



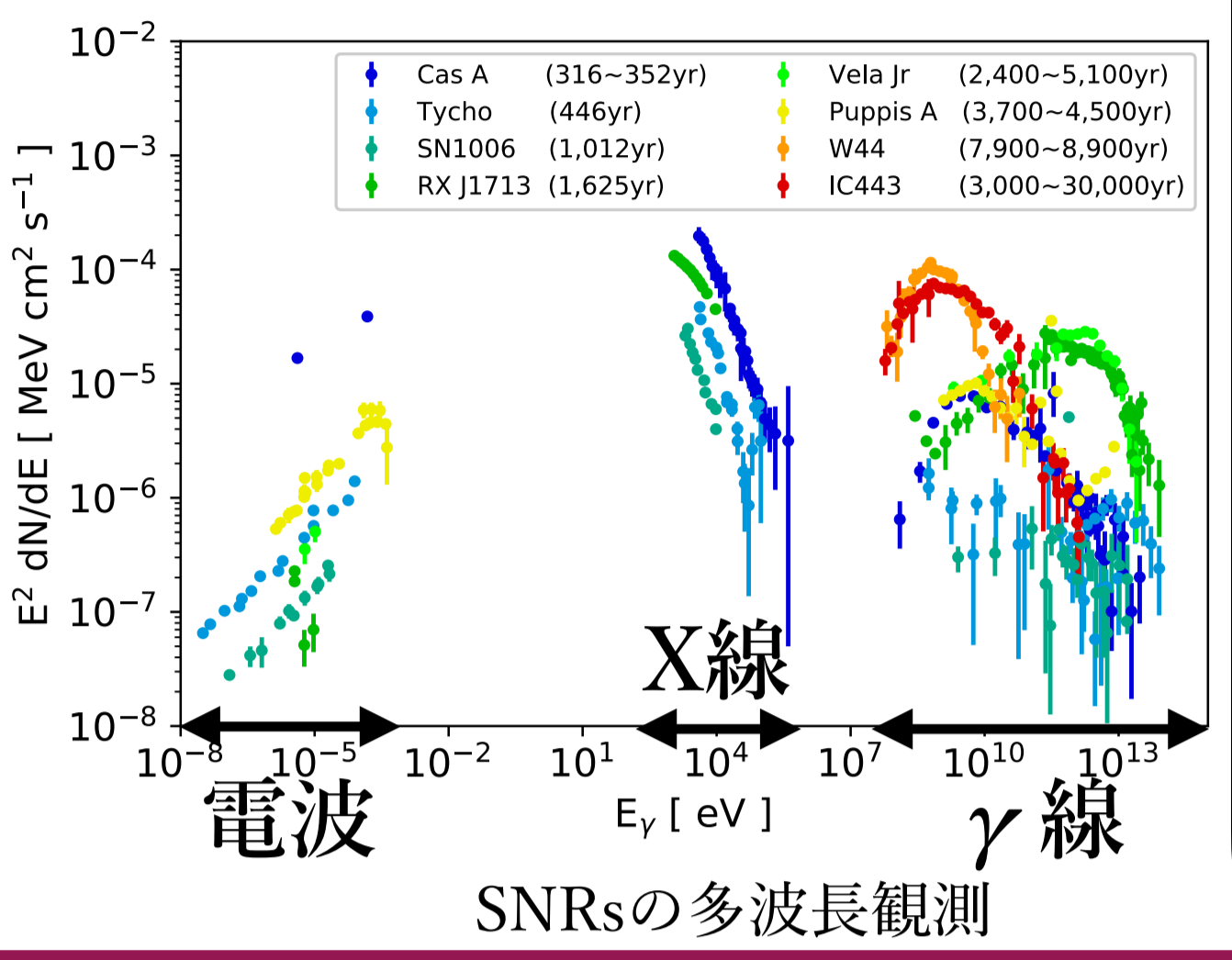
