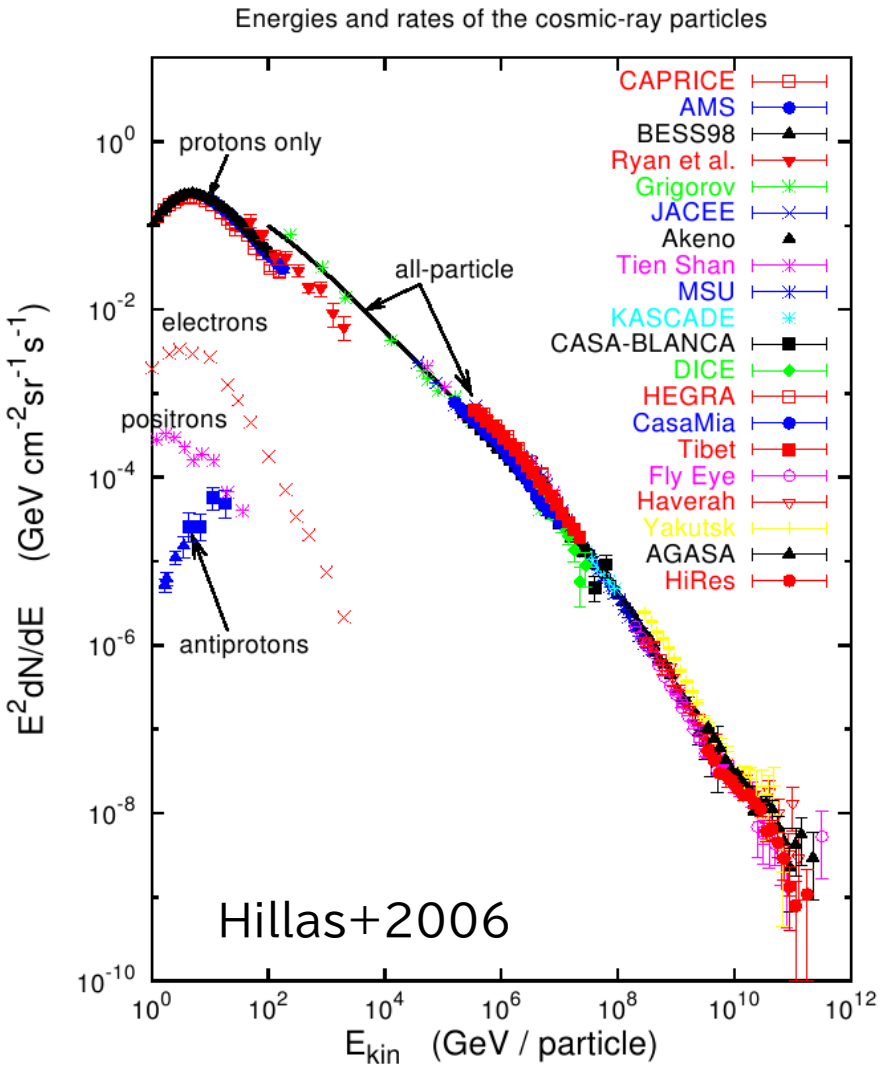
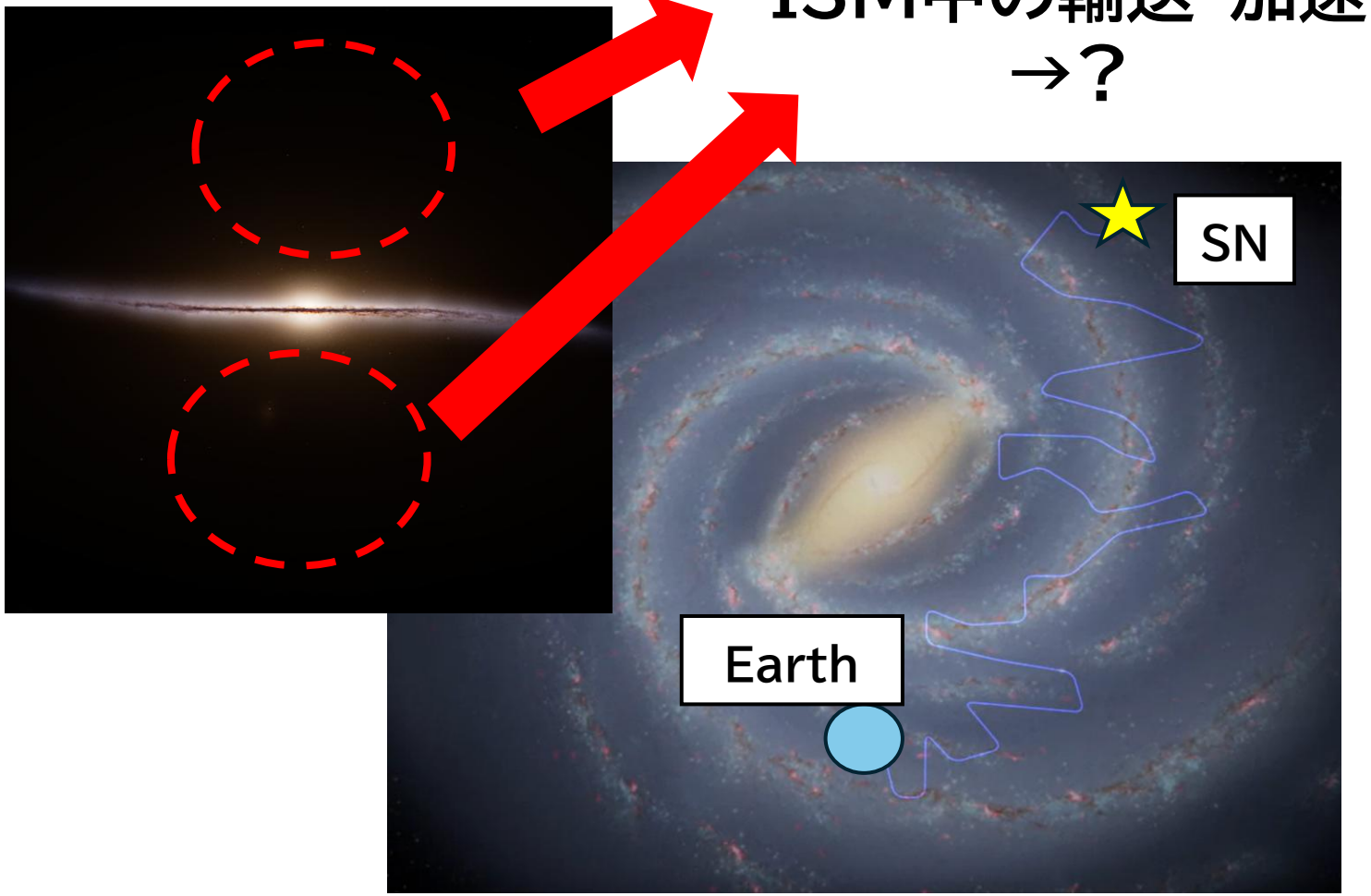
銀河ハロー における宇宙線輸送と流体への反作用

稲元　燎平（宇宙線研究所）
Collaborator: 霜田　治朗、 浅野　勝晃

CR transport

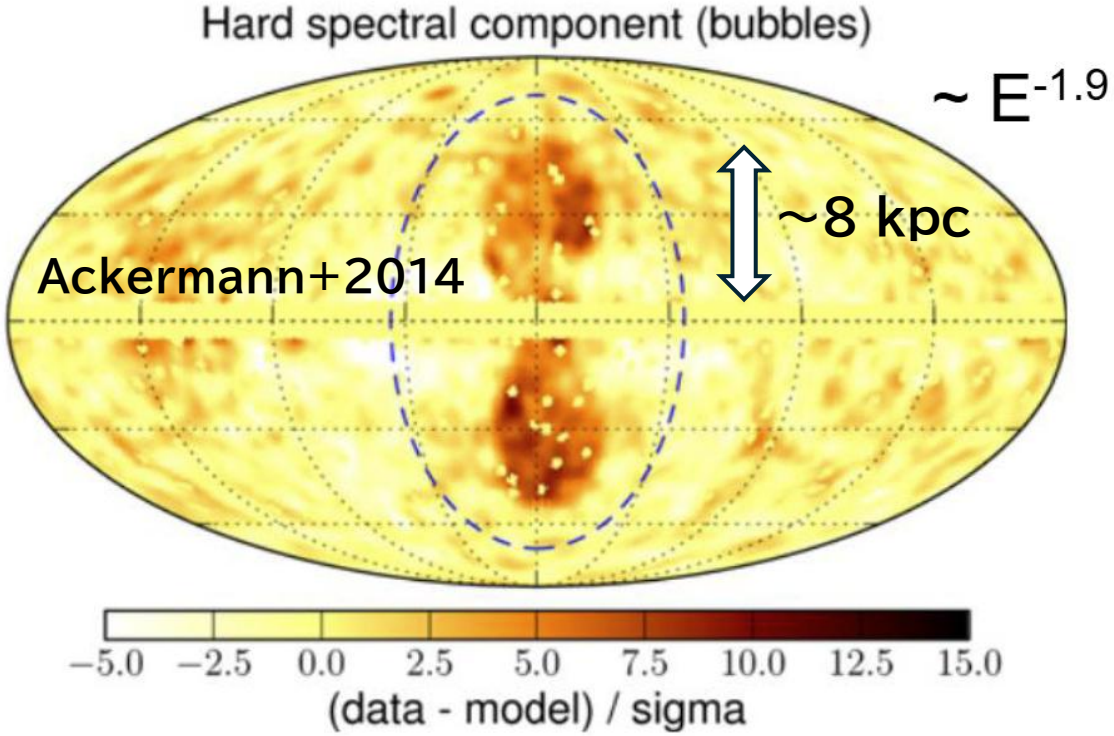


ISM中の輸送・加速
→？

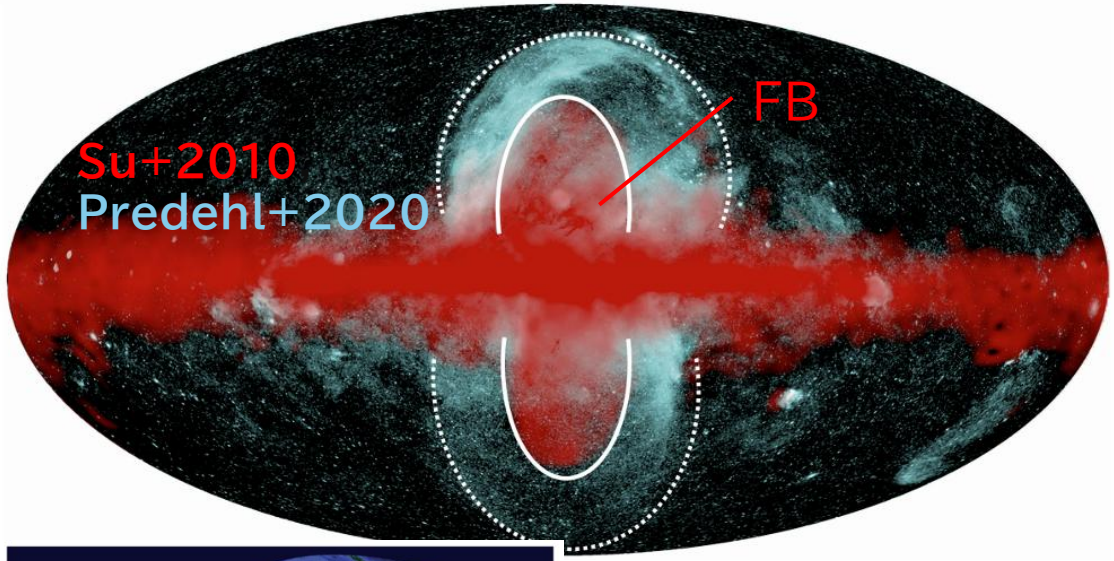


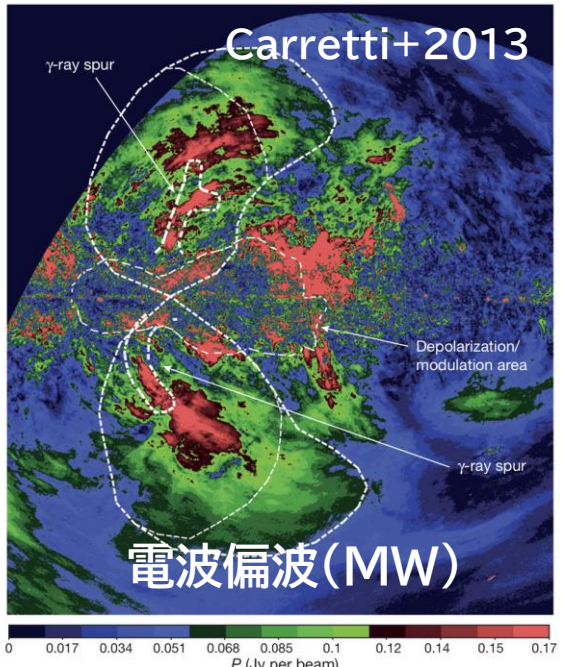
Fermi bubbles

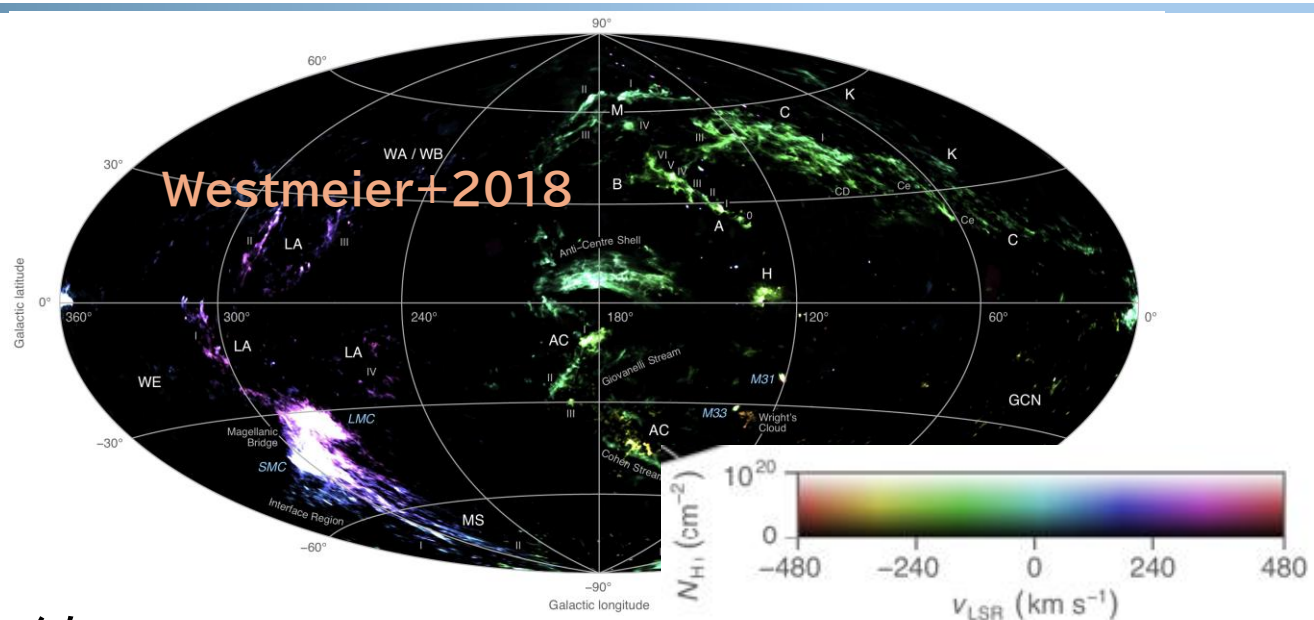
- 天の川銀河円盤から双方向に伸びる**硬い**ガンマ線放射
- 起源 & 放射機構: 未解決問題
  leptonic(宇宙線電子)?or **hadronic**(宇宙線陽子)?
  AGN-like activity? **SNR**?
- 空間的な放射構造が詳細に分解されている



MW halo environment







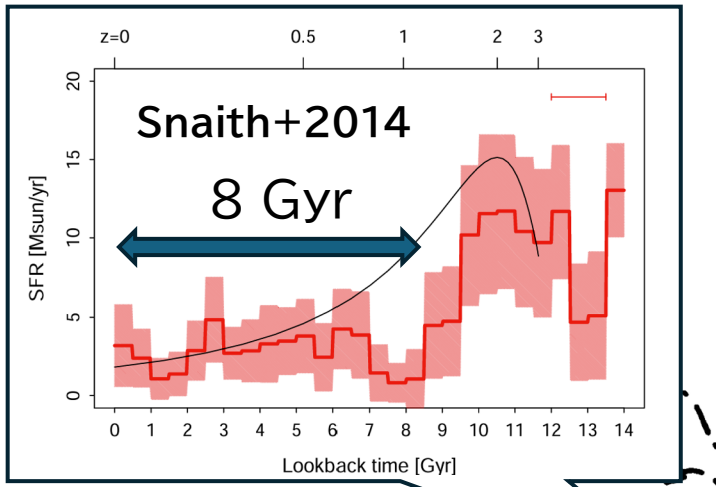
eROSITAバブル…X線
0.3~1 keV程度の
熱的放射(Gupta+2023)
銀河風の証拠？

