

# 初代宇宙線が駆動する プラズマ不安定性による銀河間空間の加熱

横山 将汰 (D3), 大平 豊

東京大学 地球惑星科学専攻

[\(Yokoyama & Ohira 2022, Yokoyama & Ohira 2023\)](#)



Web page

# Contents

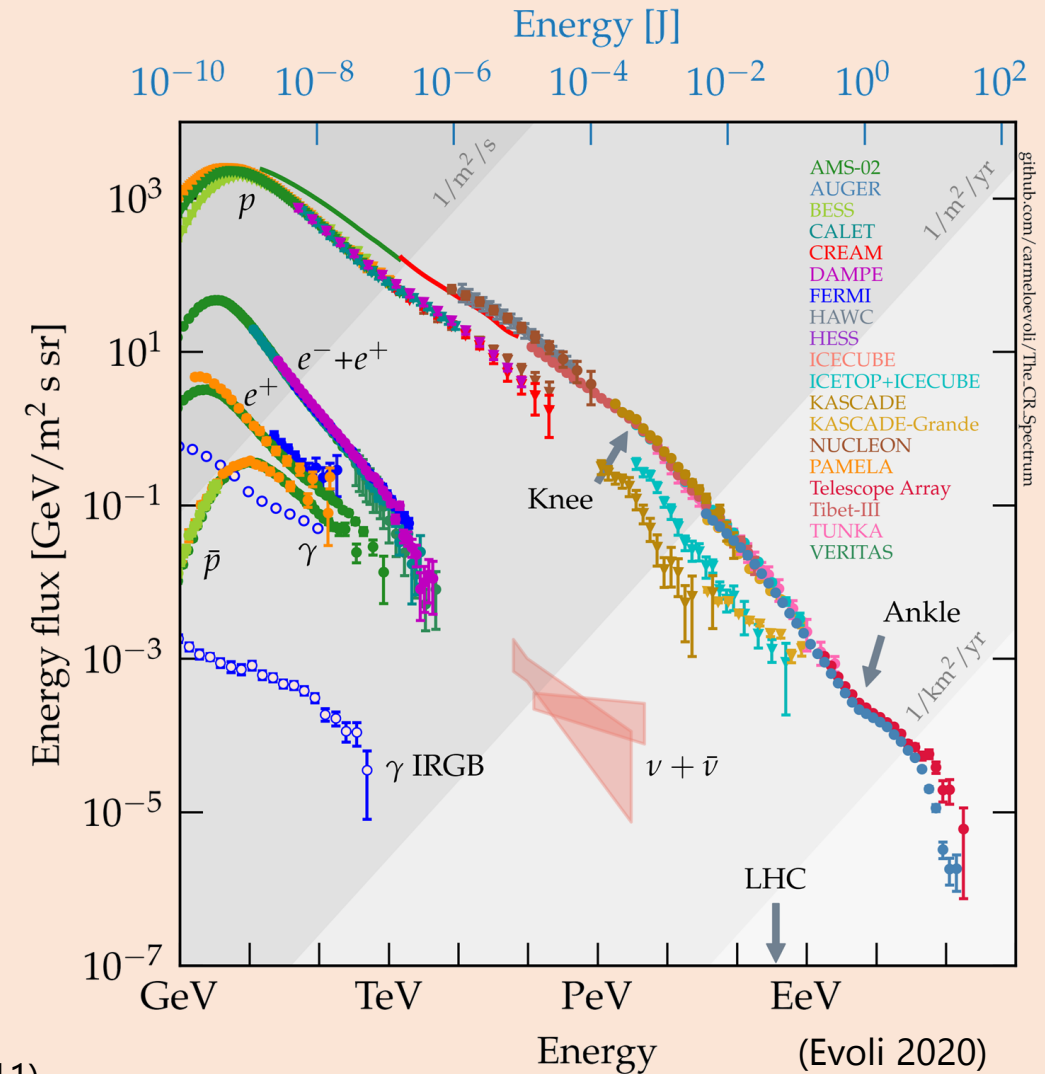
- Introduction
  - ✓ 初代宇宙線の加速
  - ✓ 初代宇宙線の影響
- 初代宇宙線による磁場生成 ([Yokoyama & Ohira 2022](#))
- 初代宇宙線による銀河間空間の加熱
  - ✓ 抵抗性加熱 ([Yokoyama & Ohira 2023](#))
  - ✓ プラズマ不安定性による加熱
- Summary

# 宇宙線

- 宇宙線：高エネルギーの非熱的荷電粒子。
- 他のエネルギー成分と同程度のエネルギー密度をもち、様々な天体現象に影響を及ぼす（銀河風の駆動、分子雲の電離など）。
- では、宇宙線はいつから存在し、いつから天体現象に影響を及ぼし始めたのか？

