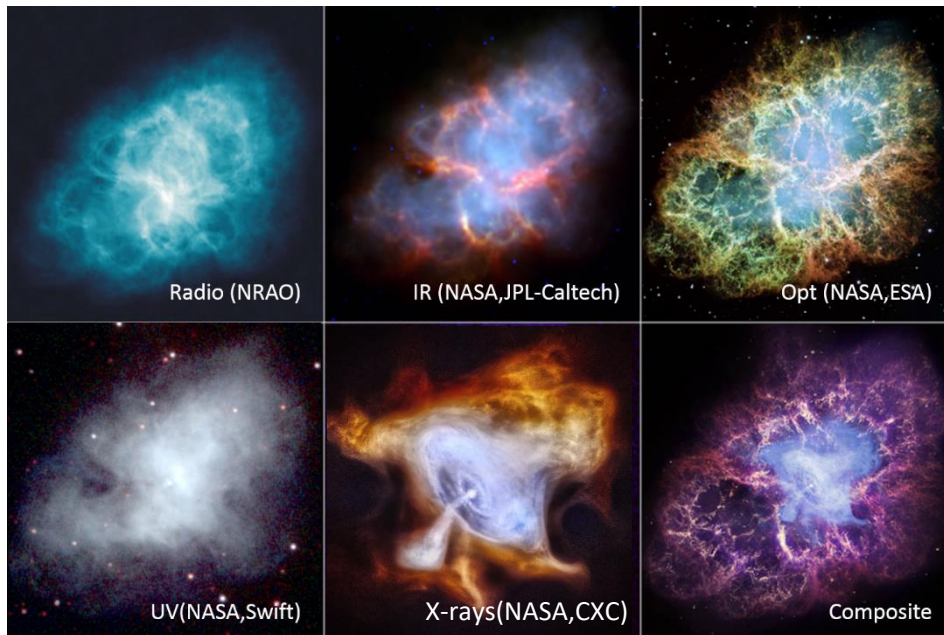


(X : NASA , radio : NCSU)

G21.5-0.9



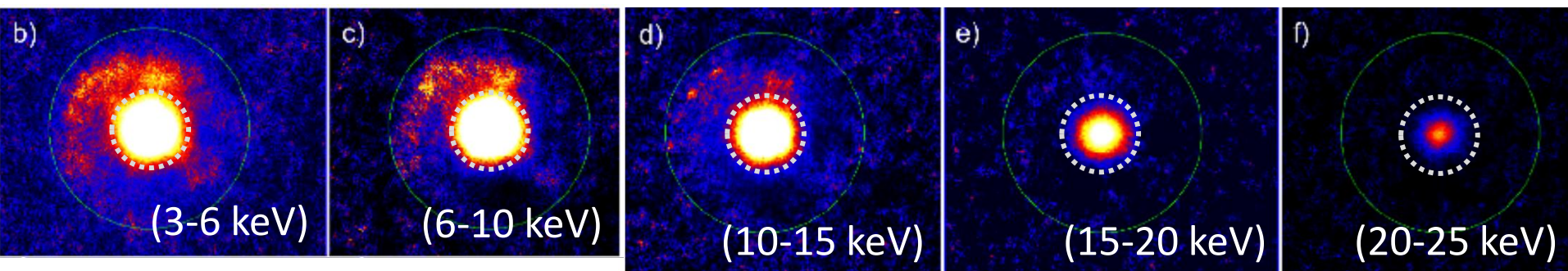
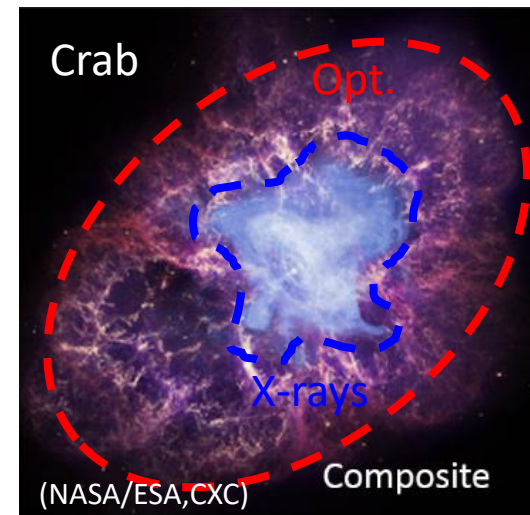
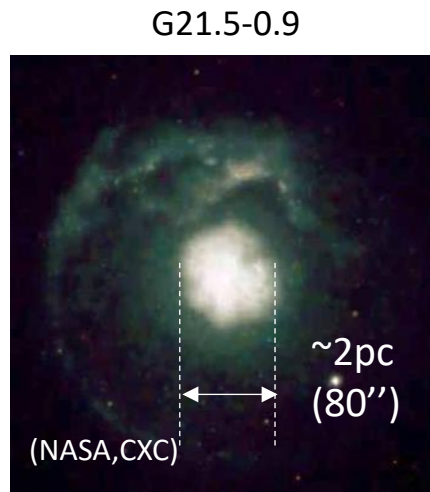
(NASA,CXC)