降着流…21 cm線
冷たいガスが降着している

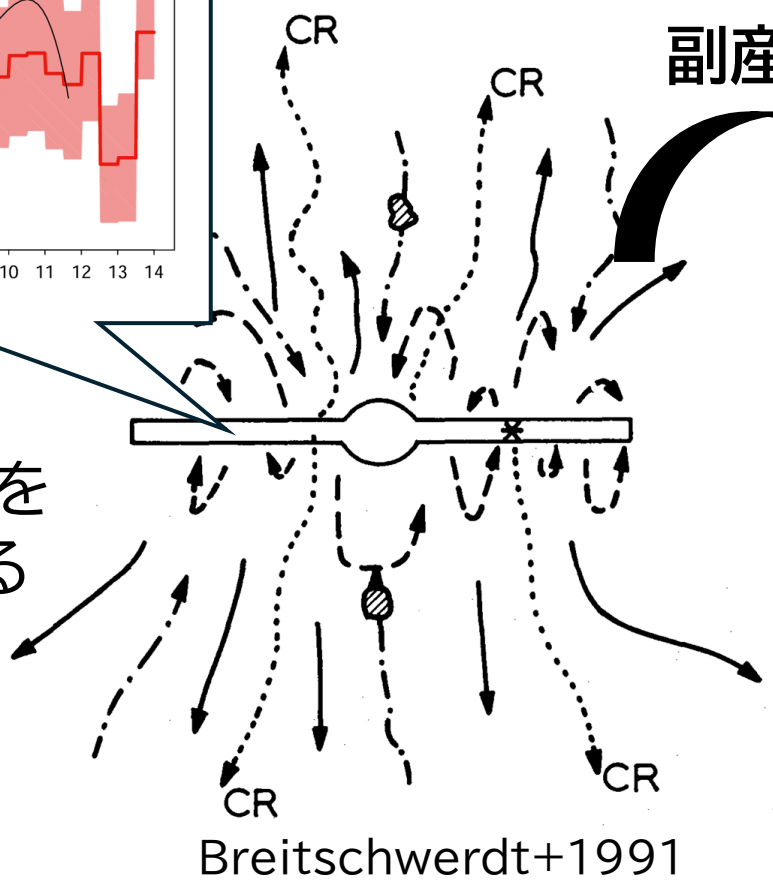
銀河ハローは流出ガスと流入ガスが混在する領域

FBs as by-products of Galaxy evolution

ハドロニック(陽子)シナリオ: CR-driven galactic winds



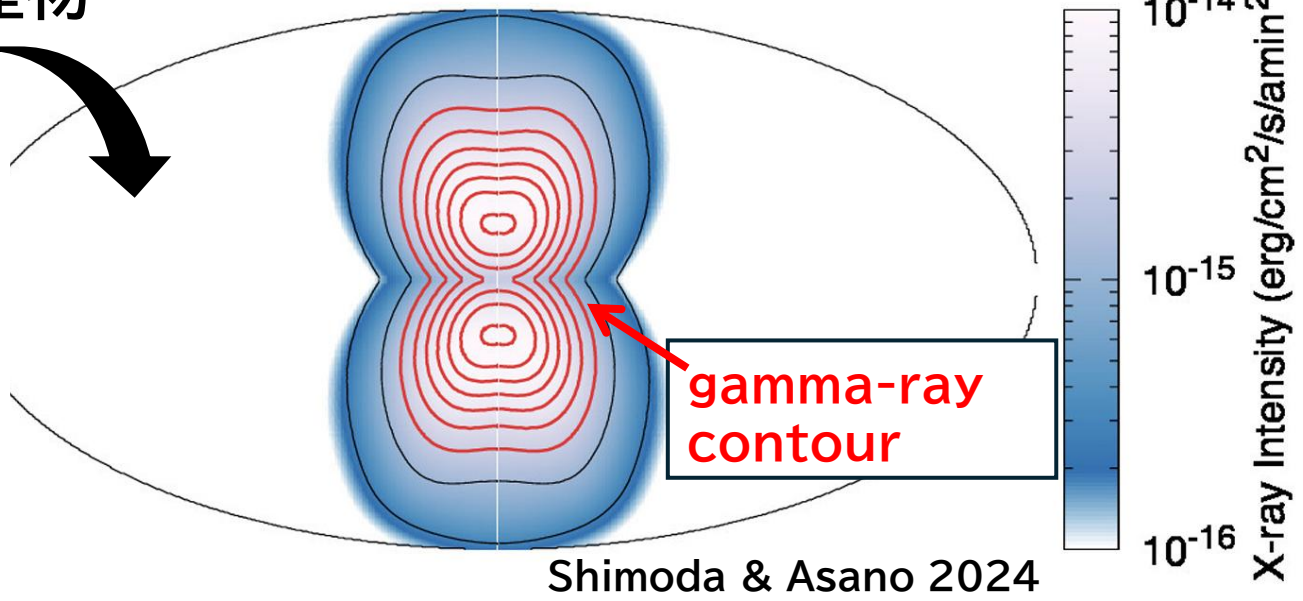
宇宙線**が**ガスを
加熱・加速する



Breitschwerdt+1991

副産物

Analytical model

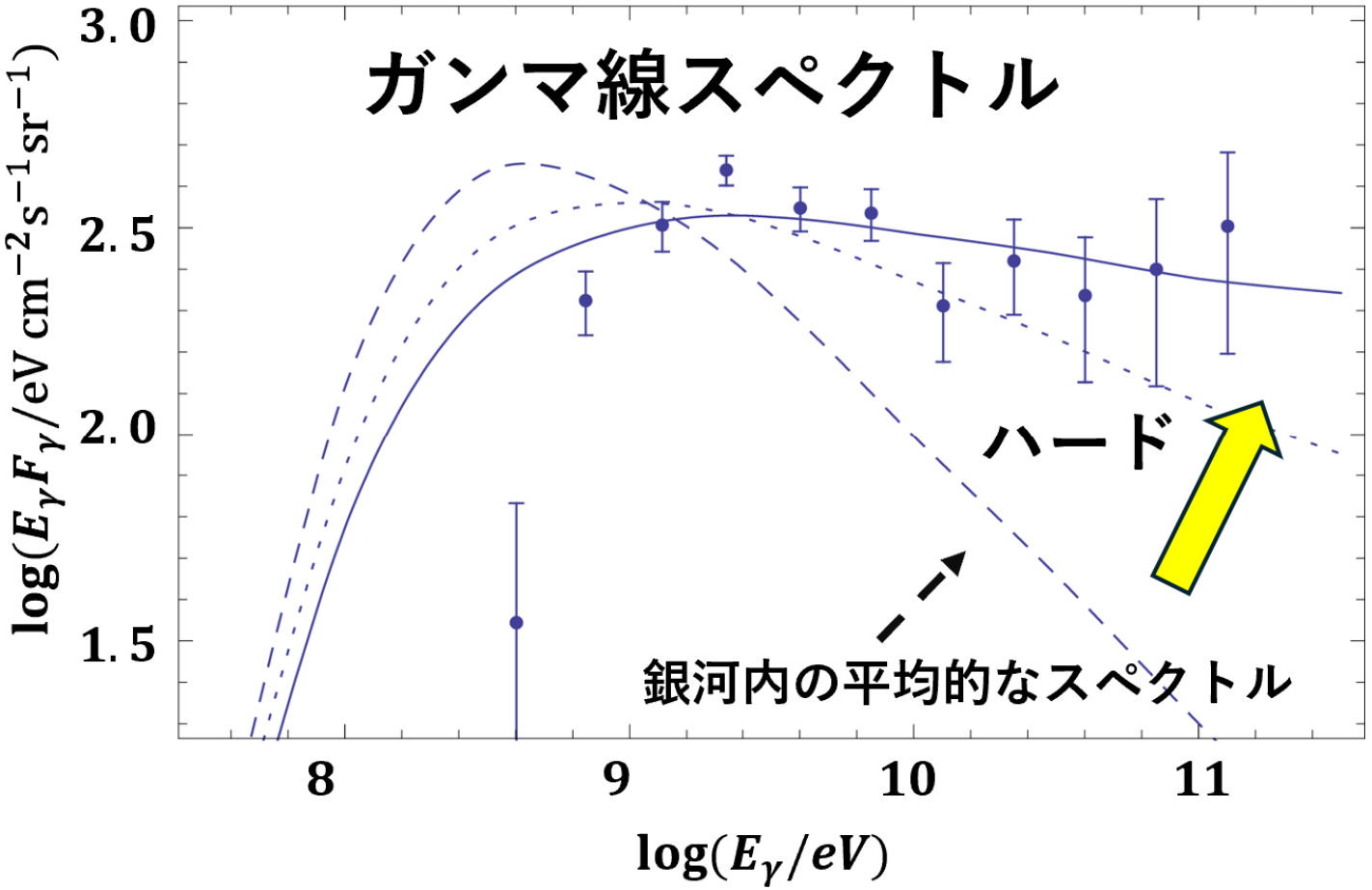


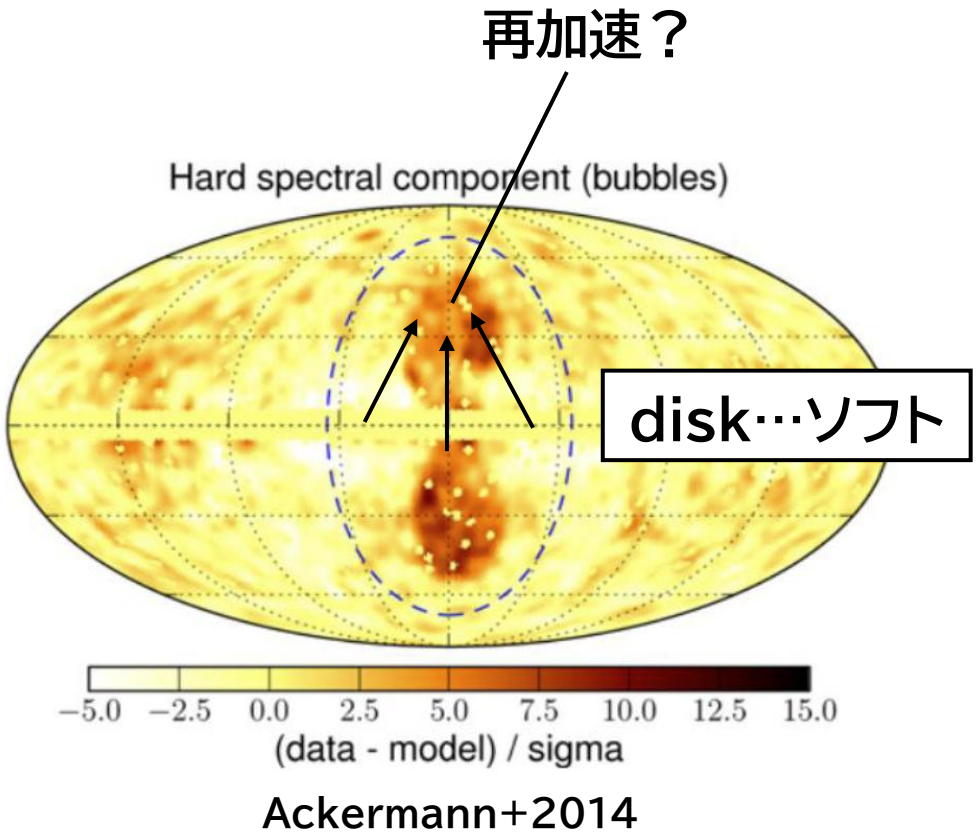
Shimoda & Asano 2024

電波＋X線＋ガンマ線を
銀河進化の枠組みで同時に説明できる？

Challenge for hadronic scenarios

Crocker & Aharonian+2011



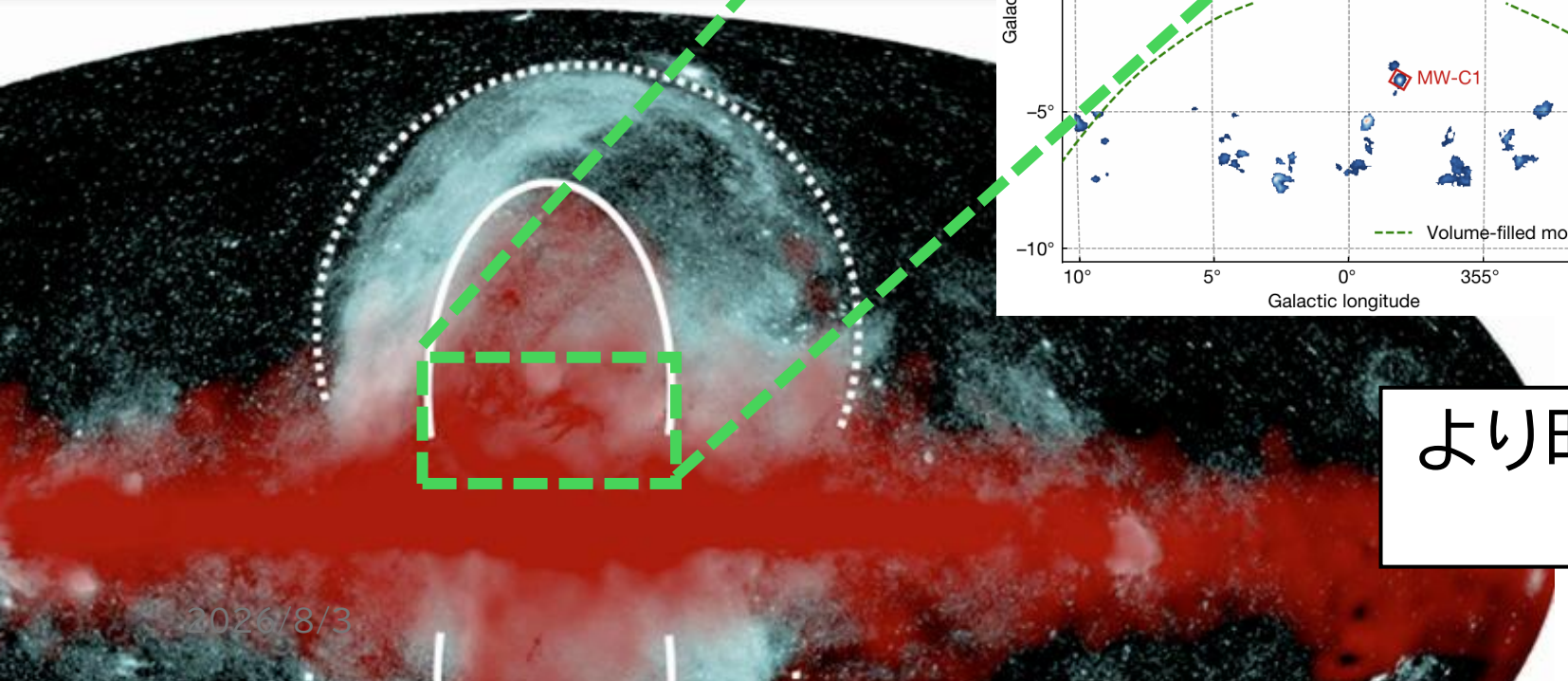


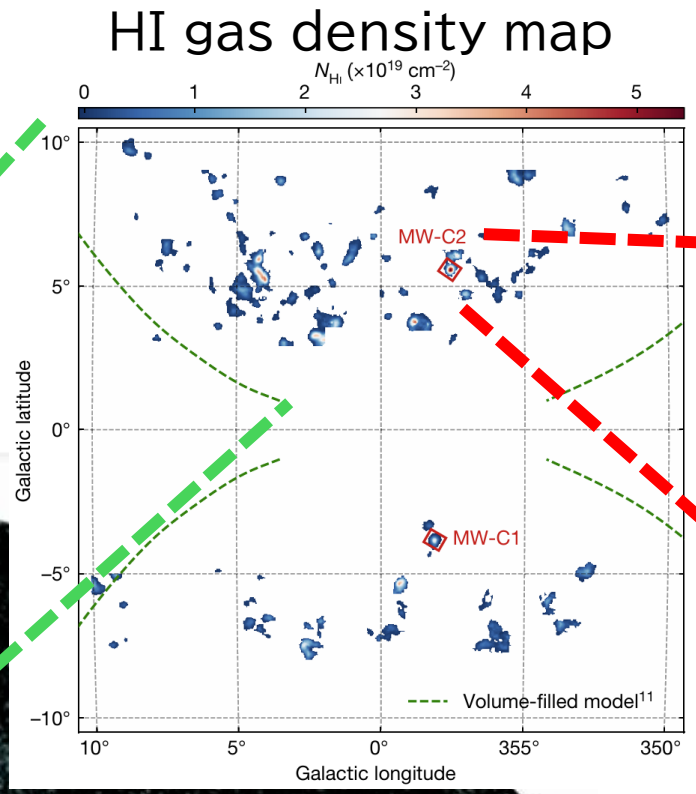
Ackermann+2014

硬いガンマ線スペクトルを説明するには、宇宙線の加速も考える必要がある

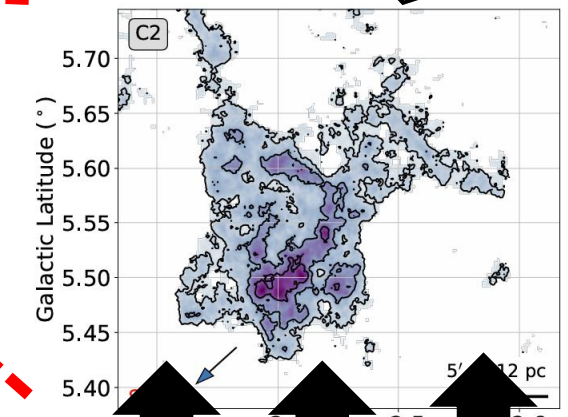
Molecular clouds in the MW halo

分子雲が銀河中心アウトフローの中に
観測されている
（Di Teodoro+2020）





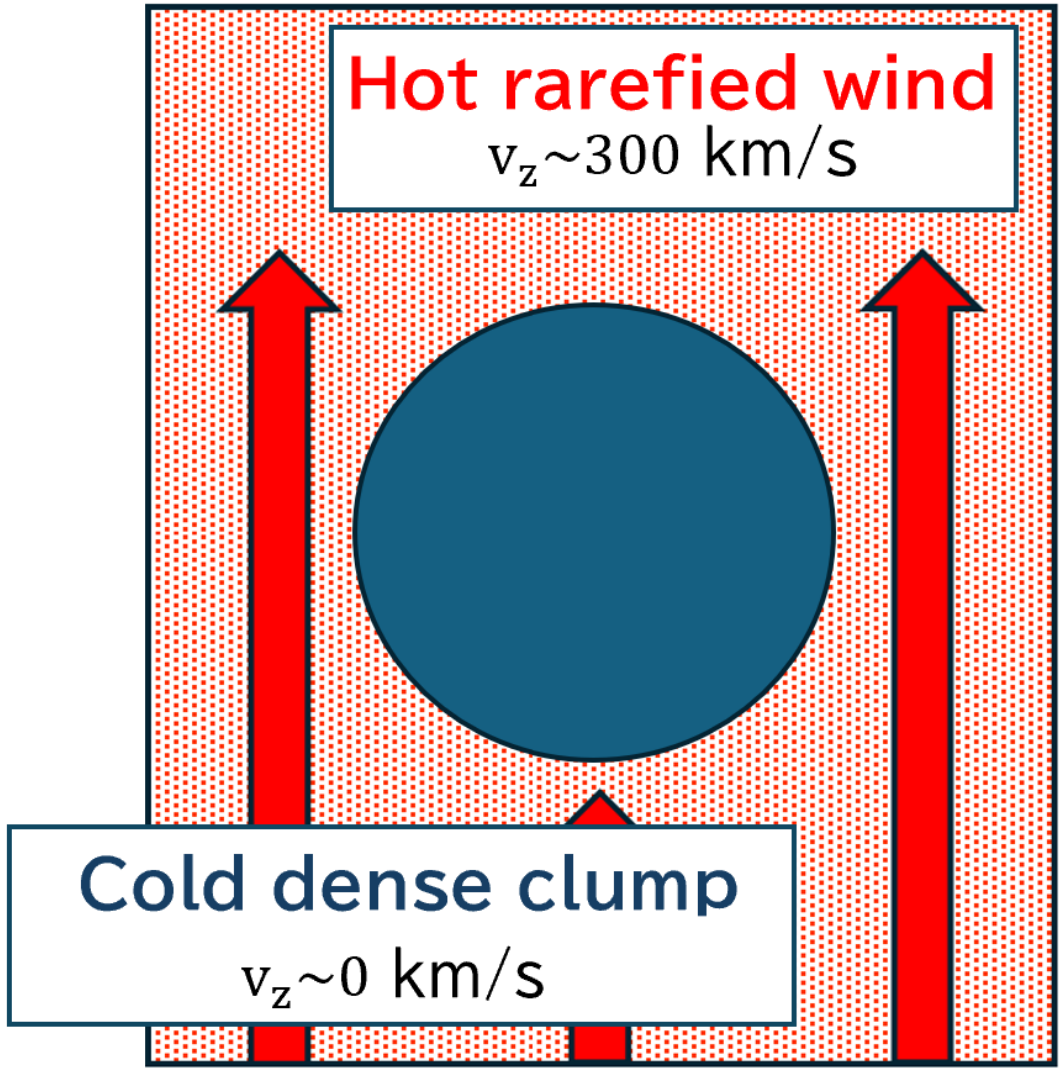
銀河風とクランプの相互作用で宇宙線が加速し得る



Noon+2022

より明るく・硬いガンマ線放射が期待できる

Set up



2次元 CR-HD シミュレーション

- 軸対称円筒座標
- 一様な宇宙線分布
- 局所熱平衡
- 宇宙線の最高エネルギー 1TeV

Initial CR conditions

- Low-CR-density case

$$P_{CR} \sim 0.01 P_{gas}$$

- High-CR-density case

$$P_{CR} \sim P_{gas}$$

CR圧力の影響と
ガンマ線放射(1 GeV~100 GeV)
について調べる

Equation

CR transport: 移流拡散方程式

CR acceleration by gas compression

$$\frac{\partial \psi_{\rm CR}(r,z,p)}{\partial t} = \nabla\cdot(D(p)\nabla\psi_{\rm CR} - \boldsymbol{v}\psi_{\rm CR}) + \frac{\partial}{\partial p}\left[\frac{p}{3}(\nabla\cdot\boldsymbol{v})\psi_{\rm CR}\right]$$