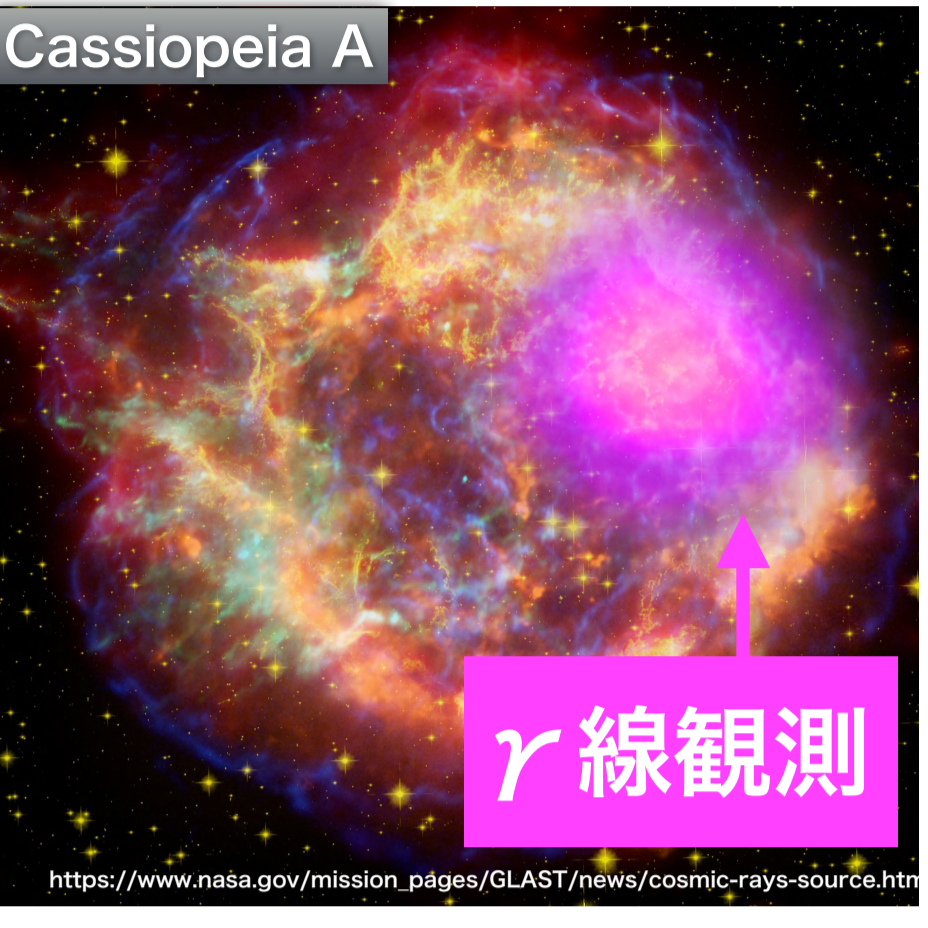
超新星残骸と多様な星周環境との相互作用に伴う非熱的放射の数値的研究