# パルサー星雲の空間分解観測

- X線放射の空間分解観測

- X線放射を出す粒子は、星雲内に存在する最高エネルギーの粒子  
⇒ X線放射の空間分布は、高エネルギー粒子の伝播過程の重要な手がかり



# 1D steady model

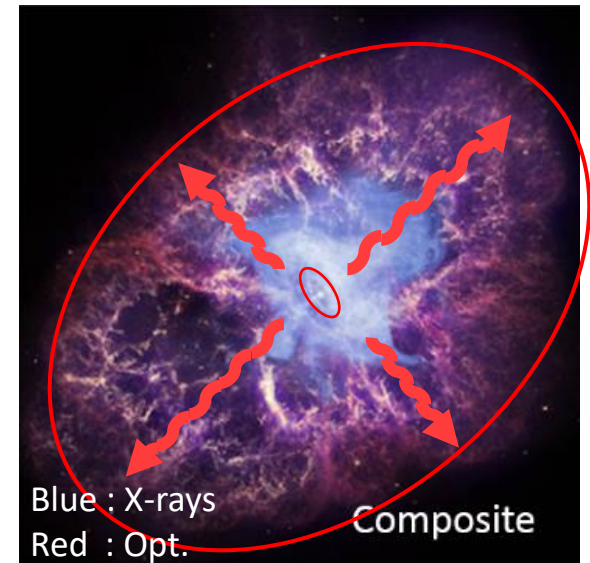
- Kennel & Coroniti (1984)

- ISMとの相互作用でできた終端衝撃波での粒子加速を仮定
  - 加速粒子は「流体とともに移流する」ことで輸送されるとする
  - Full 1D-steady MHDの解の上で、放射冷却を考慮して粒子のエネルギー・空間分布を計算
- かに星雲のSED・膨張速度をよく説明  
⇒ 星雲の標準モデルとして受け入れられた

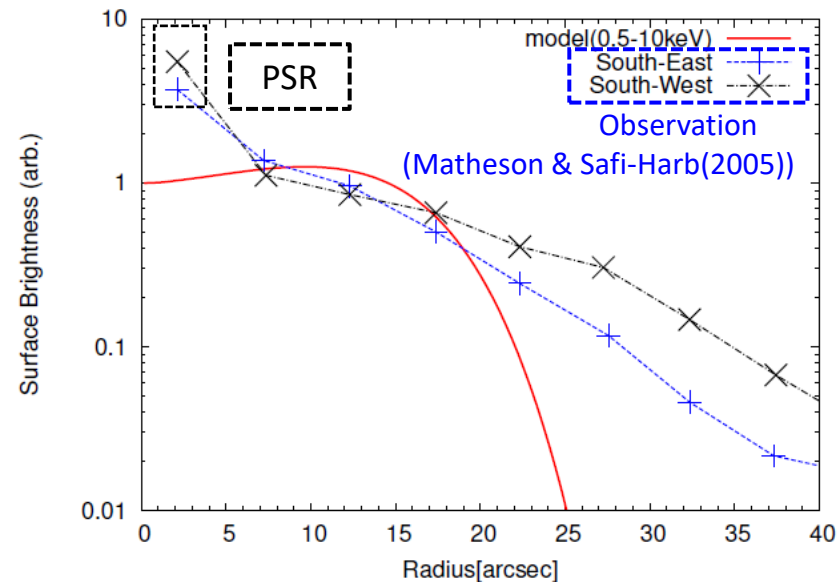
- KC modelの問題

- KCモデルは、3C 58やG21.5-0.9といった他のパルサー星雲のX線の表面輝度分布を説明しない(Ishizaki+17)
- SEDを説明するために必要な磁場強度のもとでは、星雲の外縁部に到達する前に冷却でエネルギーを失ってしまう