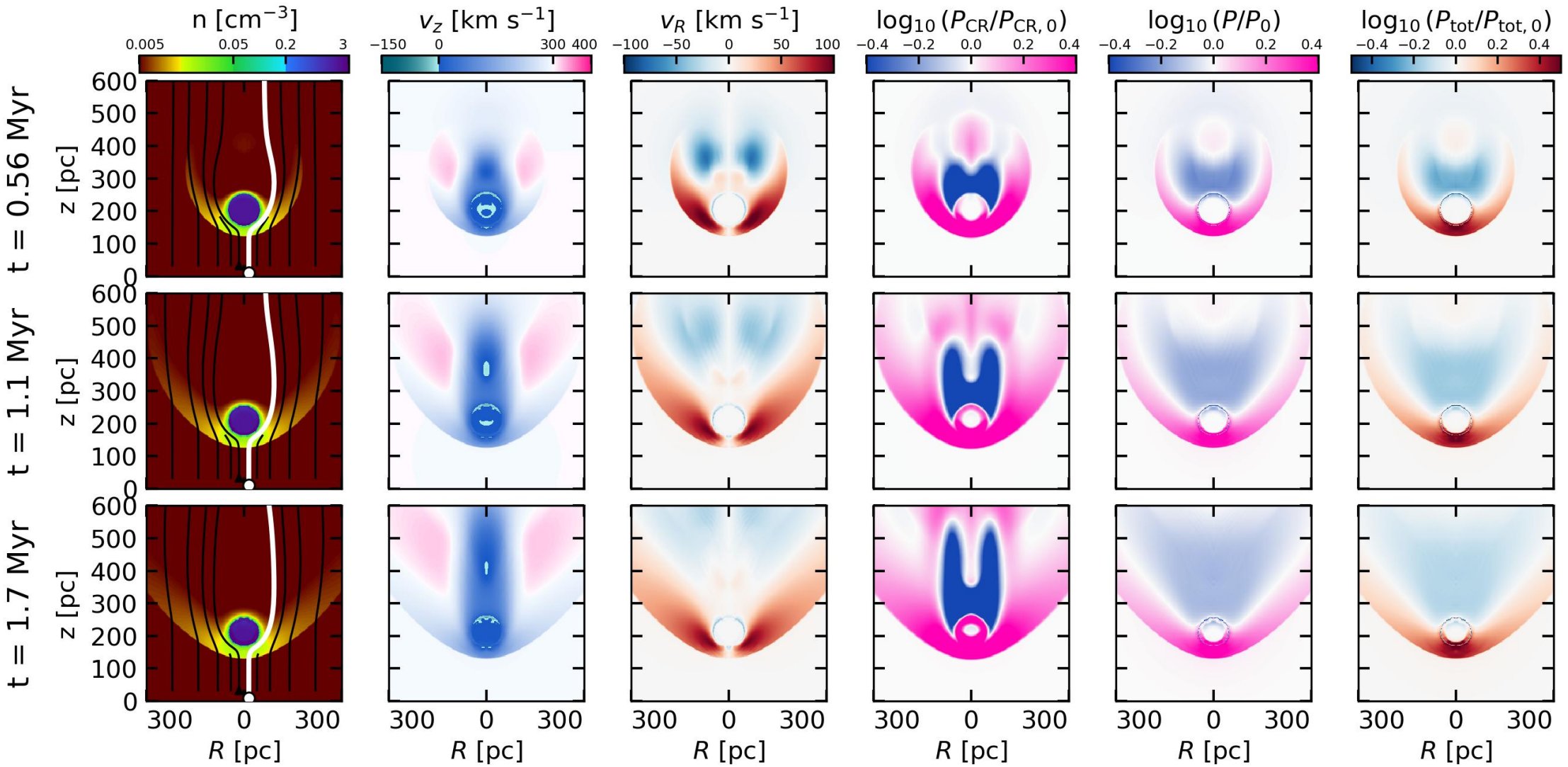
$$\frac{\partial}{\partial t}\begin{pmatrix}\rho\\ \rho\boldsymbol{v}\\ e\end{pmatrix} + \nabla\cdot\begin{pmatrix}\rho\boldsymbol{v}\\ \rho\boldsymbol{v}\boldsymbol{v}+P\mathbf{I}\\ (e+P)\boldsymbol{v}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\ -\nabla P_{\rm CR}\\ -\boldsymbol{v}\cdot\nabla P_{\rm CR} - n\mathcal{L}(n,T) - \nabla\cdot\boldsymbol{q}_{\rm cond}\end{pmatrix}$$