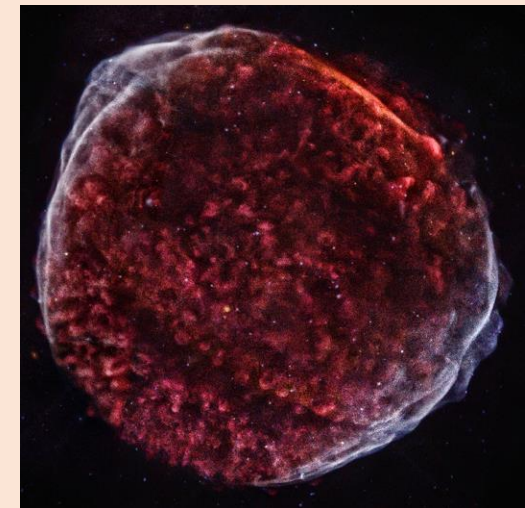
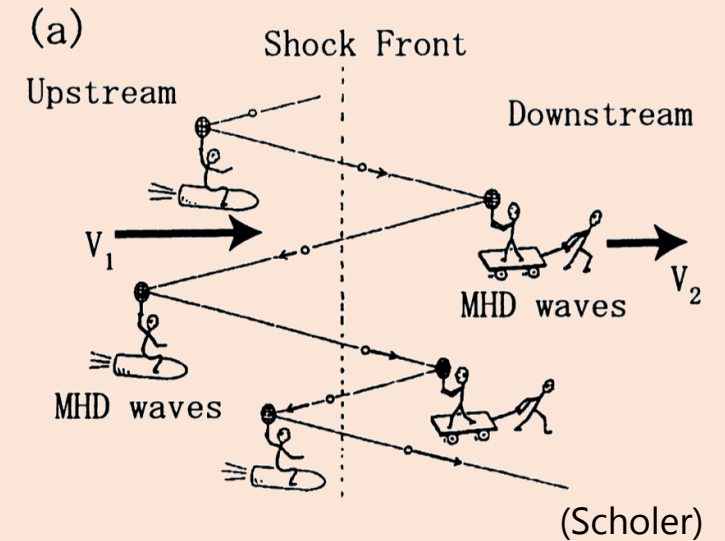
Component	Energy density
Starlight	$0.54 \text{ eV cm}^{-3}$
Thermal kinetic energy	$0.49 \text{ eV cm}^{-3}$
Turbulence	$0.22 \text{ eV cm}^{-3}$
Magnetic field	$0.89 \text{ eV cm}^{-3}$
Cosmic rays	$1.39 \text{ eV cm}^{-3}$

@LISM  
(Draine 2011)



