パルサー星雲における拡散過程と流体構造への反作用について

石崎 渉 (宇宙線研究所)

共同研究者：浅野 勝晃、川口 恭平

W. Ishizaki, K. Asano, and K. Kawaguchi (2018) ApJ, Submitted(arXiv:1809.09054)

自己紹介

- 石崎 渉 (いしざき　わたる)
  宇宙線研究所 高エネルギー天体グループ D3
- 研究テーマ
  - パルサー星雲の準解析的モデリング
- しゅみ
  - 旅行 (特に電車で)
  - (軽い)登山
  - 流体力学
  - Otaku-like activity…
    - 変な音楽をあつめること
    - アニメを見ること
    - 音ゲーをする
    - etc…

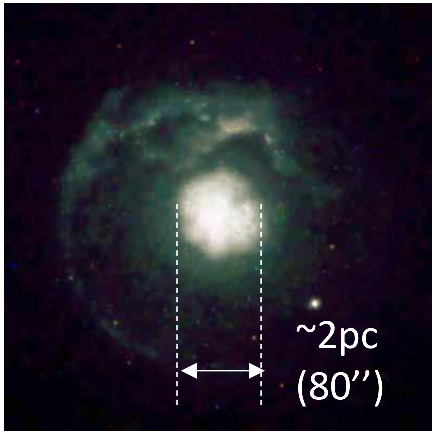
Introduction -パルサー星雲-

- 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)

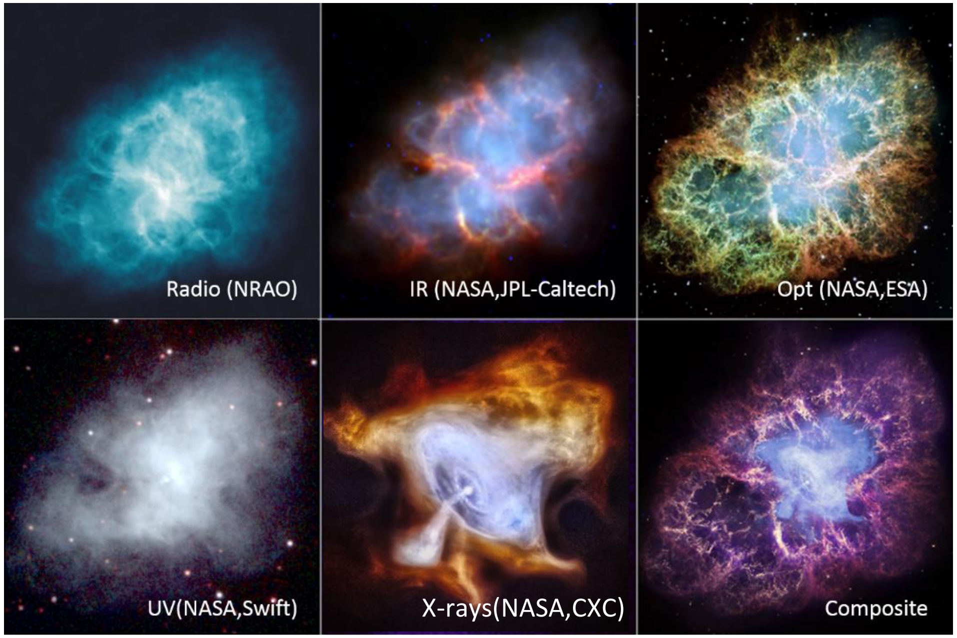
3C 58 (青 :X線 , 赤 : 電波)

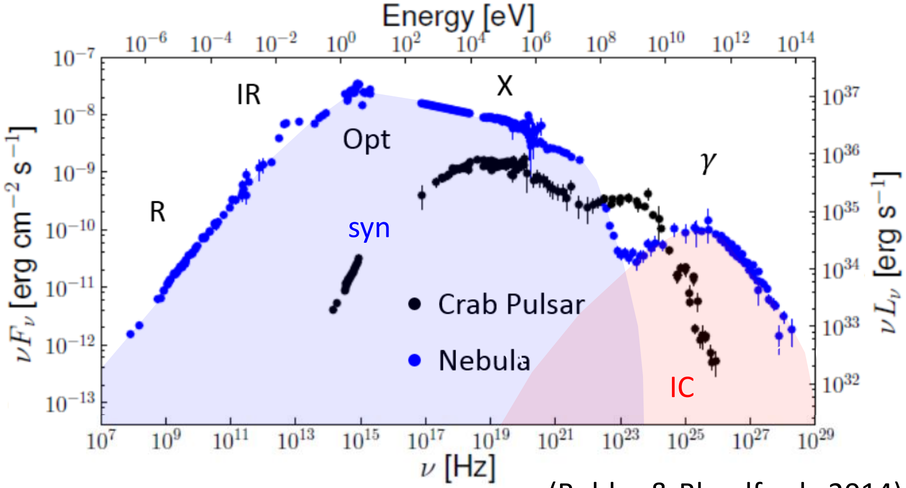
(X : NASA , radio : NCSU)

G21.5-0.9



(NASA,CXC)

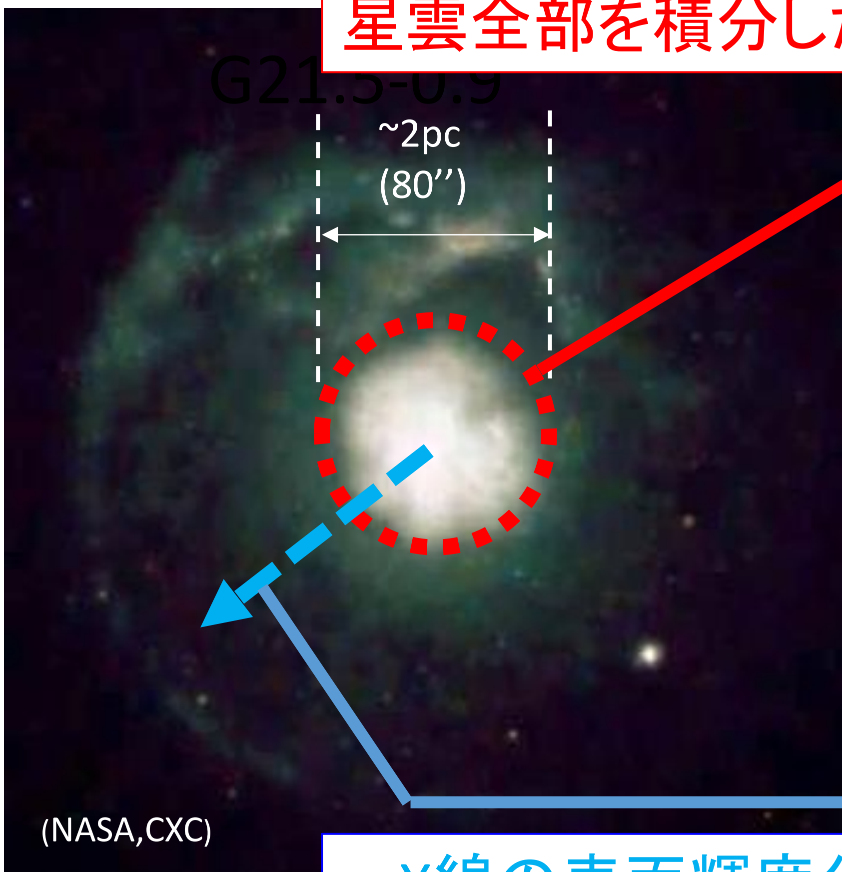




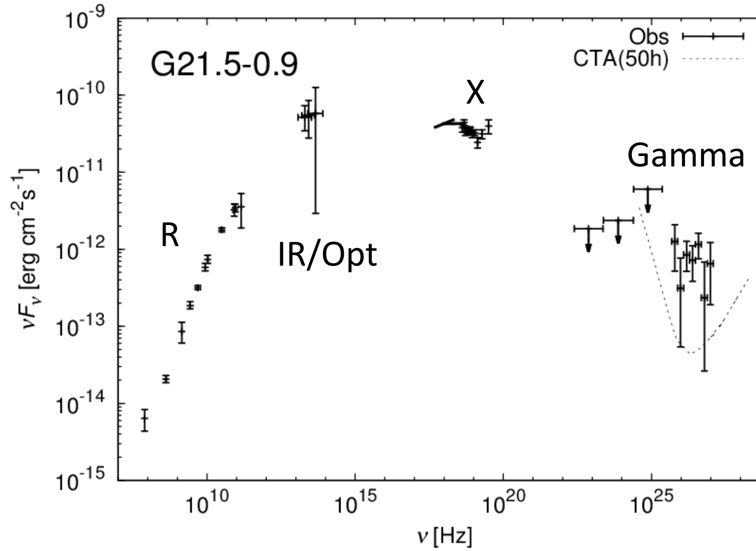
(Buhler & Blandford , 2014)

