



# 超新星残骸と多様な星周環境との相互作用に伴う非熱的放射の数値的研究

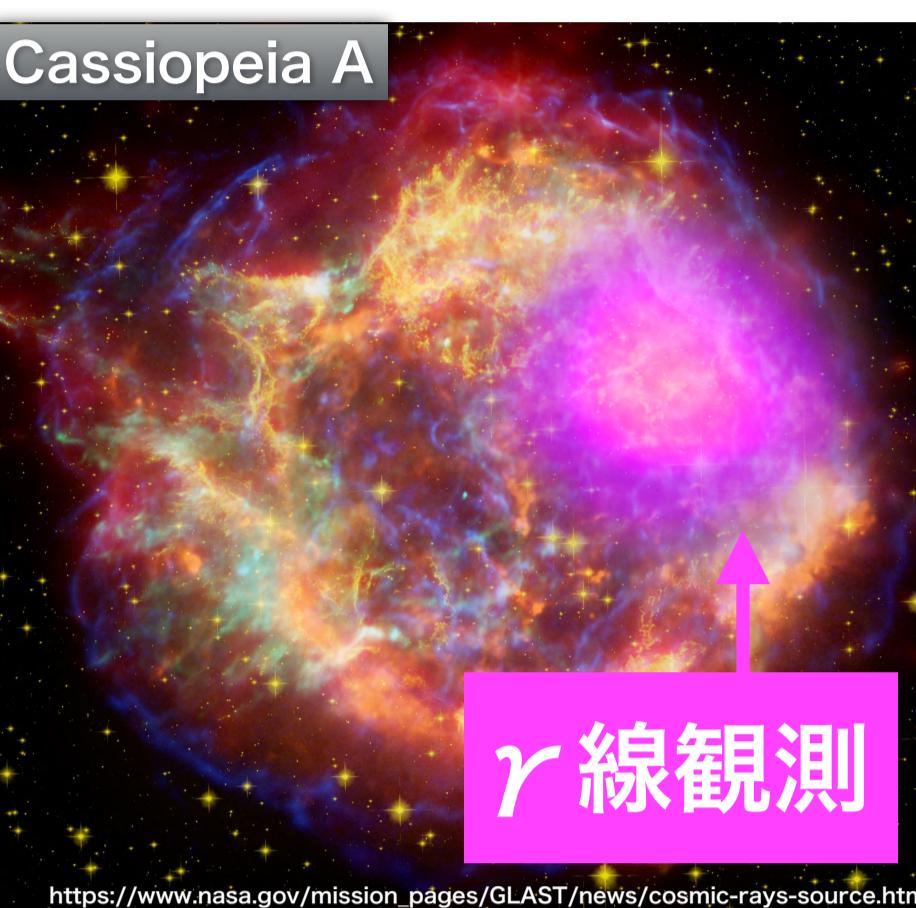
安田 晴皇, Shiu-Hang Lee (京都大学)