安田 晴皇, Shiu-Hang Lee (京都大学)

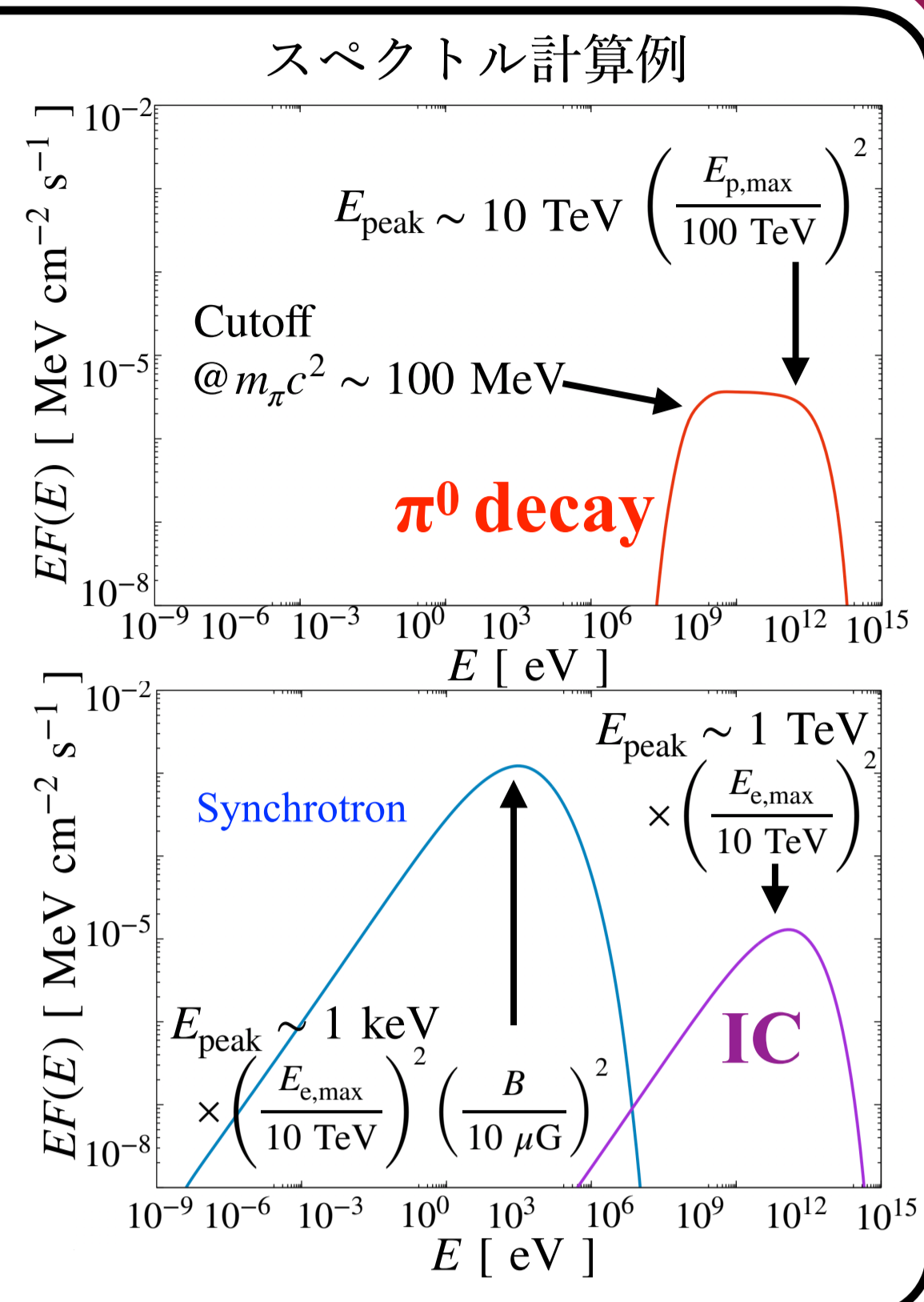