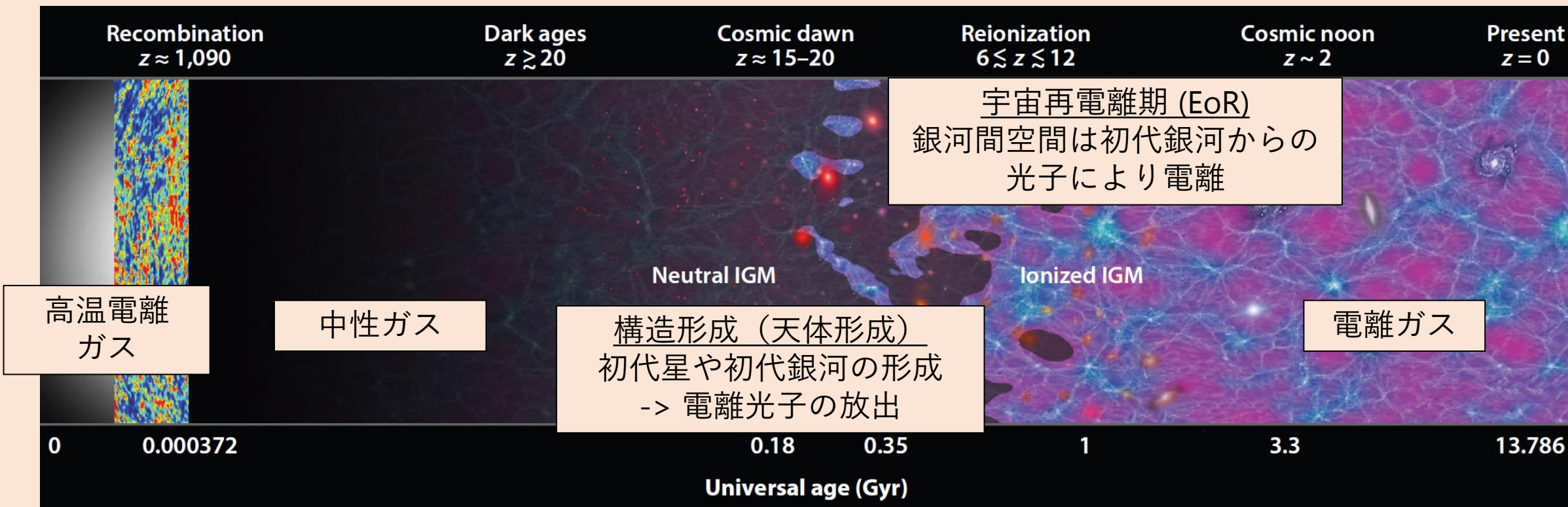
# 宇宙線加速

- 宇宙線加速の標準モデル：超新星残骸における衝撃波加速 (e.g., Drury 1983; Blasi 2013)
  - ✓ 粒子は衝撃波の上流と下流を往復することでエネルギーを獲得。
  - ✓ 衝撃波と磁気乱流の存在を仮定するだけで、宇宙線の冪関数分布を再現可能。
- 磁場が弱いと考えられる初期宇宙の銀河でも、衝撃波付近のプラズマ不安定性により磁場が増幅され、宇宙線が加速される (Ohira & Murase 2019)。
- では、これらの「初代宇宙線」は初期宇宙の進化にどのような影響を及ぼすか？



(SN1006, NASA)

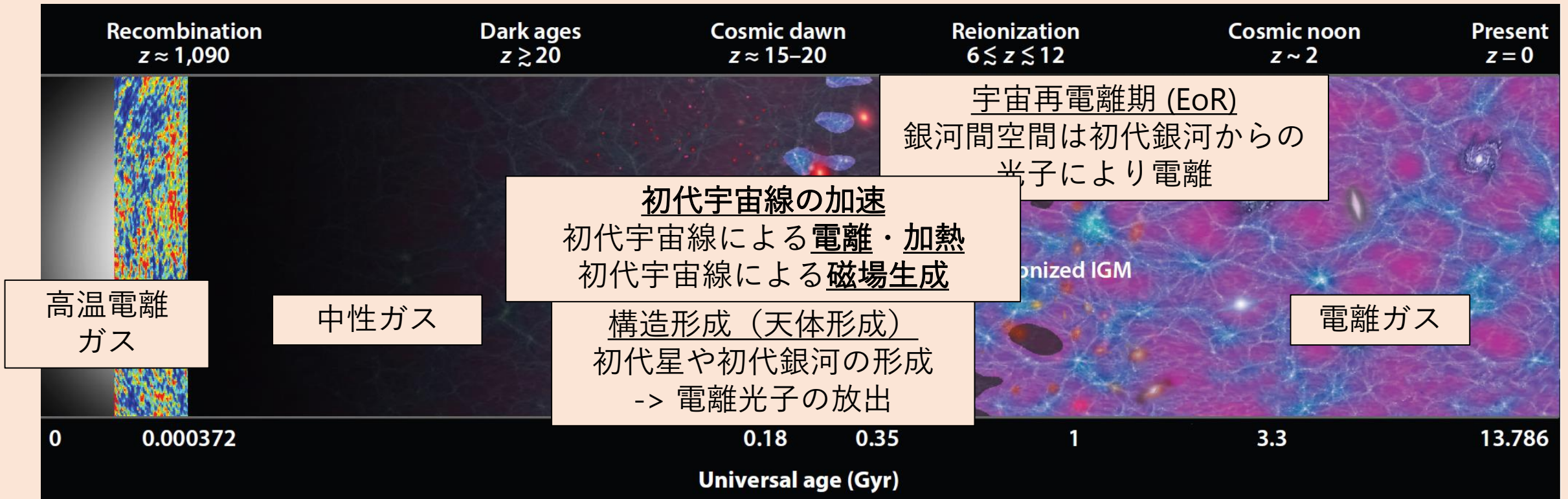
# 初期宇宙の進化



(Robertson 2022)