## 背景

超新星残骸(SNR)：超新星爆発後に出来た星の最終段階  
 $\gamma$ 線 = 宇宙線(CR)と多様な星周環境の相互作用

→  $\gamma$ 線観測から宇宙線と星周環境の情報を抜き出せる！



Cas A の多波長合成画像

$\gamma$ 線観測

SNRs の多波長観測

### $\gamma$ 線の放射機構

#### $\pi^0$ 崩壊 $\gamma$ 線放射 ( $\pi^0$ decay)

: 宇宙線陽子と星周ガスの相互作用

CR p+ →  $\pi^0$  →  $\gamma$

gas p+ →  $\pi^0$  →  $\gamma$

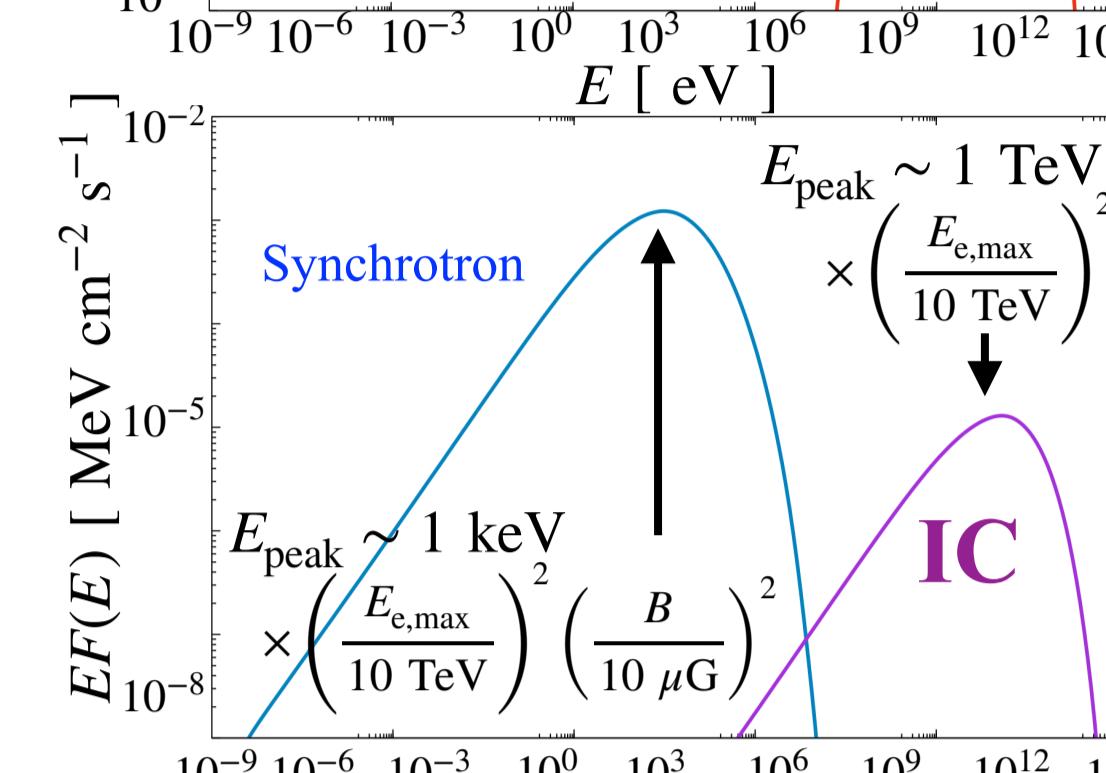
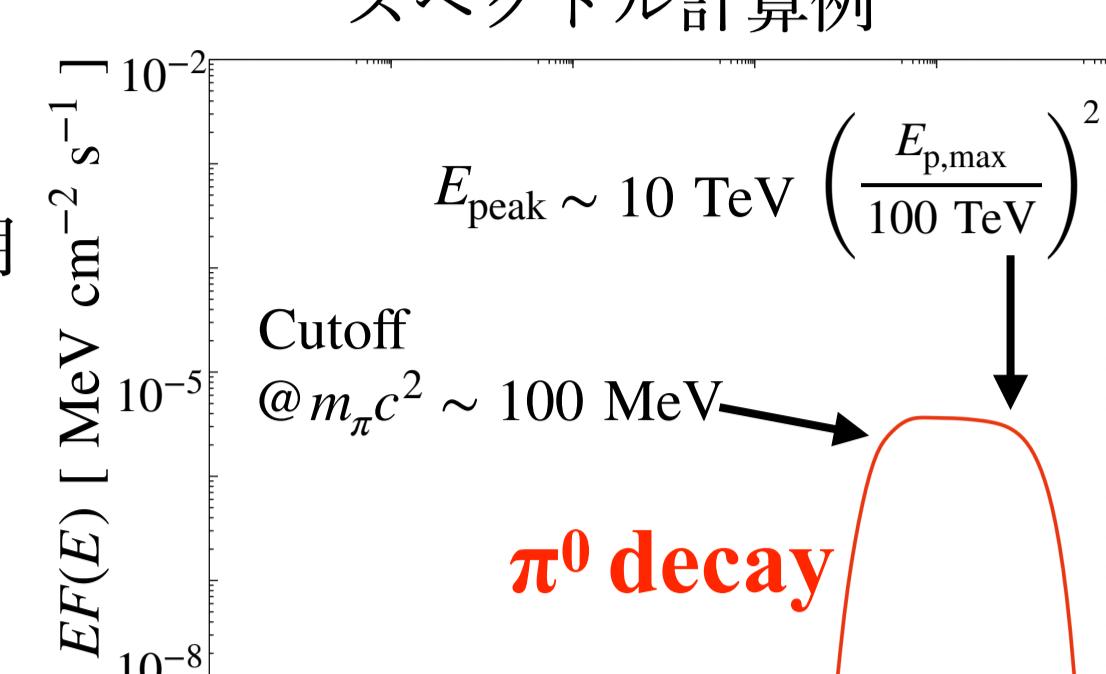
#### 逆コンプトン散乱 (IC)