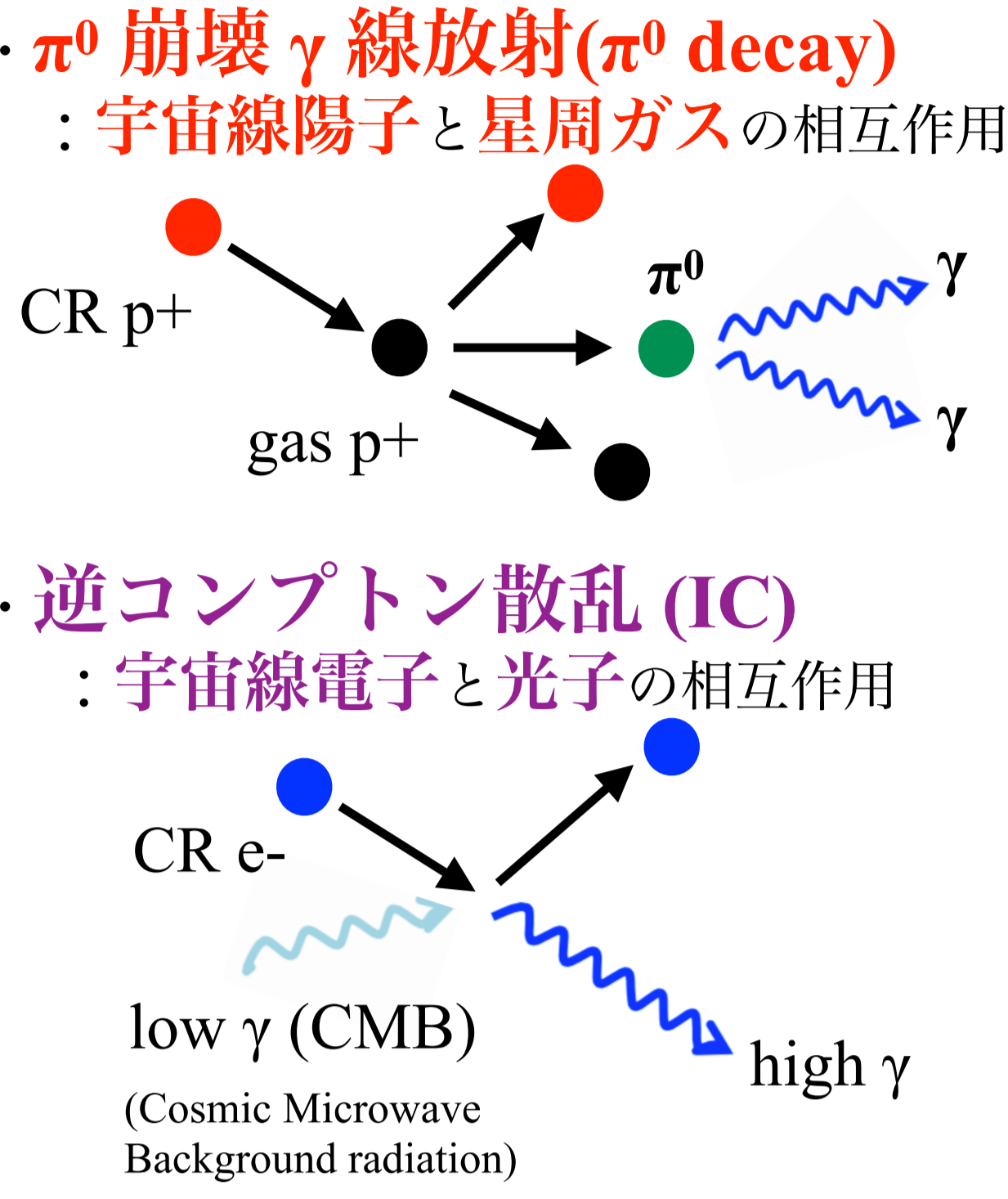