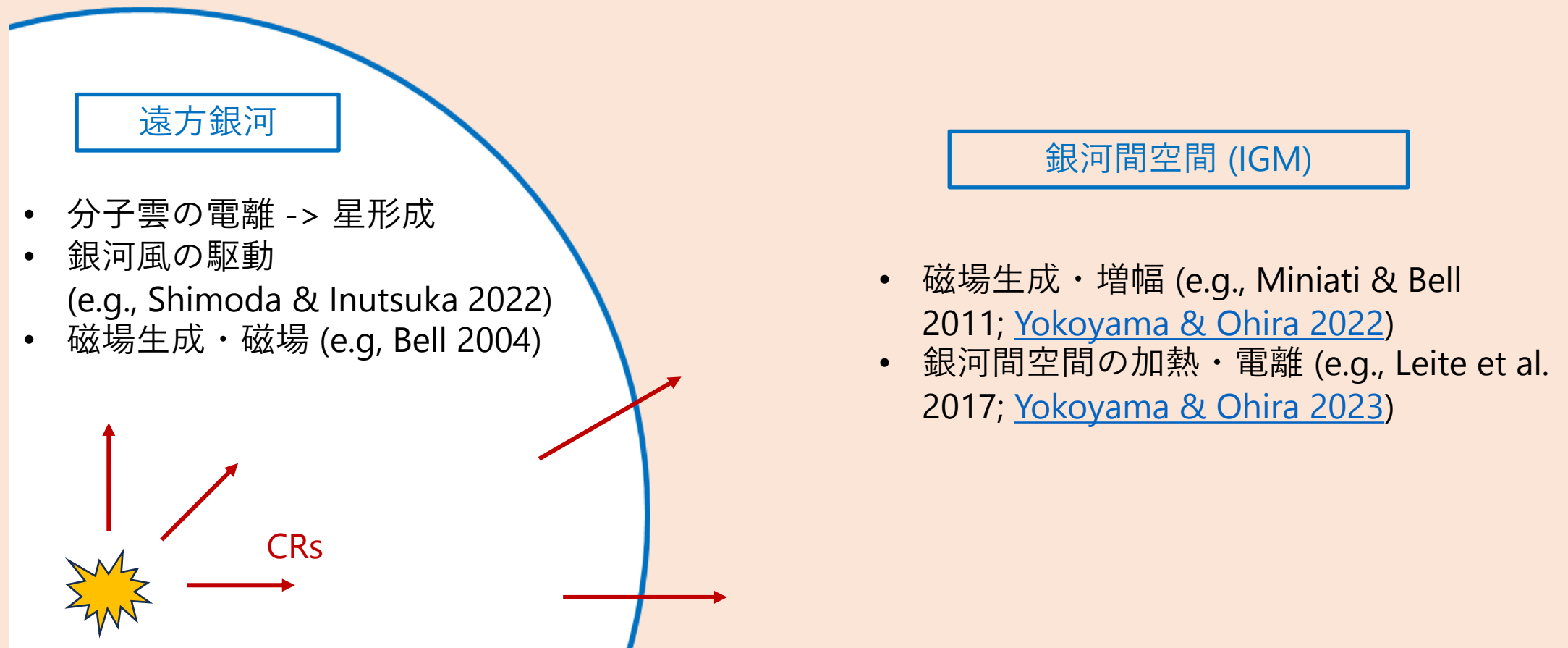
# 初期宇宙の進化



(Robertson 2022)