説明したい観測量

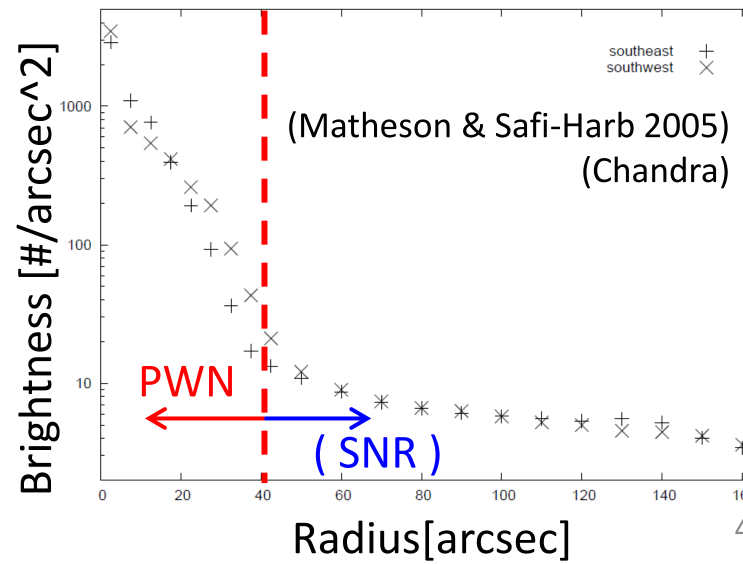
- eg. G21.5-0.9



星雲全部を積分したSED



X線の表面輝度分布



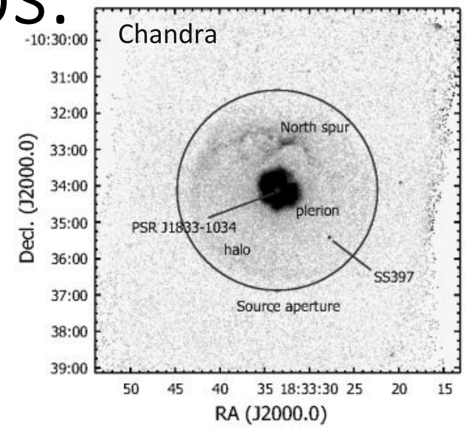
Spatially-resolved obs.

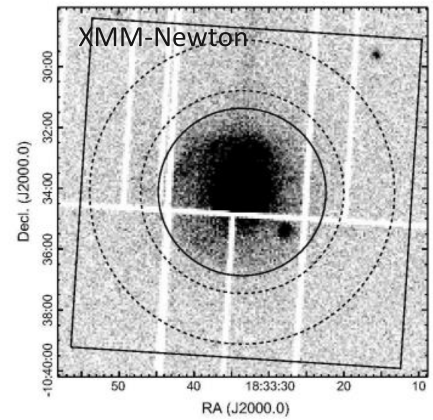
- eg. G21.5-0.9

Gallant & Tuffs (1998)
http://adsabs.harvard.edu/abs/1998MmSAI..69..963G

Tsujimoto+10
https://arxiv.org/pdf/1009.2812.pdf

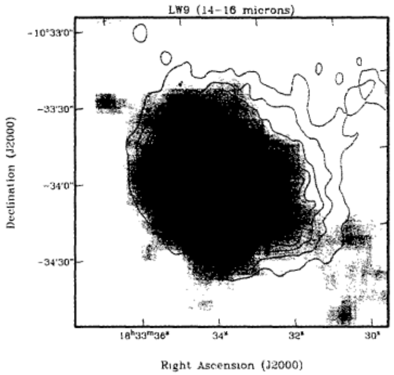
X-ray



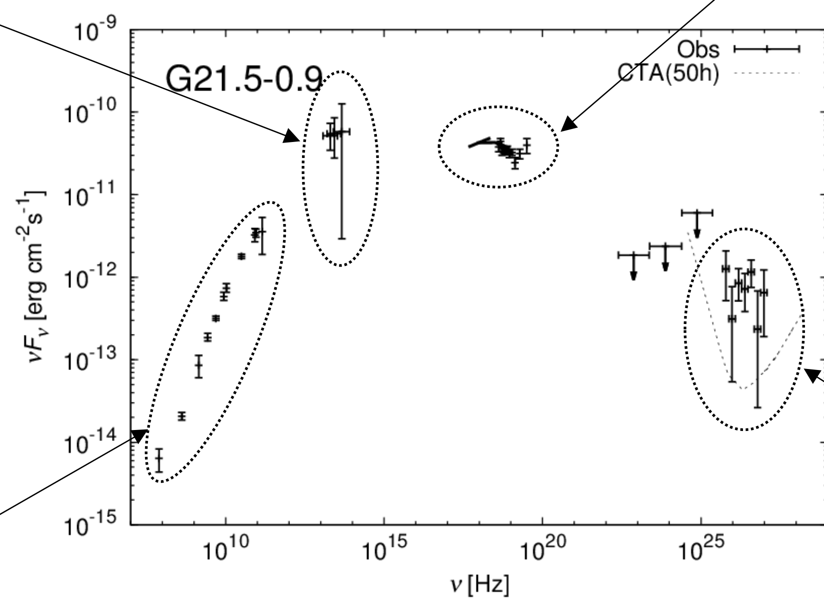


Resolved!

IR/Opt

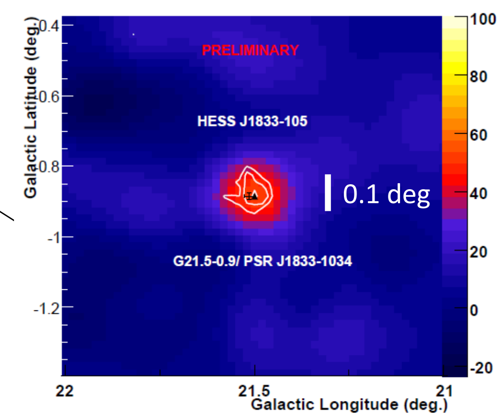


Resolved!



Gamma

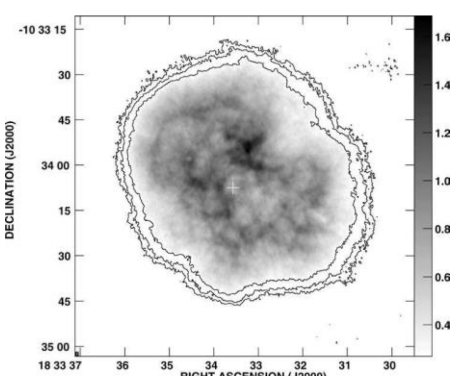
Djannati-atai+08
https://arxiv.org/abs/0710.2247



Not yet spatially resolved.

(→ CTA MST can resolve ~50'' …?)

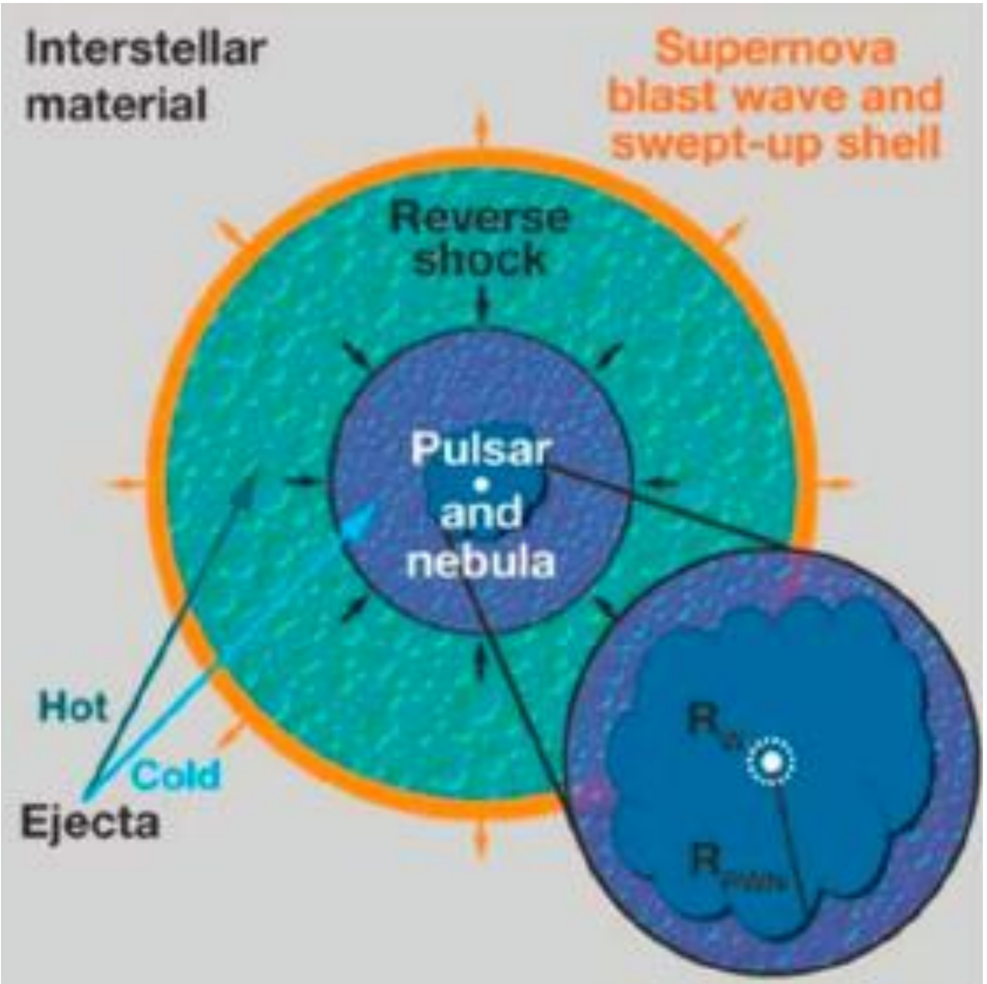
Radio



Resolved!