⇒ KC modelには改良の必要あり



0.5-2.0 keVの表面輝度分布

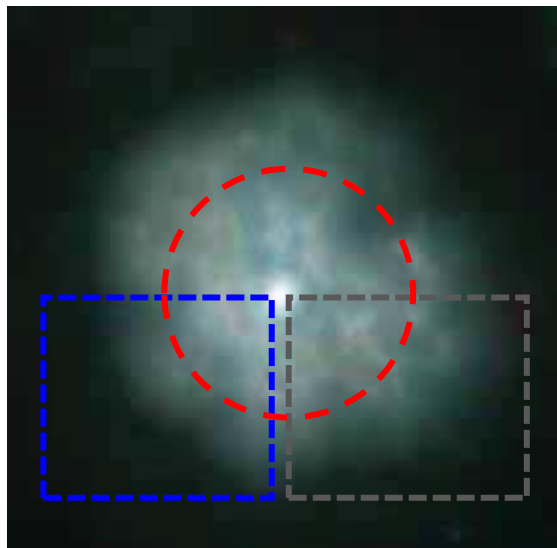




1C

G21.5-0.9

• K



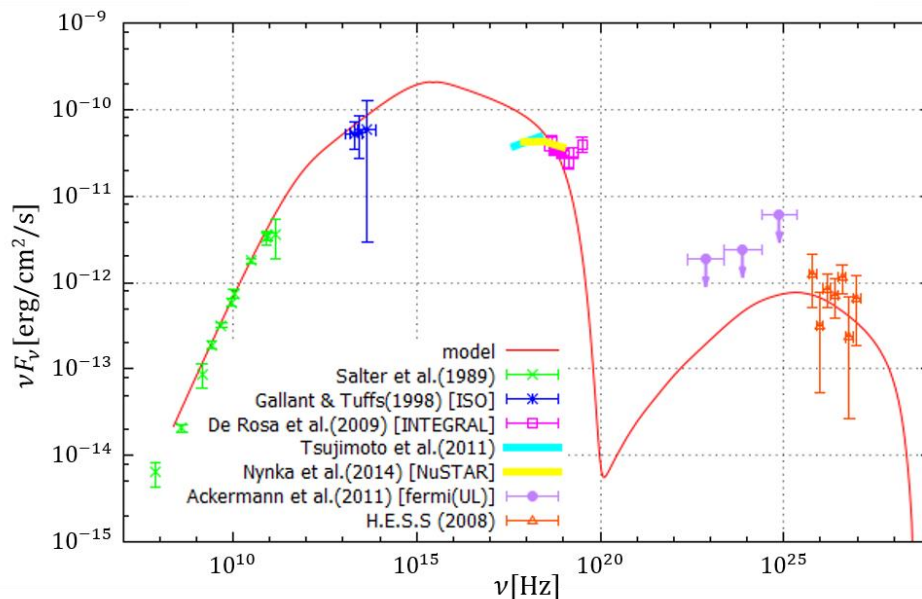
入れられた

### • KC modelの問題

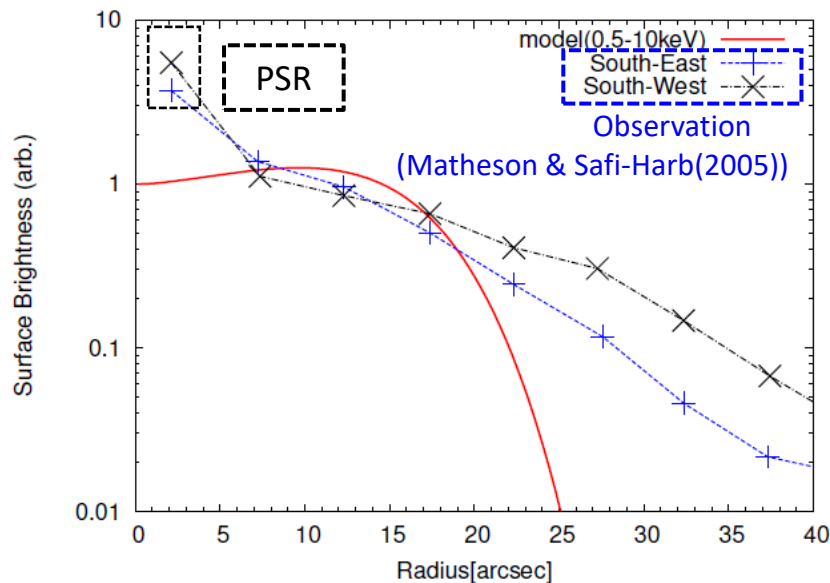
- KCモデルは、3C 58やG21.5-0.9といった他のパルサー星雲のX線の表面輝度分布を説明しない(Ishizaki+17)
- SEDを説明するために必要な磁場強度のもとでは、星雲の外縁部に到達する前に冷却でエネルギーを失ってしまう

