

# パルサー星雲の粒子輸送と放射の1次元モデル

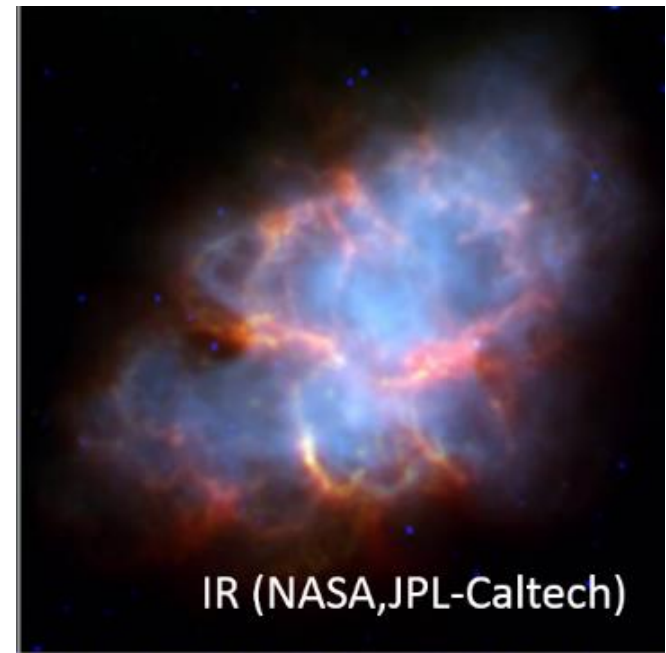


東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻  
博士課程 1年 石崎 渉

# Introduction

# Introduction -宇宙素粒子若手の会-

- 自己紹介
  - 石崎 渉 (D1)
  - ICRR 高エネルギー天体グループ所属
    - 高エネルギー天体現象の理論的研究
    - 宇宙線の起源などが知りたい集団
  - 好きな電磁波は赤外線 (適当)
- 宇宙素粒子若手の会
  - 最初は「宇宙線若手の会」かと思ってた
  - こりゃいいぜ
  - だからDMの人がたくさんいてびっくりした
  - アウェー感...
  - これもこれでいいぜ
- 僕の話は
  - 中村さんの初日に話してくださった図でいえば左側の極限
  - 「電磁波全部+宇宙線粒子」の話です。



か に

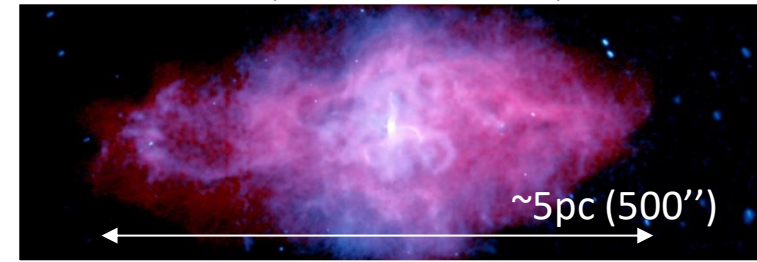
この人知ってる？



推し

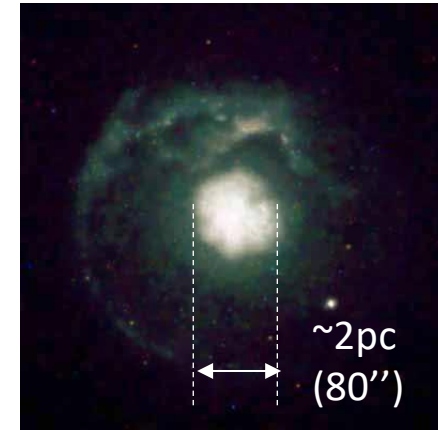
# Introduction -パルサー星雲-

- パルサーの周囲に広がる天体
  - 回転駆動型パルサーの周囲に数pc程度で広がる天体
  - 中の詰まったまゆ状の形状(Center-filled morphology)
- 電波から $\gamma$ 線の広い周波数帯で非熱的放射
  - $10^7 - 10^{29}$  [Hz] 22桁にわたるbroad-bandな放射スペクトル
  - シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱で光る
- 例: メシエ天体 M1「かに星雲」 (SN1054)

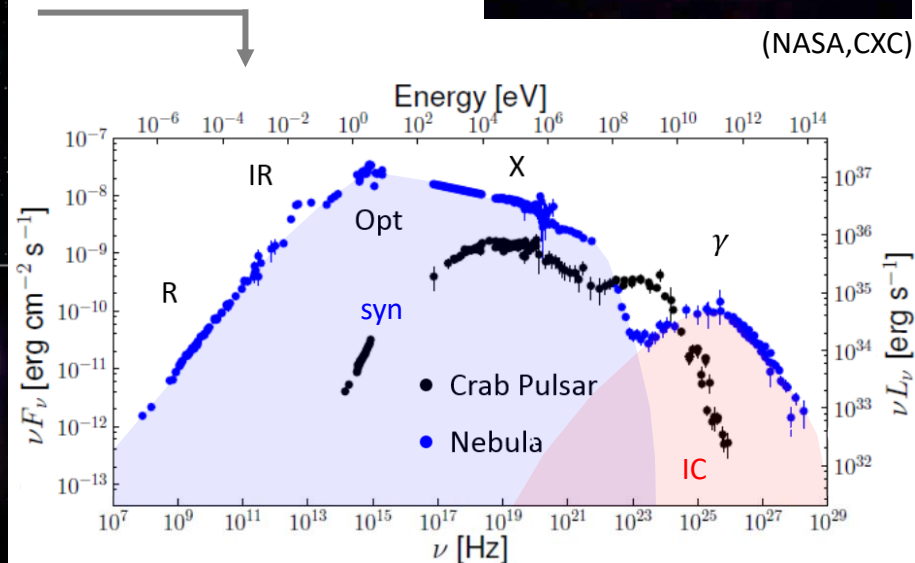
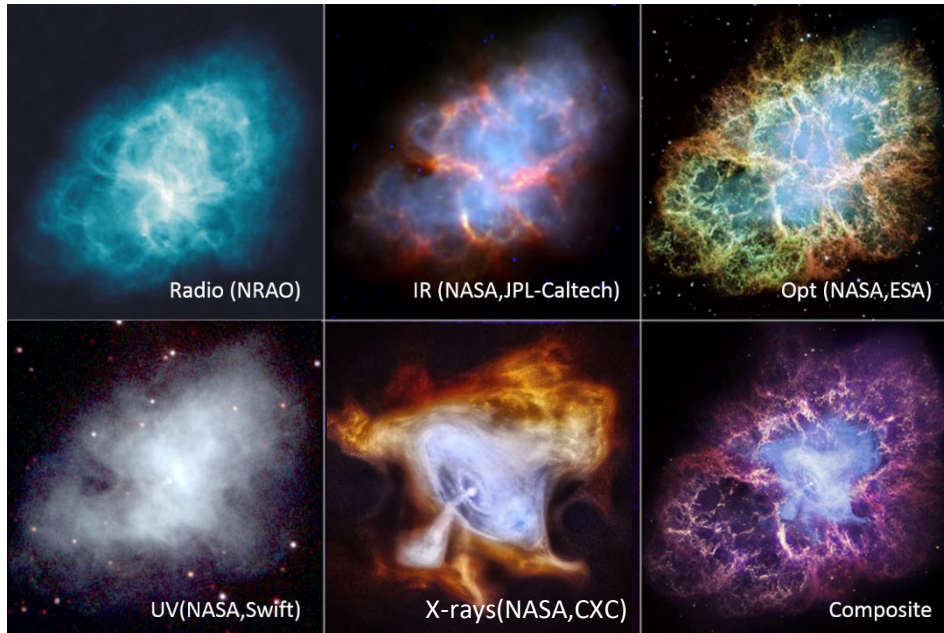


(X : NASA , radio : NCSU)

G21.5-0.9



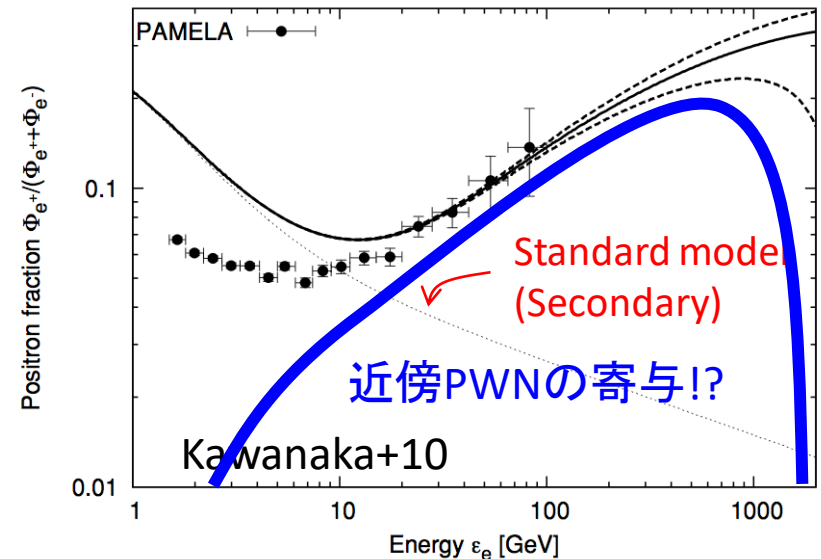
(NASA,CXC)



(Buhler &amp; Blandford , 2014)