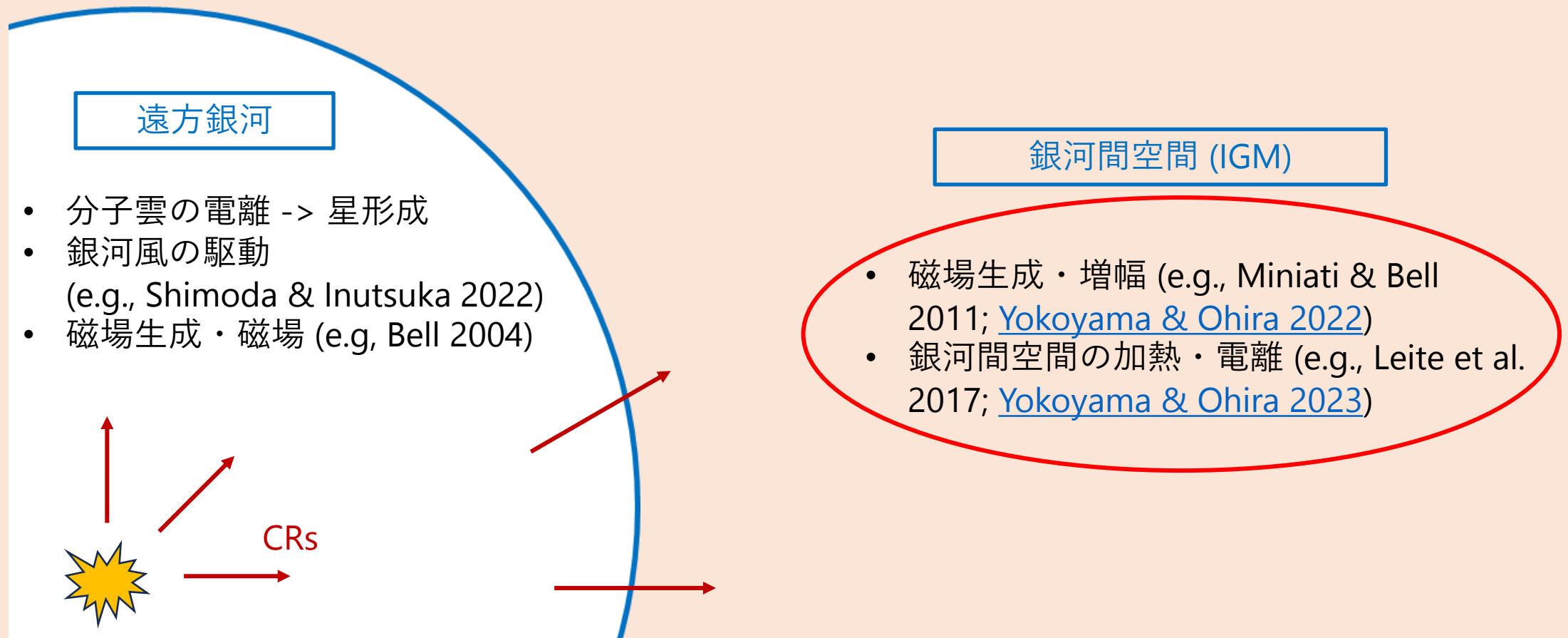
# 初代宇宙線の影響

- 初代宇宙線は銀河内外で様々な影響を及ぼす。



# 初代宇宙線の影響

- 初代宇宙線は銀河内外で様々な影響を及ぼす。

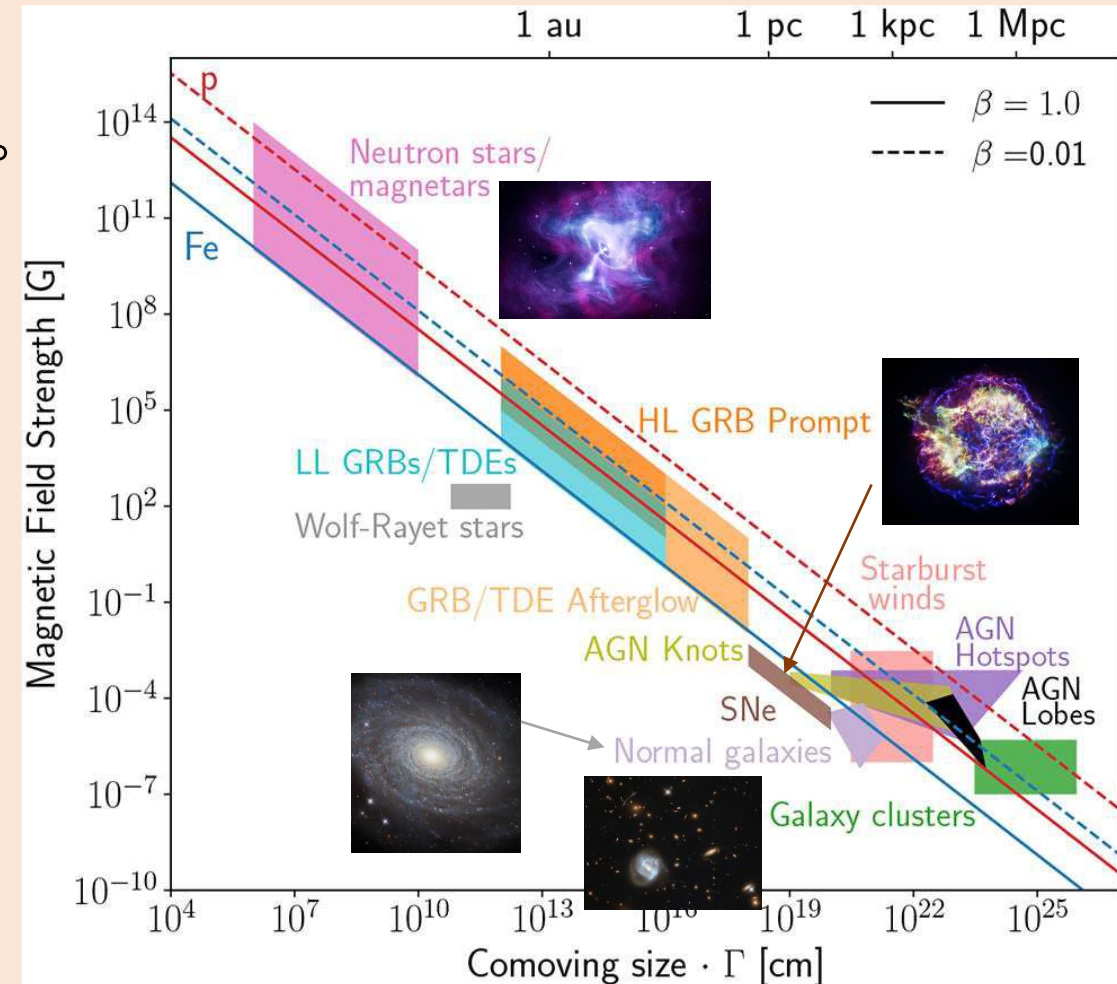




# 初代宇宙線による 銀河間空間磁場の生成

# 宇宙磁場の起源

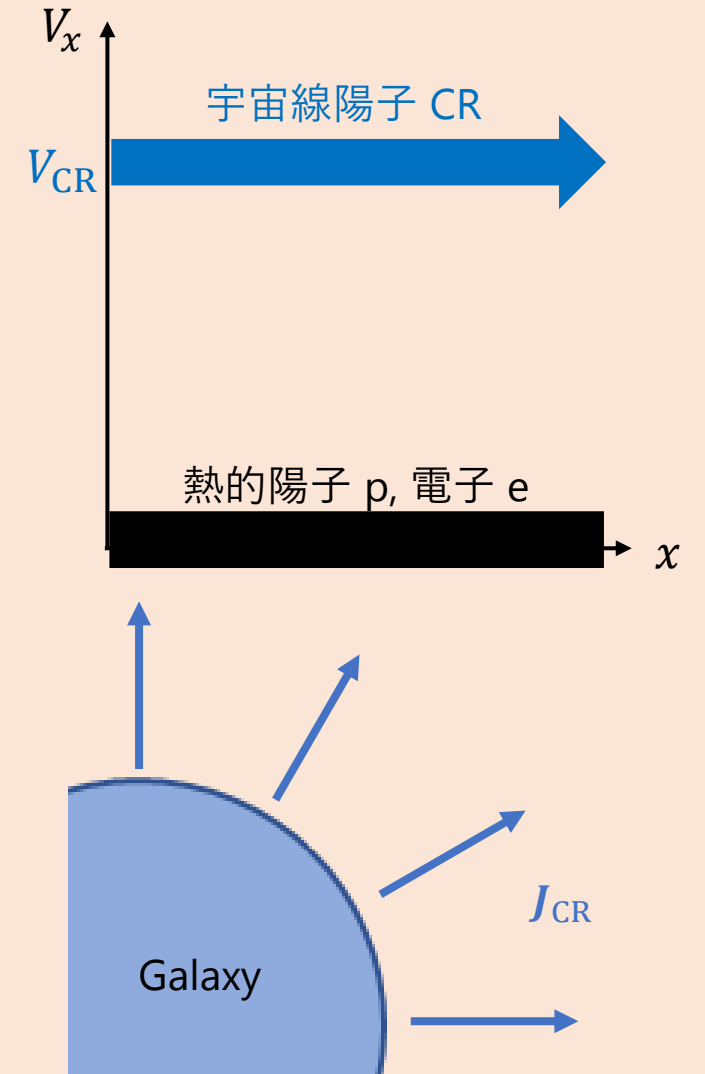
- 宇宙には様々な天体スケールで磁場が遍く存在し、ボイド領域の磁場の存在も示唆されている。
- 宇宙磁場はある種磁場をダイナモ機構により増幅することで作られたと考えられている。
- 種磁場の起源は未解明である。
  - ✓ 宇宙論的な磁場生成過程
  - ✓ 天体物理学的な磁場生成過程
- 銀河間空間に伝播した宇宙線も磁場を生成する (e.g., Miniati & Bell 2011, Ohira 2021)。
- 我々は抵抗性加熱を介した新たな磁場生成機構を発見 ([Yokoyama & Ohira, 2022](#))。



(Alves Batista, 2019 and NASA)