: 宇宙線電子と光子の相互作用

CR e- → low  $\gamma$  (CMB) → high  $\gamma$

(Cosmic Microwave Background radiation)

### スペクトル計算例



### 目的

疑問点：観測による進化像は正しい？

i) < 1,000 yr :  $\pi^0$  decay (hadronic)?

ii) < 5,000 yr : IC (leptonic)?

iii) > 10,000 yr :  $\pi^0$  decay (hadronic)

iii) > 10,000 yr ii) < 5,000 yr

i) < 1,000 yr

問題点：観測数が少ない=観測バイアス

→ 理論的アプローチによる

新しい進化像の構築

## 方法：流体シミュレーション

“CR-Hydro code” の開発：流体計算と粒子加速計算をコンシスティントに計算が可能

流体方程式

$$\frac{dr}{dm} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial P_{\text{tot}}}{\partial m}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\partial(P_{\text{tot}} u)}{\partial m} E = \frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{P_{\text{tot}}}{\gamma_{\text{eff}} - 1}$$

$R_{\text{sk}}, V_{\text{sk}}, T_{\text{age}}, B_0, T_0$

宇宙線フィードバック

- 全圧力  $P_{\text{tot}}$  :  $P_{\text{tot}}(x) \equiv P_g(x) + P_{\text{CR}}(x) + P_B(x)$
- ガス圧  $P_g(x)$
- 宇宙線圧  $P_{\text{CR}}(x) = \frac{4\pi}{3} \int_{p_{\text{inj}}}^{p_{\text{max}}} p^3 v f(x, p) dp$
- 磁気圧  $P_B(x) = \frac{B(x)^2}{8\pi}$
- 実効比熱比  $\gamma_{\text{eff}}$  :

$$\frac{\gamma_{\text{eff}}}{\gamma_{\text{eff}} - 1} P_{\text{tot}} = \frac{\gamma_{\text{gas}}}{\gamma_{\text{gas}} - 1} P_{\text{gas}} + \frac{\gamma_{\text{CR}}}{\gamma_{\text{CR}} - 1} P_{\text{CR}}$$

### 流体計算

非線形拡散衝撃波加速 (NLDSA)

$$\{u(x) - v_A(x)\} \frac{\partial f(x, p)}{\partial x} - Q(x, p) =$$

移流項

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ D(x, p) \frac{\partial f(x, p)}{\partial x} \right\} + \frac{d\{u(x) - v_A(x)\}}{dx} \frac{p \partial f(x, p)}{3 \partial p}$$