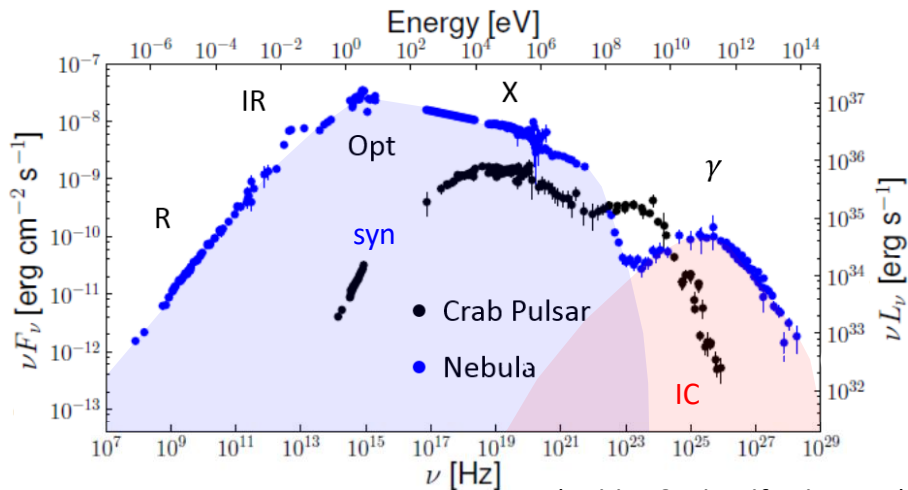
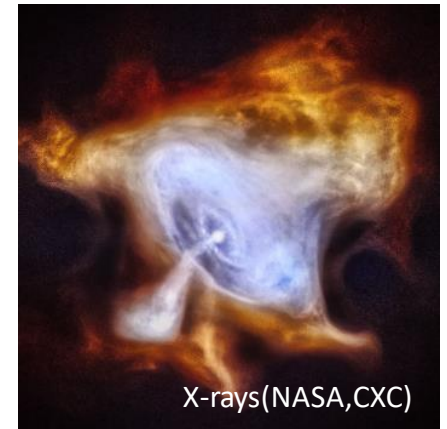
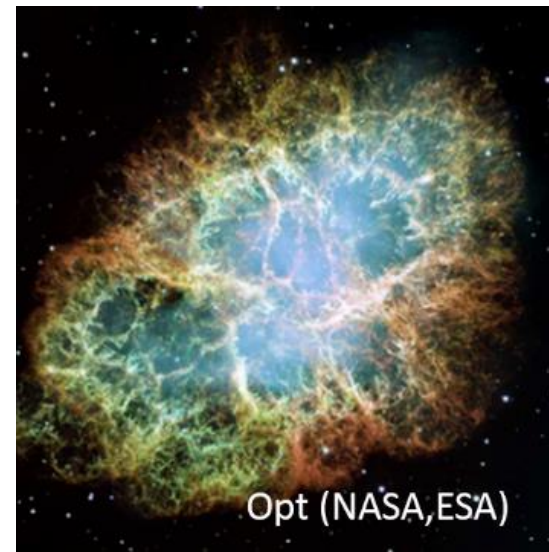
# Introduction –なぜパルサー星雲 / DMに興味がある人向け–

- Positron Excess
  - PAMERA, AMS-02で報告
  - 宇宙線Positronがstandardな描像からずれてたという事件
    - Positronは基本的にCRのsecondaryからできると思っている
    - つまり生成時点でelectronよりsoftなはず
    - その比率は、エネルギーの減少関数であってほしい → なってなかった... !
- 極限環境
  - 実はパルサー星雲の構成粒子は電子・陽電子
    - 1次陽電子源として寄与するかも？
  - 超相対論的磁化プラズマの存在
    - パルサー風の $\Gamma \sim 10^5$ は銀河最速？
- 調べがいがある
  - あらゆる波長帯で光っている
  - 空間分解観測に耐える大きさ！
  - 高エネルギー粒子の伝播モデルの最適な実験場！

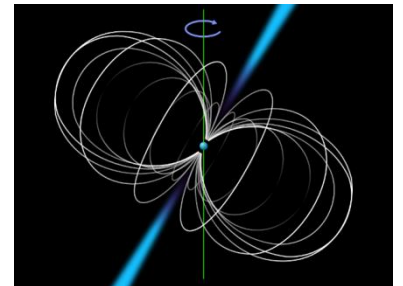


# Introduction -パルサー星雲の研究-

- パルサー星雲の何を研究するのか？
  - 非熱的電子・陽電子の形成過程
  - 高エネルギー粒子の伝播過程
  - 星雲自体のマクロなdynamics
- どうやって研究するのか？
  1. 星雲のマクロな流れをモデル化
  2. マクロな流れの上での高エネルギー粒子の伝播を計算
  3. そこからの放射を計算
  4. 観測されたSpectral Energy Distributionと照らし合わせる



(Buhler & Blandford , 2014)

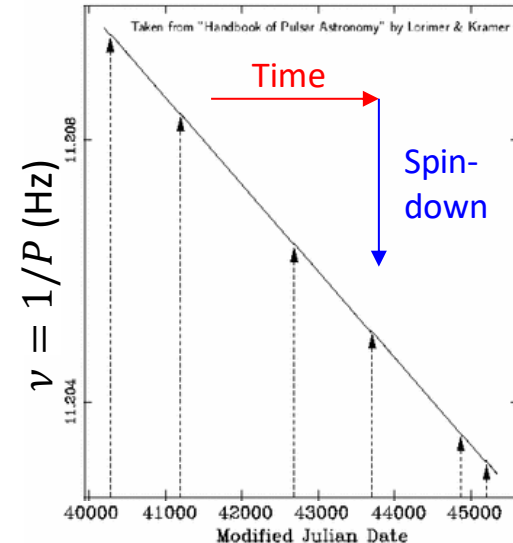
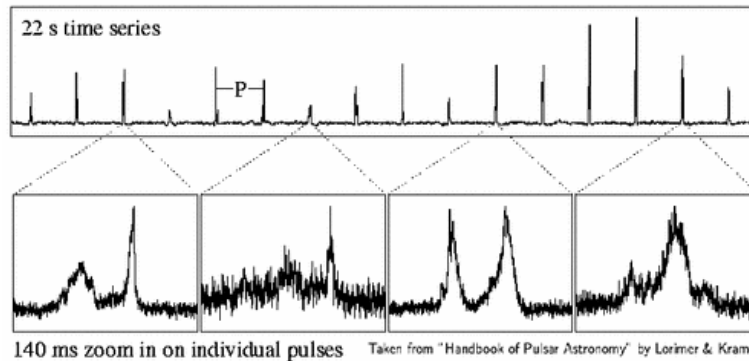
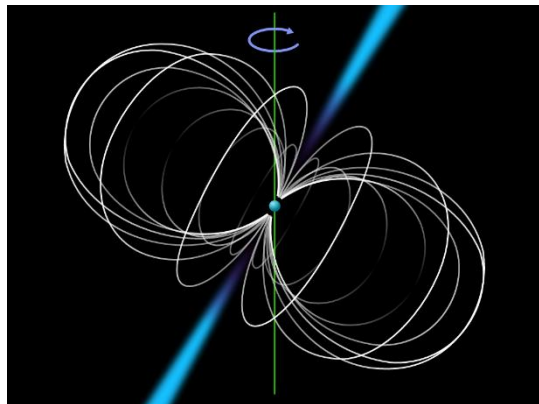
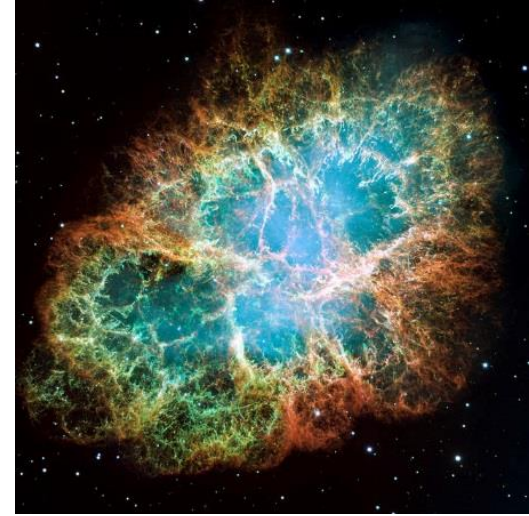


# Standard model of Pulsar Wind Nebulae



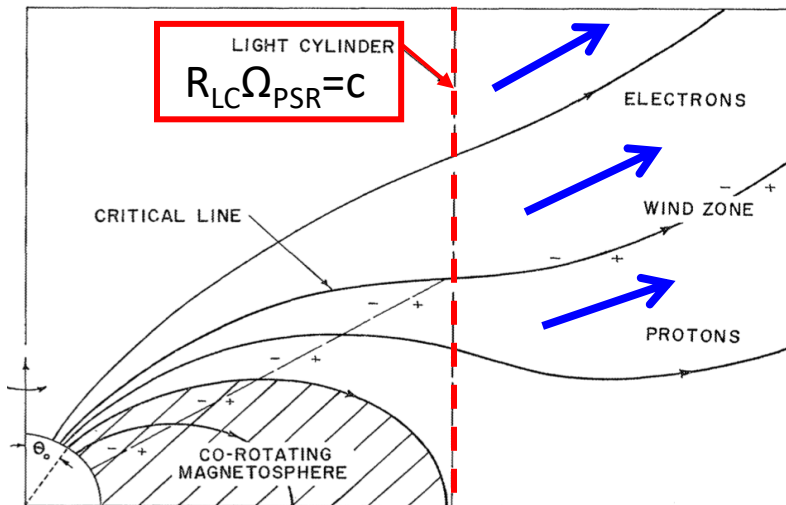
# Pulsar Wind –Pulsar-

- 回転駆動型パルサー
  - 周期的な電磁放射 :  $P \sim 1s$
  - 強磁場による磁気制動 :  $B \sim 10^{12}G$
- パルサーは回転エネルギーを放出している
  - 周期の変化率 :  $\dot{P} \sim 10^{-(12-13)}s s^{-1}$
  - $L_{sd} = |I\Omega\dot{\Omega}| = 5 \times 10^{38} \text{erg/s} \left(\frac{P}{33ms}\right)^{-3} \left(\frac{\dot{P}}{4.21 \times 10^{-13}}\right)$  (Crab pulsar)
- Pulsar Wind Nebula(PWN) はパルサーをエネルギー源とする
  - (Pulsar emission)  $\sim 1\% \times L_{sd} \ll L_{sd}$
  - (Nebula luminosity)+(Expanding power)  $\sim L_{sd}$
  - ほぼすべての回転エネルギー損失  $L_{sd}$  はPWNへ注入