Radiative cooling

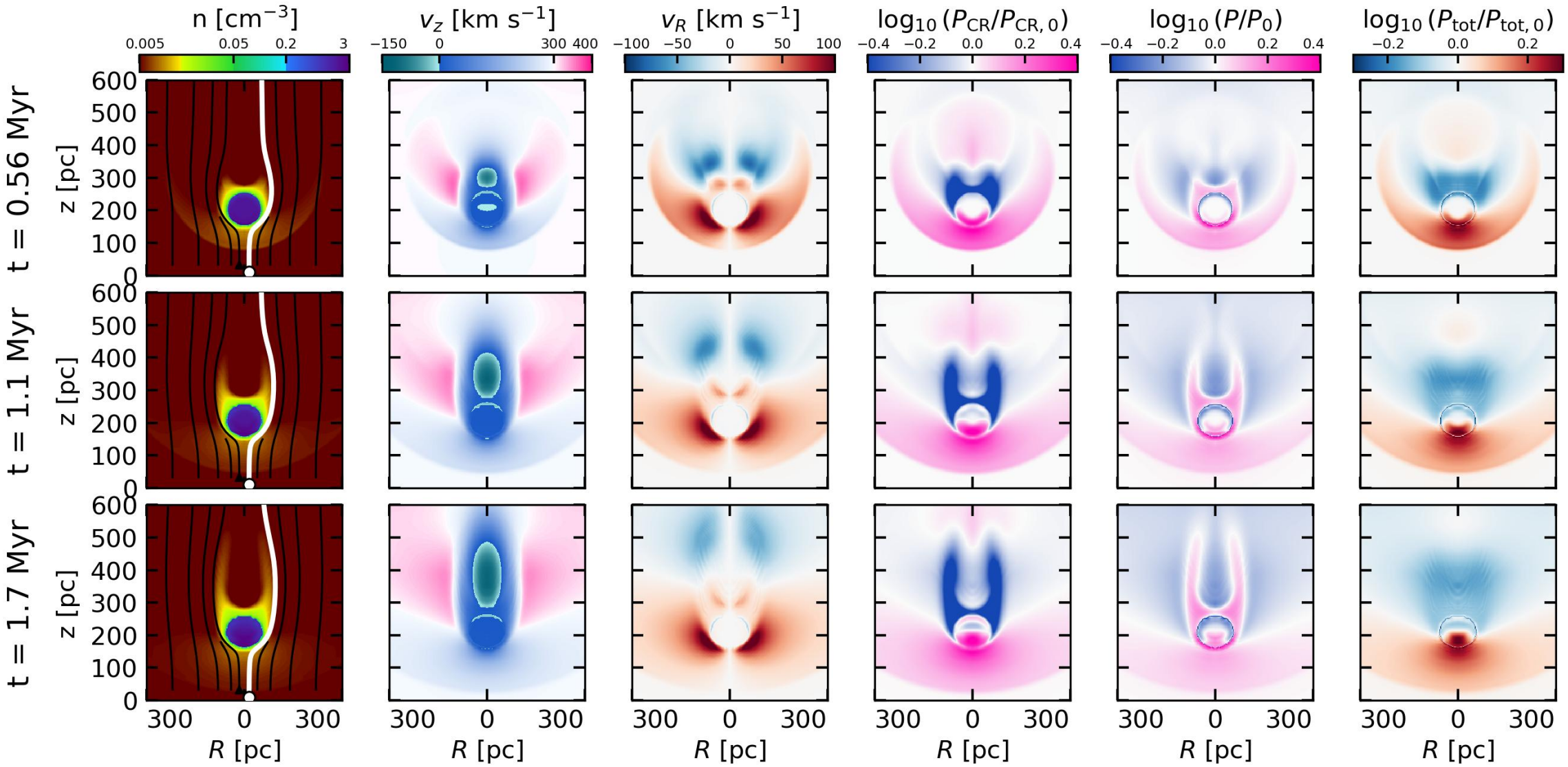
Cosmic-ray pressure

$$P_{\rm CR} = \frac{1}{3}\int p\, v(p)\, \psi_{\rm CR}(p)\, dp$$

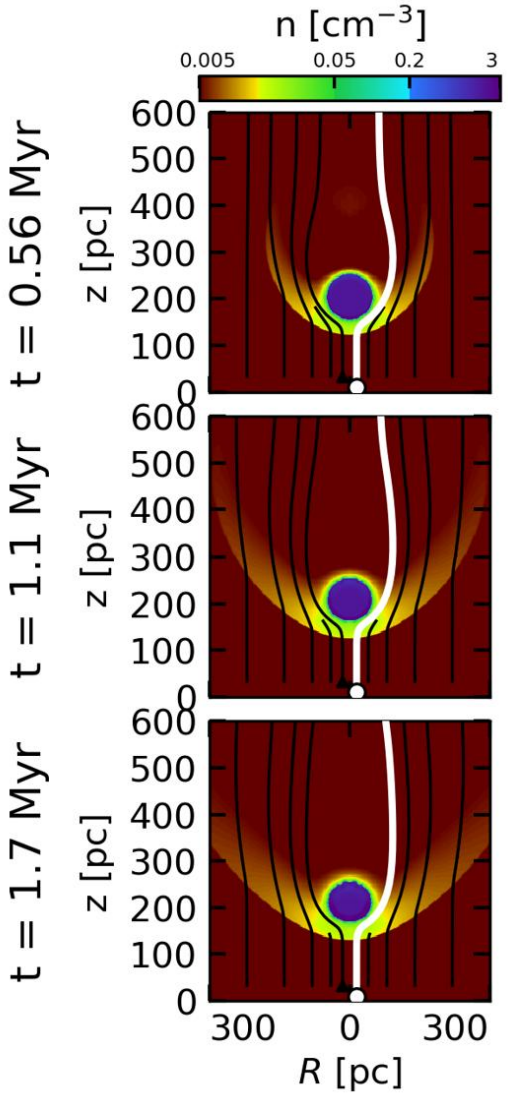
Gas evolution: CR-poor

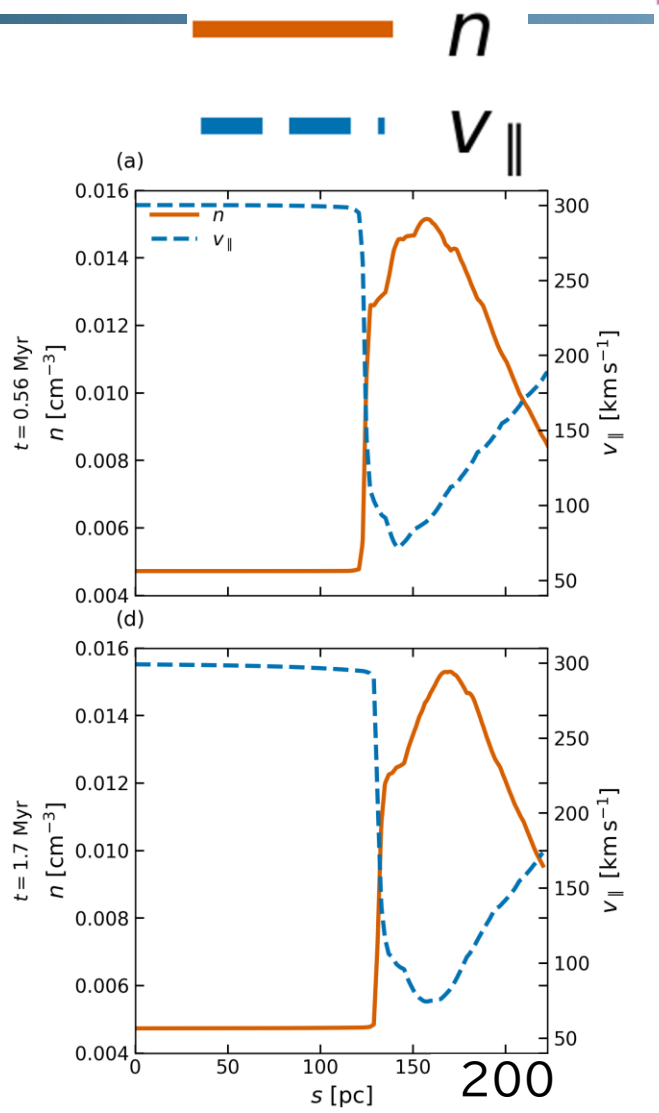


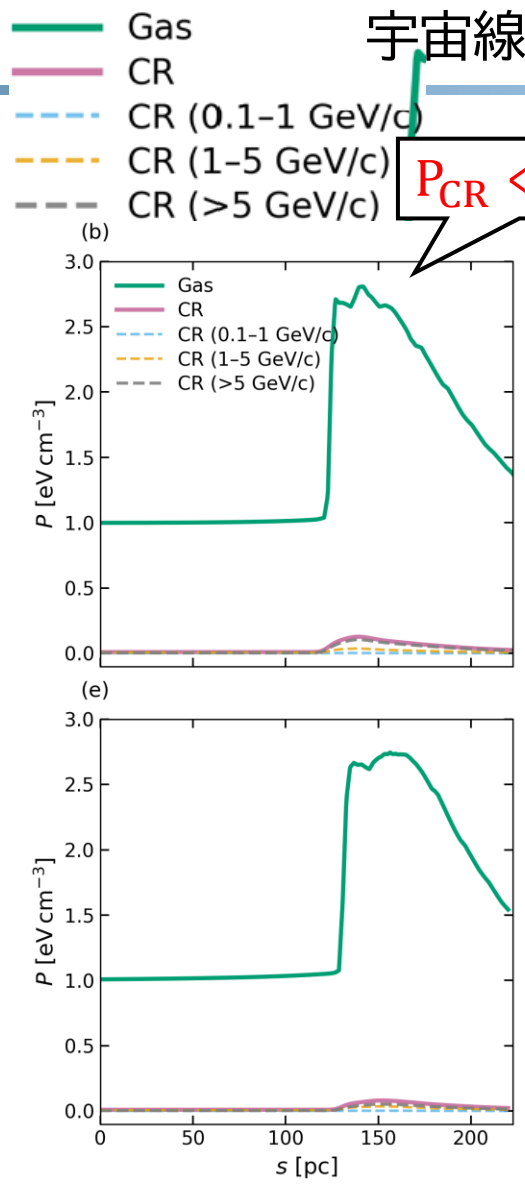
Gas evolution: CR-rich



CR-poor

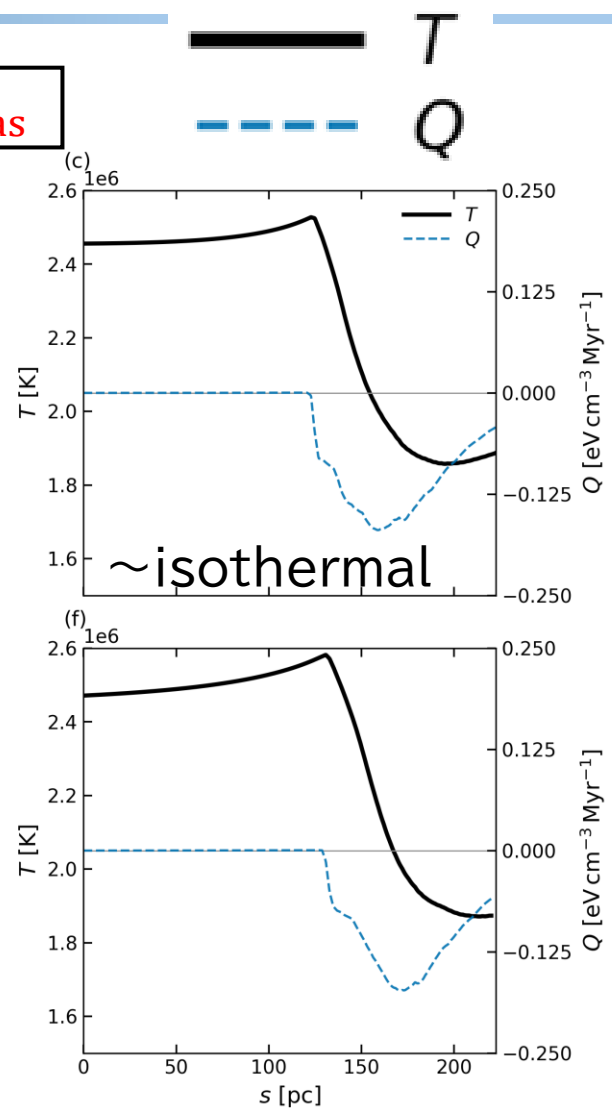




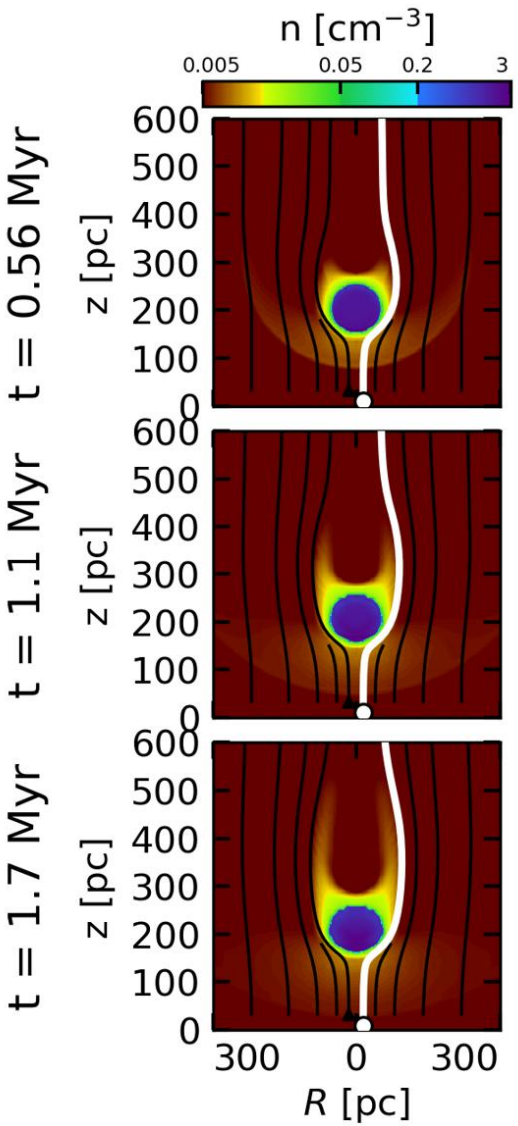


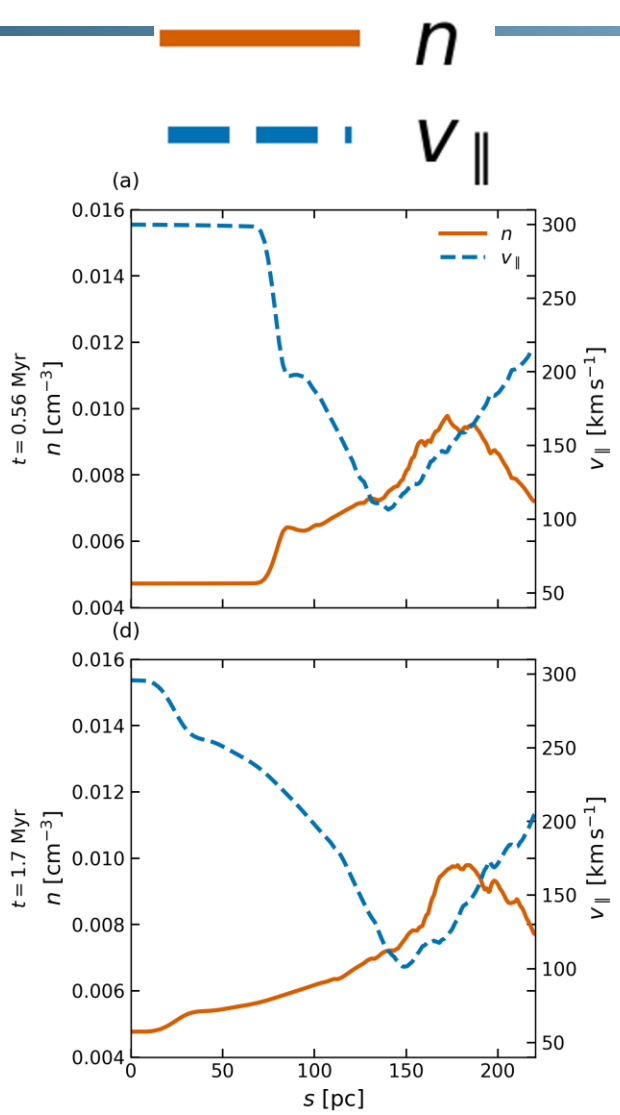
宇宙線は受動的に加速される

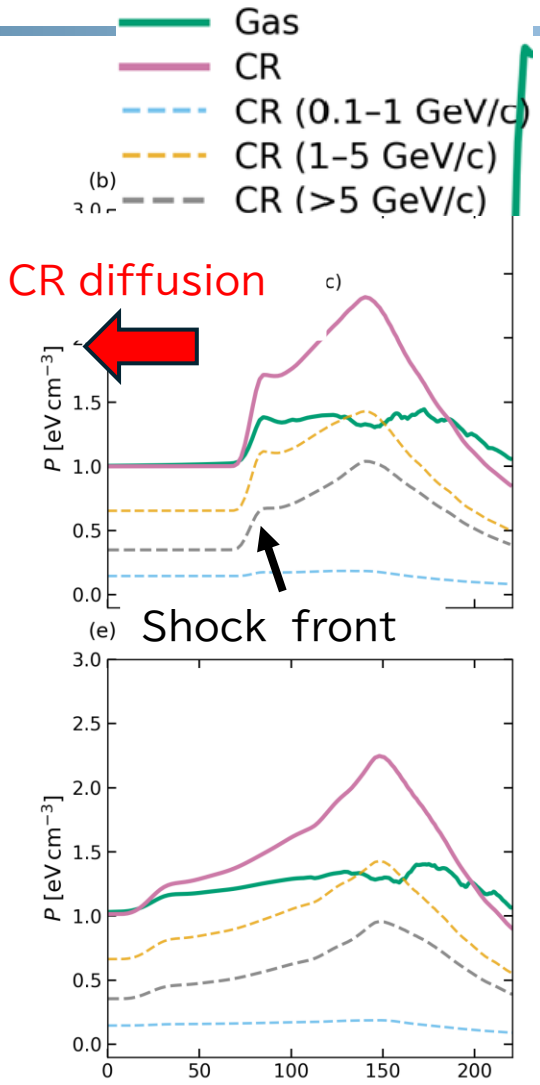
$P_{CR} \ll P_{gas}$

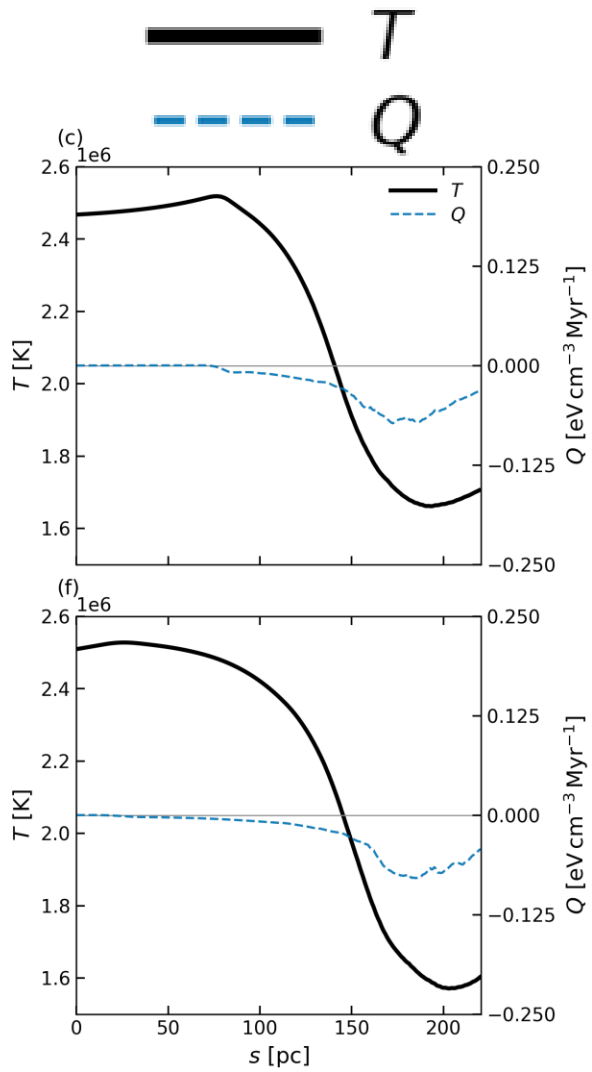


CR-rich



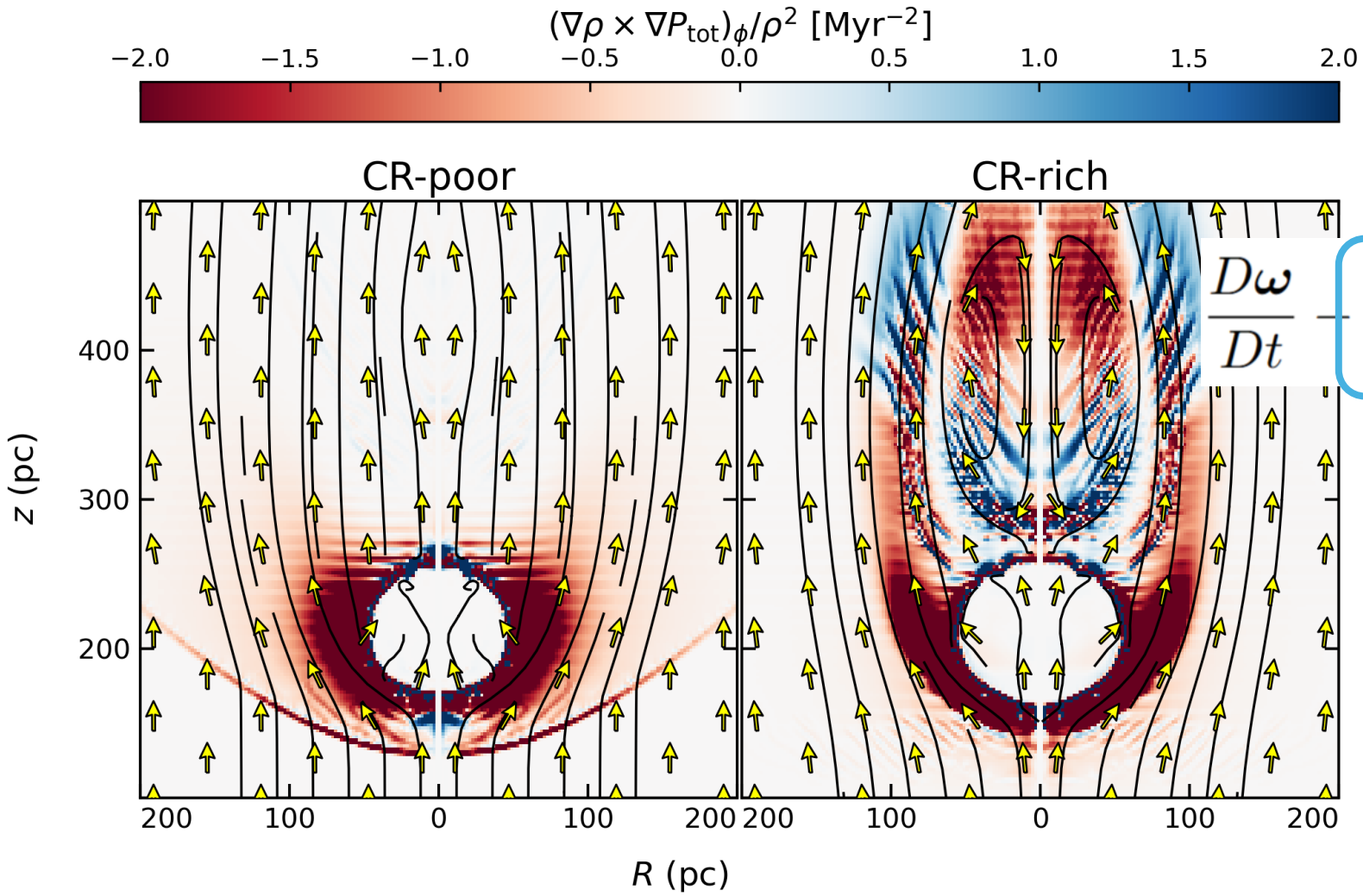






宇宙線が拡散することで
圧縮構造がなだらかになる

Baroclinic term



Vorticity: $\boldsymbol{\omega} \equiv \nabla \times \boldsymbol{v}$

$$\frac{D\boldsymbol{\omega}}{Dt} - \frac{\nabla\rho \times \nabla P_{\rm tot}}{\rho^2} = (\boldsymbol{\omega}\cdot\nabla)\boldsymbol{v} - \boldsymbol{\omega}(\nabla\cdot\boldsymbol{v})$$