拡散項

加速項

$f_p(x, p), f_e(x, p)$

放射冷却

陽子: i)  $\pi^0$ 崩壊  
電子: i) シンクロトロン放射  
ii) 逆コンプトン散乱  
iii) 制動放射

非熱的放射

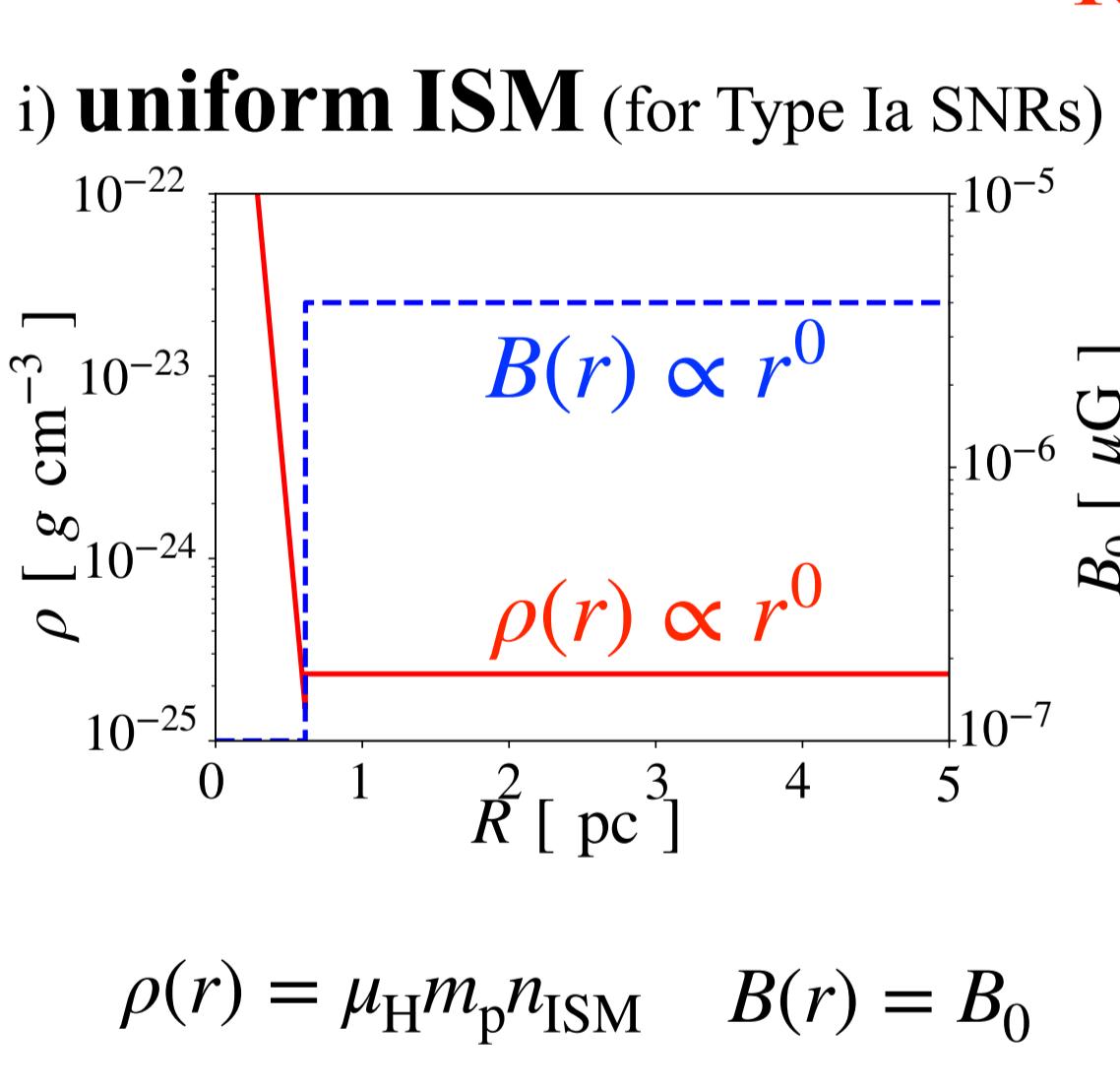
陽子: i)  $\pi^0$ 崩壊  
電子: i) シンクロトロン放射  
ii) 逆コンプトン散乱  
iii) 制動放射

### 粒子加速

## 星周環境モデル

2種類の星周環境を用意 → 密度を変えて3通りずつ

10 yr ~ 5,000 yrまで進化計算



ii) power-law CSM (for CC SNRs)

$$\rho(r) = \frac{\dot{M}}{4\pi r^2}, \quad B(r) = \frac{(\sigma_w \dot{M} V_w)^{1/2}}{r}$$