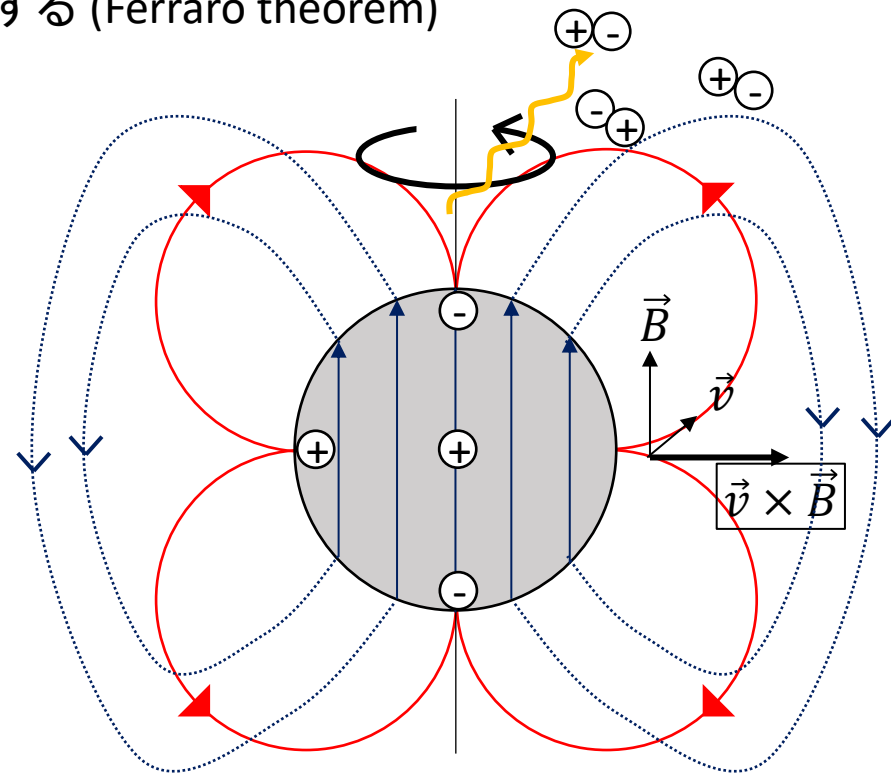


# Pulsar Wind –Pulsar Wind-

- Pulsar magnetosphere
  - パルサーは発電する(単極誘導)
  - 相対論的な $e^\pm$ プラズマに満ちた磁気圏が形成 (Goldreich & Julian 69)
- Pulsar Wind
  - 強磁場のためプラズマは星と共回転する (Ferraro theorem)
  - 光円柱の外では共回転できない
  - 磁力線に沿ったoutflowが生まれる  
→パルサー風 (Pulsar Wind)

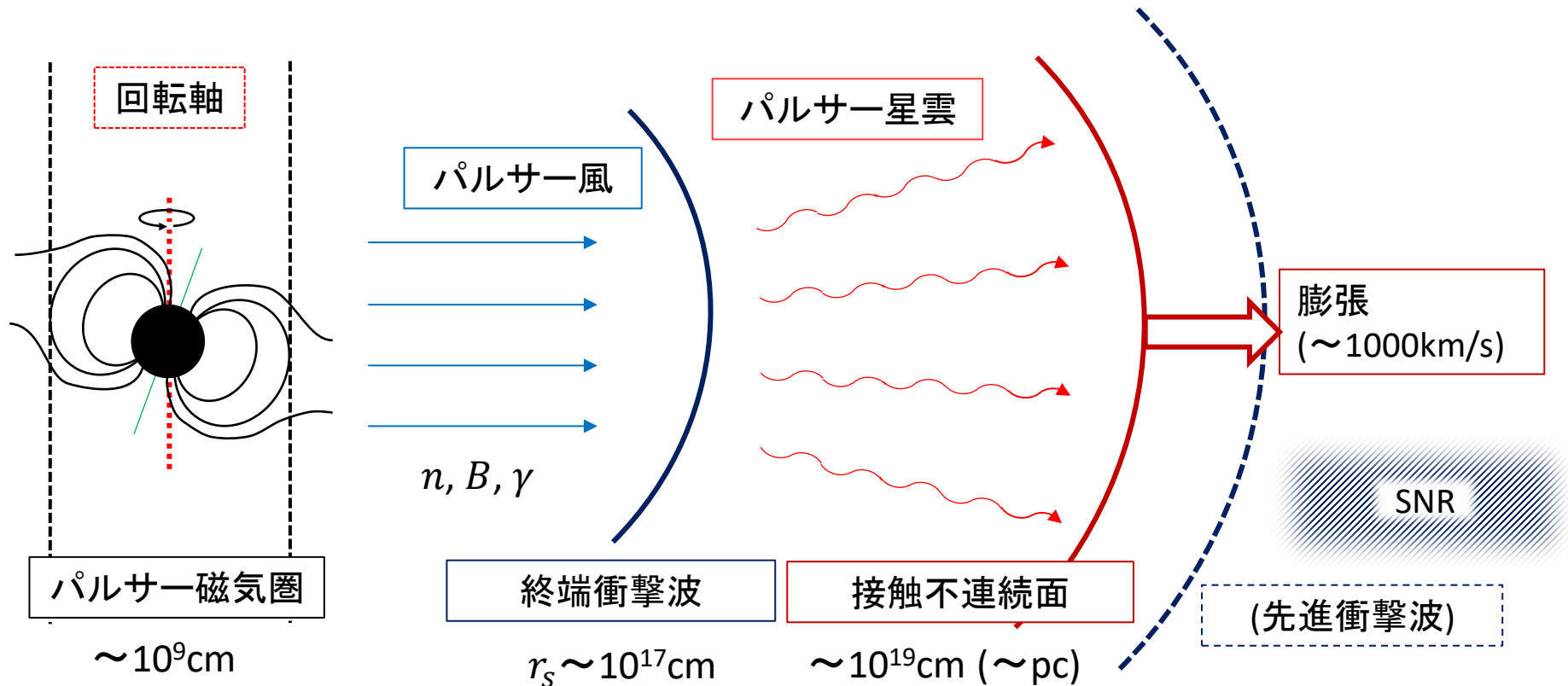


(Goldreich & Julian 69)



# Standard 1-D Model -概要-

- パルサー星雲の標準的な描像(Kennel & Coroniti 1984)
  - パルサー風は衝撃波で熱化  $\Rightarrow$  終端衝撃波における接続条件
  - 衝撃波下流は自由流れ  $\Rightarrow$  亜音速の自由流れ
  - 終端衝撃波における粒子加速を仮定  $\Rightarrow$  流れに沿った非熱的粒子の発展
  - 放射冷却しながらパルサー星雲を移流



# Standard Modelを葬る話

(僕の研究の話)

# Glory of KC -1D steady model-

- Previous studies of 1D steady model for PWN

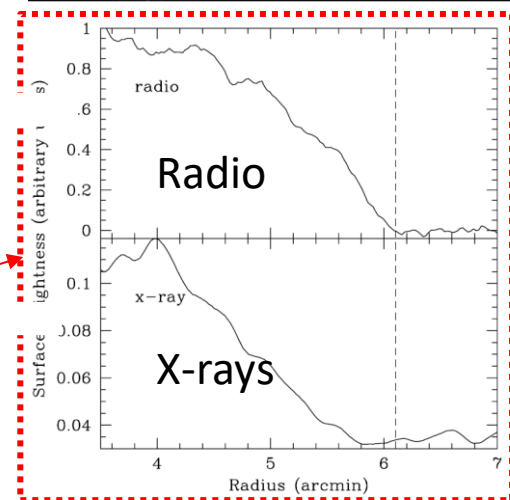
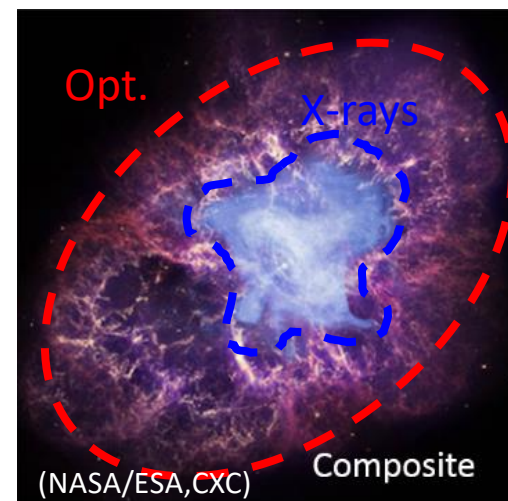
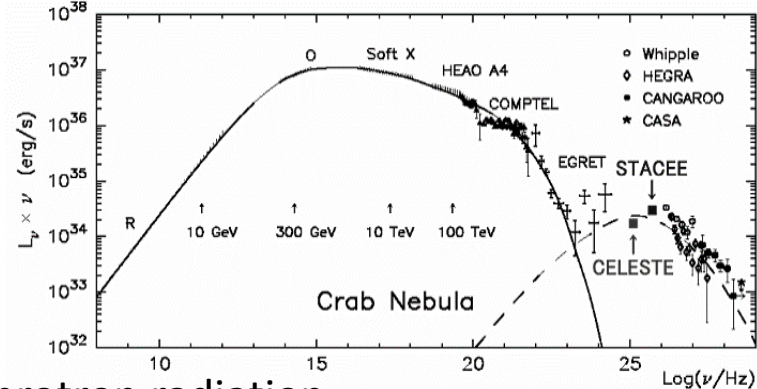
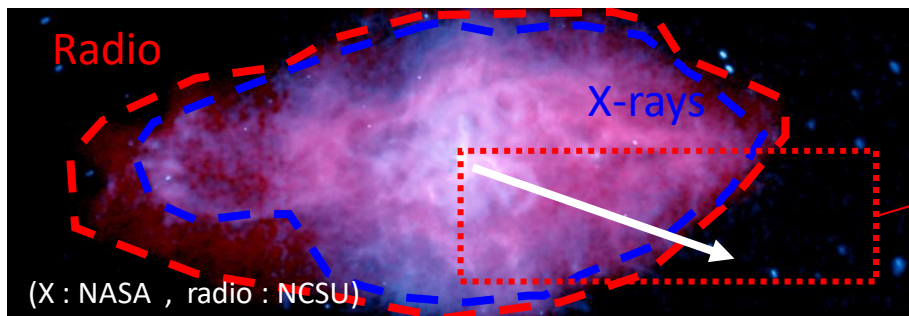
- Kennel & Coroniti (1984ab) ; MHD model + synchrotron radiation
- Atoyan & Aharonian (1996)
  - 星間光子場+SSCとのICで $\gamma$ 線を説明しSEDを完全にfitした

- 問題提起

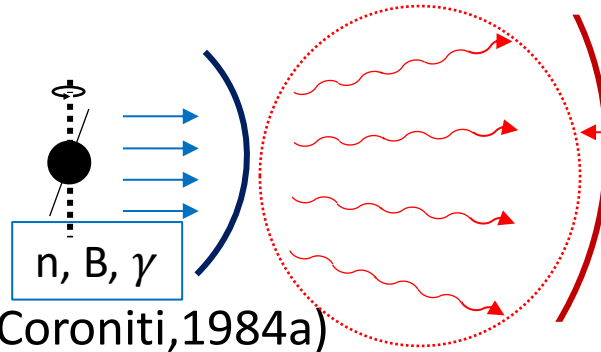
- KC84sはCrab nebulaでのみ検証されたモデルではない
- かに星雲と観測的特徴が異なる天体の存在
  - 「KC modelは一般のPWNに対して通用するの？」
  - 「空間分解観測のデータもちゃんと再現できるの？」

星雲を積分したスペクトル  
+  
放射の空間分布

これらを同時に検証する



# Model -Flow-



- MHD model of PWN (Kennel & Coroniti, 1984a)

- Up-stream : Pulsar wind (unshocked)

- Assumptions : Cold Plasma, toroidal field & Highly relativistic wind

- $\sigma$  parameter

- Assuming that the downstream is adiabatic flow, downstream is only characterized by (up-stream)  $\sigma$  parameter.