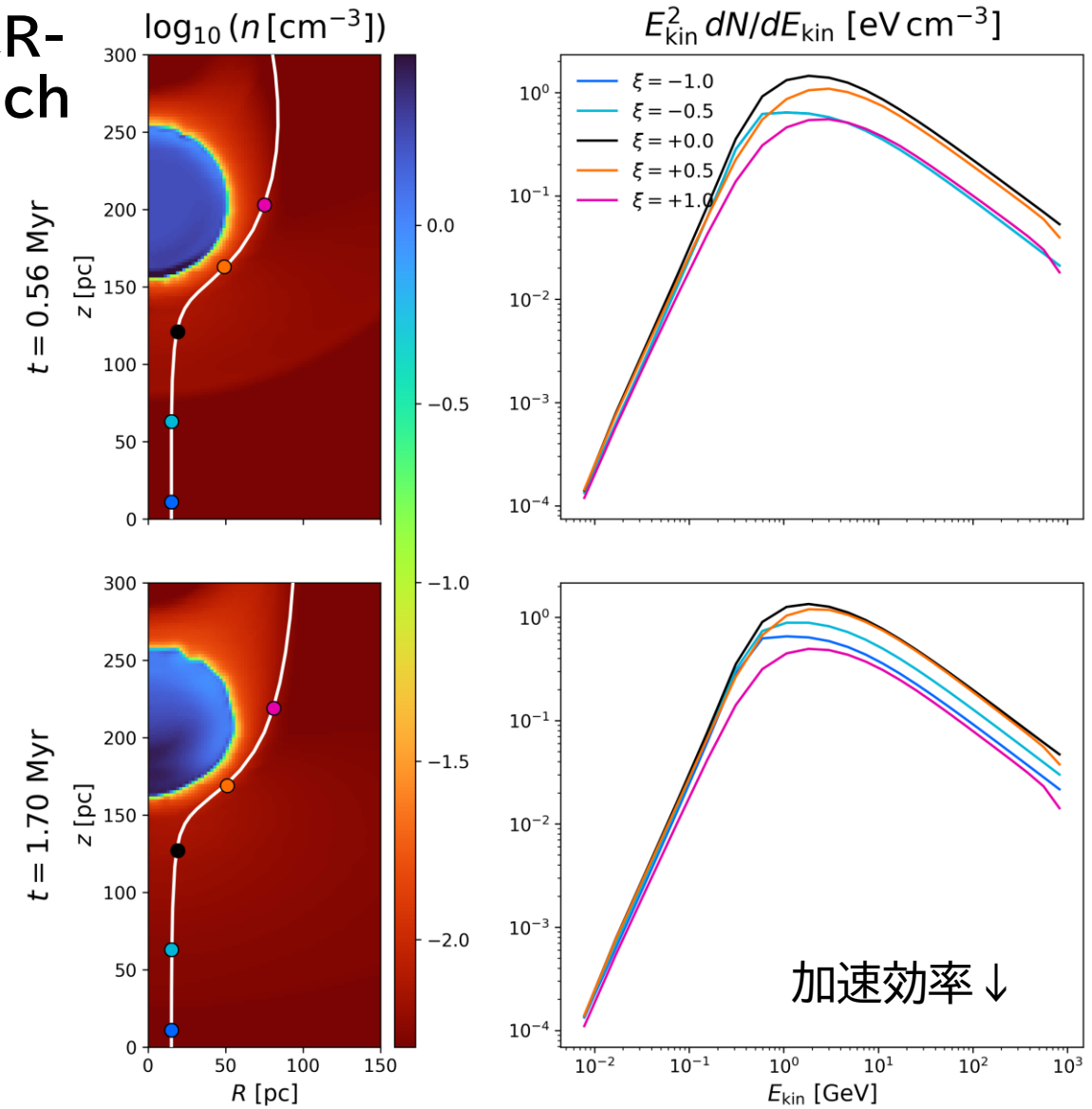
$$P_{\rm tot} = P + P_{\rm CR}$$

宇宙線圧力は
乱流構造も変える

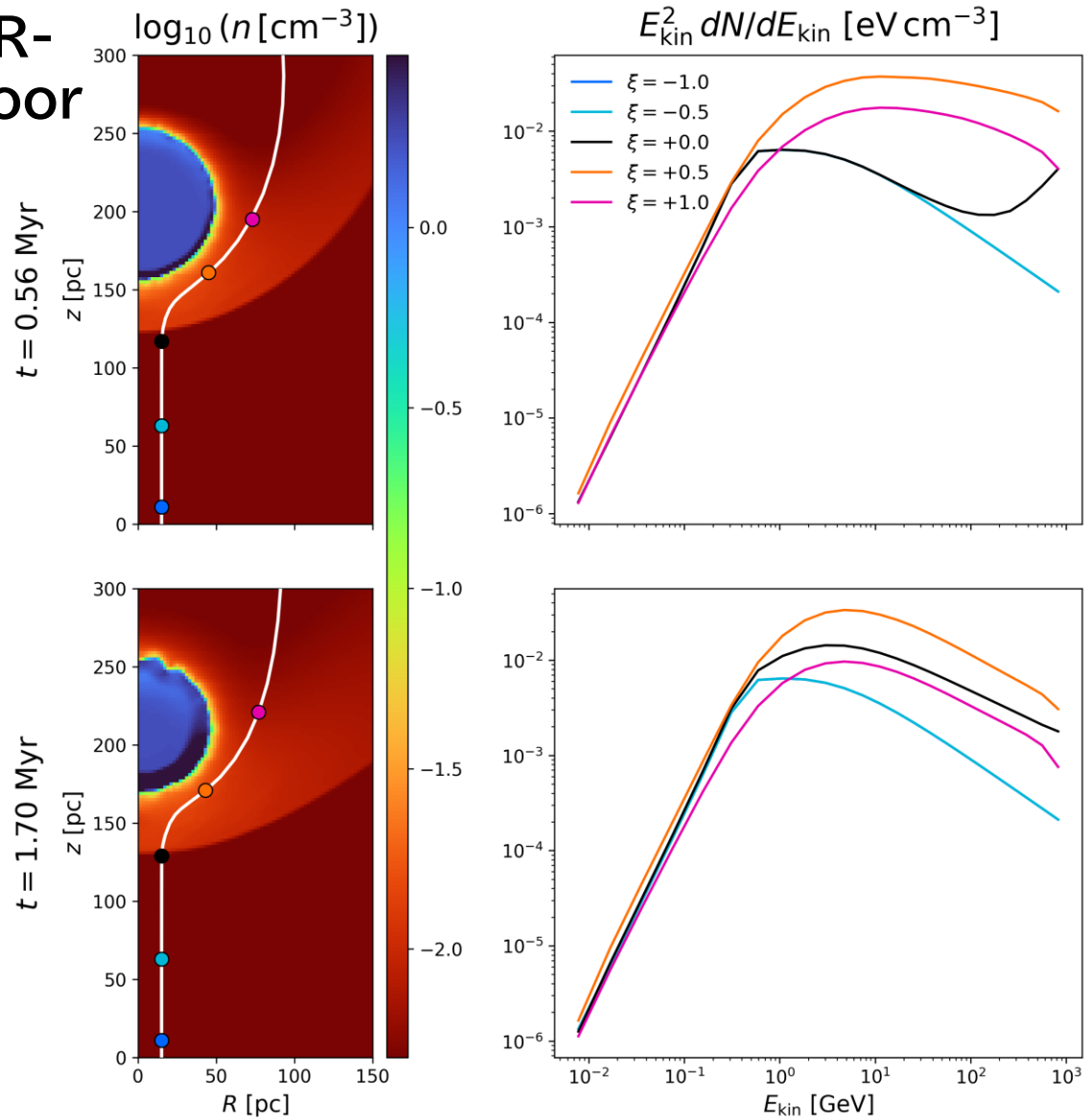
→シア加速に重要

CR spectrum

CR-rich



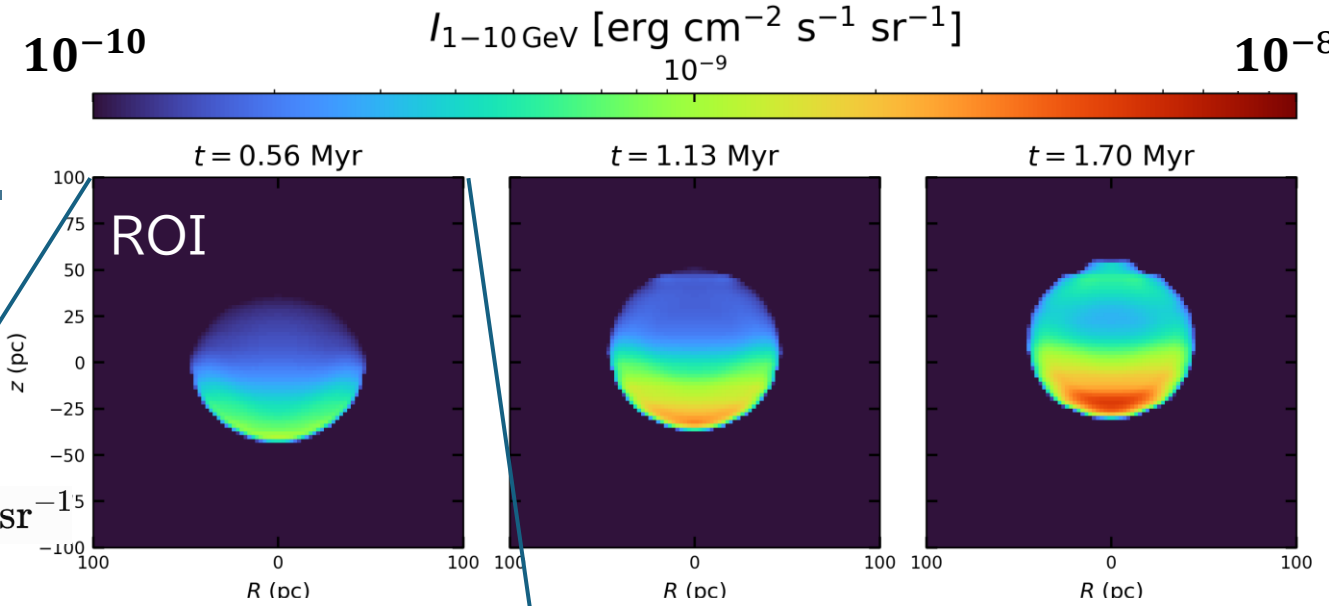
CR-poor



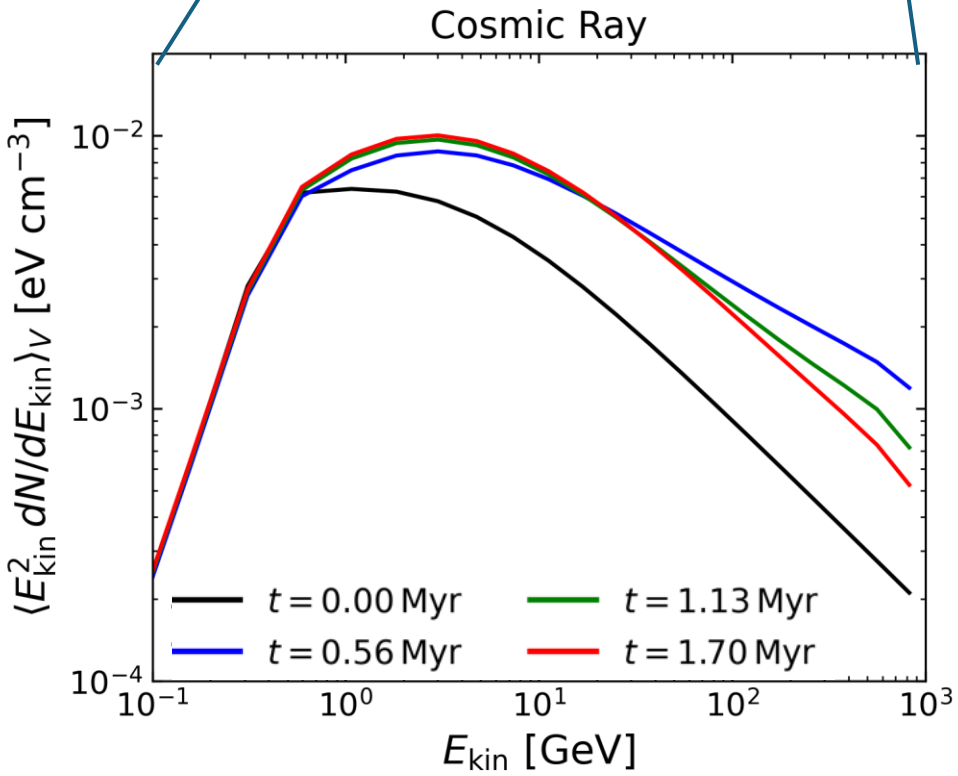
Gamma ray

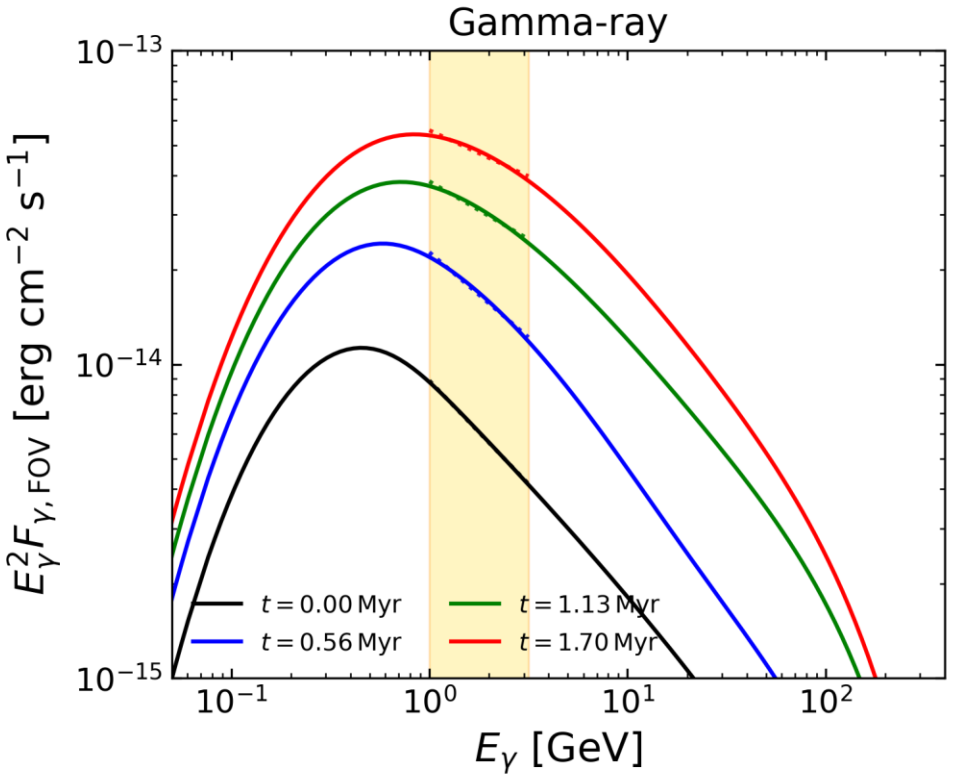
8.5 kpcに置く

1～10 GeVのintensity
10^-9～10^-8 $\mathrm{erg\,cm^{-2}\,s^{-1}\,sr^{-1}}$
数十倍の増光



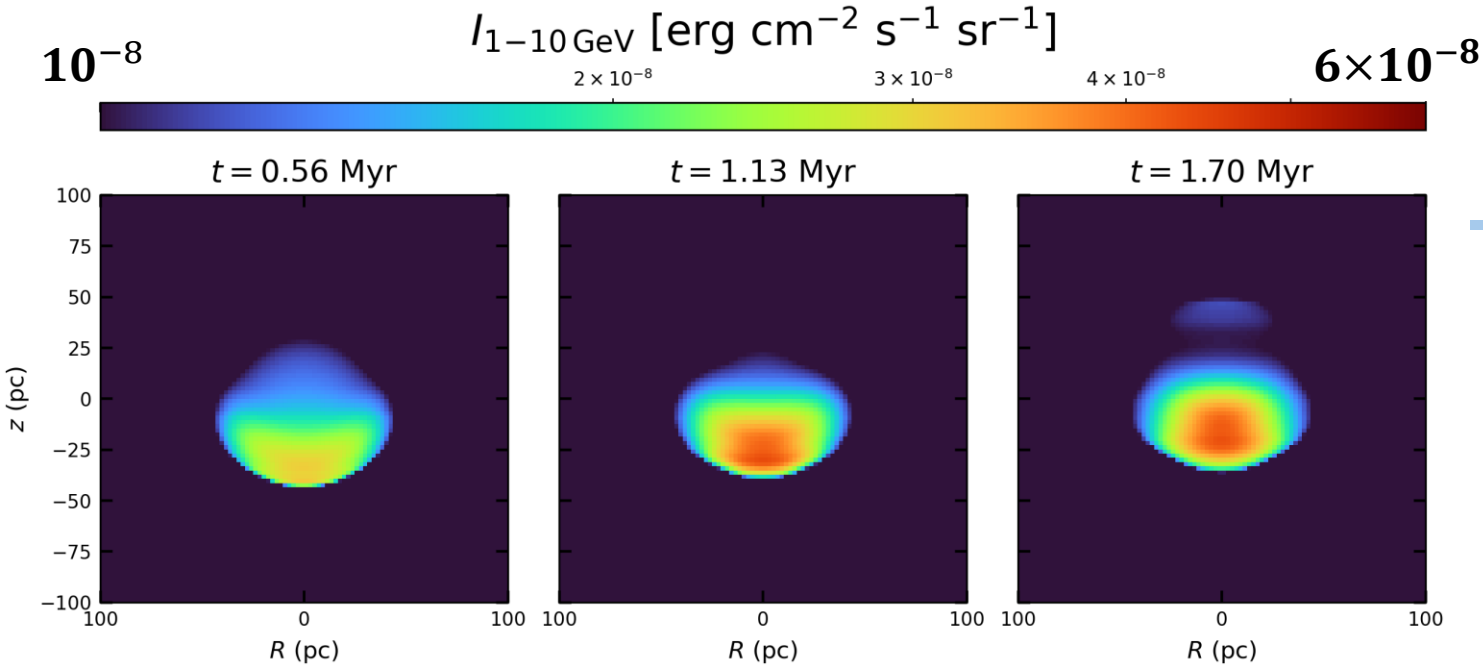
加速された宇宙線が、
クランプの圧縮領域に
拡散して侵入していく

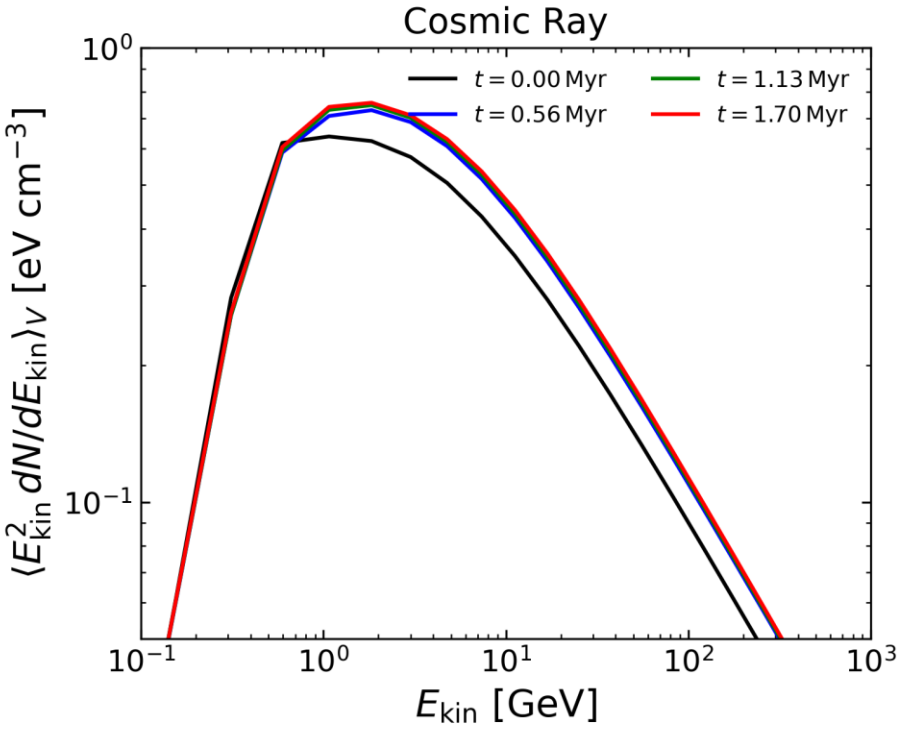


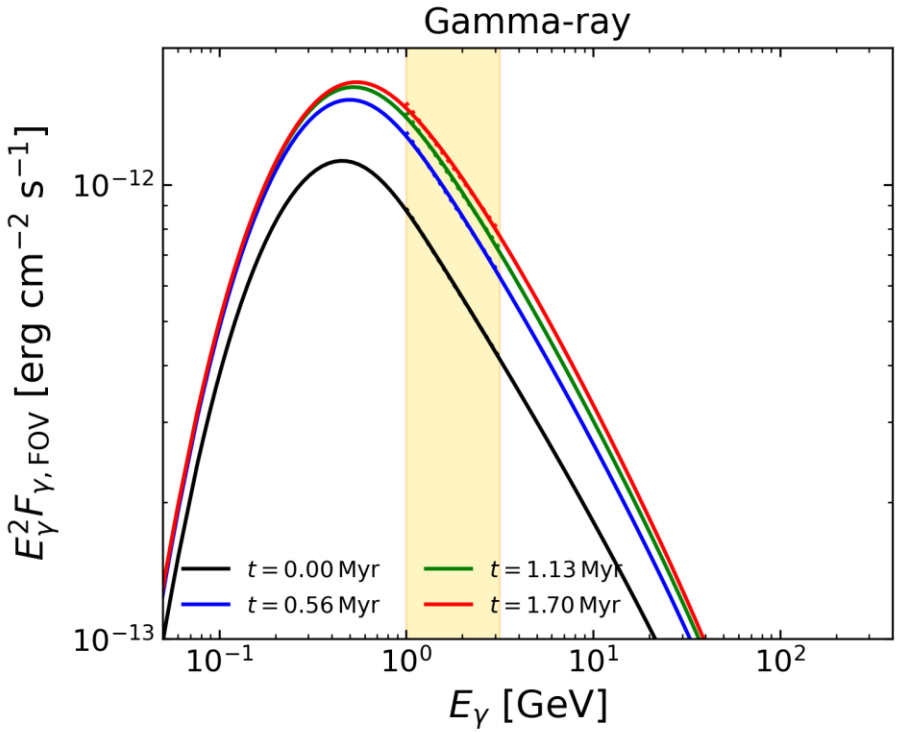


Gamma ray

1～10 GeVのintensity
＞10^-8 $\mathrm{erg\,cm^{-2}\,s^{-1}\,sr^{-1}}$
数倍の増光

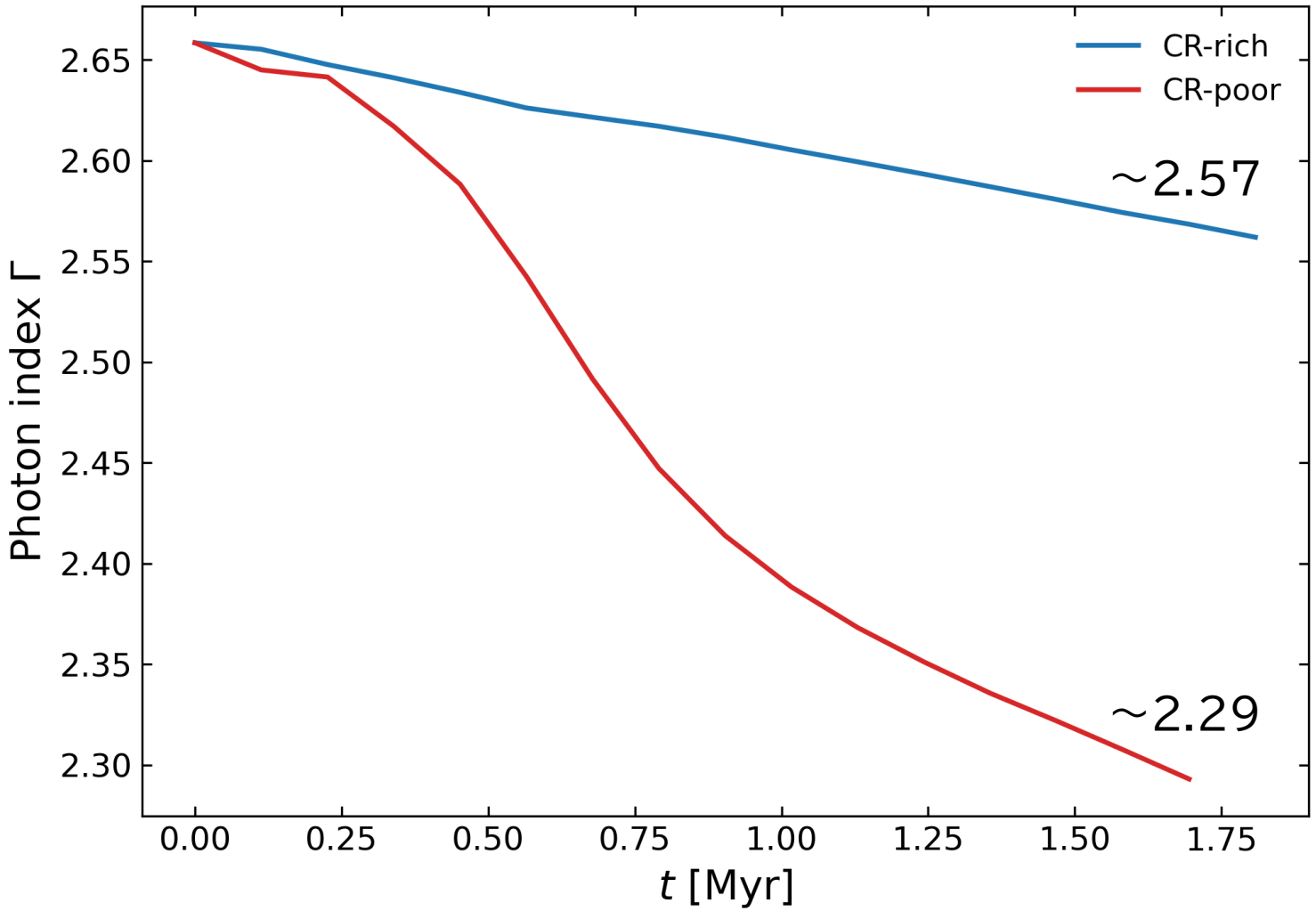






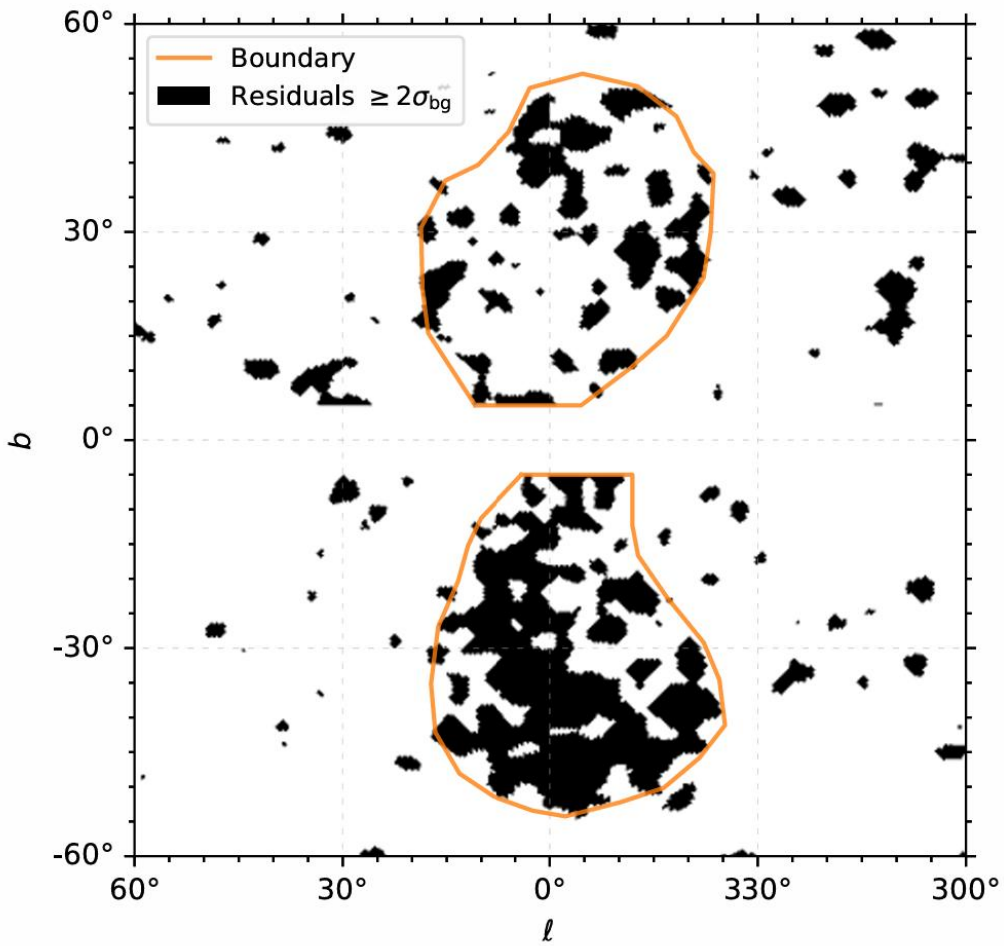
Gamma ray spectrum

1~3.16 GeVのphoton index



Implications for FBs (1) : surface brightness

DAMPE collaboration 2025



Clumpy gamma ray emission?

- 今回計算したクランプの質量は比較的重い～2×10^4 $M_\odot$
- クランプの質量は 約a few 10^3 $M_\odot$(半径半分)ほど

covering factorは0.1～0.2(r～25 pc)程度

I_γ [10^{-9} erg cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}]