Bietenholtz & Bartel (2008)

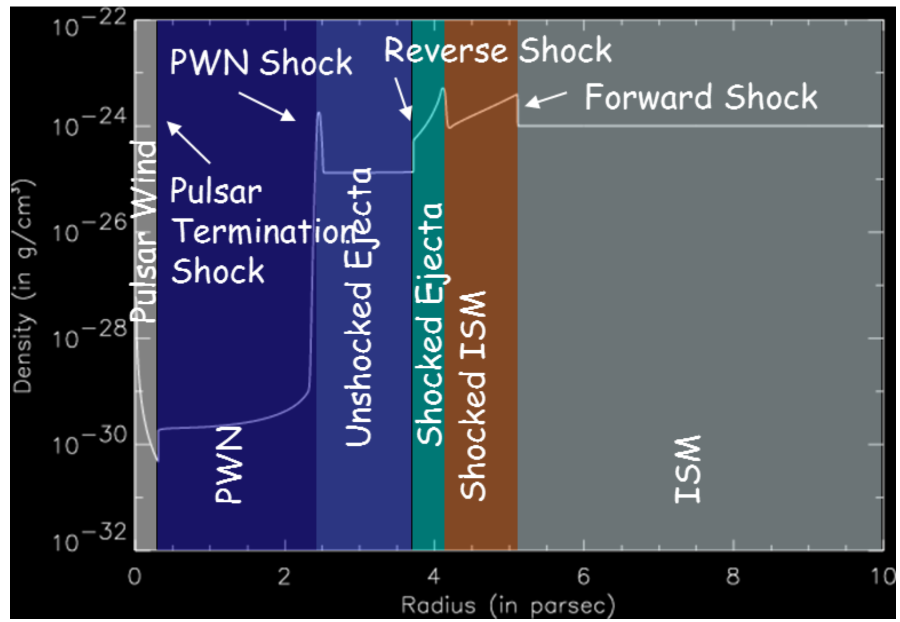
パルサー星雲の標準的描像



Gaensler & Slane (2006)

パルサー星雲は超新星残骸に包まれている"二重爆風構造"

1. PWN vs. SN ejecta ⇔ PWN
2. SN ejecta vs. ISM ⇔ SNR



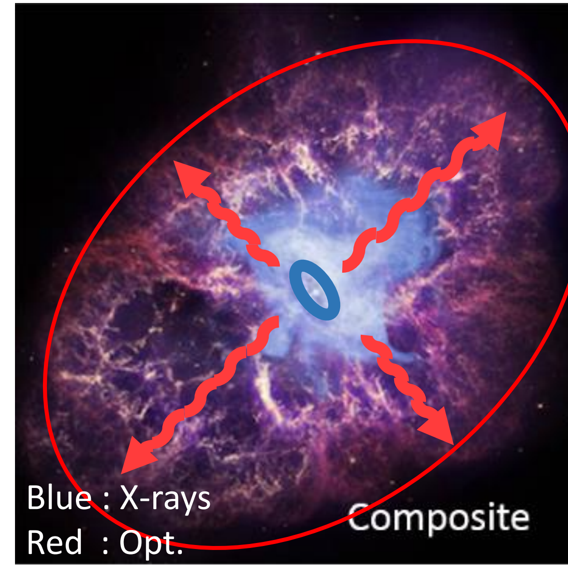
From Slane's slide (Heisenberg,2008)

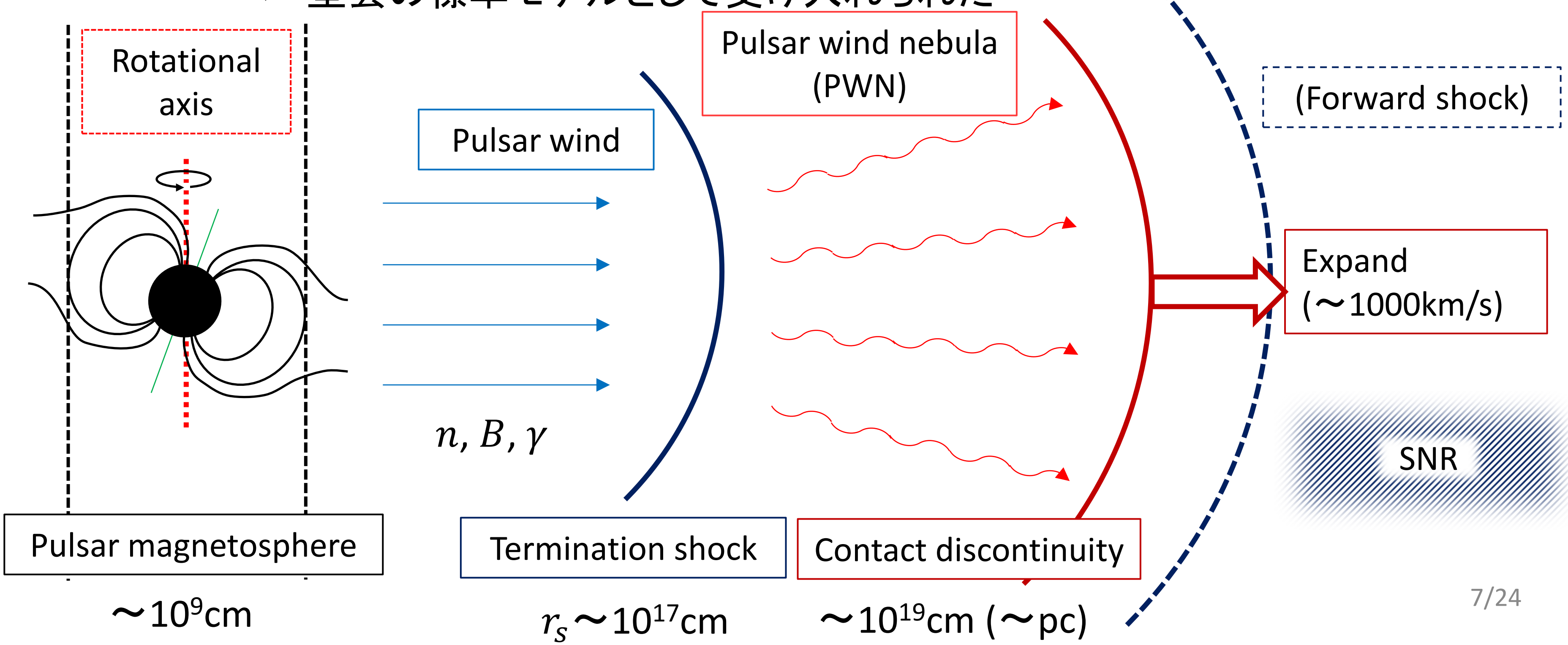
パルサー星雲の標準的描像

- 一次元定常モデル Rees & Gunn (1974), Kennel & Coroniti (1984)
  - 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
  - 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