$$\sigma = \frac{B_1^2 / 4\pi}{n_1 u_1 \gamma_1 m c^2} = \frac{\text{(Poynting flux)}}{\text{(particle energy flux)}}$$

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

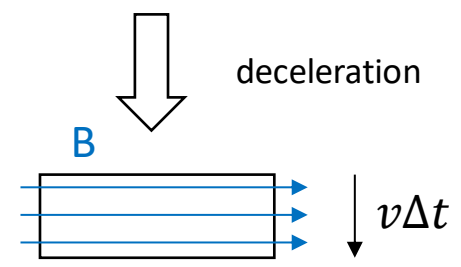
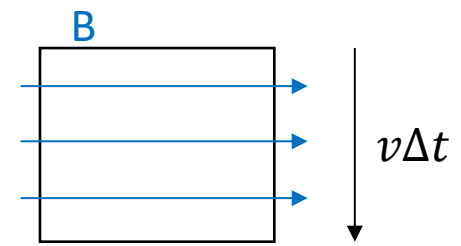
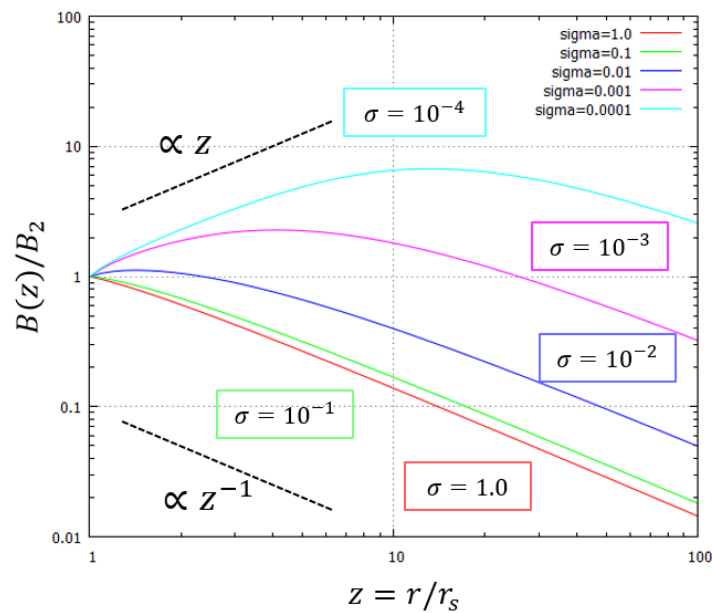
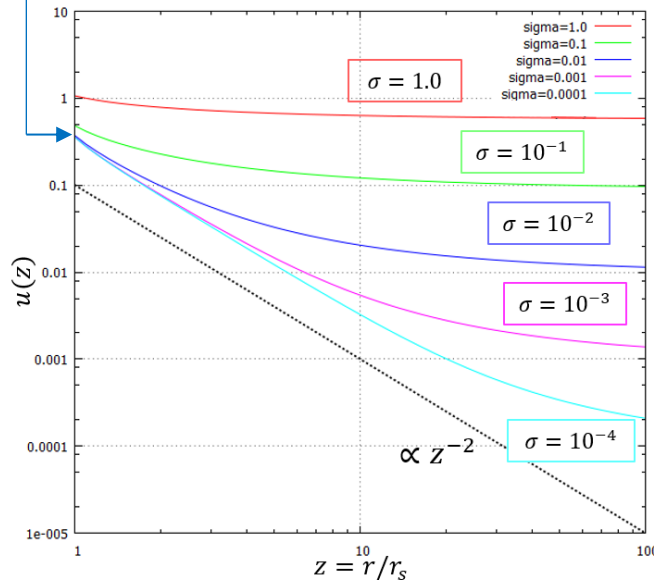
$$\frac{d}{dr} [nur^2] = 0$$

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{ruB}{\gamma} \right] = 0$$

$$nur^2 \frac{d}{dr} \left[ \gamma\mu + \frac{B^2}{4\pi n\gamma} \right] = 0$$

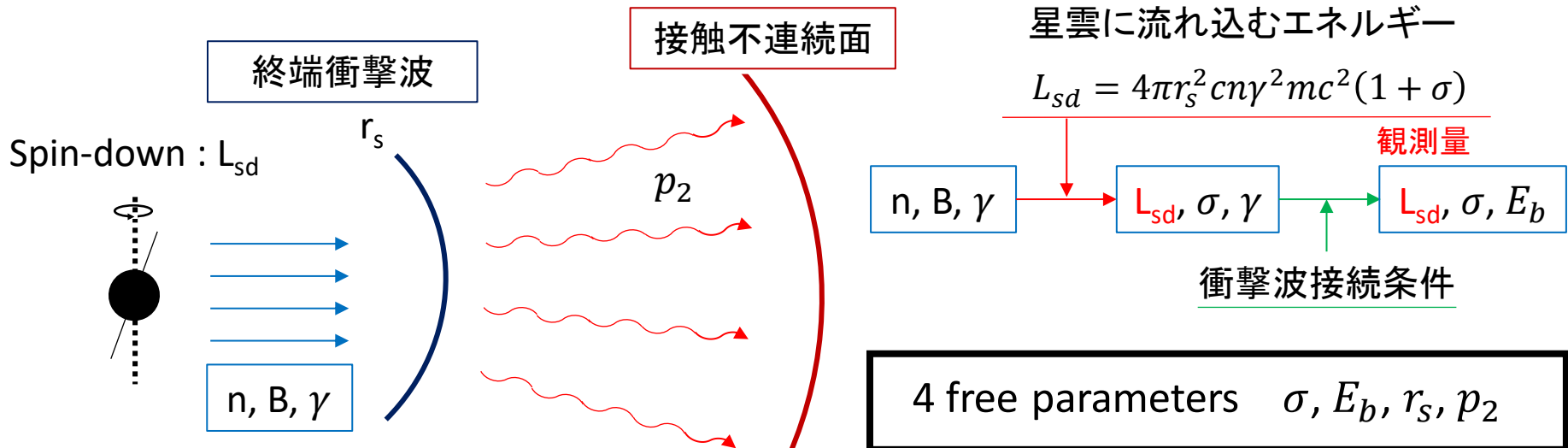
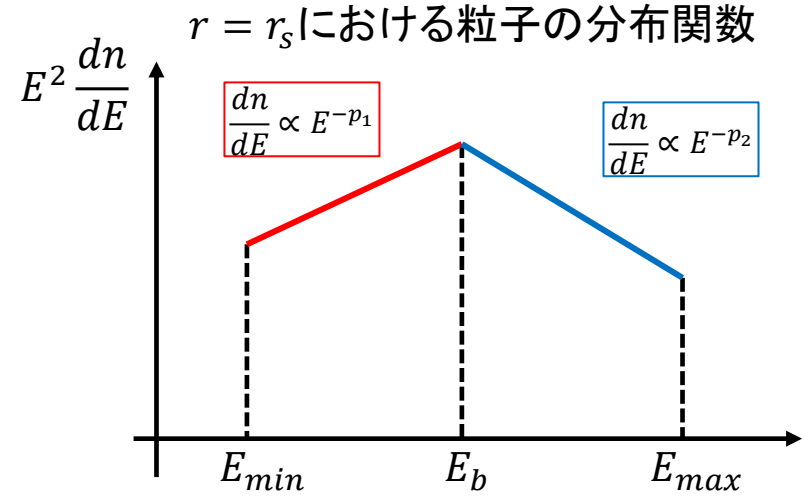
$$\frac{d}{dr} (ur^2 ne) + p \frac{d}{dr} (ur^2) = 0$$

$$\mu = mc^2 + \frac{\Gamma_c}{\Gamma_c - 1} \left( \frac{P}{n} \right)$$



# Model –Injection & Parameters–

- 終端衝撃波における粒子分布
  - Broken power-law 型の分布を仮定
- 仮定・観測量
  - $E_{\min} = 10mc^2$ は固定
  - $E_{\max}$  は(gyro radius)~(shock radius)となるエネルギー:  $E_{\max} = eB_{\text{up}}r_s$
  - $p_1$ は観測的に求められている値を使う (e.g. Crab  $p_1 \sim 1.6$ )
  - パルサーの回転エネルギー損失はすべてパルサー星雲に注入



# Model –Energy distribution & Radiation–

## • 粒子のエネルギー進化

- $n(E,r)$ : 半径 $r$ での非熱的粒子のエネルギー分布

$$\underbrace{\frac{\partial n}{\partial t}}_{\text{対流微分}} + u \frac{\partial n}{\partial r} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial E} (Q_{\text{syn}} E^2 n)}_{\text{シンクロトロン冷却}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial E} (Q_{\text{IC}} E^2 n)}_{\text{逆コンプトン散乱冷却}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial E} \left( \frac{c}{3r^2} \frac{d}{dr} (\dot{u} r^2) E n \right)}_{\text{断熱冷却}} - \underbrace{\frac{c}{r^2} \frac{d}{dr} (u r^2) n}_{\text{体積変化の項}}$$

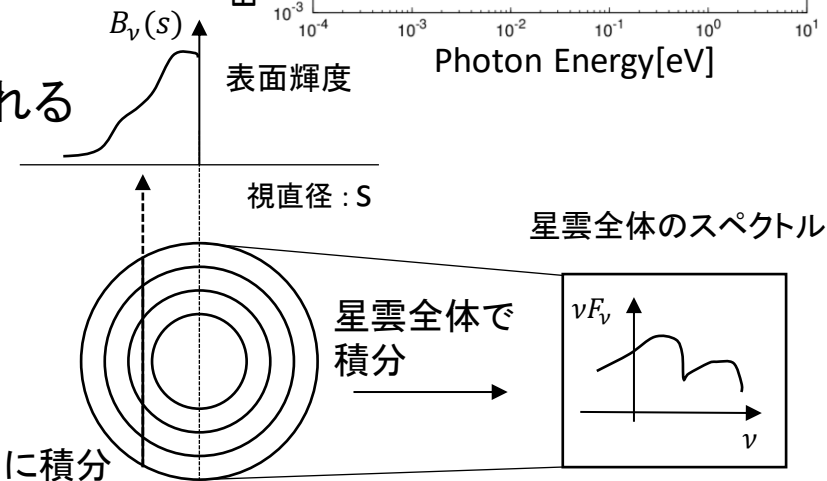
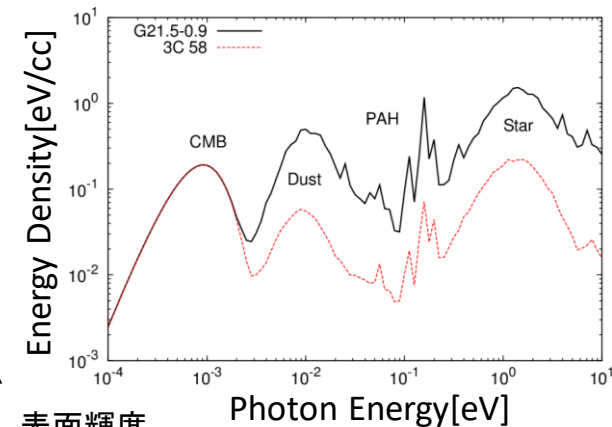
Flow solution given by MHD model