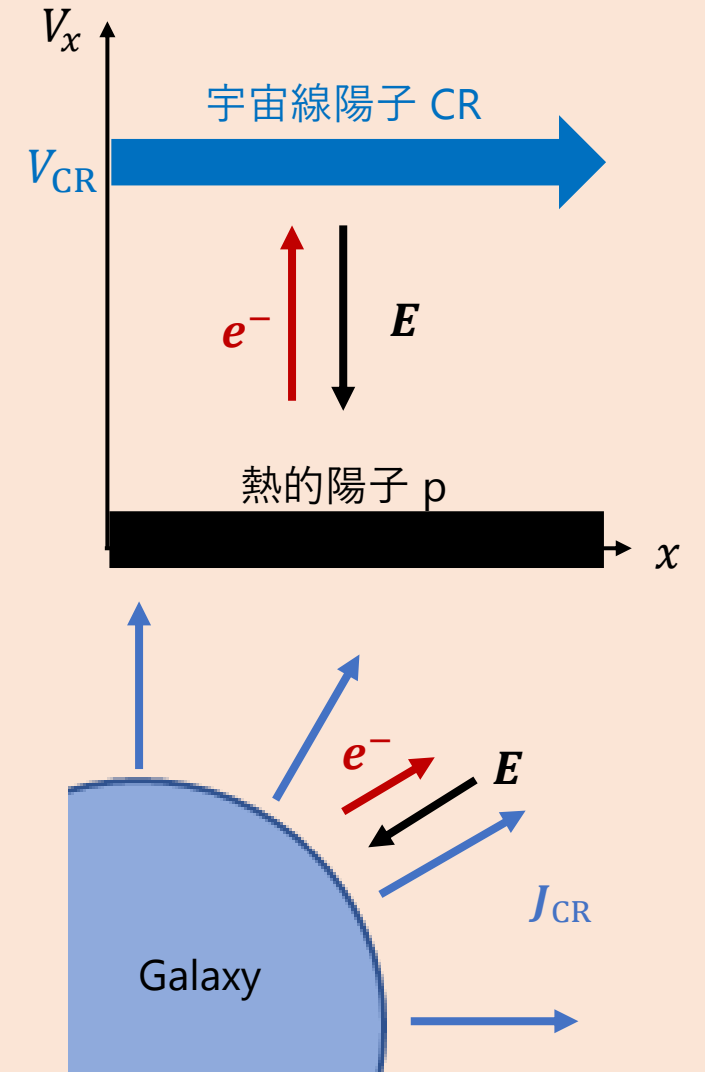
# 宇宙線による抵抗性加熱

- 熱的陽子・熱的電子・宇宙線の3成分プラズマを考慮。



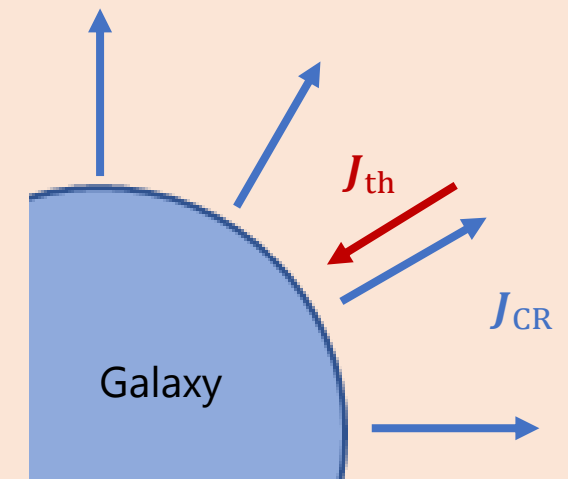
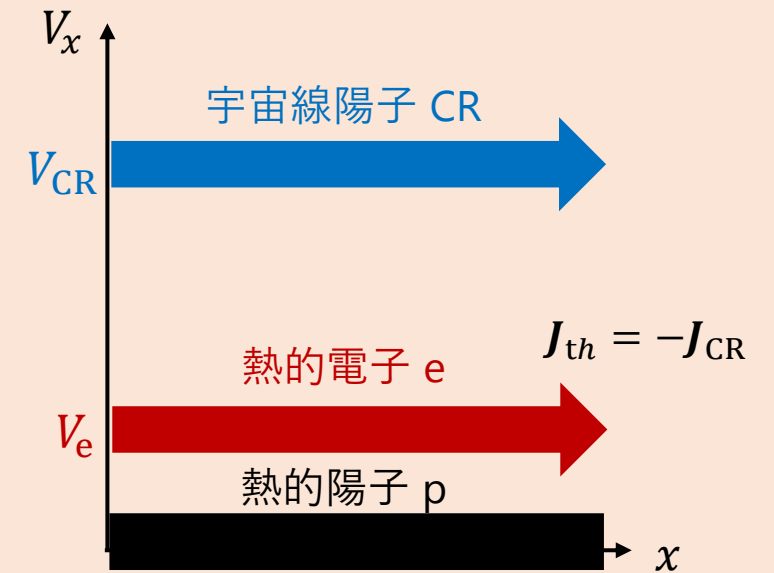
# 宇宙線による抵抗性加熱