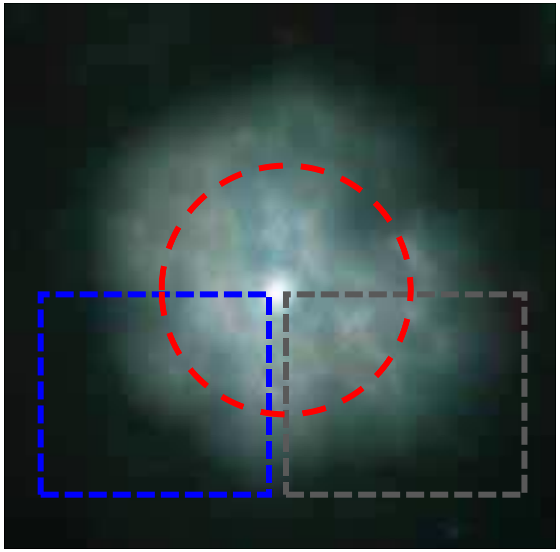




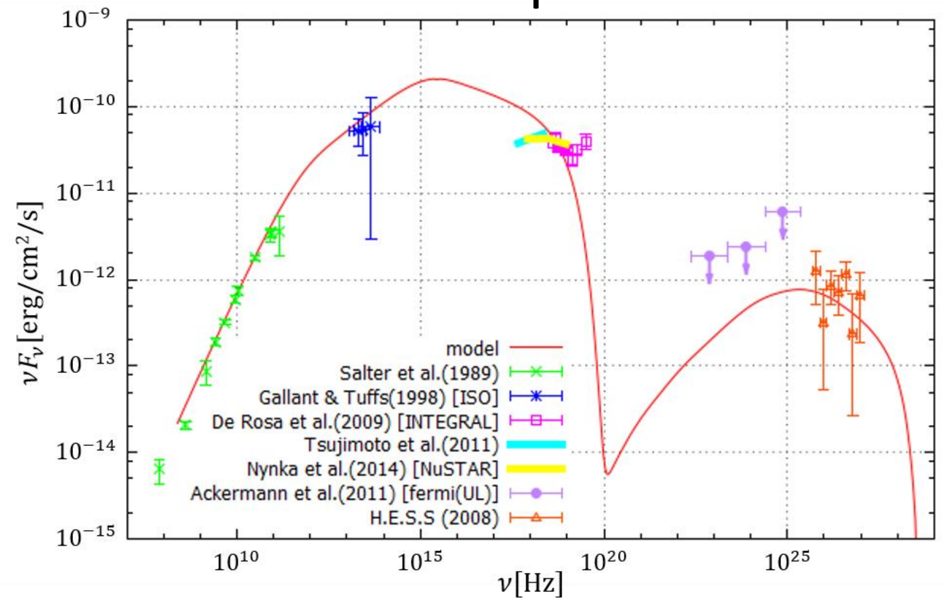
1D steady model-

- 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

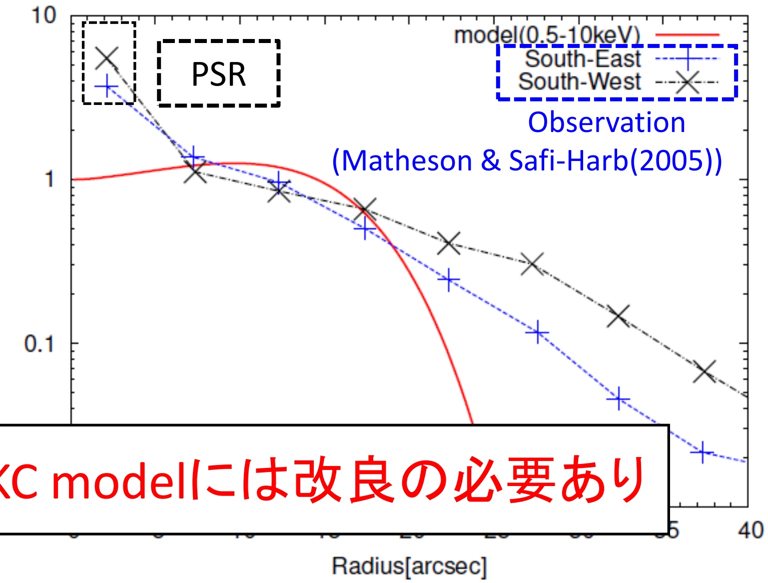
G21.5-0.9



Photon spectrum

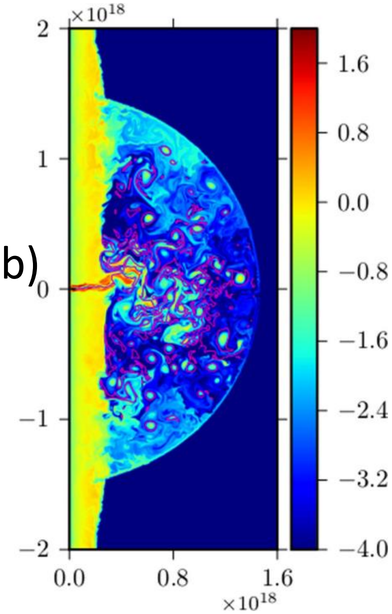


0.5-2.0 keVの表面輝度分布

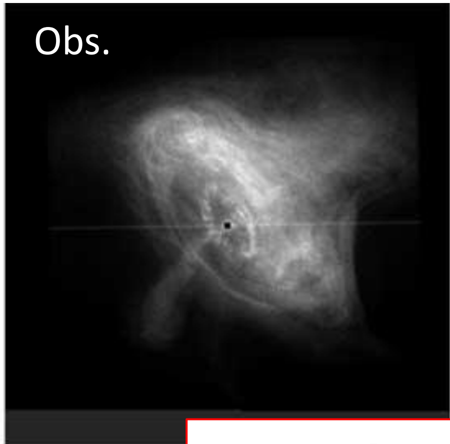


⇒ KC modelには改良の必要あり

Turbulent magnetic field in PWNe



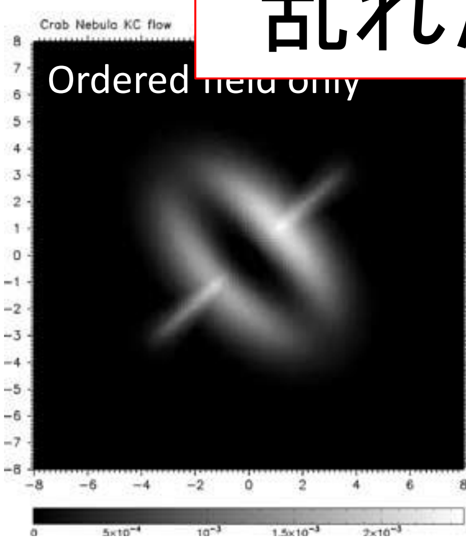
Semi-analytical study

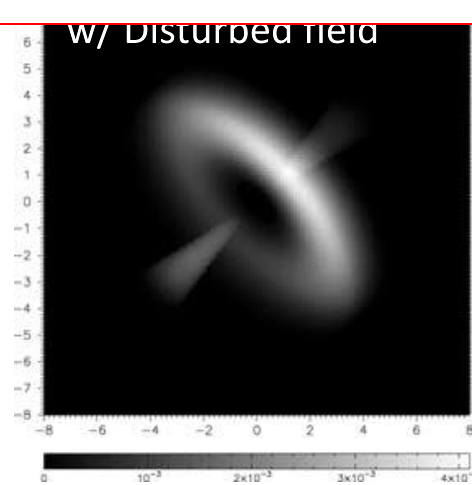


2-D, 3-D simulation

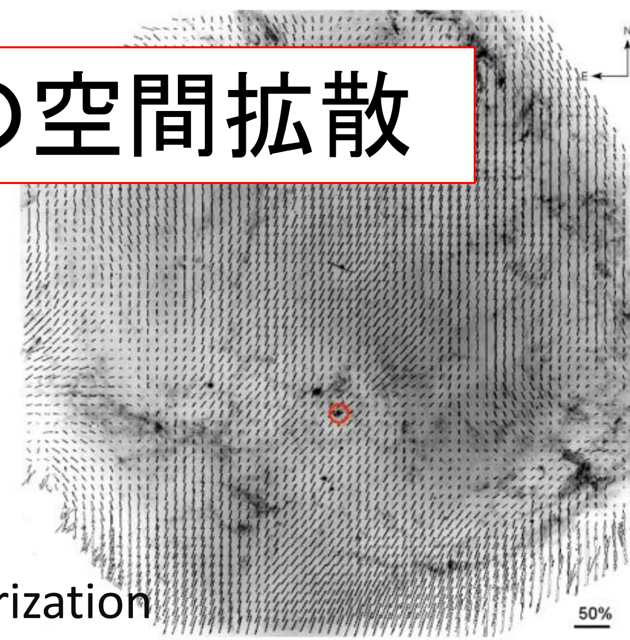
(Porth+ 2014b)

乱れた磁場による粒子の空間拡散





(Shibata+ 2003)