## • 放射スペクトルの計算

- シンクロトロン放射
  - 各点の磁場 $B(r)$ で放射を計算
- 逆コンプトン散乱
  - 種光子のスペクトルはGALPROPから決定
  - Klein-Nishina効果まで考慮して計算

## • 観測量

- $n(E,r)$ から単位体積あたりの光度  $j_\nu$  が得られる
- Flux:  $F_\nu = \frac{1}{4\pi D^2} \int_{r_S}^{r_N} j_\nu 4\pi r^2 dr$
- 表面輝度分布:  $B_\nu(s) = 2 \int_{\min(r_S, s)}^{r_N} \frac{j_\nu r dr}{\sqrt{r^2 - s^2}}$





Application

# Application -target-

- 選択基準

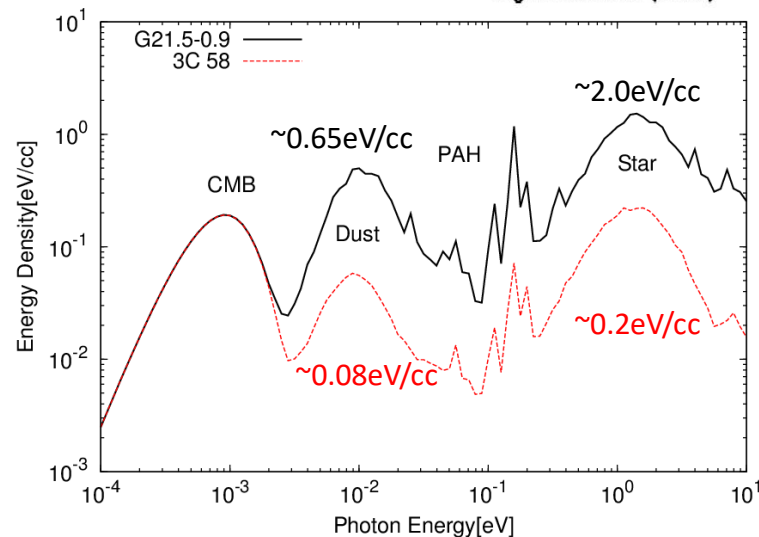
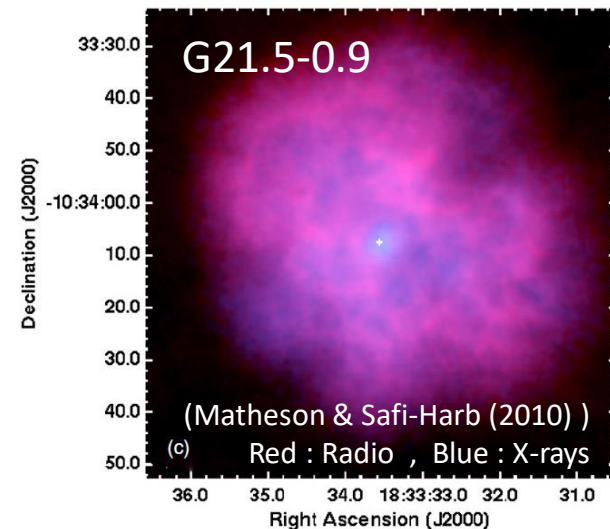
- 星雲のスペクトルの観測が充実しているもの
- X線放射が星雲の縁まで広がっているもの

- G21.5-0.9

- みかけの大きさ : 半径40''
- 距離 :  $D=4.8\text{kpc}$  (Tian & Leahy 2008)  
→ 星雲の半径 :  $r_N = 0.9\text{pc}$
- 中心のパルサー : PSR J1833-1034
- $P=61.9\text{ms}$  ,  $\dot{P} = 2.02 \times 10^{-13}\text{ss}^{-1}$   
→  $L_{sd} = 3.3 \times 10^{37}[\text{erg/s}]$

- 3C 58

- 見かけの大きさ :  $5' \times 9'$
- 距離 :  $D=2.0\text{kpc}$  (Kothes et al.,2013)  
→ 星雲の半径 :  $r_N = 2.0\text{pc}$
- 中心のパルサー : PSR J0205+6449
- $P=65.7\text{ms}$  ,  $\dot{P} = 1.94 \times 10^{-13}\text{ss}^{-1}$   
→  $L_{sd} = 2.7 \times 10^{37}[\text{erg/s}]$



# Result -Entire Spectrum-

	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

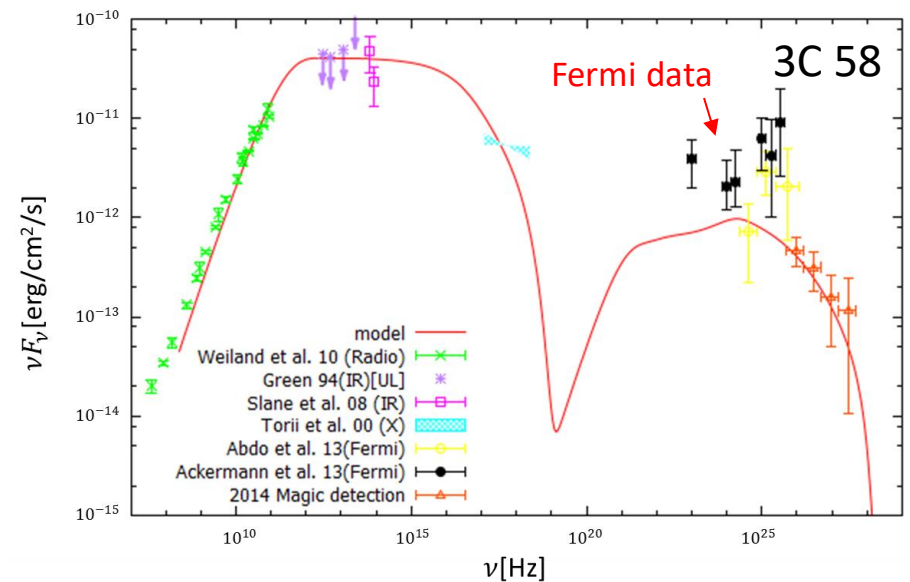
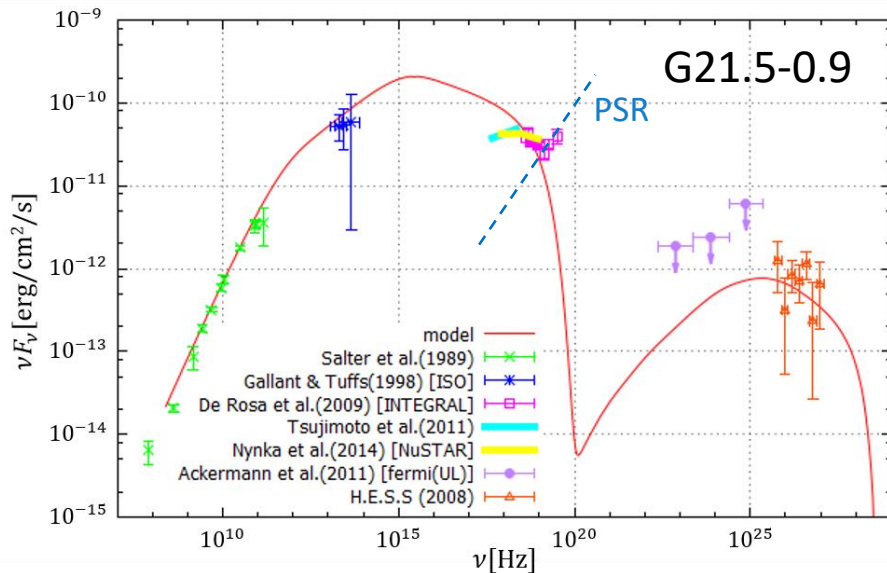
- 結果

- 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の絶対値のみを参考にした

- 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



# Result -Entire Spectrum-

	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

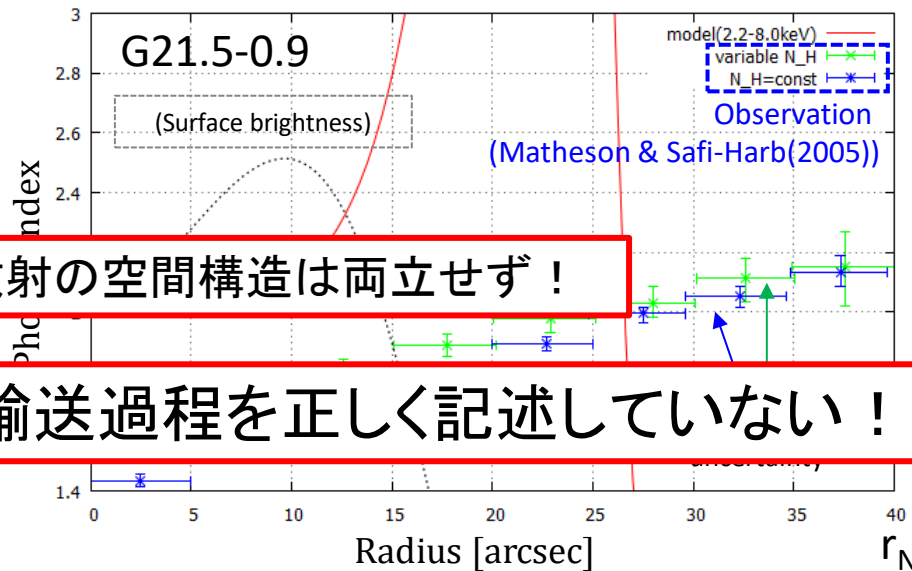
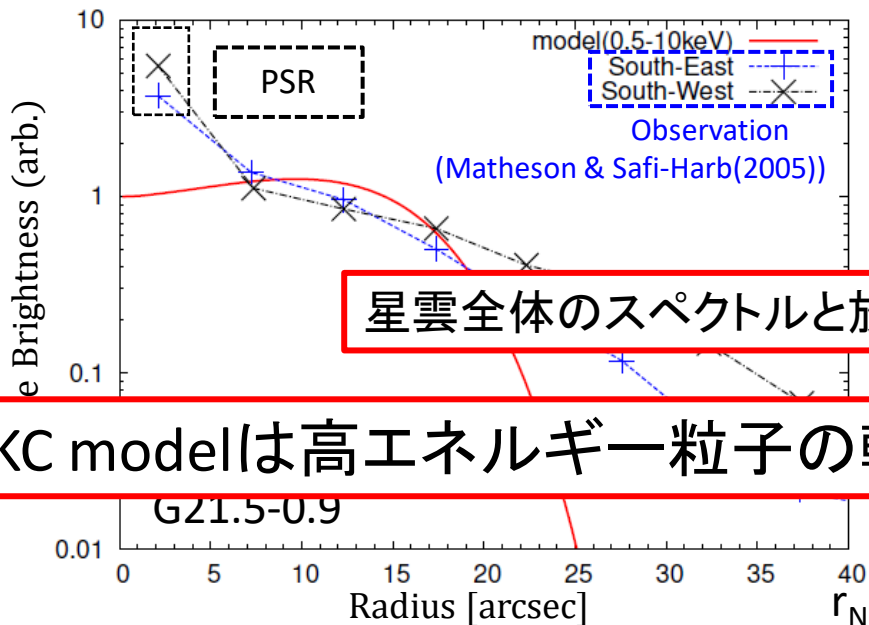
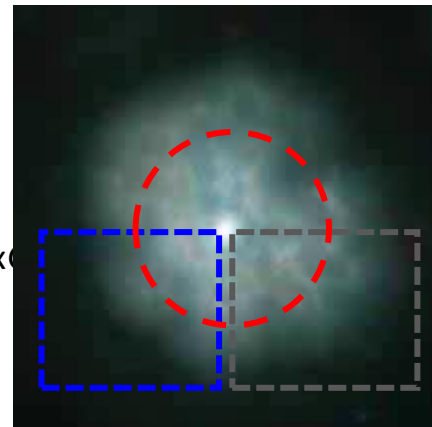
- 結果