⇒ KC modelには改良の必要あり

## Photon spectrum

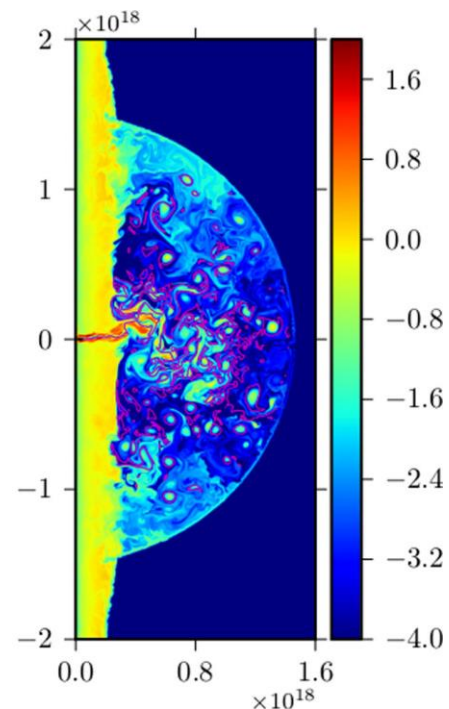


### 0.5-2.0 keVの表面輝度分布



# Motivation –Improvement of the 1D steady model-

- X線の放射領域の問題を解決するには...
  - 放射冷却を抑える過程
  - より効率的に粒子の空間的分布を広げる過程
- パルサー星雲の拡散モデル
  - Tang & Chevarier (2012)
    - 拡散で3C 58, G21.5-0.9のphoton indexの半径依存性を説明
  - Porth et al. (2016)
    - Test particleで3D simulationから拡散係数を推定
    - 得られた拡散係数を用いて1D steady modelを構築
  - X線の拡がりを説明するためには $\kappa \sim 10^{27} \text{cm}^2/\text{s}$ が必要
  - ただし、いずれも「表面輝度分布のプロファイル」のみ議論
- 問題点
  - X線の放射領域の問題は、SEDから期待される磁場の強さが、表面輝度分布を説明するには強すぎるのが本質
    - ⇒ SEDと表面輝度を同時に検証すべき！
  - 拡散係数の値が流体の運動に寄与する程度に大きい(後述)



(Porth et al., 2014)

# Motivation –Improvement of the 1D steady model–

- X線の放射領域の問題を解決するには...