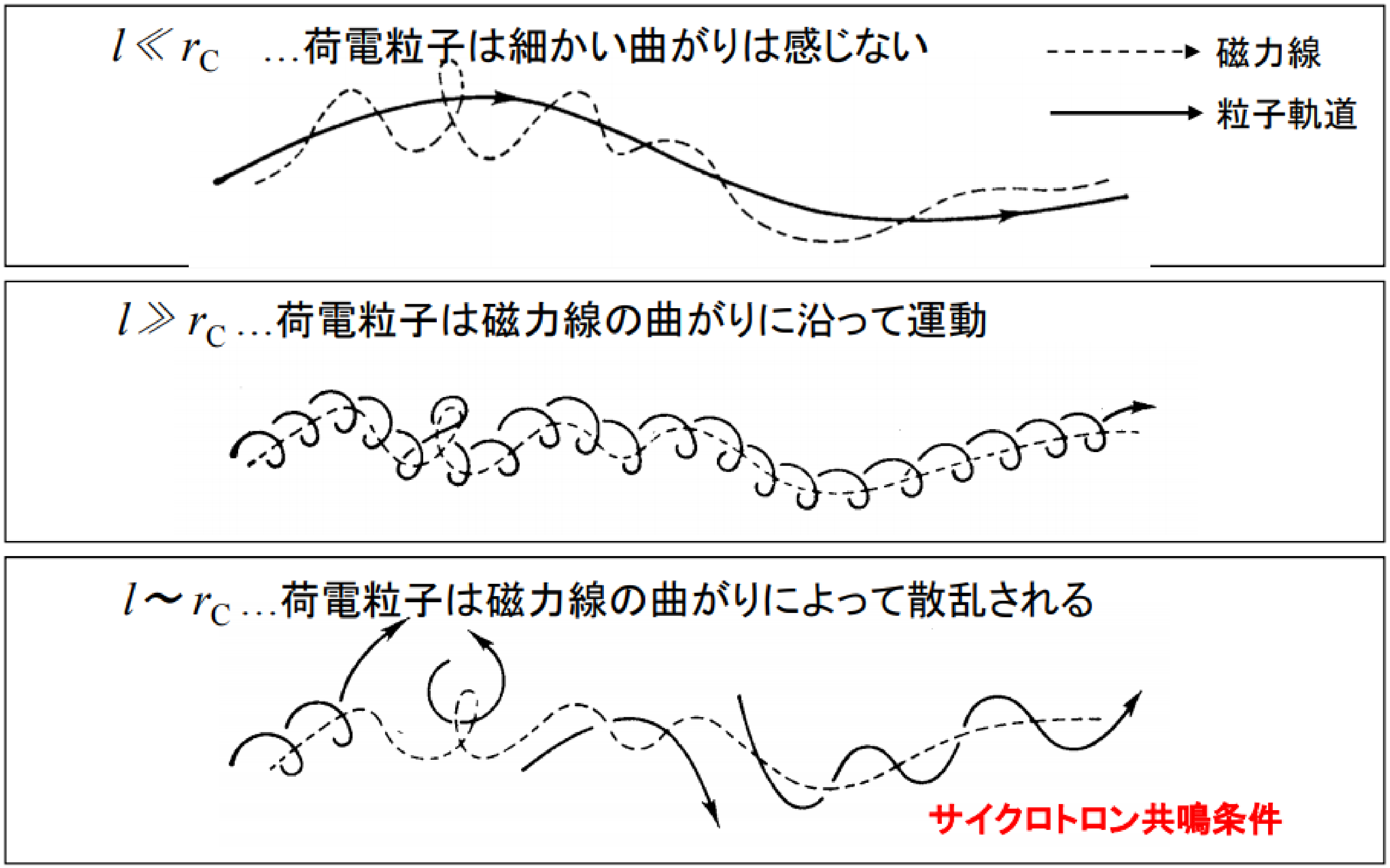


Polarization measurement

(Moran+ 2013)

Appendix –Resonant Scattering of Particles by Waves-

r_C (サイクロトロン半径) ⟷ 磁場の乱れ(=アルフェン波、ホイスラー波)の特徴的な波長 l

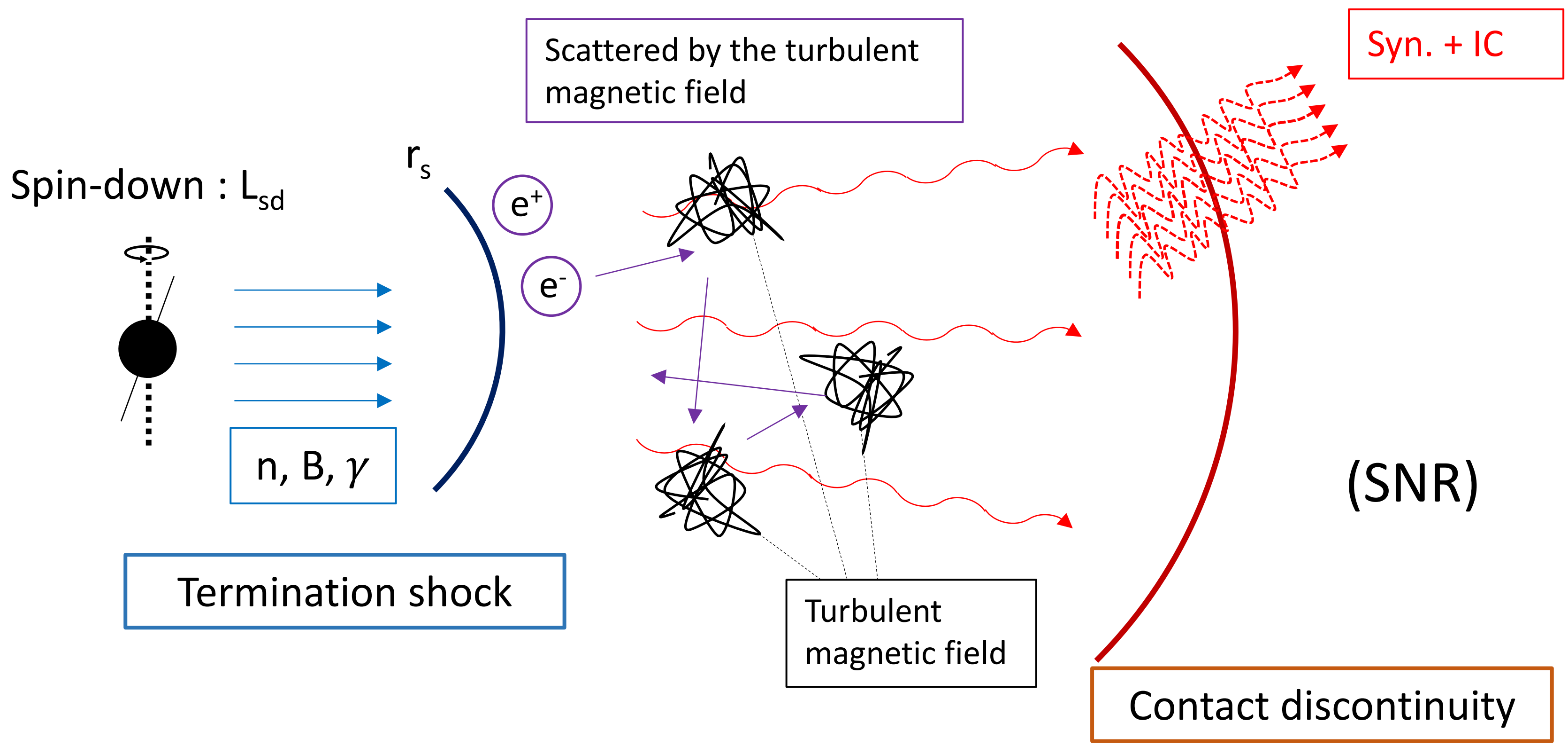


Terasawa-san’s slide (2011/7/29 タウンミーティング「地下素粒子実験・宇宙観測」)

Diffusion model of PWNe

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

- 空間拡散を考慮したパルサー星雲モデル
  - 大局的な構造として、半径方向の流れ＋紙面平行方向の磁場
  - 加えて、乱れた磁場成分が存在すると考える
  - 衝撃波で加速された電子・陽電子は流体上をランダムウォーク



Order estimate (the case of G21.5-0.9)

2 keVのX線を出す電子のエネルギー:

$$E_{\rm X} \sim 3.9 \times 10^{13}\ {\rm eV} \left(\frac{B}{100\ \mu{\rm G}}\right)^{-1/2} \left(\frac{\nu_{\rm X}}{2\ {\rm keV}}\right)^{1/2}$$

そういう人たちの(放射冷却での)寿命:

$$t_{\rm cool,X} \sim 310\ {\rm yr} \left(\frac{B}{100\ \mu{\rm G}}\right)^{-3/2} \left(\frac{\nu_{\rm X}}{2\ {\rm keV}}\right)^{-1/2}$$

エネルギー依存性のない拡散係数の場合(e.g., Porth+16, Lu+17)

拡散で星雲の縁r_Nまで届きなさいって条件:

$$\kappa \sim \frac{r_{\rm N}^2}{t_{\rm cool,X}} \sim 7.9 \times 10^{26}\ {\rm cm^2\ s^{-1}} \left(\frac{r_{\rm N}}{0.9\ {\rm pc}}\right)^2 \left(\frac{B}{100\ \mu{\rm G}}\right)^{3/2} \left(\frac{\nu_{\rm X}}{2\ {\rm keV}}\right)^{1/2}$$

流体の持つエネルギーフラックスと拡散流束の持つフラックスが等しくなる半径:

$$r_{\rm pe} \sim \frac{r_{\rm s}^2 v_{\rm d}}{\kappa} \sim \underline{0.1\ {\rm pc}} \left(\frac{r_{\rm s}}{0.05\ {\rm pc}}\right)^{-2} \left(\frac{r_{\rm N}}{0.9\ {\rm pc}}\right)^{-2} \left(\frac{B}{100\ \mu{\rm G}}\right)^{-3/2} \left(\frac{\nu_{\rm X}}{2\ {\rm keV}}\right)^{-1/2} < r_{\rm N}$$

パラメータによっては、拡散過程が流体に及ぼす影響を無視できない！

拡散過程が流体運動に及ぼす反作用を考慮した定式化が必要！

Method – iterative method -

定常と球対称性を仮定する
→ 1D(radial)+1D(energy) eqs.