FB: ~ 1 $\quad \langle I_{\rm FB} \rangle \sim f_{\rm cover} \left(\frac{r_{\rm cl}}{50\,{\rm pc}} \right) I_{\rm clump,50}$

CR-poor: 1–10

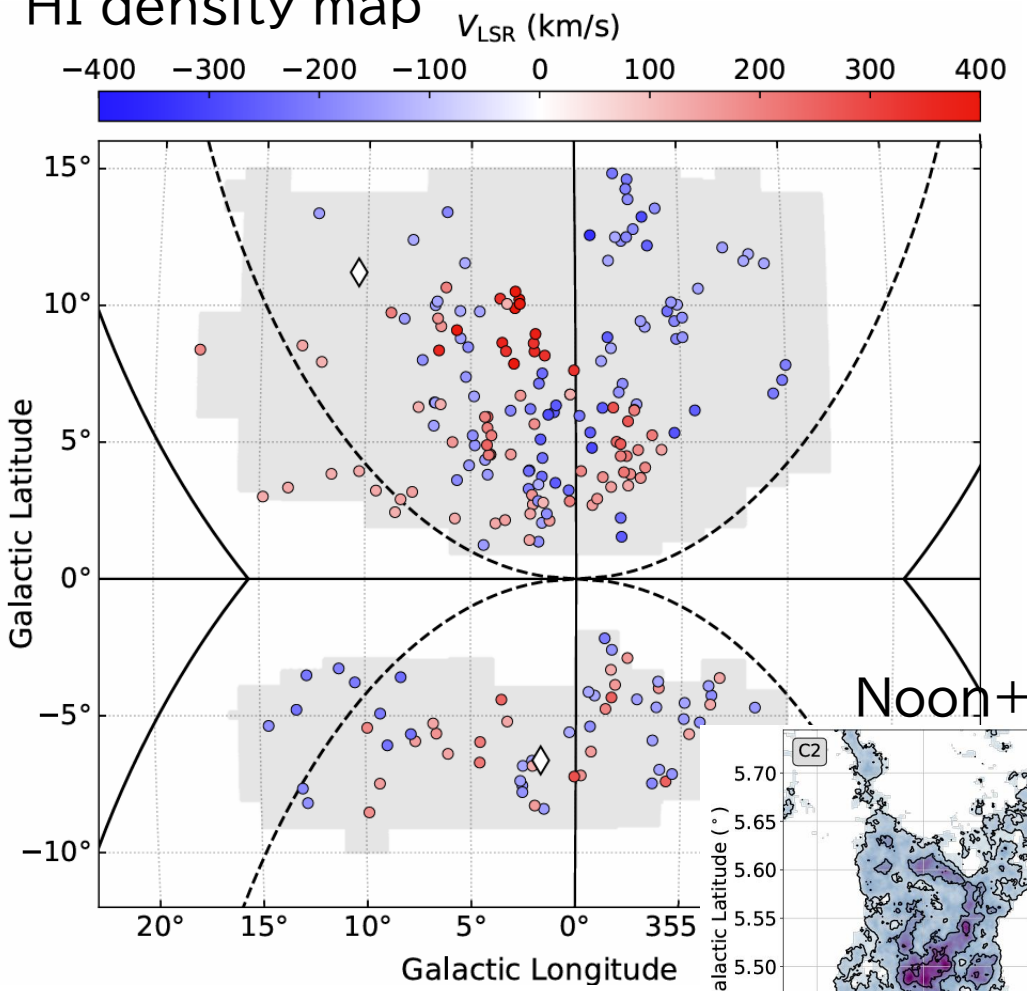
(半径 50 pcの場合)

CR-rich: $\gtrsim 10$

現状、角度分解能とforeground contaminationの問題がある

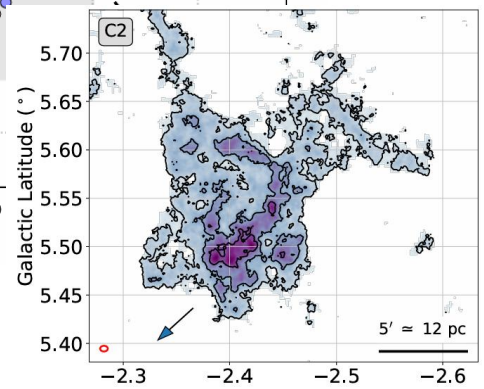
Implications for FBs (2) : SFR

HI density map

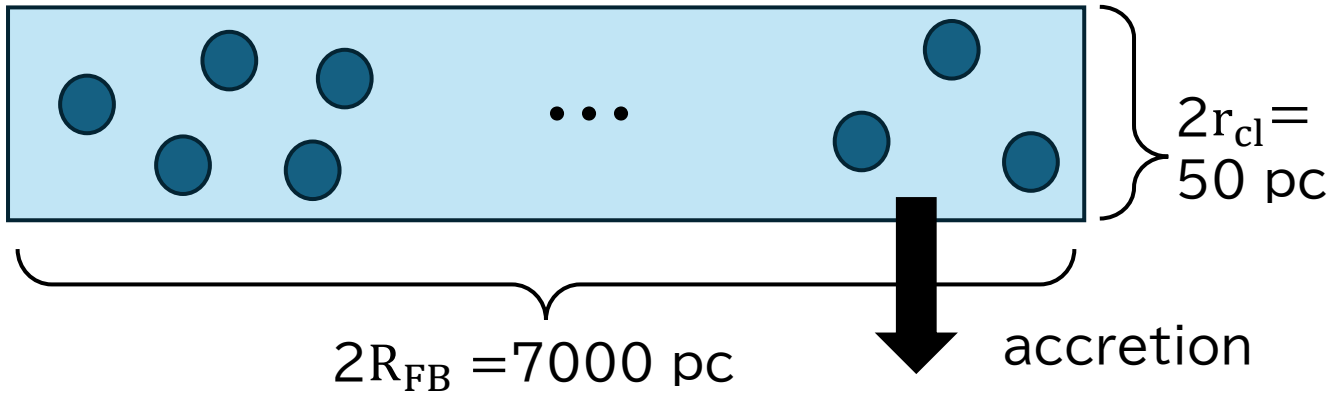


Lockman+2026

Noon+2023



$$t_{\rm cross} = \frac{2r_{\rm cl}}{v_{\rm cl}} \qquad N = \frac{\dot{M} t_{\rm cross}}{M_{\rm cl}} = \frac{2\dot{M} r_{\rm cl}}{M_{\rm cl} v_{\rm cl}}$$



- $\dot{M}$~1 $M_\odot$/yrを仮定すると、

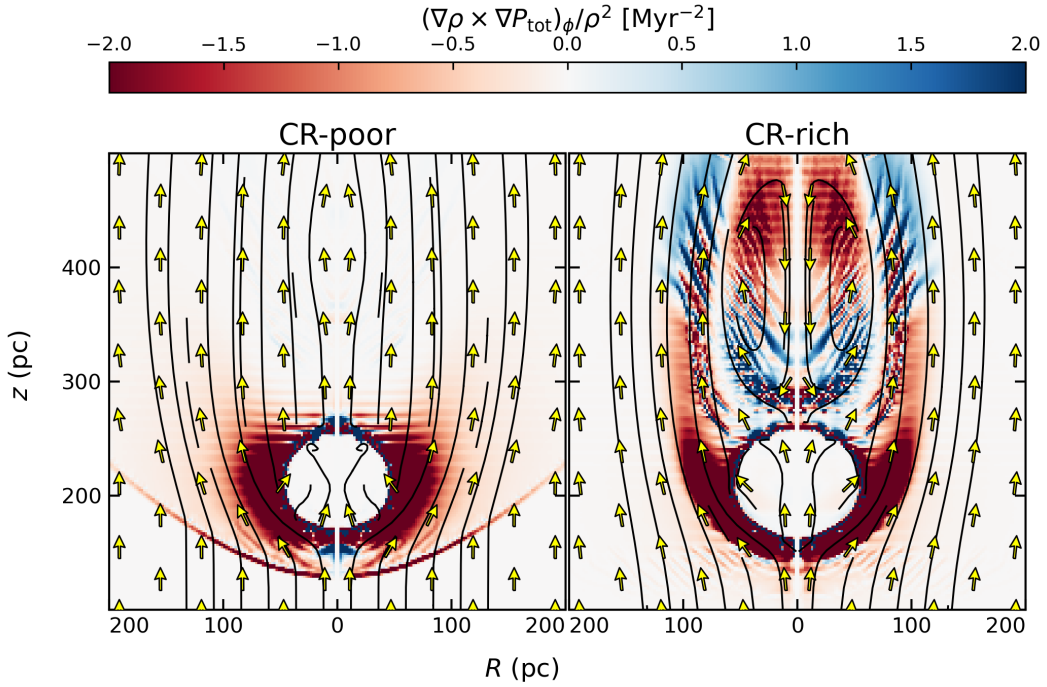
$$f_{\rm cover} = \frac{N \pi r_{\rm cl}^2}{4 R_{\rm FB} r_{\rm cl}}$$

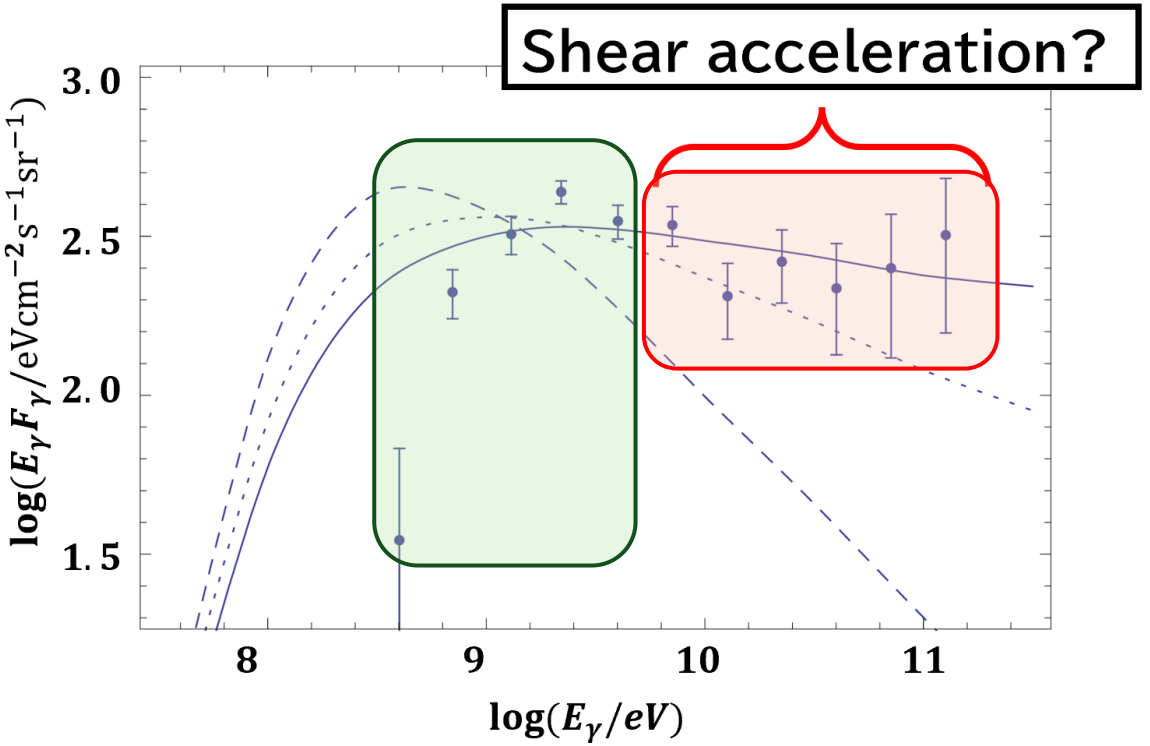
$R_{\rm FB} = 3.5$ kpc、$v_{\rm cl} = 300$ km/s

f_{cover}~0.3

Summary

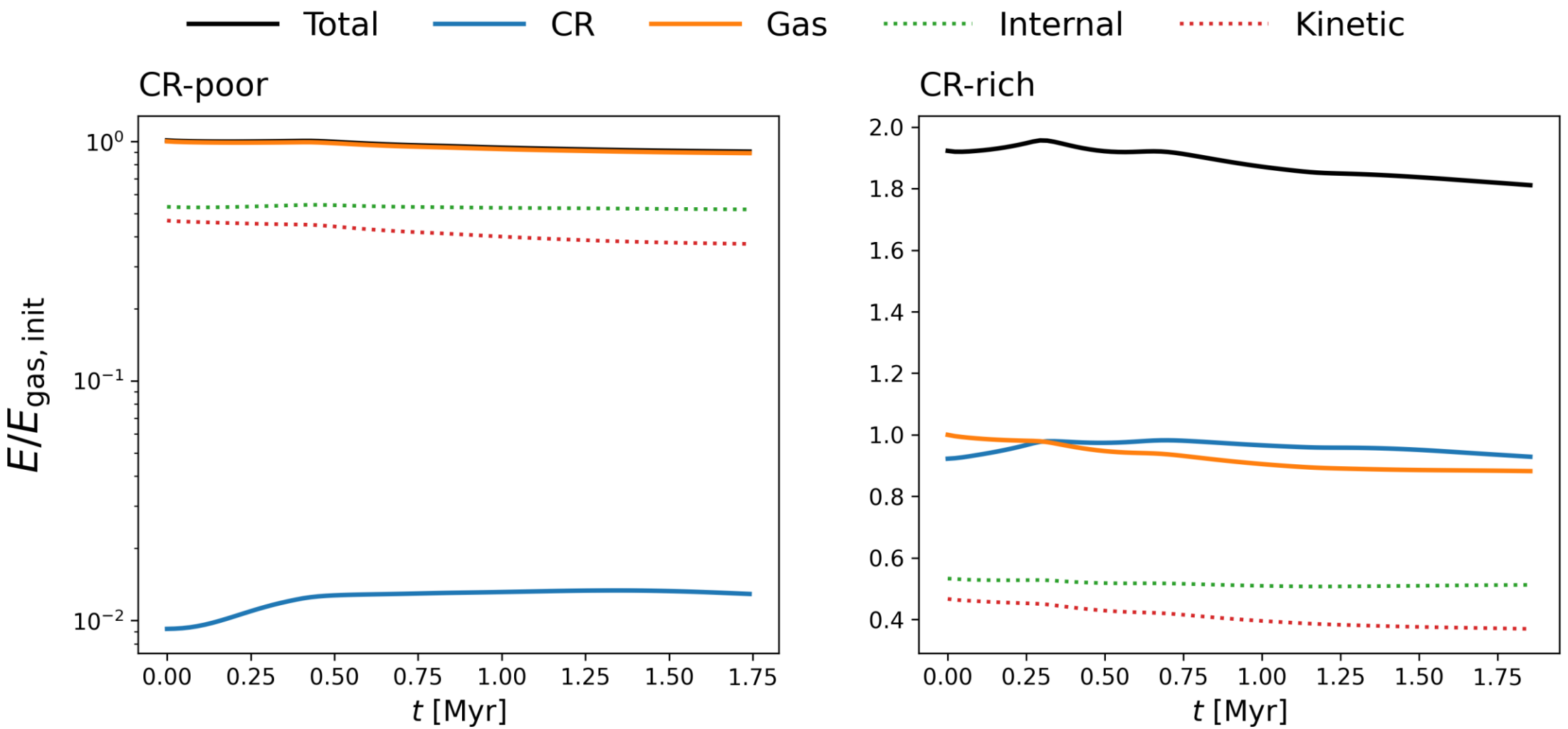
1. 低温ガスクランプと高温銀河風を仮定した局所計算を行った。
2. 宇宙線が薄い場合は、ガンマ線強度が数十倍に増光し、GeV付近のガンマ線フラックスがハードになった（～2.66 → <2.3）
3. 宇宙線が濃い場合は、ガンマ線強度の増光は2,3倍に制限され、0.1程度のindex変化
4. いずれのケースでもsurface brightnessは説明し得る