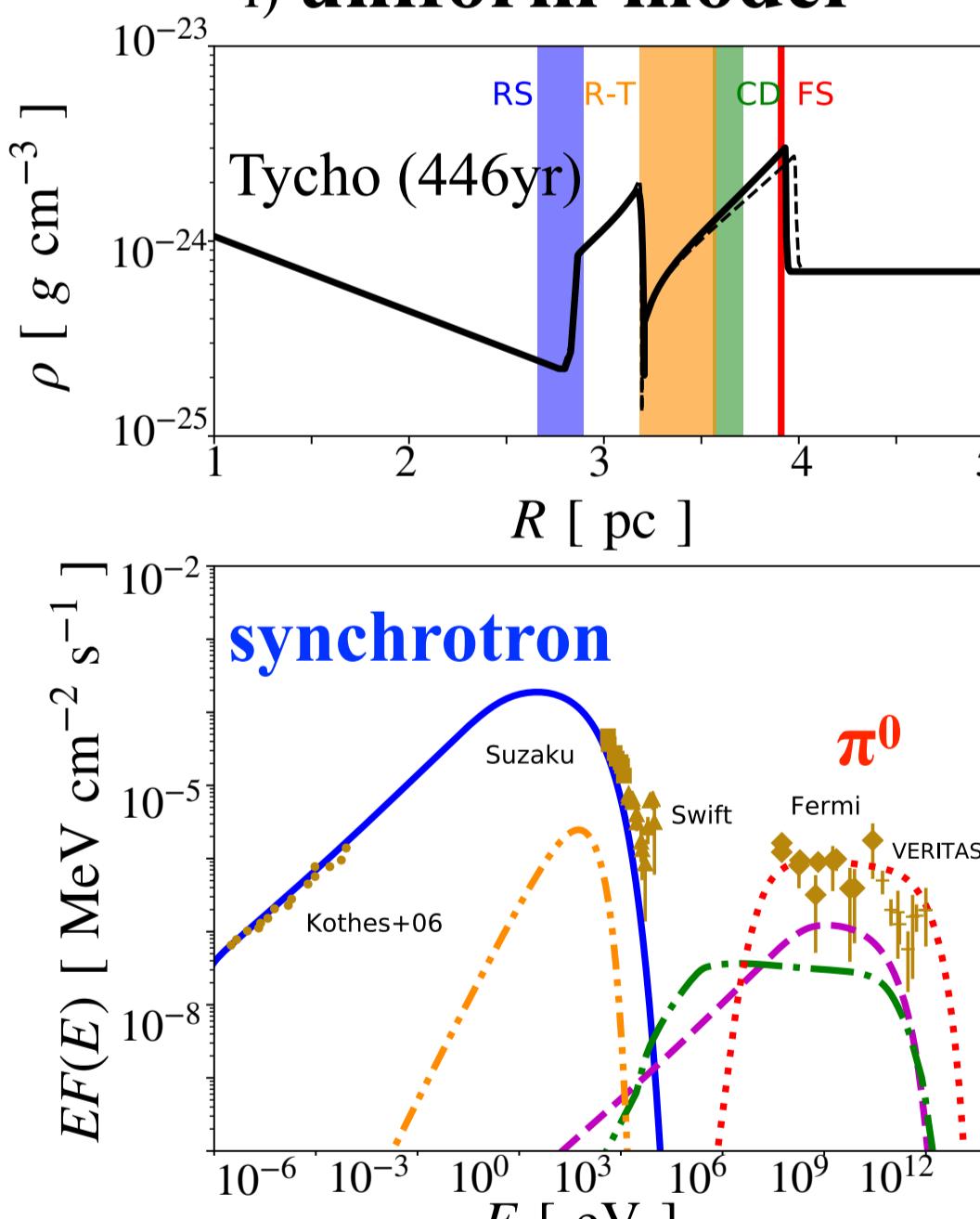
\*  $T = 10^4$  K is constant in both cases