Fokker-Planck equation

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

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

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

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

Update u(r)

Fluid equations

Effect of diffusion

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

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

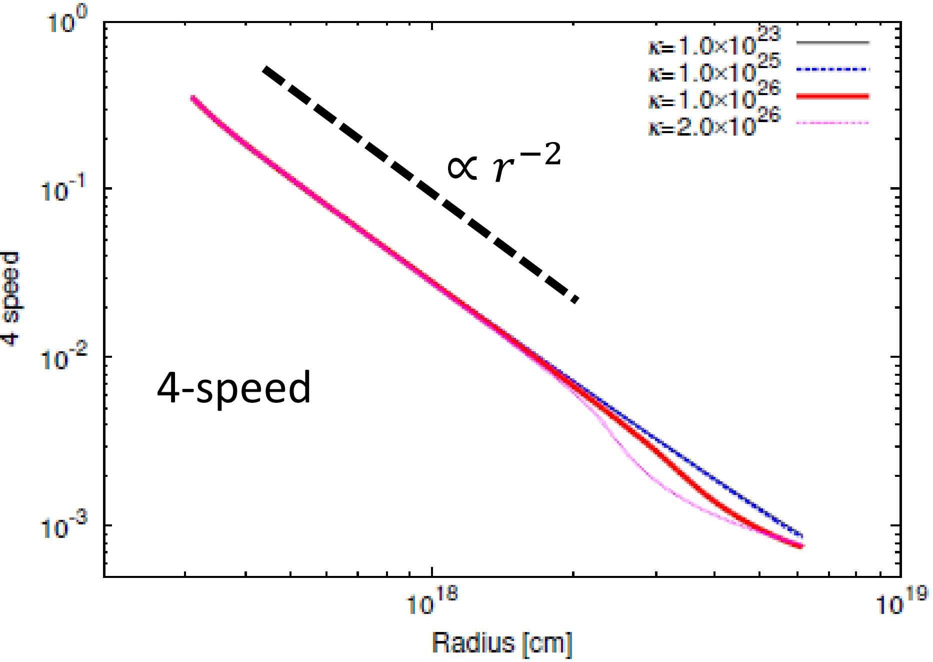
$$r\beta B=\mathrm{const}$$

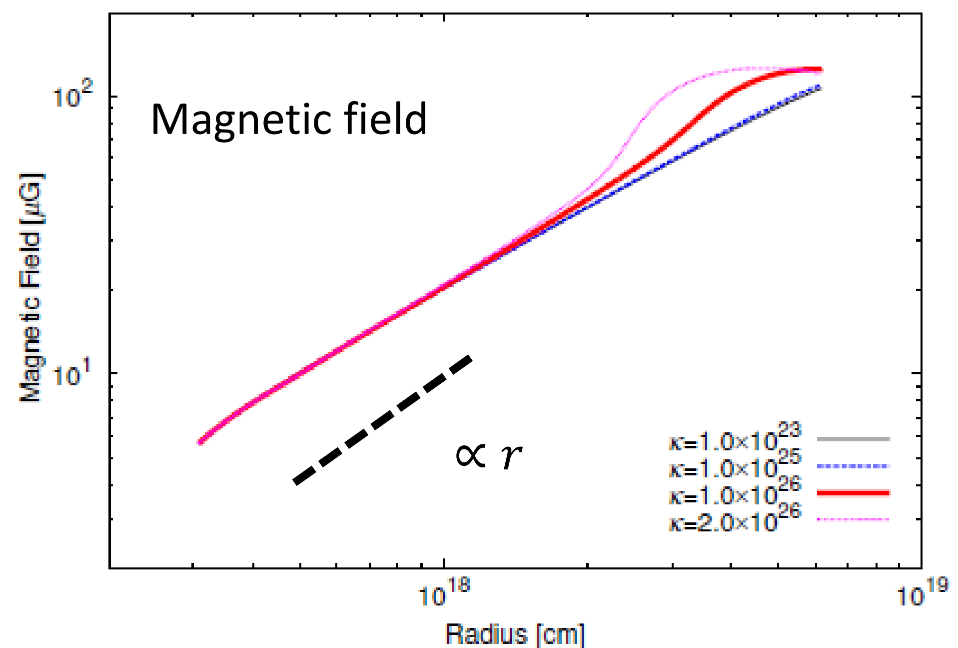
$$\epsilon(r)\equiv\int E'\left(\frac{dn}{dE}\right)'dE' \qquad \delta(r)\equiv\frac{1}{c}\int\kappa E'\left(\frac{dn}{dE}\right)'dE' \qquad Q(r)\equiv\frac{1}{c}\int Q'_{\rm rad}\left(\frac{dn}{dE}\right)'dE'$$

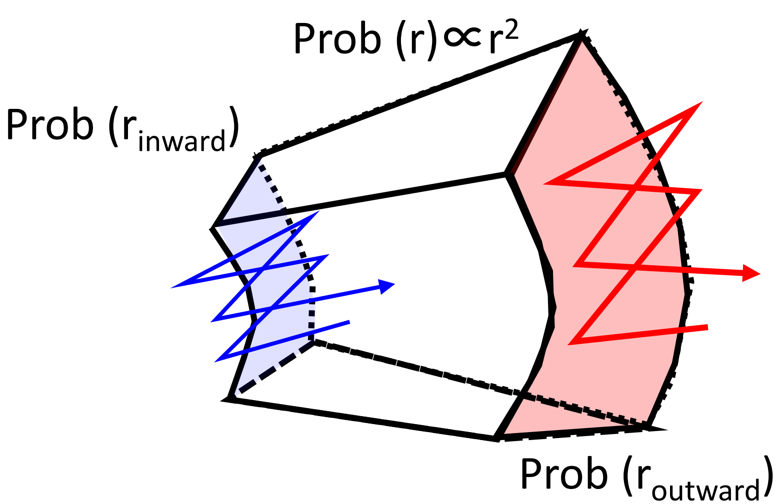
※運動量空間1次元、空間1次元の定常ボルツマン方程式を解いているということに相当

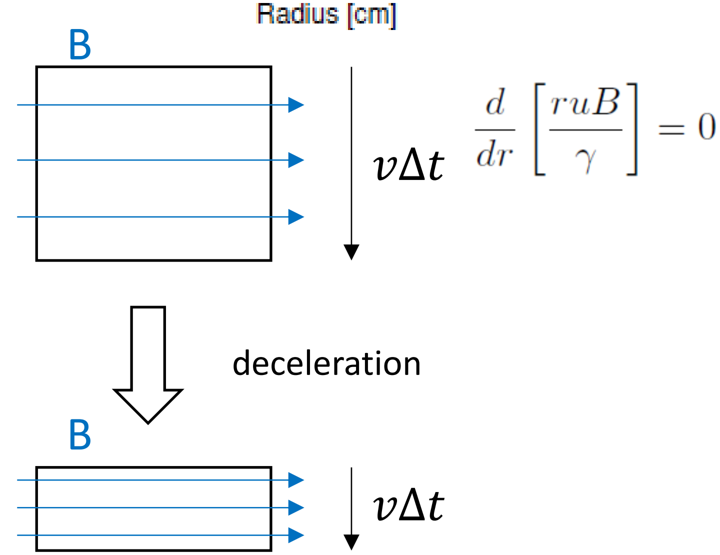
Test Calculation to investigate a dependence on the diffusion coefficient

$L_{\rm sd} = 10^{38}\,{\rm erg\,s^{-1}}$, $E_{\rm b} = 10^5 m_{\rm e}c^2$, $p_1 = 1.1$, $p_2 = 2.5$, $r_{\rm s} = 0.1$ pc, $r_{\rm N} = 2.0$ pc and $\sigma = 10^{-4}$.