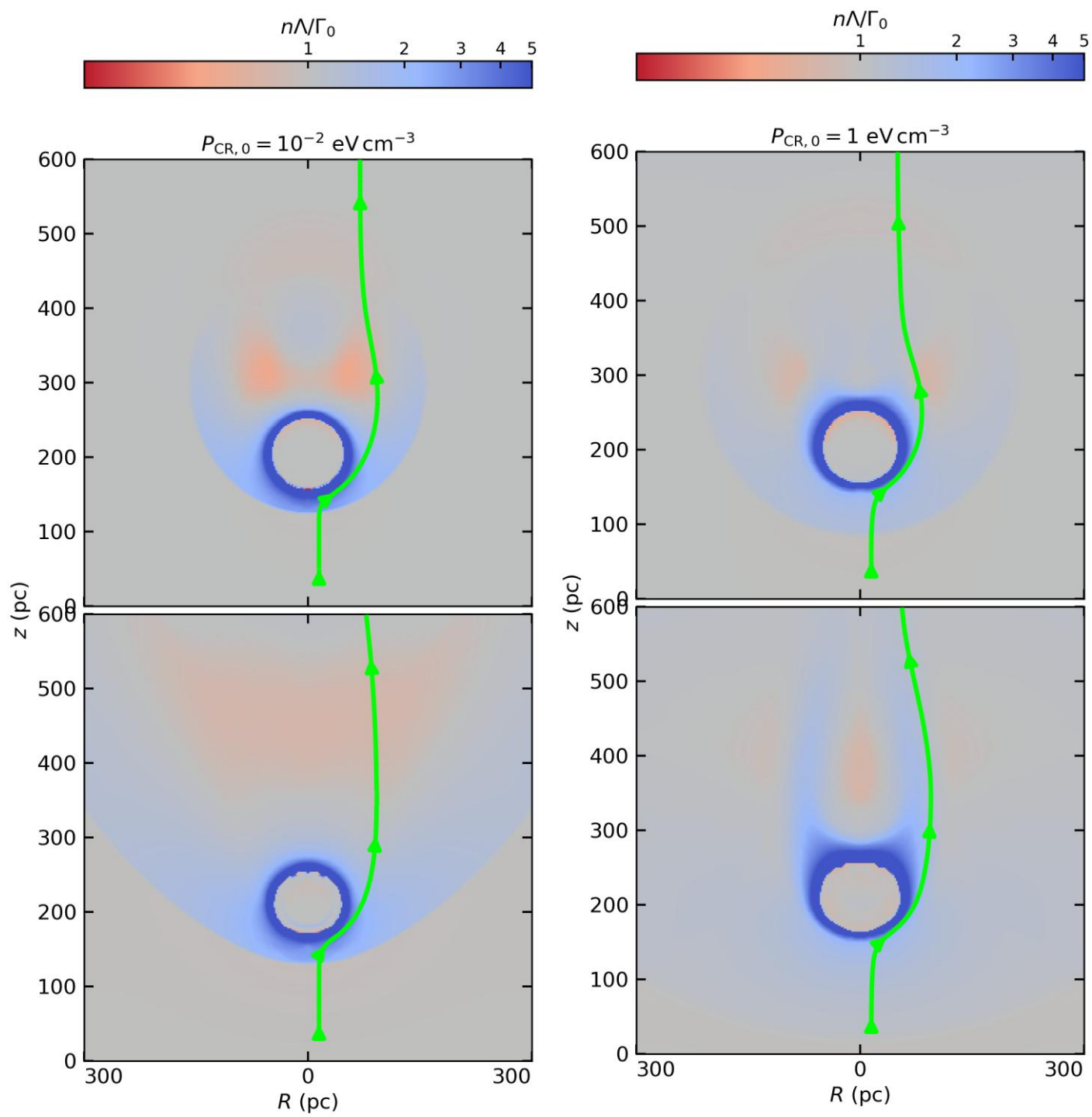




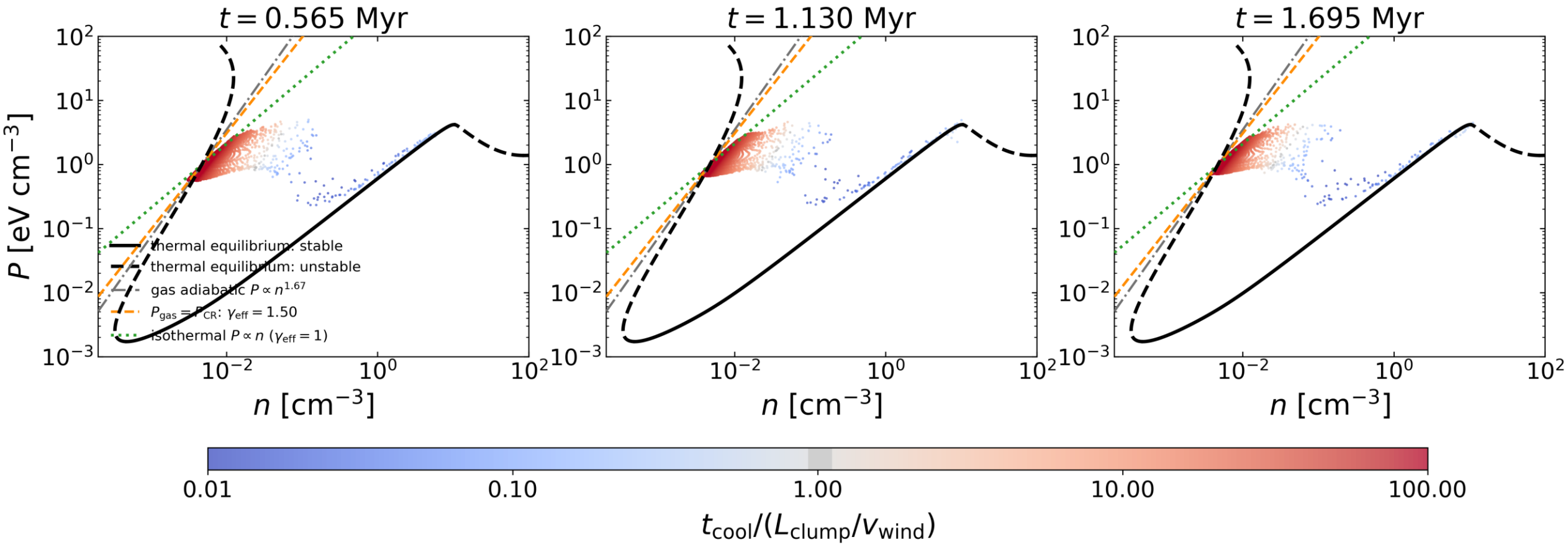
Appendix

Energy exchange

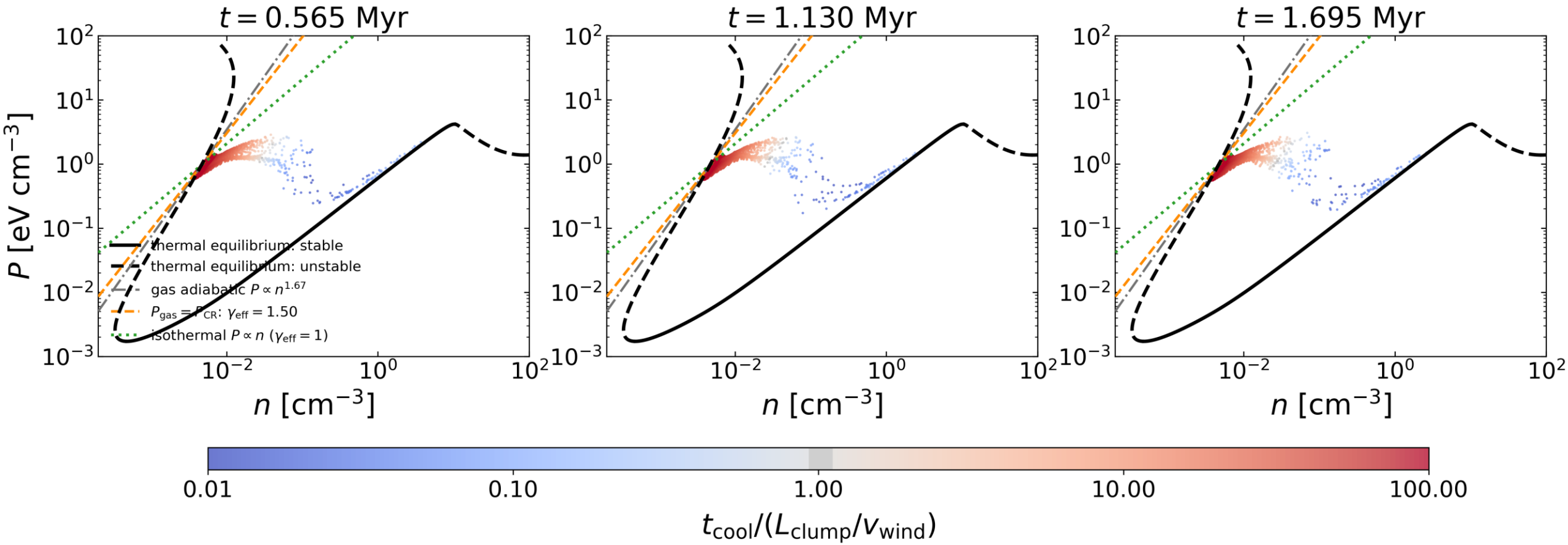



$n\Lambda/\Gamma_0$
1
2
3
4
5
$P_{\mathrm{CR},0} = 10^{-2}$ eV cm^{-3}
$P_{\mathrm{CR},0} = 1$ eV cm^{-3}
600
500
400
300
200
100
0
z (pc)
300
0
300
R (pc)

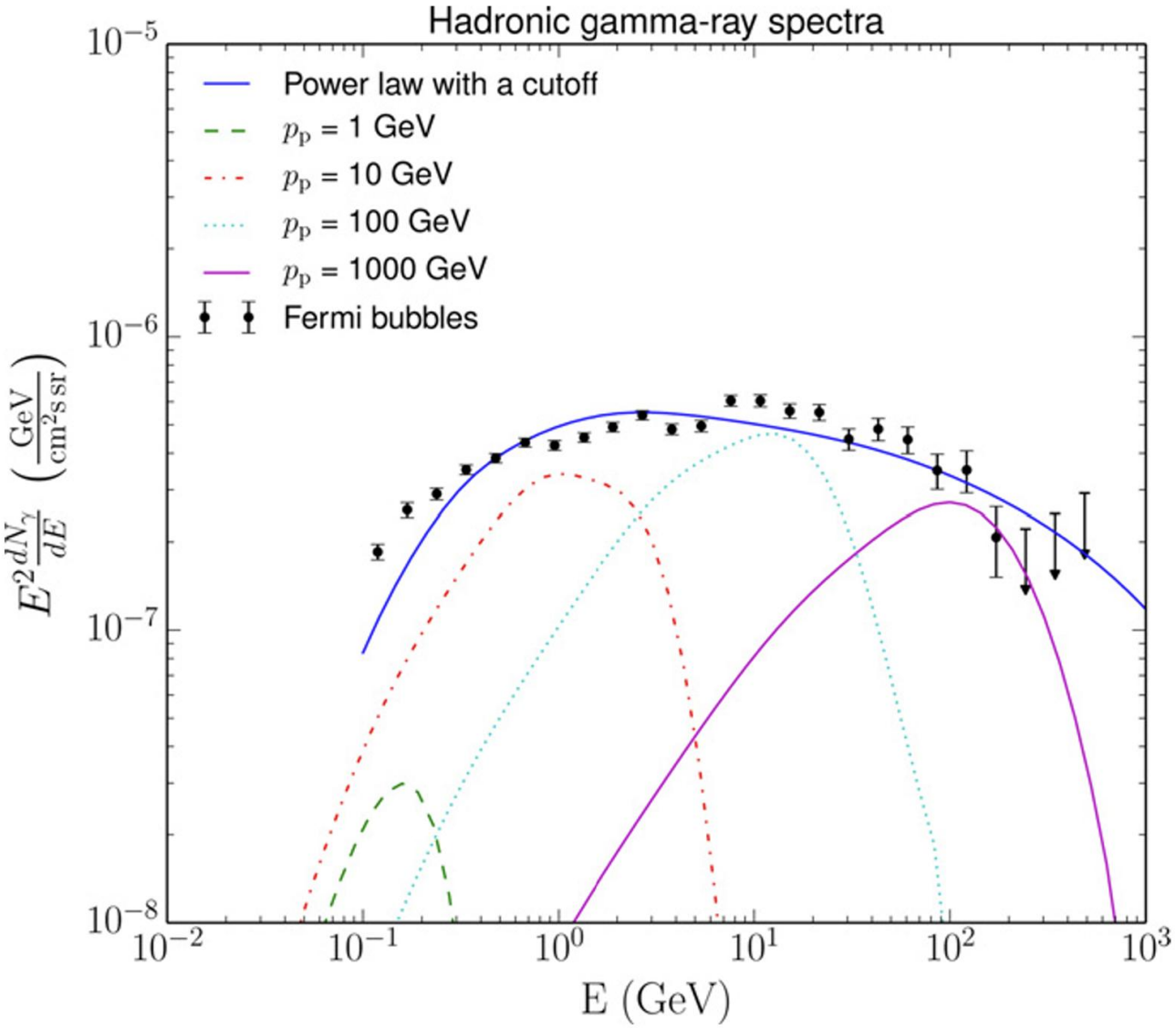
CR-poor


$t = 0.565$ Myr
$t = 1.130$ Myr
$t = 1.695$ Myr
P [eV cm^{-3}]
n [cm^{-3}]
thermal equilibrium: stable
thermal equilibrium: unstable
gas adiabatic $P \propto n^{1.67}$
$P_{gas} = P_{CR}$: $\gamma_{eff} = 1.50$
isothermal $P \propto n$ ($\gamma_{eff} = 1$)
0.01
0.10
1.00
10.00
100.00
$t_{cool}/(L_{clump}/v_{wind})$

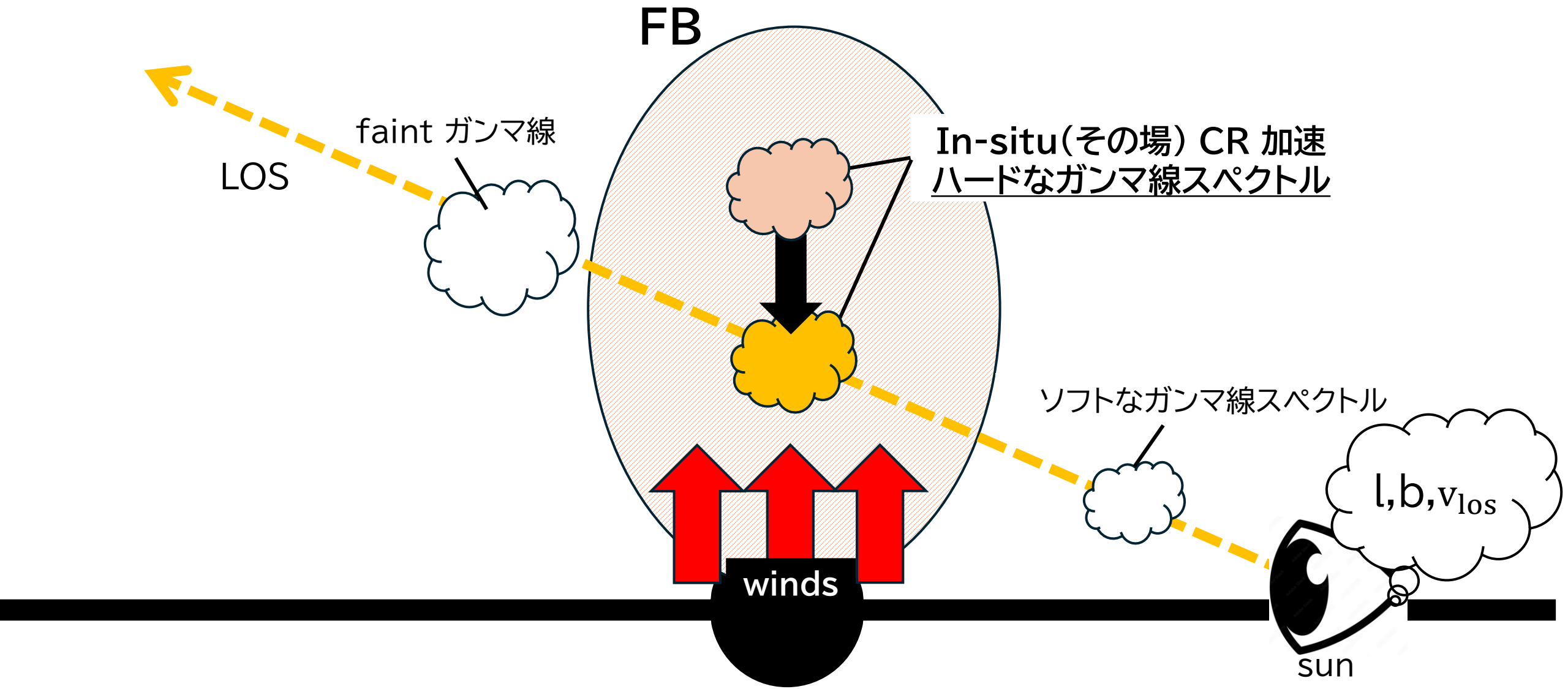
CR-rich


$t = 0.565$ Myr
$t = 1.130$ Myr
$t = 1.695$ Myr
P [eV cm^{-3}]
n [cm^{-3}]
thermal equilibrium: stable
thermal equilibrium: unstable
gas adiabatic $P \propto n^{1.67}$
$P_{\rm gas} = P_{\rm CR}$: $\gamma_{\rm eff} = 1.50$
isothermal $P \propto n$ ($\gamma_{\rm eff} = 1$)
0.01
0.10
1.00
10.00
100.00
$t_{\rm cool}/(L_{\rm clump}/v_{\rm wind})$