- 放射冷却を抑える過程
- より効率的に粒子の空間的分布を広げる過程

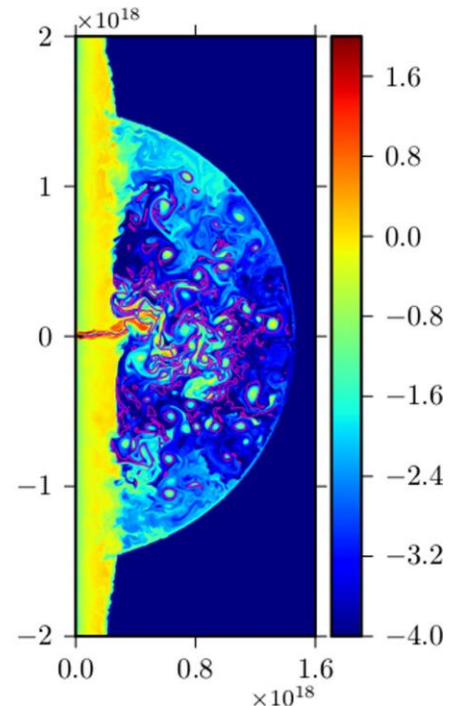
「粒子の空間拡散」を考慮することによるKCモデルの改良

- パルサー星雲の拡散モデル

- Tang & Chevarier (2012)
  - 拡散で3C 58, G21.5-0.9のphoton indexの半径依存性を説明
- Porth et al. (2016)
  - Test particleで3D simulationから拡散係数を推定
  - 得られた拡散係数を用いて1D steady modelを構築
- X線の拡がりを説明するためには $\kappa \sim 10^{27} \text{cm}^2/\text{s}$ が必要
- ただし、いずれも「表面輝度分布のプロファイル」のみ議論

- 問題点

- X線の放射領域の問題は、SEDから期待される磁場の強さが、表面輝度分布を説明するには強すぎるのが本質
  - ⇒ SEDと表面輝度を同時に検証すべき！
- 拡散係数の値が流体の運動に寄与しうる程度に大きい(後述)

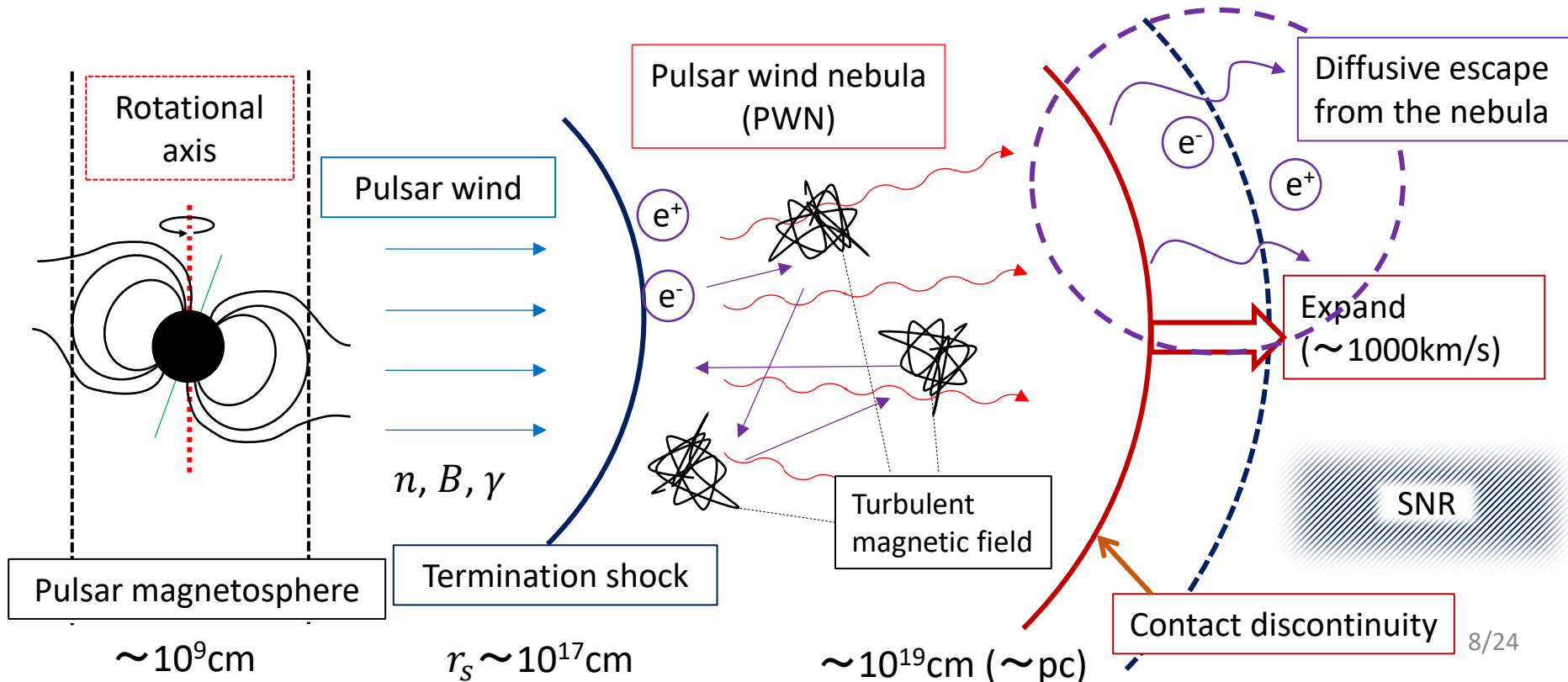


(Porth et al., 2014)