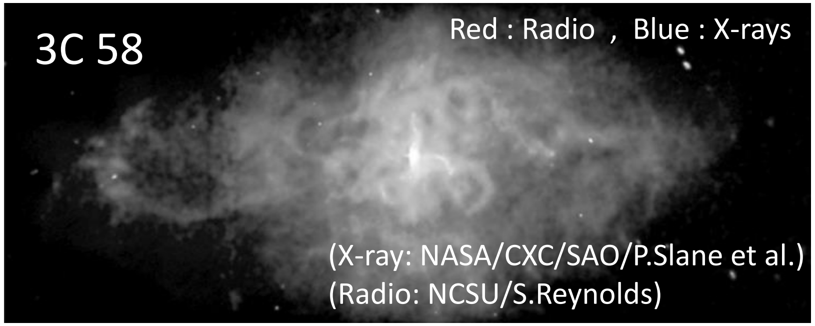


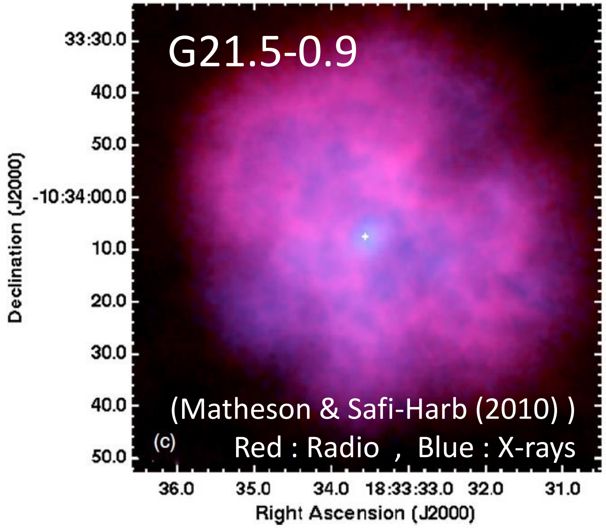


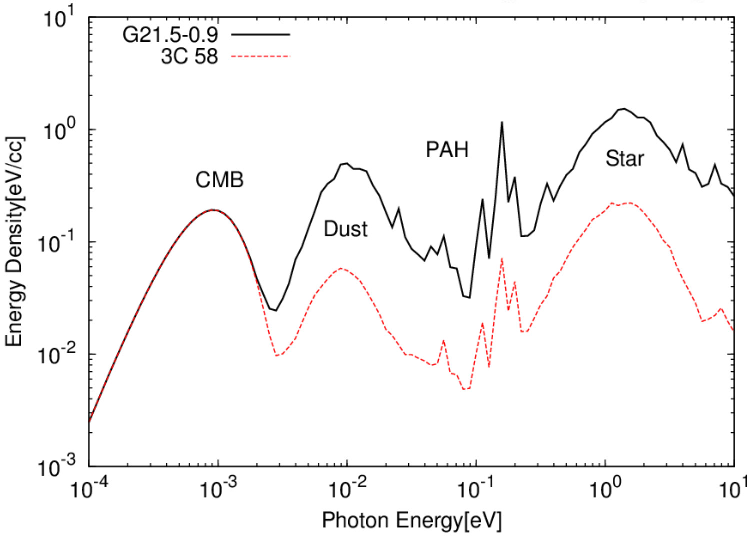


Target

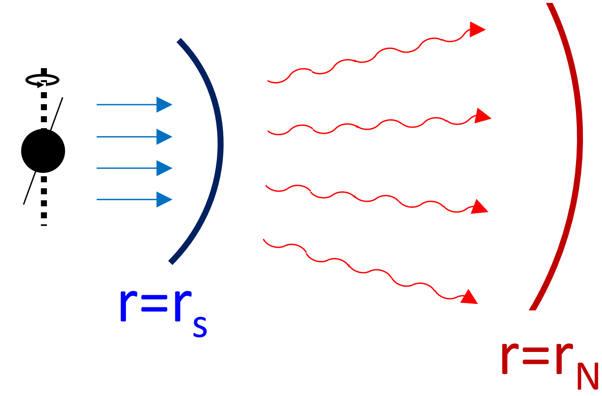
- 選定理由
  - 様々な周波数帯での観測がある
  - X線の放射領域が大きく拡がっている
- G21.5-0.9
  - 見かけの大きさ : 40’’
  - 距離 : D=4.8kpc (Tian & Leahy 2008)
    → 星雲のサイズ : $r_{\rm N} = 0.9$pc
  - 中心パルサー : PSR J1833-1034
  - P=61.9ms , $\dot{P} = 2.02 \times 10^{-13} s s^{-1}$
    → $L_{sd} = 3.3 \times 10^{37}$[erg/s]
- 3C 58
  - Angular size : 5’ × 9’
  - Distance : D=2.0kpc (Kothes et al.,2013)
    → Nebula radius : $r_{\rm N} = 2.0$pc
  - Central pulsar : PSR J0205+6449
  - P=65.7ms ,$\dot{P} = 1.94 \times 10^{-13} s s^{-1}$
    → $L_{sd} = 2.7 \times 10^{37}$[erg/s]







Setup

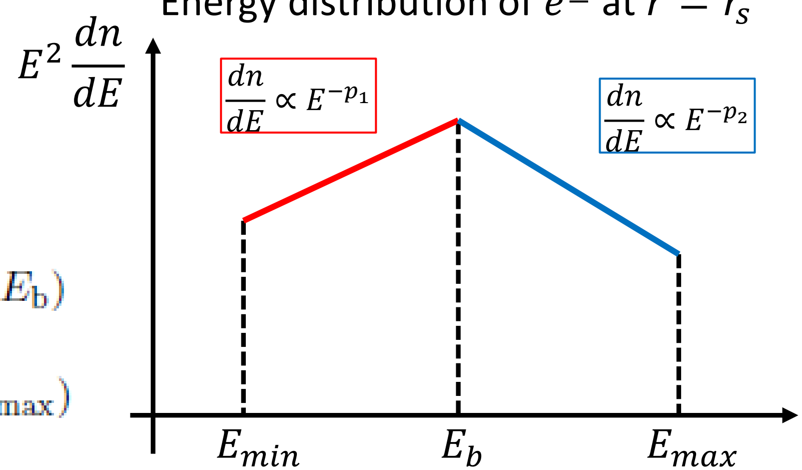


- 境界条件
  - 流体方程式:
    - @termination shock
      Rankine-Hugoniot condition
    - @edge of a nebula
      Free escape boundary
  - Fokker-Planck方程式:
    - @termination shock

$$n(E', r_s) = \begin{cases} \dfrac{n_0}{E_b}\left(\dfrac{E'}{E_b}\right)^{-p_1} & (E_{\min} < E' < E_b) \\ \dfrac{n_0}{E_b}\left(\dfrac{E'}{E_b}\right)^{-p_2} & (E_b < E' < E_{\max}) \end{cases}$$

    - @edge of a nebula
      Free escape boundary

Energy distribution of $e^{\pm}$ at $r = r_s$

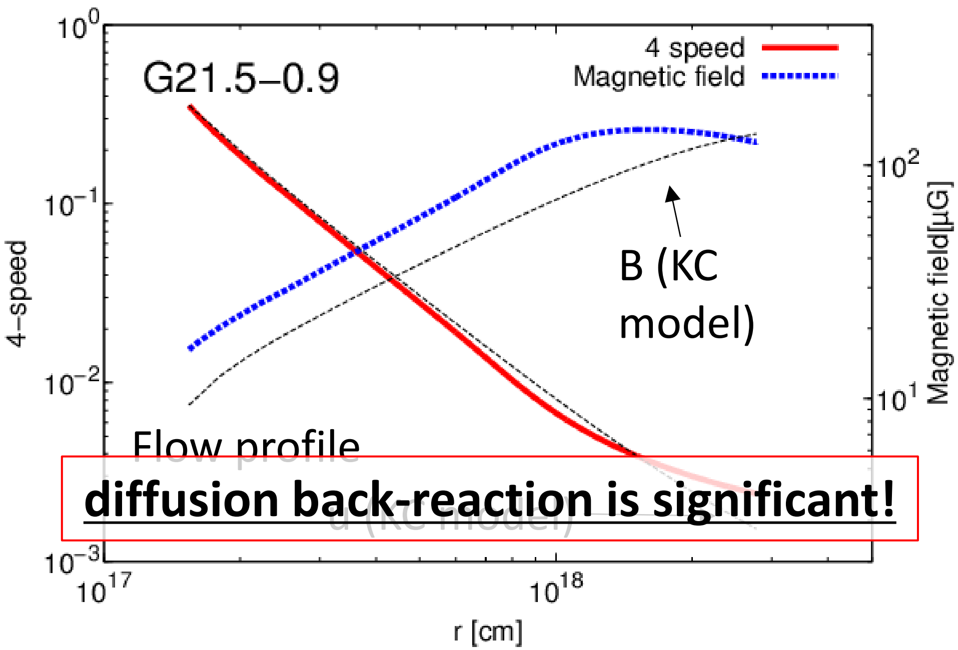


- 拡散係数

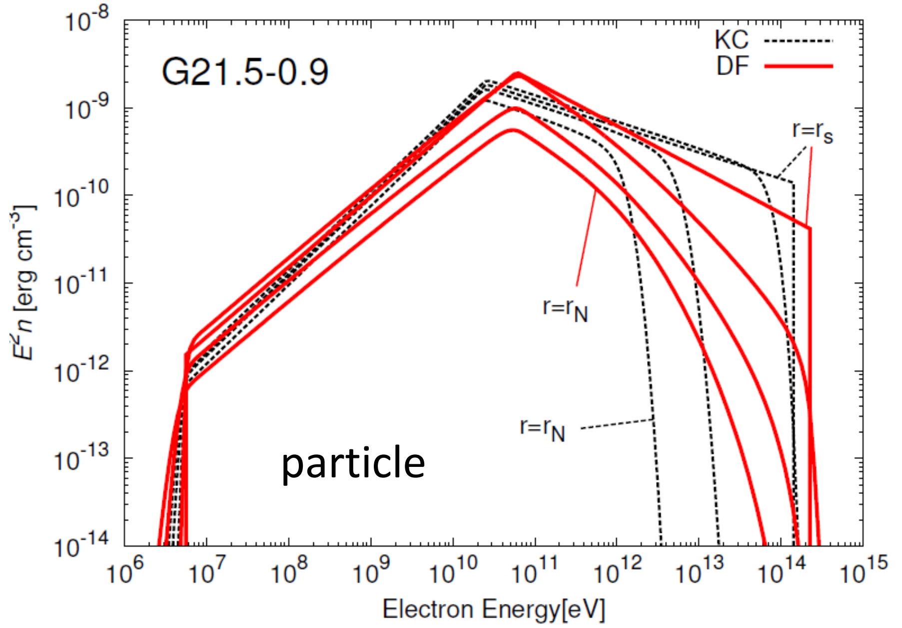
$$\tilde{\kappa} = \kappa_0 \left(\frac{E}{E_b}\right)^{1/3}$$