\* Full ionized gas is assumed

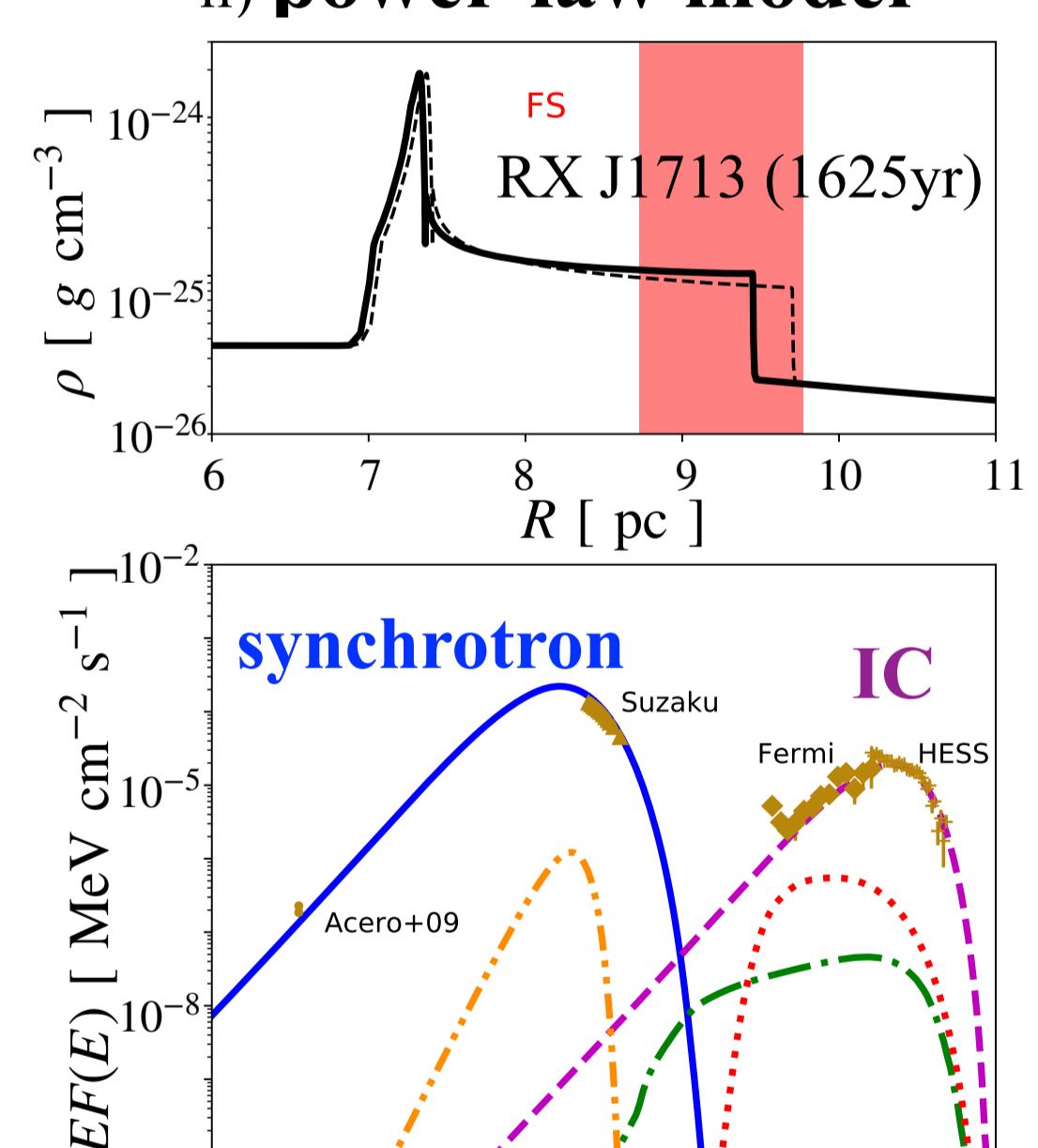
## 結果①: calibration test

Tycho と RX J1713 の流体構造と多波長観測を同時に再現！

i) uniform model

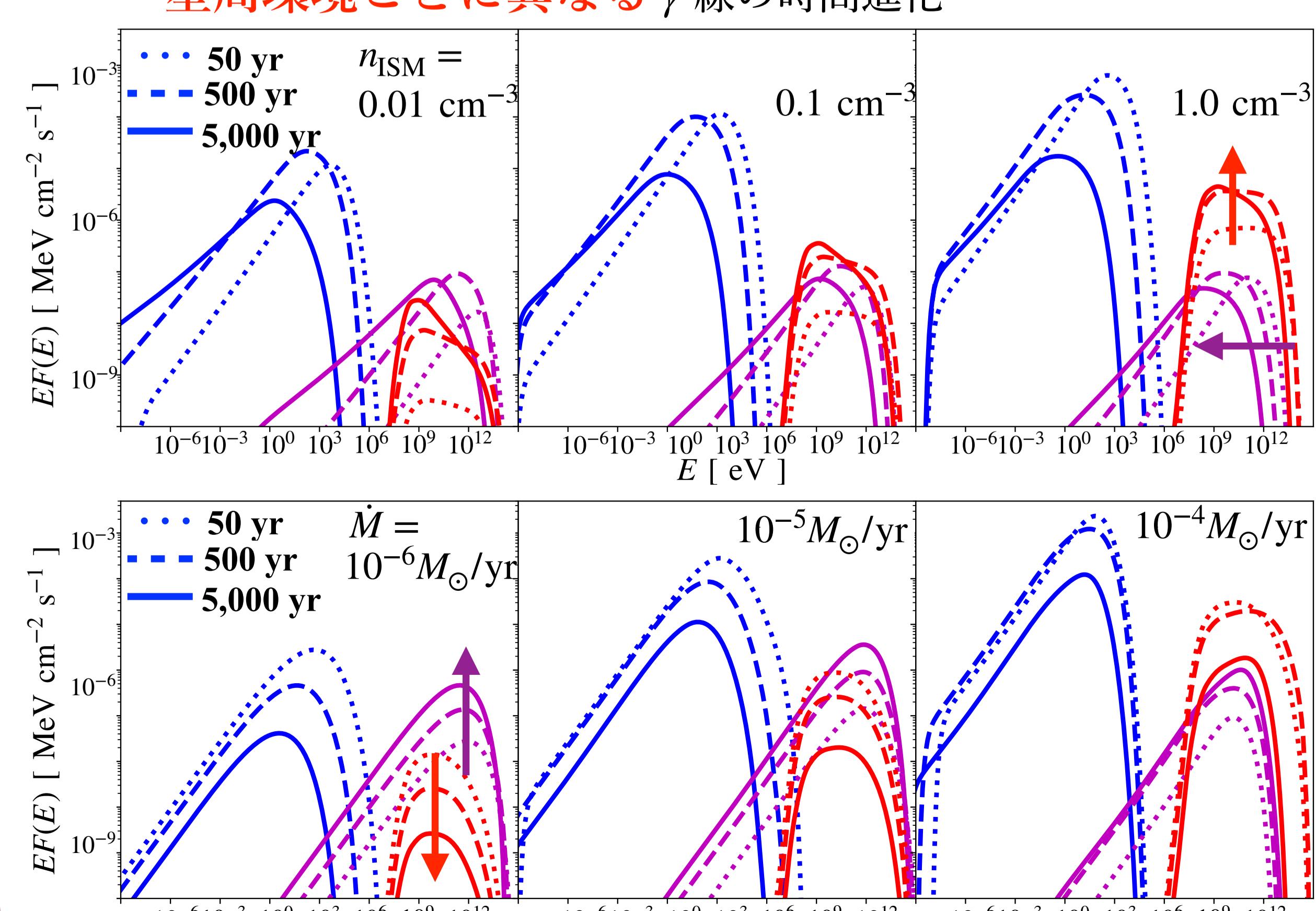


ii) power-law model



## 結果②: time-evolution of SED

星周環境ごとに異なる  $\gamma$ 線の時間進化



i) uniform model

- $\pi^0$  decay : constantly increase ↑
- IC : shift to lower energy ←

ii) power-law model

- $\pi^0$  decay : constantly decrease ↓
- IC : constantly increase ↑

## 結論

①  $\gamma$ 線の時間進化には密度分布構造と磁場強度が重要！

②  $\gamma$ 線観測と星周環境を結ぶ新しい進化像を獲得！

	$T_{\text{age}} = 50$ yr	500 yr	5,000 yr	> 10,000 yr
previous picture	No obs.	hadronic	leptonic	hadronic
uniform ISM	0.01 cm <sup>-3</sup>	leptonic	leptonic	leptonic
	0.1 cm <sup>-3</sup>	leptonic	mixed	hadronic
	1.0 cm <sup>-3</sup>	hadronic	hadronic	hadronic
power-law CSM	$10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$	mixed	leptonic	leptonic
	$10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$	hadronic	mixed	leptonic
	$10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}$	hadronic	hadronic	mixed

## 参考文献

Lee et al. 2012, Yasuda & Lee 2019 (submitted to APJ)