# Model -Overview-

- 1次元・定常拡散モデル

- 終端衝撃波での粒子加速
- 粒子は、星雲内の流れに押し流されると同時に、星雲内の乱れた磁場に散乱されながら広がっていく
- Contact discontinuityの外にも拡散して広がる効果を考える





# Model

$$P_e = \frac{v_2 r_s}{\kappa} \sim 1 \left( \frac{\kappa}{3 \times 10^{27} \text{cm}^2/\text{s}^{-1}} \right)^{-1} \left( \frac{r_s}{0.1 \text{pc}} \right)$$

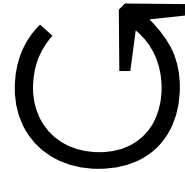
## 移流拡散方程式

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

$$\langle \dot{E} \rangle_{\text{syn}} \equiv \frac{4}{3} \sigma_{\text{T}} c \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2 U_B$$

$$\langle \dot{E} \rangle_{\text{ad}} \equiv \frac{p}{3} \frac{c}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u(r))$$

$$\frac{dn}{dE} \rightarrow \epsilon, p, \delta, Q$$



速度場  $u(r)$   
の更新

## 拡散の反作用を考慮した流体方程式

### 拡散項

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \left( \gamma^2 (\epsilon + p) \beta + \frac{(\mathbf{E} \times \mathbf{B})_r}{4\pi} - \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \left( \frac{4}{3} \gamma^2 \beta^2 + 1 \right) \delta(r) \right\} \right) \right] = -\gamma Q(r)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \left( \gamma^2 (\epsilon + p) \beta^2 + p + \frac{E^2 + B^2}{8\pi} - \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{4}{3} \gamma^2 \beta \delta(r) \right\} \right) \right] = \frac{2p}{r} - \gamma \beta Q(r)$$

$$r\beta B = \text{const}$$

$$\epsilon(r) \equiv \int E' \left( \frac{dn}{dE} \right)' dE'$$

$$\delta(r) \equiv \frac{1}{c} \int \kappa E' \left( \frac{dn}{dE} \right)' dE'$$

$$Q(r) \equiv \frac{1}{c} \int Q'_{\text{rad}} \left( \frac{dn}{dE} \right)' dE'$$