背景

超新星残骸(SNR): 超新星爆発後に出来る星の最終段階
 γ 線 = 宇宙線(CR)と多様な星周環境の相互作用
 $\rightarrow \gamma$ 線観測から宇宙線と星周環境の情報を抜き出せる!

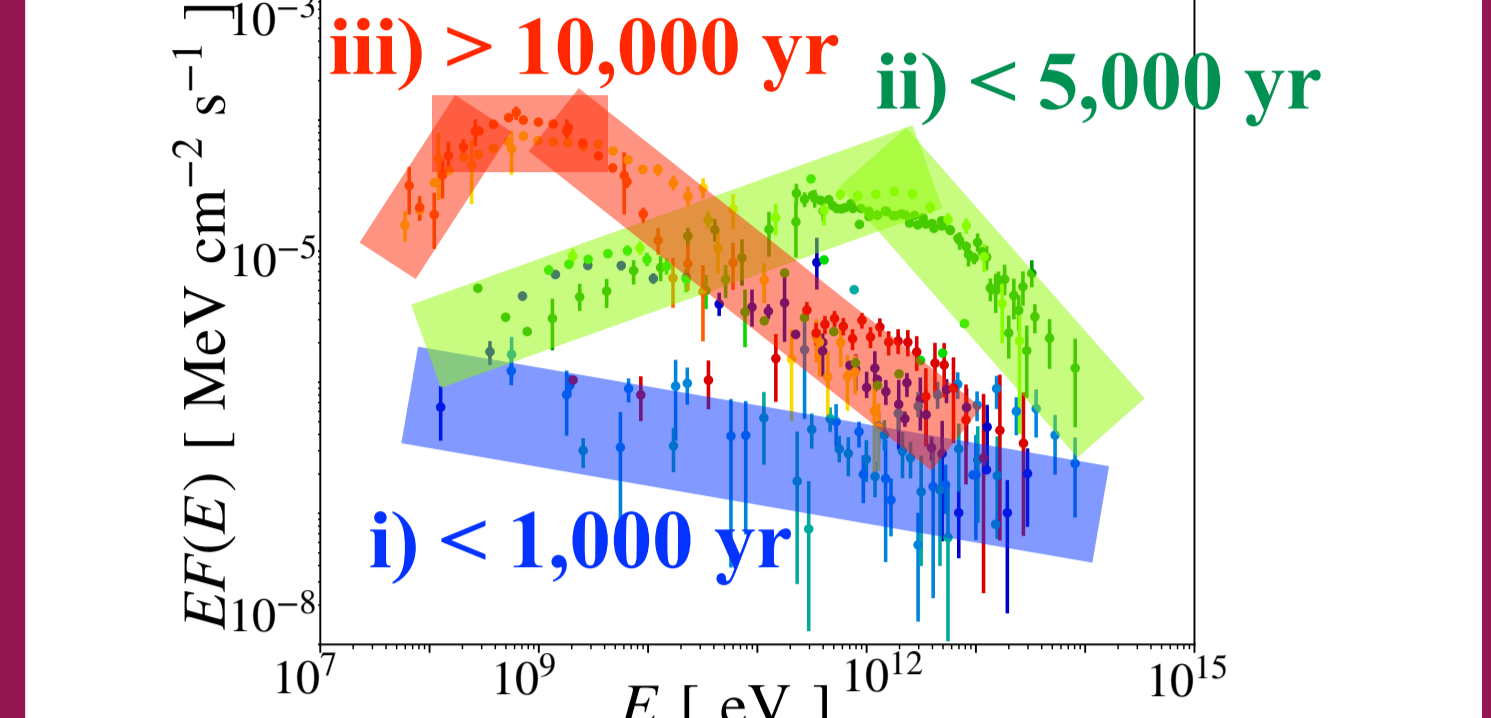


γ 線の放射機構



目的

疑問点: 観測による進化描像は正しい?
 i) < 1,000 yr : π^0 decay (hadronic)?
 ii) < 5,000 yr : IC (leptonic)?
 iii) > 10,000 yr : π^0 decay (hadronic)



問題点: 観測数が少ない = 観測バイアス
 \rightarrow 理論的アプローチによる新しい進化描像の構築

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ントに計算が可能

流体方程式

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

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

流体計算

宇宙線フィードバック

全圧力 P_{tot} :
 $P_{\text{tot}}(x) \equiv P_g(x) + P_{\text{CR}}(x) + P_B(x)$
 ガス圧 宇宙線圧 磁気圧

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

非線形拡散衝撃波加速 (NLDSA)