Ackermann+2014

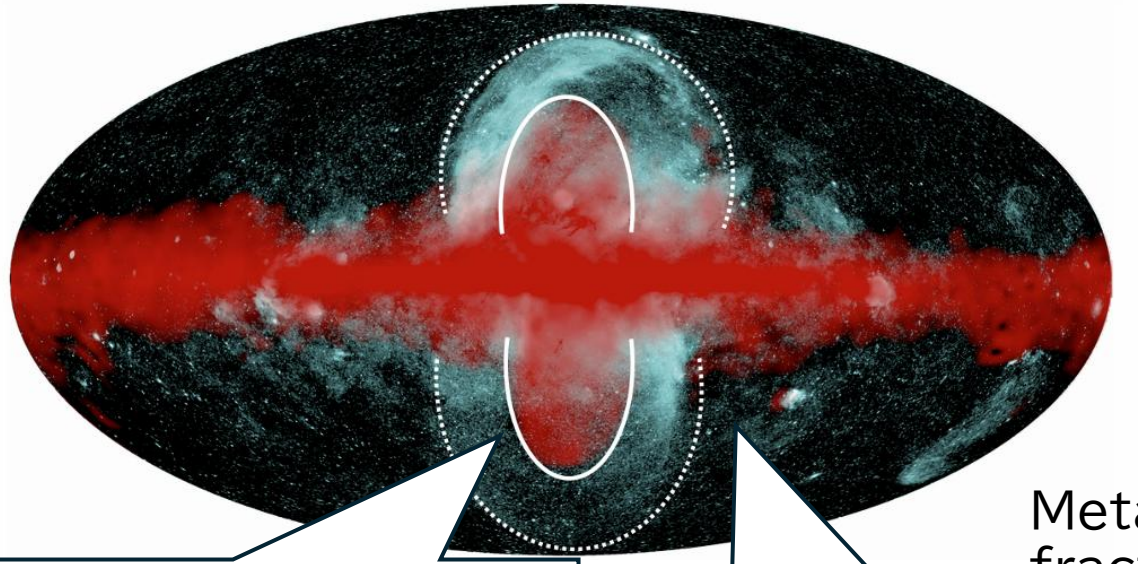


Potential New Diagnostic of 3D Position of MCs



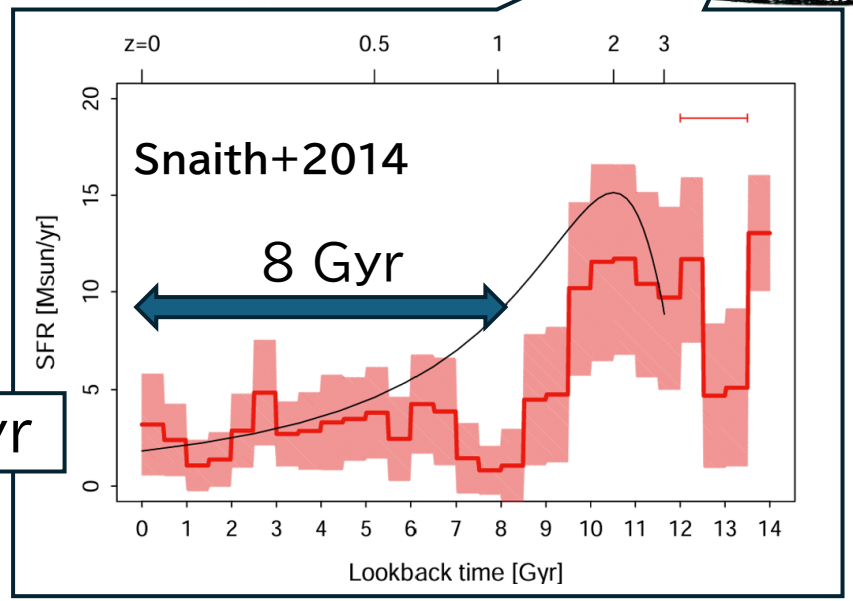
Mass & Metal fraction

円盤におけるガスの収支が星形成を決める



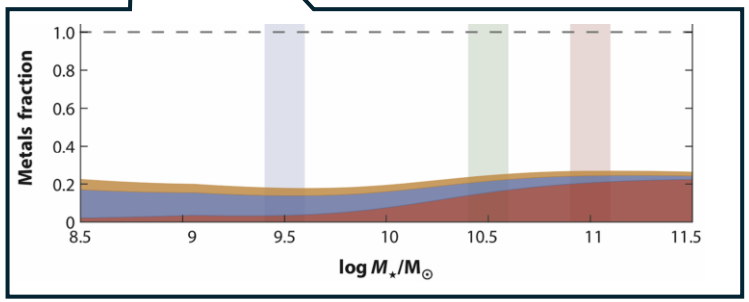
Gas accretion
↓
SNR
↓
Metal pollution

SFR



$3M_{\odot}/yr$

Metal fraction

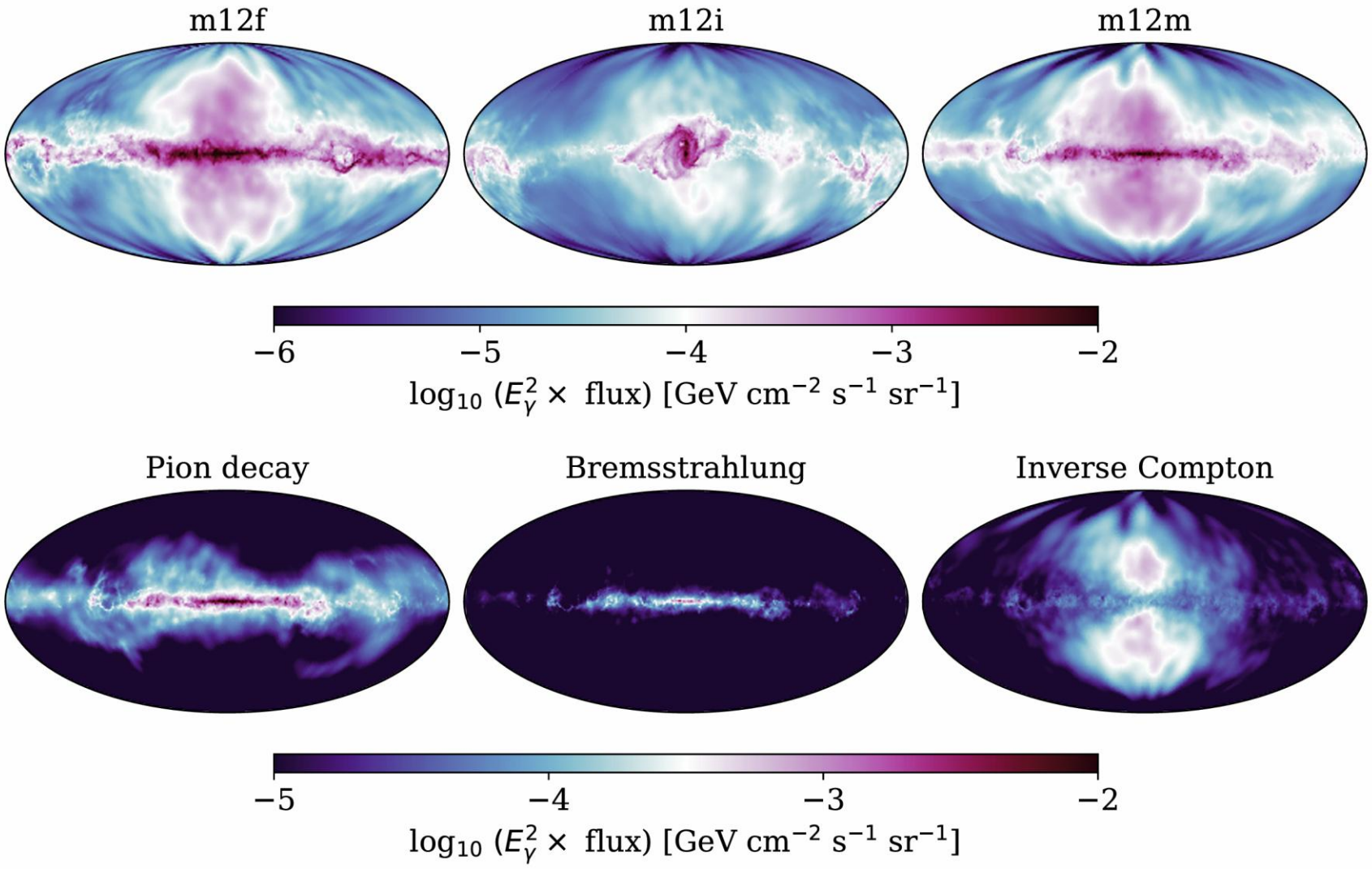


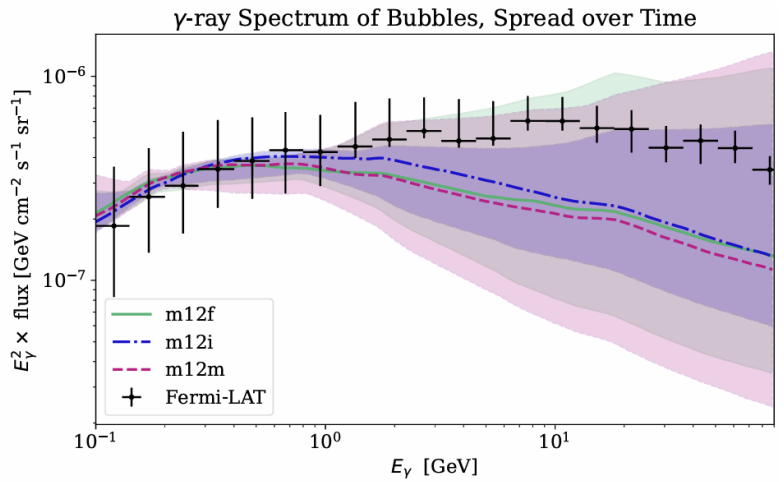
Tumlinson+2017

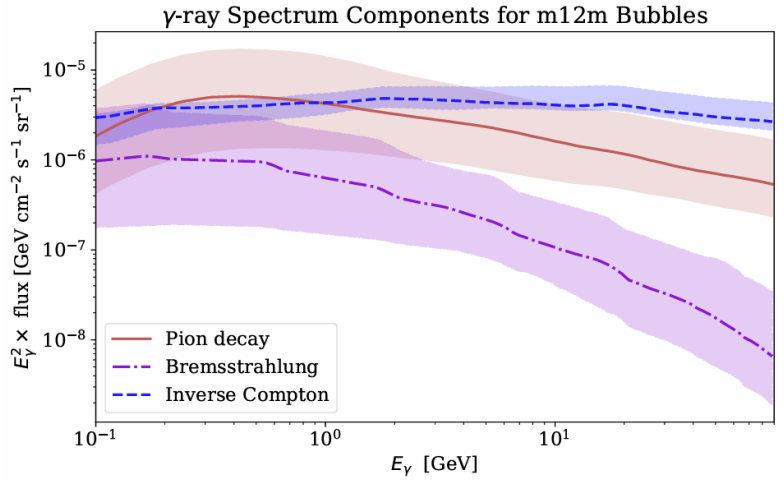
mass fluxを与える成分が必要

Shimoda & Inutsuka & Nagashima 2024

Sands et al. 2025

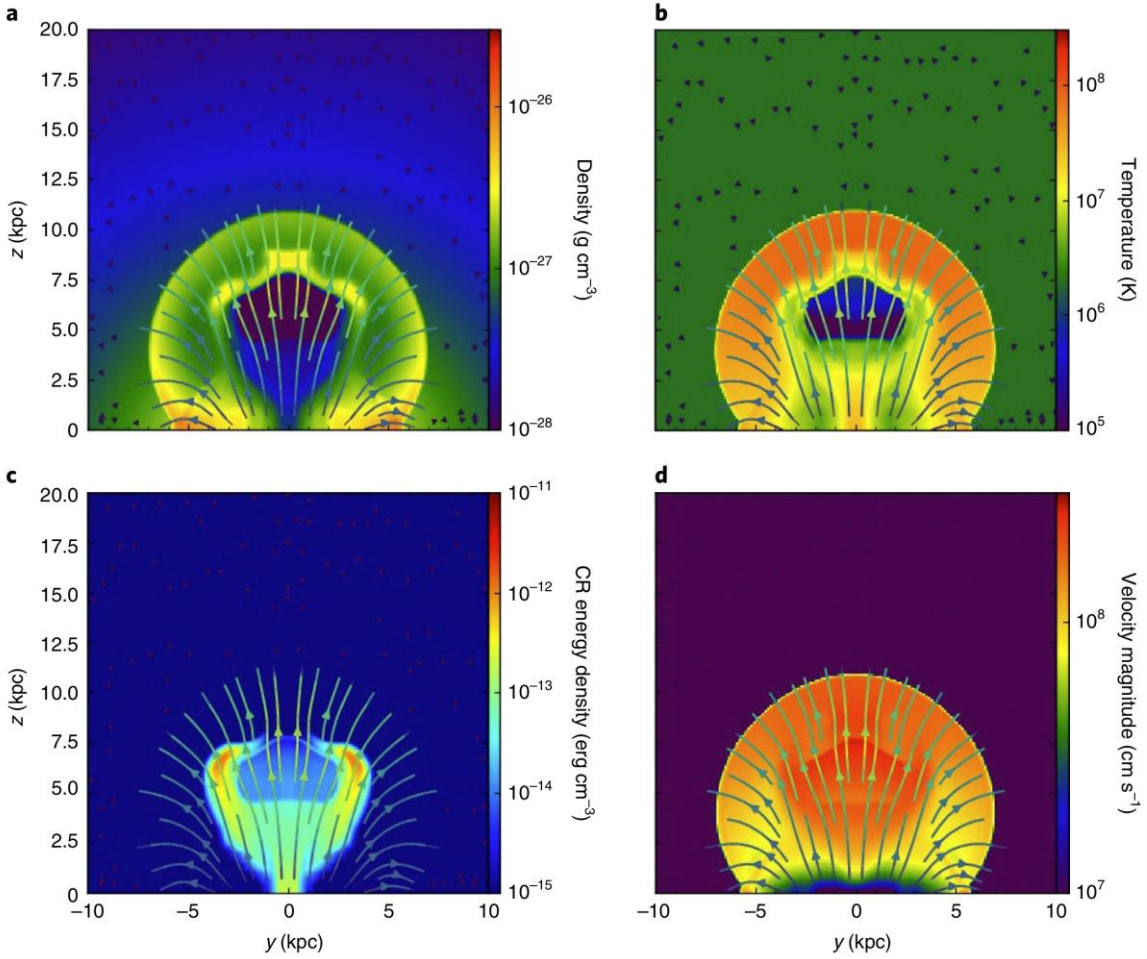






Yang et al. 2022

2.6 Myr前に注入



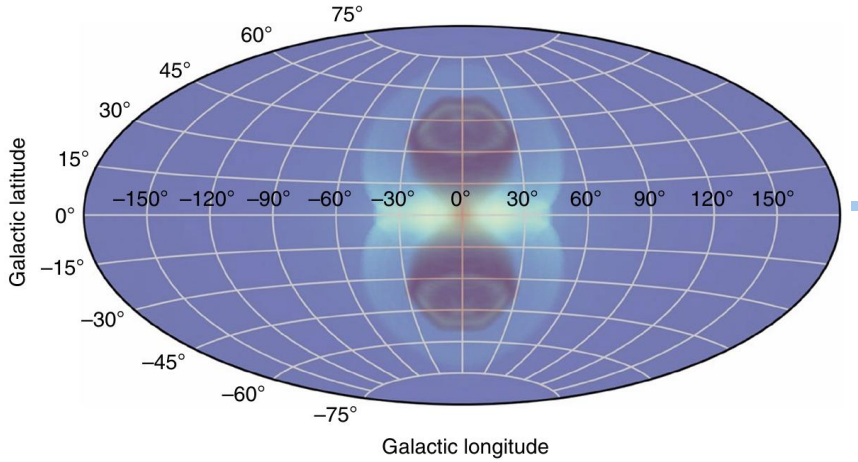


Table 1 | Input and derived jet parameters

Parameter	Description	Value	Unit
η	Density contrast	0.05	-
η_e	Energy density contrast	0.81	-
e_{jcr}	CR energy density	6.82×10^{-11}	erg cm^{-3}
v_{jet}	Jet speed	0.025	c[b]
R_{jet}	Radius of cross-section	0.5	kpc
t_{jet}	Duration of injection	0.1	Myr
n_{ej}	Electron number density	0.1	cm^{-3}
ρ_j	Thermal gas density	1.95×10^{-25}	g cm^{-3}
e_j	Thermal energy density	1.29×10^{-9}	erg cm^{-3}
P_{ke}	Kinetic power	3.08×10^{44}	erg s^{-1}
P_{th}	Thermal power	7.21×10^{42}	erg s^{-1}
P_{cr}	CR power	3.82×10^{41}	erg s^{-1}
P_B	Magnetic power	3.31×10^{41}	erg s^{-1}
P_{jet}	Total power	3.16×10^{44}	erg s^{-1}
E_{jet}[a]	Total injected energy	1.00×10^{57}	erg

[a]The total injected energy by both bipolar jets is $2E_{jet}$ [b]The velocity of light