# Result

$$\sigma = 3 \times 10^{-4}$$

$$r_s = 0.05 \text{ pc}$$

$$L_{\text{sd}} = 3.5 \times 10^{37}$$

$$r_N = 2.0 \text{ pc}$$

$$\gamma_1 = 2.2 \times 10^4$$

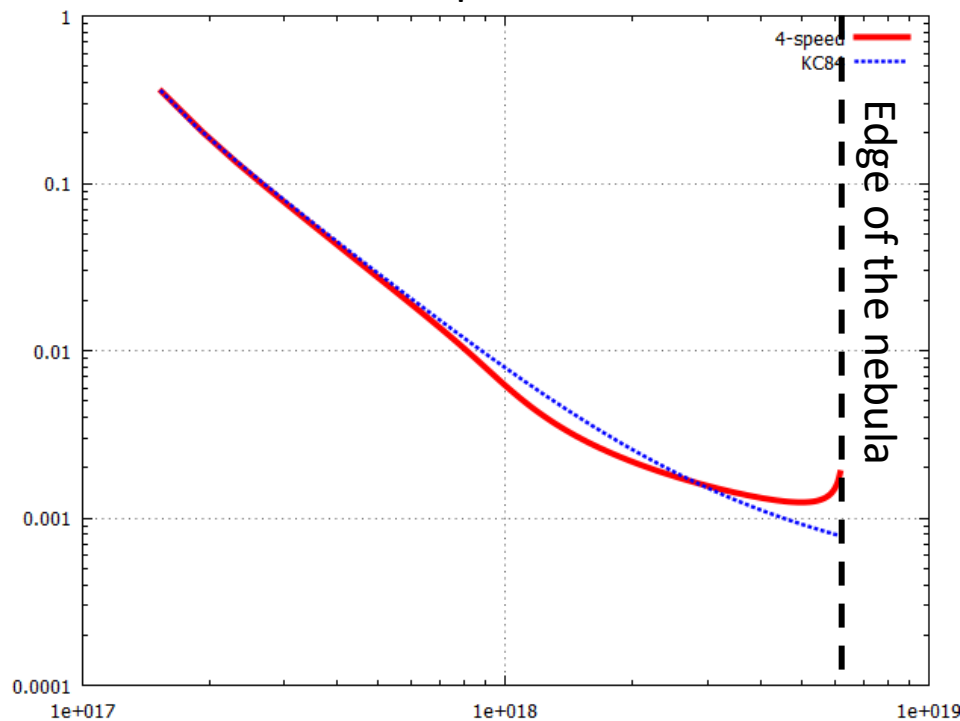
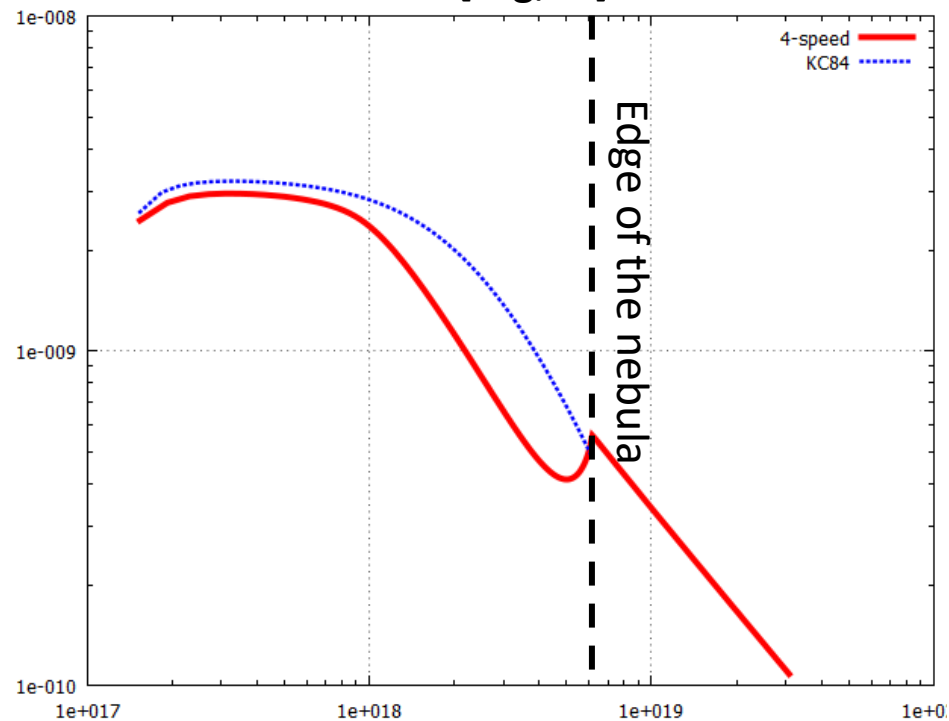
$$\kappa = 3.0 \times 10^{26} (E/1\text{TeV})^{1/3} \text{ cm}^2/\text{s}$$

## • 拡散係数

- X線を放射する粒子に対して  $\kappa \sim 10^{27} \text{ cm}^2/\text{s}$
- 圧力分布のパイルアップは星雲の縁で移流を切ったためあらわれる
- 4-speedも縁でパイルアップする

圧力 [erg/cc]

4-speed



半径 [cm]

半径 [cm]