- 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！

KC modelは高エネルギー粒子の輸送過程を正しく記述していない！

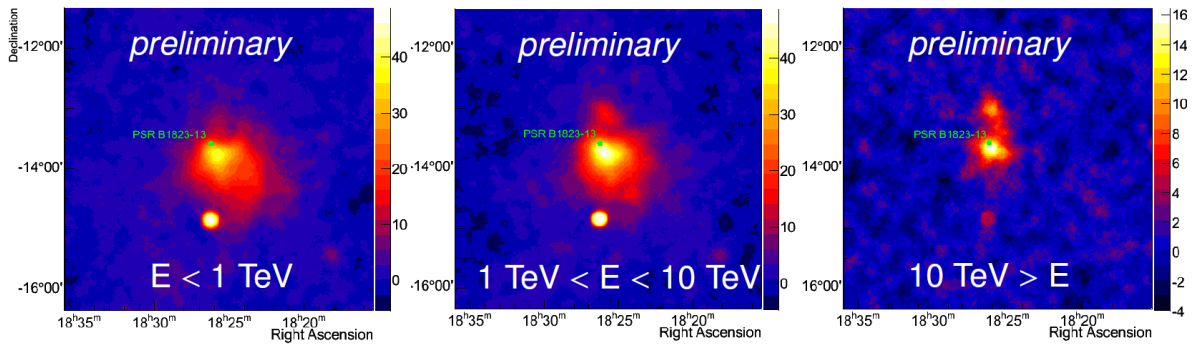
# Future Work

## 観測的研究

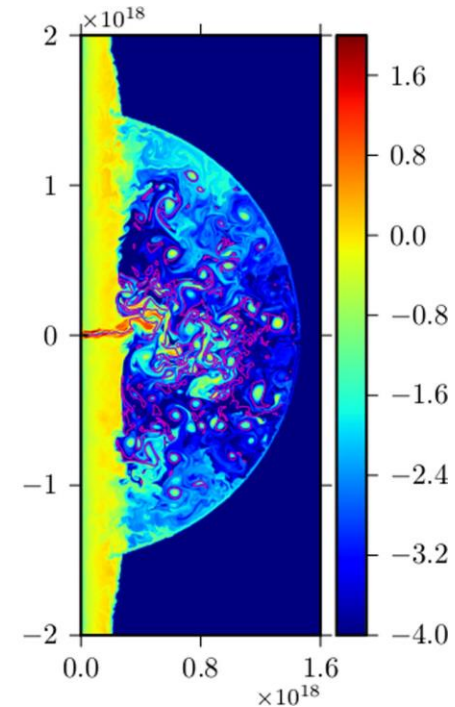
- 電波を放出している電子は、放射冷却が非効率  
⇒ マクロな流れの構造(磁場構造と粒子数密度)の情報(ただし縮退)
- γ線で空間分解観測！
  - ICは磁場に関係ない⇒星雲内の密度分布のみの情報
  - HESS-IIは一部の天体で“energy-dependent morphology”を報告！  
⇒ CTAによるγ線の空間分解観測によって研究が大きく進む

## モデルの改良

- パルサー星雲の2D,3D-MHD simulationから乱流の存在が示唆されている
- 乱流の存在をモデルに組み込む
  - 拡散過程：磁場の乱れによる空間的な拡散  
⇒ 高エネルギー粒子の存在範囲を広げる
  - 再加速過程：乱流磁場から粒子がエネルギーをもらう  
⇒ 粒子の冷却を実効的に弱める



(Mitchell et al. ,2016 , arXiv : 1610.08894)



(Porth et al. ,2014)

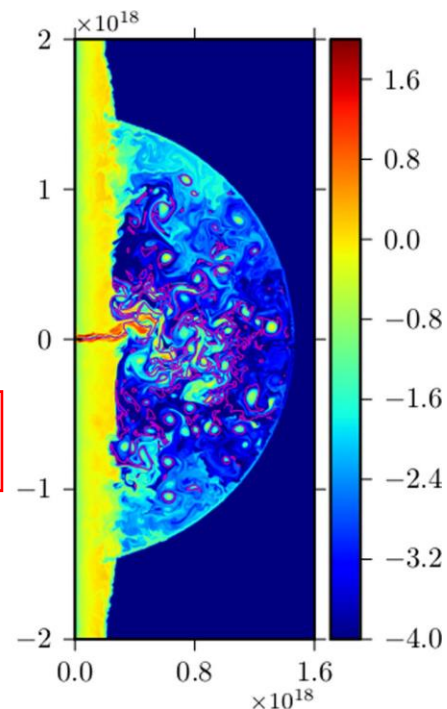
# 最近のはじめたこと

- 何が問題か
  - KCの流れ場
- どうしたらいいか
  - PWN背景の流体構造を修正？
    - 乱流が立っているなら、乱流のeddy motionの動圧が実効的な等方圧力になるかも
    - 「星雲」「電磁場」「乱流」の3成分流体のformulation
    - 相互作用は？
      - 乱流の散逸 「乱流」→「星雲」の熱エネルギー
      - 磁場の散逸 「磁場」→「乱流」の磁場エネルギー
      - 乱流の散逸2 「乱流」の磁場→「星雲」の熱エネルギー
  - 期待

- 非熱的粒子の伝播方程式を修正？

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \left( \frac{1}{3p^2} \frac{\partial}{\partial p} (p^3 \mathbf{w}) \right) \cdot \nabla f + \nabla \cdot \{ u f \underbrace{- \mathbf{n} D_{\parallel} (\mathbf{n} \cdot \nabla)}_{\text{空間拡散項}} f \} = \frac{1}{3} (\nabla \cdot \mathbf{w}) p \frac{\partial f}{\partial p} + \underbrace{\frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} p^2 D_{pp}}_{\text{エネルギー拡散項}} \frac{\partial f}{\partial p}$$

- 宇宙線伝播の研究で方程式はよくわかってる
- 拡散係数は完全にmodel dependent (個人的な感想では適當)
- Morphology観測を使ったmodelingでこのmodelを詰めたい！



(Porth et al., 2014)

# Conclusion

- 回転駆動型パルサーは、その回転エネルギーを相対論的outflowのパルサー風として放出している
- パルサー風はISMと爆風構造を形成し、パルサー星雲を形成する
- Kennel & Coroniti (1984)はこれを1次元定常で定式化した研究で広く受け入れられた
- この1次元モデルをG21.5-0.9に適用し、パルサー星雲全体からの放射スペクトルを再現した
- しかし放射スペクトルを再現するようなパラメータでは、photon index・表面輝度分布の空間構造を再現できない
- 星雲全体の放射スペクトルから要求される磁場強度は、空間構造の観測事実を説明するには強すぎる
- X線を出すような高エネルギー粒子において、放射冷却が効きすぎている





Backup

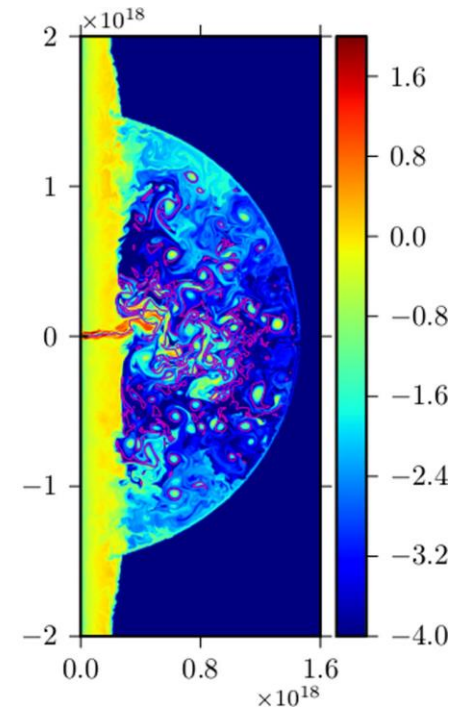
# Future Work

- 観測的研究

- 放射冷却の効かない低周波のシンクロトン放射は、磁場構造と粒子数密度の情報を持っている
- $\gamma$ 線の空間分解観測によって星雲内の密度分布の情報が独立に得られる
  - ⇒ CTAによる $\gamma$ 線の空間分解観測によって研究が大きく進む

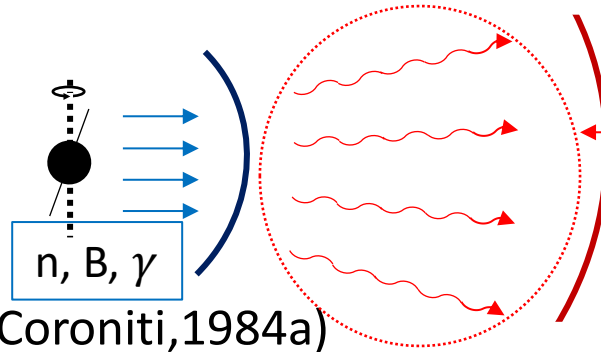
- モデルの改良

- パルサー星雲の2D,3D-MHD simulationから乱流の存在が示唆されている
- 乱流の存在をモデルに組み込む
  - 拡散過程：磁場の乱れによる空間的な拡散
    - ⇒ 高エネルギー粒子の存在範囲を広げる
  - 再加速過程：乱流磁場から粒子がエネルギーをもらう
    - ⇒ 粒子の冷却を実効的に弱める