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

移流項 注入項

拡散項 加速項

粒子加速

放射冷却

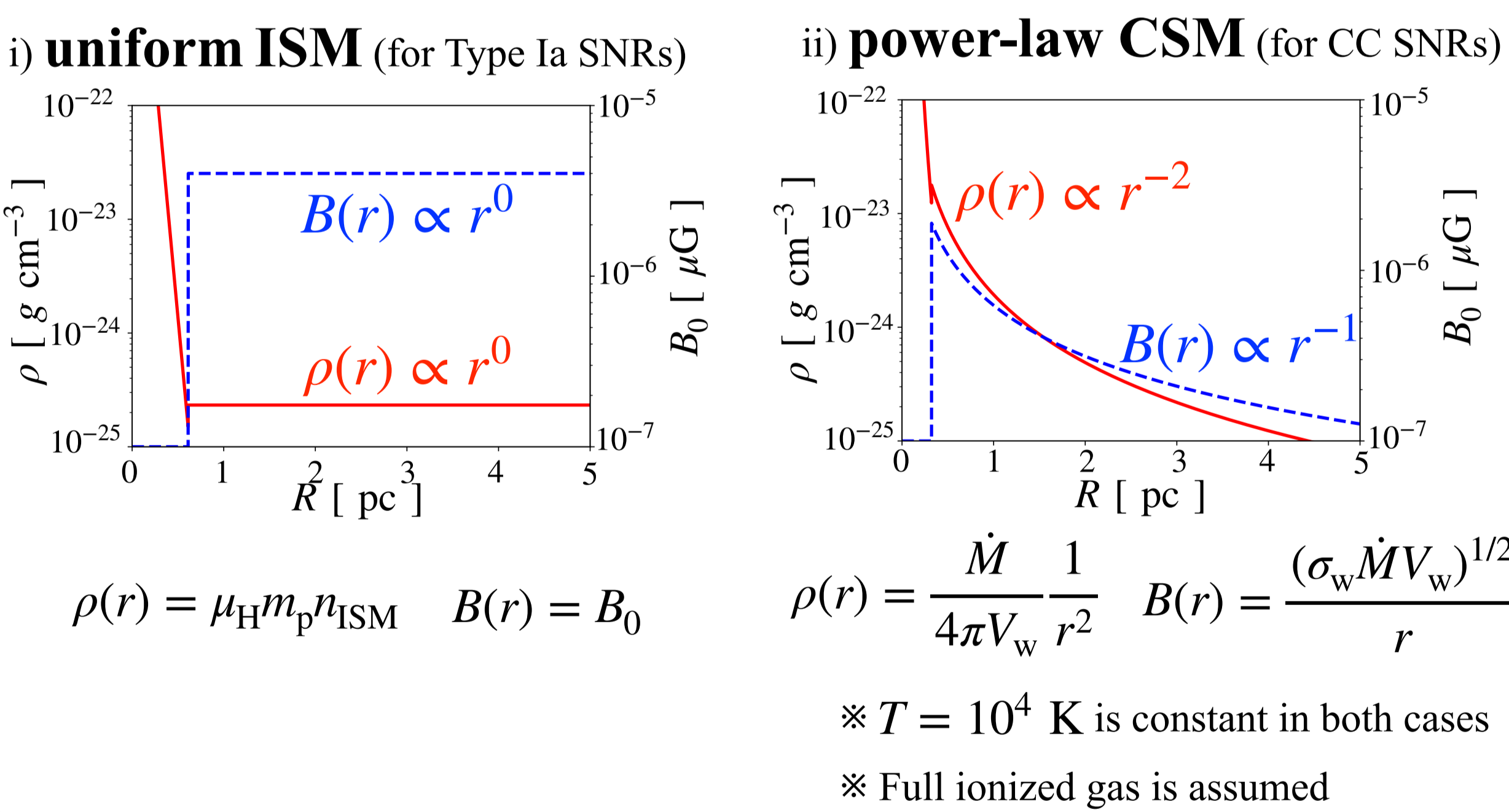
陽子: i) π^0 崩壊
 電子: i) シンクロトロン放射
 ii) 逆コンプトン散乱
 iii) 制動放射