# Result

$$\sigma = 3 \times 10^{-4} \quad r_s = 0.05 \text{ pc}$$

$$L_{sd} = 3.5 \times 10^{37} \quad r_N = 2.0 \text{ pc}$$

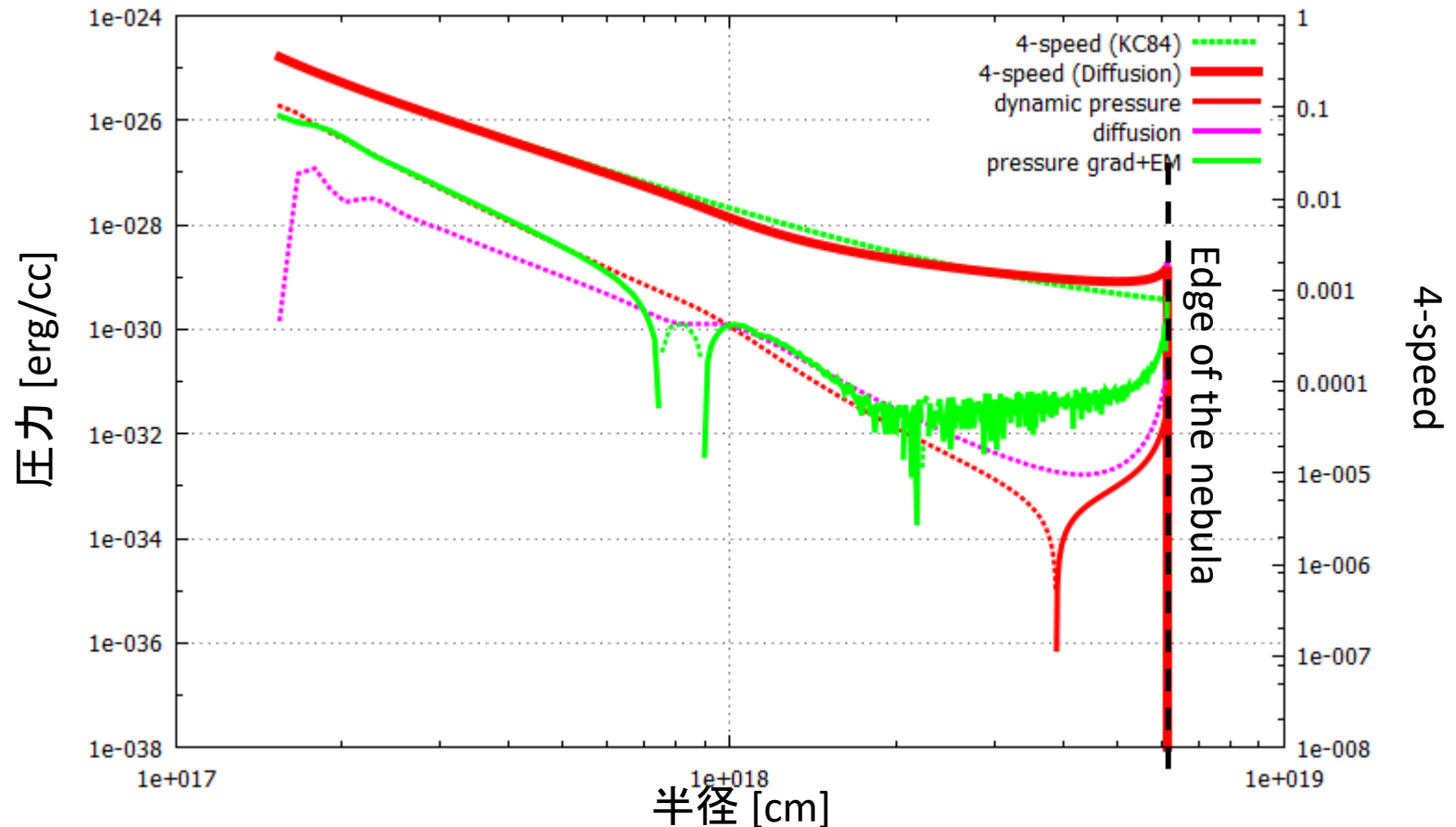
$$\gamma_1 = 2.2 \times 10^4$$

$$\kappa = 3.0 \times 10^{26} (E/1\text{TeV})^{1/3} \text{ cm}^2/\text{s}$$

- 拡散過程による減速

- 球対称系では拡散は総計で外向きの流束を作る

⇒ 運動量が半径方向に持ち出される ⇒ 反作用で流体は減速



# Discussion (+Summary)

- 拡散過程による流体の減速
  - KCモデルでlow-sigmaがfavorされるのは、パルサー風を星雲の縁までに十分減速できるから
  - 拡散がもっと強い場合、high-sigmaでも十分な減速が見込めるかもしれない？
- 先行研究との比較
  - Porth+17, Tang & Chevarier 11はエネルギー依存性のない拡散係数を用いている
  - 拡散係数のエネルギー依存性を考慮しない場合、むしろ拡散が効きやすくなるセンスに...？
- 展望
  - 放射計算
  - 様々な拡散係数・モデルで計算
  - High-sigmaでの計算