(Porth et al., 2014)

# Model –Flow Solution–



- MHD model of PWN (Kennel & Coroniti, 1984a)

- Up-stream : Pulsar wind (unshocked)
  - Assumptions : Cold Plasma, toroidal field & Highly relativistic wind
- $\sigma$  parameter
  - Assuming that the downstream is adiabatic flow, downstream is only characterized by (up-stream)  $\sigma$  parameter.

$$\sigma = \frac{B_1^2 / 4\pi}{n_1 u_1 \gamma_1 m c^2} = \frac{\text{(Poynting flux)}}{\text{(particle energy flux)}}$$

$$\frac{d}{dr} [nur^2] = 0$$

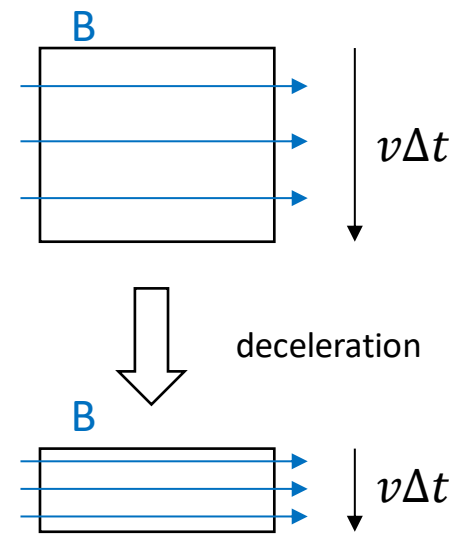
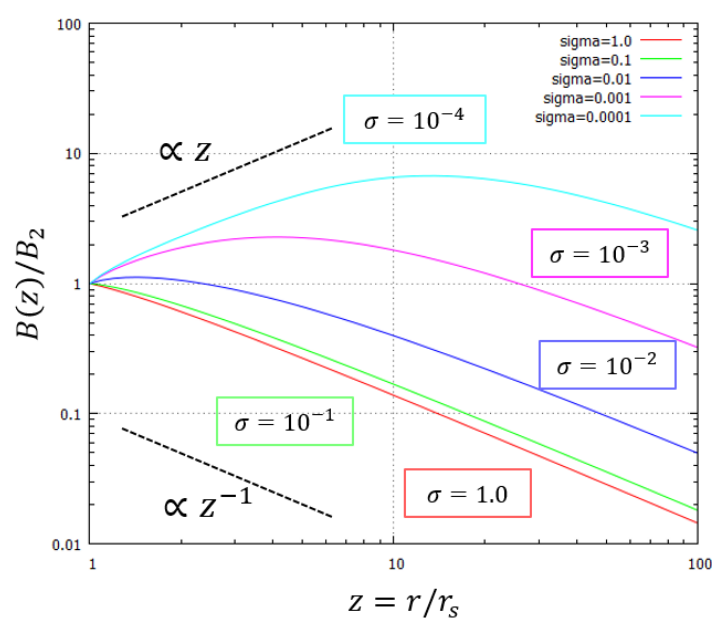
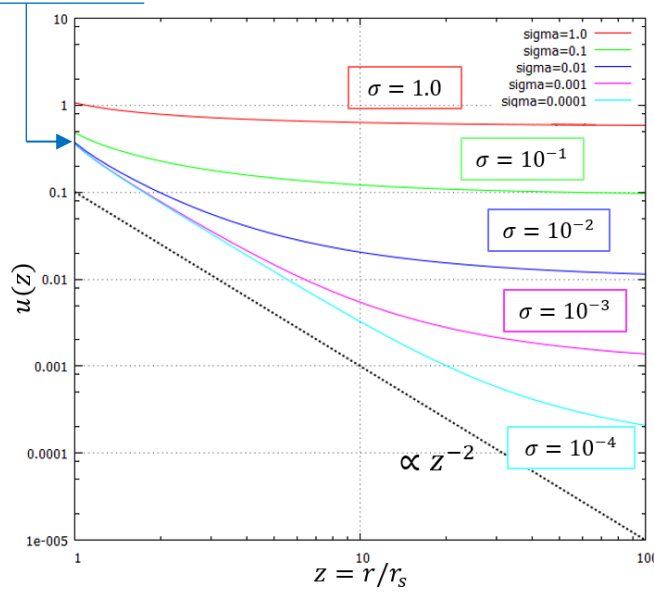
$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{ruB}{\gamma} \right] = 0$$

$$nur^2 \frac{d}{dr} \left[ \gamma\mu + \frac{B^2}{4\pi n\gamma} \right] = 0$$

$$\frac{d}{dr} (ur^2 ne) + p \frac{d}{dr} (ur^2) = 0$$

$$\mu = mc^2 + \frac{\Gamma_c}{\Gamma_c - 1} \left( \frac{P}{n} \right)$$

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

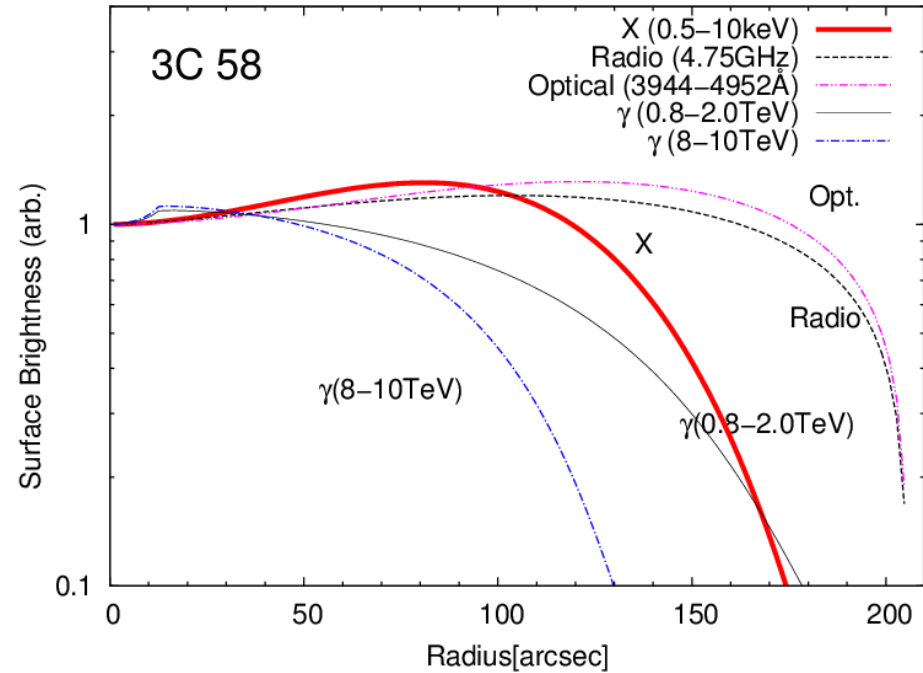
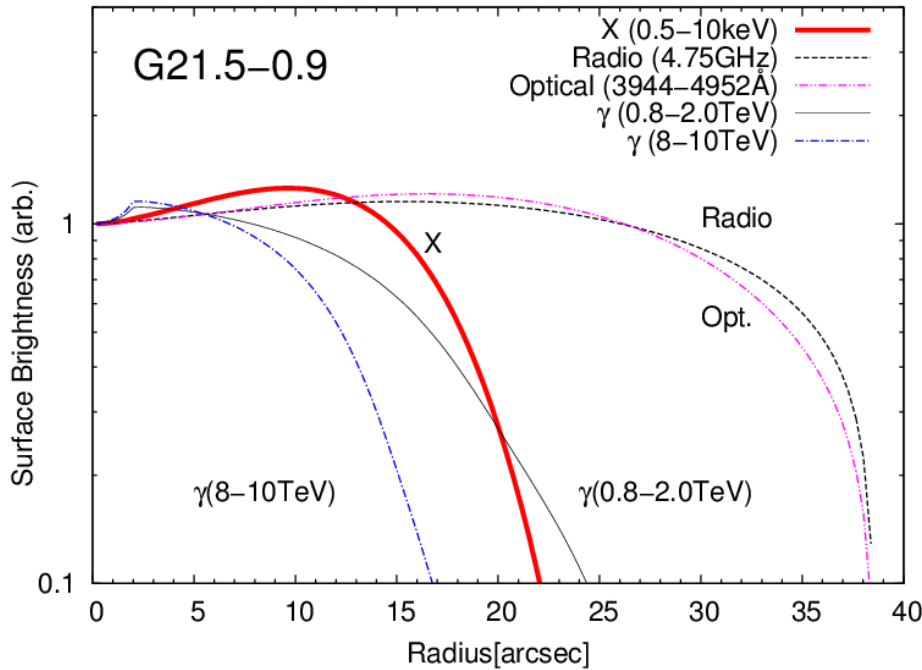


# Result -Surface Brightness-

- Surface brightness

- Radial profile of the surface brightness for various frequencies
- The Cut-off feature appears due to the two different reasons
  - At the edge of nebula -> “Confinement”
  - Inner nebula -> “Synchrotron Cooling”
- The X-rays nebulae are smaller than radio on both G21.5-0.9 and 3C 58

	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

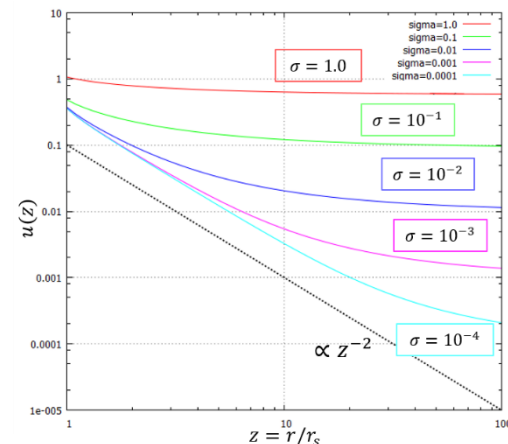


# Summary

- We investigate the 1-D model of PWNe based on Kennel & Coroniti (1984), and apply this model to two objects, G21.5-0.9 and 3C58.
- We find that the KC model can reproduce the entire spectrum but the spatial structure (surface brightness and photon index) is incompatible.
- In this model, the magnetic field required by the entire spectrum is too strong to reproduce the spatial structure of emission.
- That is to say, the high-energy electrons that emits the X-rays suffer the excessive synchrotron cooling.