非熱的放射

星周環境モデル

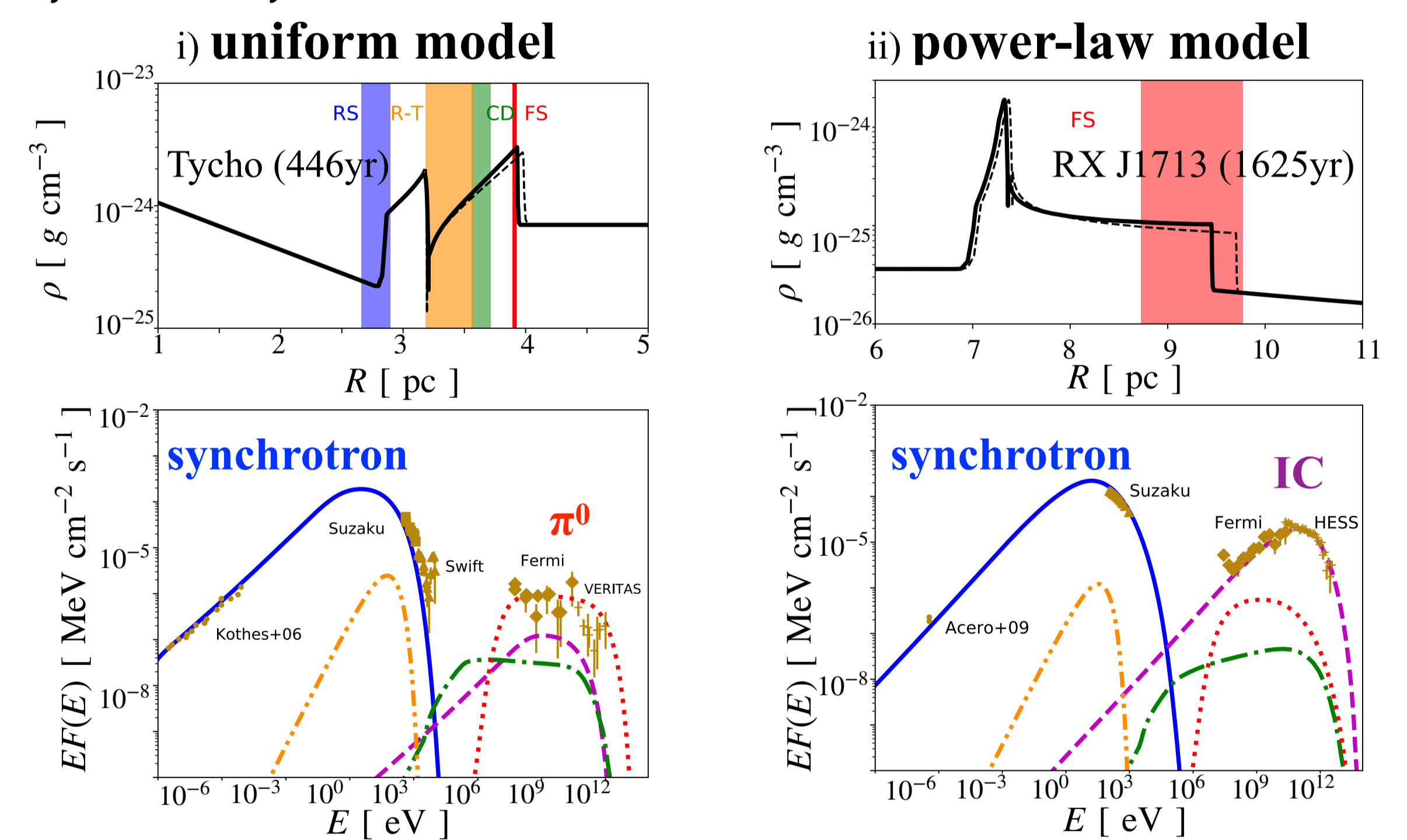
2種類の星周環境を用意 \rightarrow 密度を変えて3通りずつ

10 yr ~ 5,000 yr まで進化計算



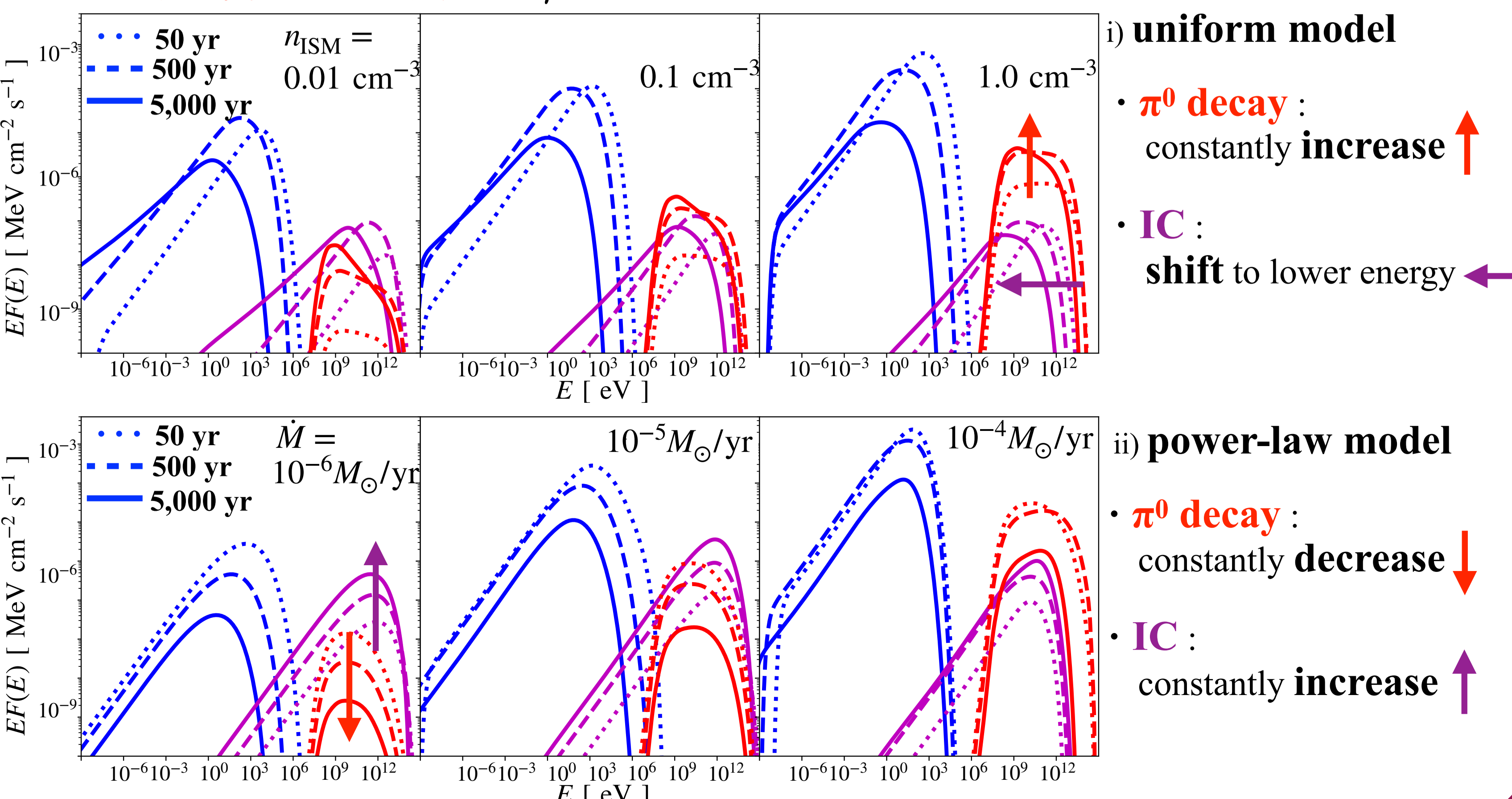
結果①: calibration test

TychoとRX J1713の流体構造と多波長観測を同時に再現!



結果②: time-evolution of SED

星周環境ごとに異なる γ 線の時間進化



結論

- γ 線の時間進化には密度分布構造と磁場強度が重要!
- γ 線観測と星周環境を結ぶ新しい進化描像を獲得!

| | | $T_{\text{age}} = 50$ yr | 500 yr | 5,000 yr | > 10,000 yr |
|------------------|-------------------------------|--------------------------|----------|----------|-------------|
| previous picture | | No obs. | hadronic | leptonic | hadronic |
| uniform ISM | 0.01 cm^{-3} | leptonic | leptonic | leptonic | |
| | 0.1 cm^{-3} | leptonic | mixed | hadronic | |
| | 1.0 cm^{-3} | 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)