Mimicking the interaction with the kolmogrov-like turbulence

Application to G21.5-0.9

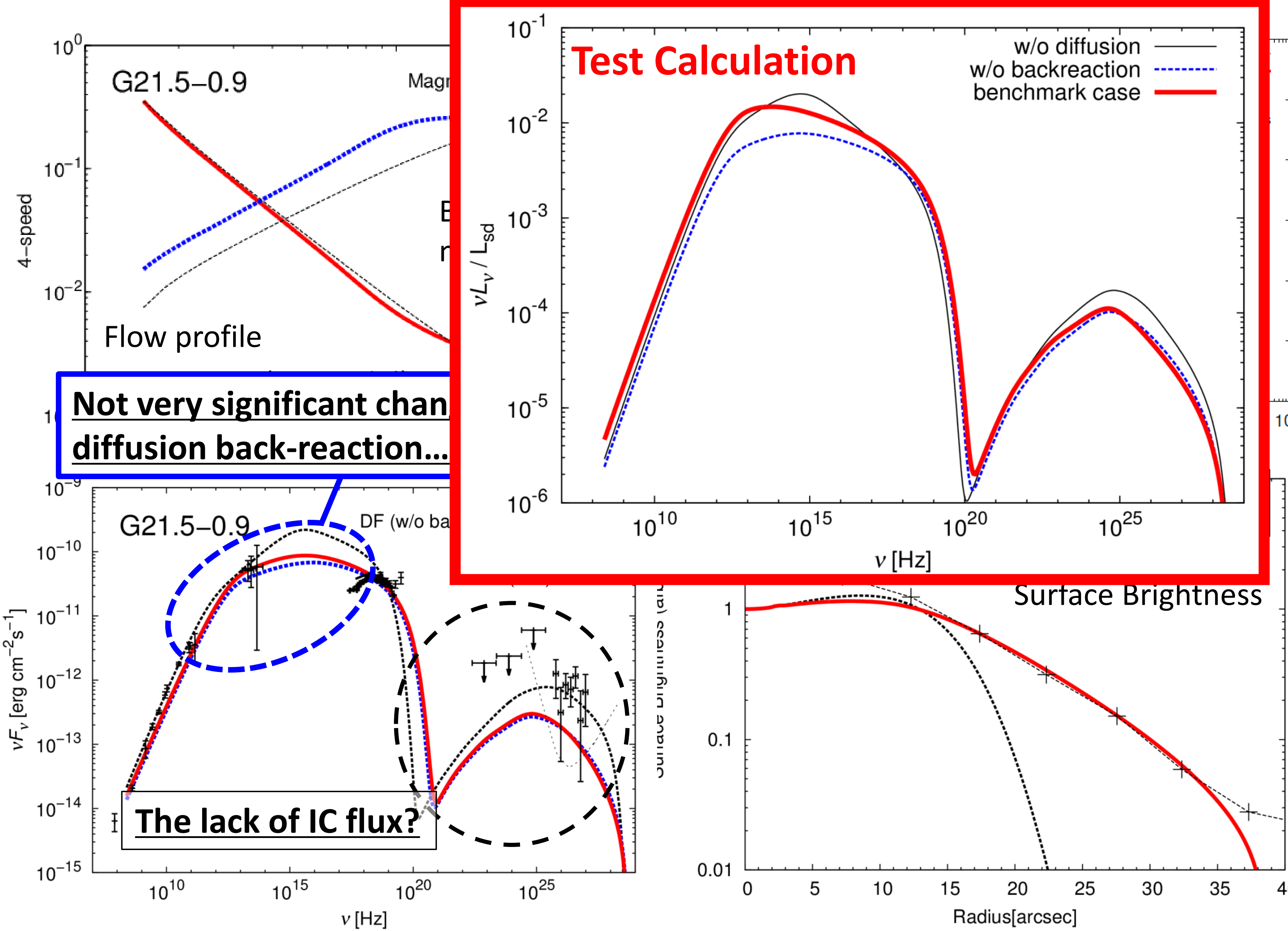


diffusion back-reaction is significant!



		G21.5-0.9	
Given Parameters	Symbol	KC[a]	DF
Spin-down Luminosity (erg s^{-1})	L_{sd}	3.5×10^{37}	
Distance (kpc)	D	4.8[c]	
Radius of the nebula (pc)	r_N	0.9	
Fitting Parameters			
Break Energy (eV)	E_b	2.6×10^{10}	6.0×10^{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_s	0.05	0.05
Magnetization parameter	σ	2.0×10^{-4}	6.0×10^{-4}
Diffusion coefficient at E_b (cm^2 s^{-1})	κ_0	-	1.0×10^{26}

Application to G21.5-0.9



Escaped particles...?

10^{32} erg/s
→ ～10^{14} erg/s/cm^2 (for G21.5-0.9)

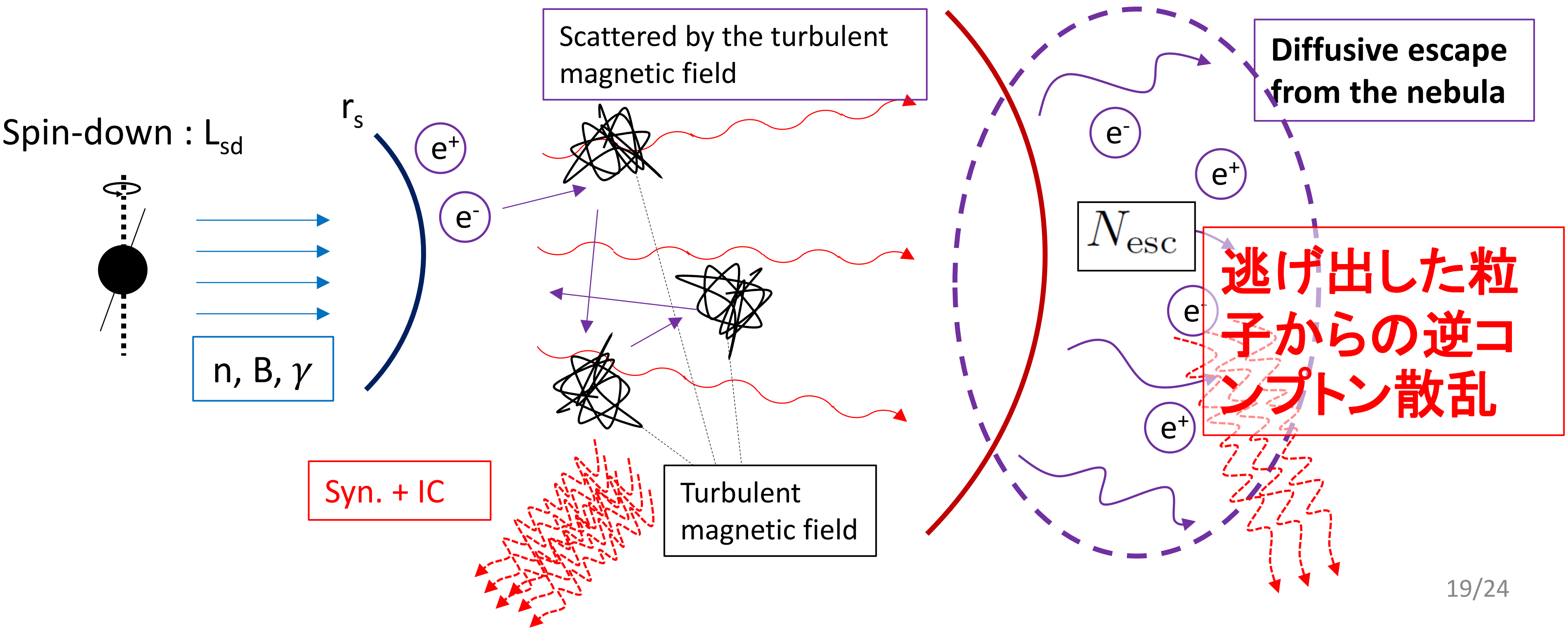
$e^{\pm}$+ γ(CMB)

- 星雲外に逃げ出した粒子の寄与
  - 効率的にr_Nまで到達した粒子が星雲外に拡散していくと考える

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

$$r_{\rm N} + \sqrt{\kappa t_{\rm adv}} \sim 2 \ {\rm pc} \ (90'')$$

(For G21.5-0.9)



まとめ

- 粒子の空間拡散と移流を記述するFokker-Planck方程式と、拡散過程の反作用まで考慮した磁気流体力学を、self-consistentに解く手法を新たに開発した。
- 実際に、その手法を用いて1次元定常系の計算を具体的に行い、拡散過程によって流体が減速するという現象を見出した。
- さらに、これを実際の天体3C 58, G21.5-0.9に適用し、それぞれの天体について、SEDとX線のSurface brightnessを同時に再現することに成功した。
- 以上の二天体においては、拡散過程の流体運動への反作用は、SEDにほとんど影響を与えない。
- G21.5-0.9においては、電子・陽電子の星間空間への逃げ出しを考えることで、SEDのfitであまりうまく合わせられなかったγ線のフラックスを説明できる可能性を示唆した。