# Discussion –空間構造-

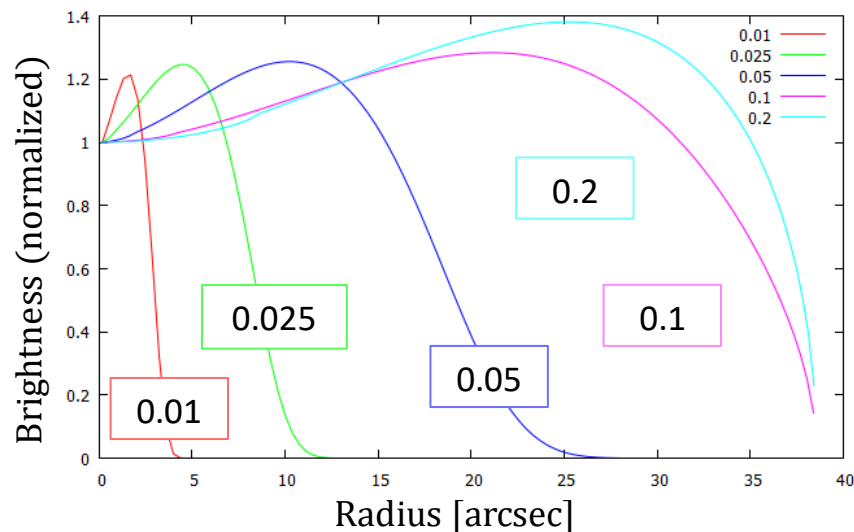
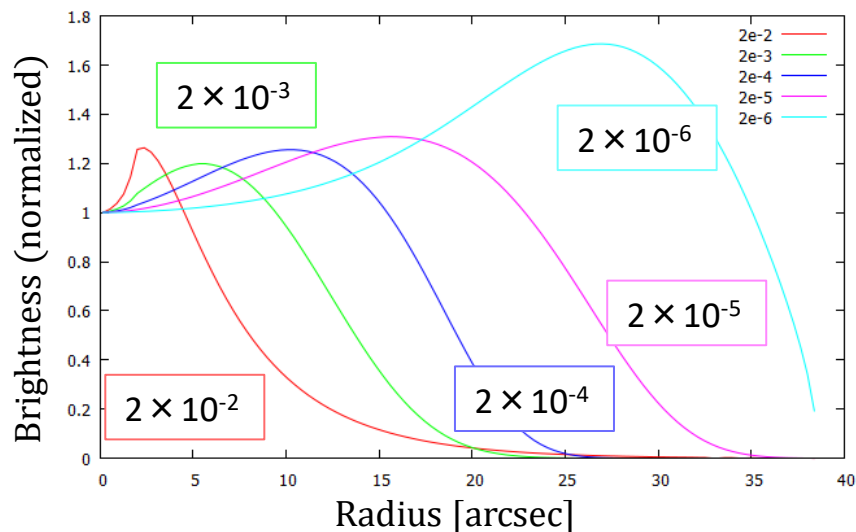
- 空間構造に関するパラメータ
  - $\sigma$  : 流れの振る舞いを変える
  - $r_s$  : 流れの典型スケールを変える
- 表面輝度分布に対する $\sigma$ と $r_s$ の依存性
  - $\sigma \rightarrow$  小 : 磁場が弱くなる  $\Rightarrow$  放射冷却が効かない
  - $r_s \rightarrow$  大 : 空間的変化のスケールが大きくなる



$$B_1 = \sqrt{\frac{L_{sd}}{cr_s^2} \frac{\sigma}{1 + \sigma}}$$

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{syn} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 U_B$$

X線の広がりを説明するなら、 $\sigma$ を小さく、 $r_s$ を大きくとればよさそう



# Discussion - $\sigma$ 依存性-

## • シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱の比

- $\frac{P_{\text{syn}}}{P_{\text{IC}}} \gtrsim 10 \Rightarrow B \gtrsim 30 [\mu\text{G}]$  (c.f. Best-Fit  $B \sim 120 [\mu\text{G}]$ )
- $\sigma$ を小さく、 $r_s$ を大きくとると比が合わなくなる

$$B_1 = \sqrt{\frac{L_{sd}}{cr_s^2} \frac{\sigma}{1 + \sigma}}$$

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{syn}} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 U_B$$

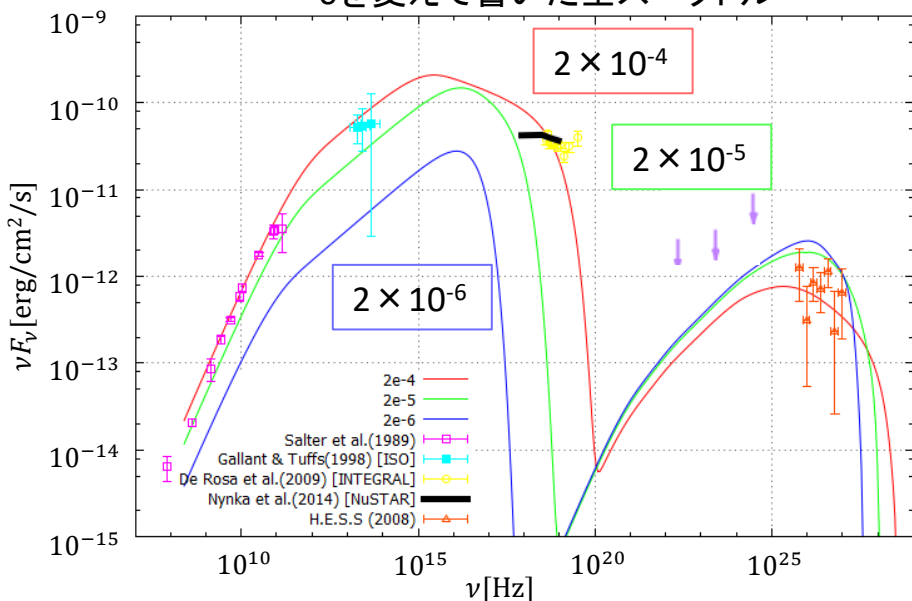
$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{IC}} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 U_{\text{ph}}$$

$$\frac{P_{\text{syn}}}{P_{\text{IC}}} = \frac{U_B}{U_{\text{ph}}} \propto \sigma r_s^{-2}$$

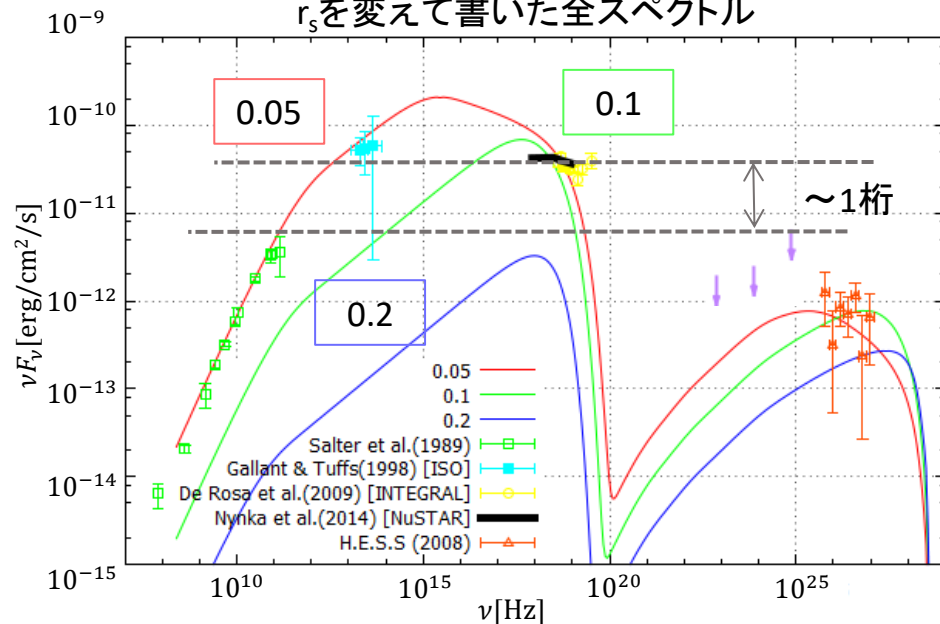
空間構造を再現する磁場強度では、放射スペクトルを再現できない

⇒ KC modelは空間構造を再現できない

$\sigma$ を変えて書いた全スペクトル



$r_s$ を変えて書いた全スペクトル



# Conclusion

- Kennel & Coroniti (1984)の1次元モデルをG21.5-0.9に適用し、パルサー星雲全体からの放射スペクトルを再現した
- しかし放射スペクトルを再現するようなパラメータでは、photon index・表面輝度分布の空間構造を再現できない
- 星雲全体の放射スペクトルから要求される磁場強度は、空間構造の観測事実を説明するには強すぎる
- X線を出すような高エネルギー粒子において、放射冷却が効きすぎている



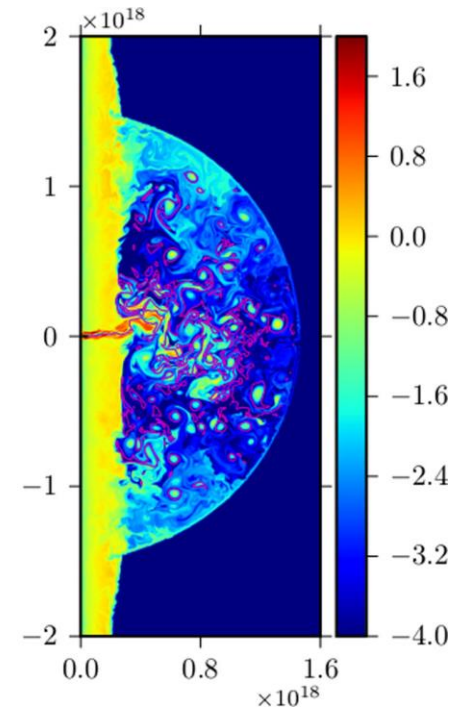
# Future Work

- 観測的研究

- 放射冷却の効かない低周波のシンクロトン放射は、磁場構造と粒子数密度の情報を持っている
- $\gamma$ 線の空間分解観測によって星雲内の密度分布の情報が独立に得られる
  - ⇒ CTAによる $\gamma$ 線の空間分解観測によって研究が大きく進む

- モデルの改良

- パルサー星雲の2D,3D-MHD simulationから乱流の存在が示唆されている
- 乱流の存在をモデルに組み込む
  - 拡散過程：磁場の乱れによる空間的な拡散
    - ⇒ 高エネルギー粒子の存在範囲を広げる
  - 再加速過程：乱流磁場から粒子がエネルギーをもらう
    - ⇒ 粒子の冷却を実効的に弱める



(Porth et al., 2014)