- 熱的陽子・熱的電子・宇宙線の3成分プラズマを考慮。
- 宇宙線が流す電流により、電場発生 ( $\partial \mathbf{E} / \partial t = -4\pi \mathbf{J}_{CR}$ )。



# 宇宙線による抵抗性加熱

- 熱的陽子・熱的電子・宇宙線の3成分プラズマを考慮。
- 宇宙線が流す電流により、電場発生 ( $\partial \mathbf{E} / \partial t = -4\pi \mathbf{J}_{\text{CR}}$ )。
- 熱的電子が加速されることで電場は打ち消される。
- プラズマ振動周期程度で、宇宙線電流と熱的電子が担う 帰還電流 が釣り合った定常状態が達成される ( $\mathbf{J}_{\text{th}} = -\mathbf{J}_{\text{CR}}$ )。

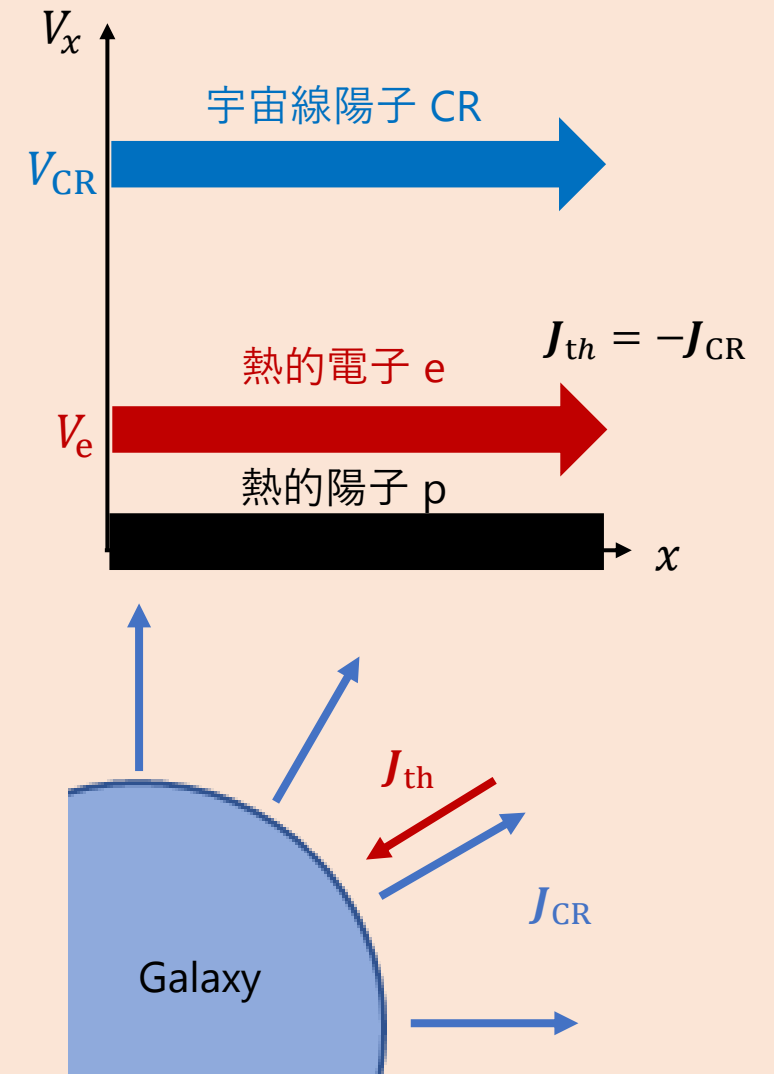


# 宇宙線による抵抗性加熱

- 熱的陽子・熱的電子・宇宙線の3成分プラズマを考慮。
- 宇宙線が流す電流により、電場発生 ( $\partial E / \partial t = -4\pi J_{CR}$ )。
- 熱的電子が加速されることで電場は打ち消される。
- プラズマ振動周期程度で、宇宙線電流と熱的電子が担う 帰還電流 が釣り合った定常状態が達成される ( $J_{th} = -J_{CR}$ )。
- 熱的陽子・電子間の Coulomb 衝突は無視できず、帰還電流を保つため抵抗性電場が生じる ( $E = \eta J_{th} = -\eta J_{CR}$ )。
- 熱的プラズマは 抵抗性加熱 (Joule 加熱) により温度上昇。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{3}{2} n_H k_B T \right) = \eta J_{CR}^2, \quad \eta = 1.4 \times 10^{-7} \left( \frac{T}{1 \text{ K}} \right)^{-3/2} \text{ s}$$

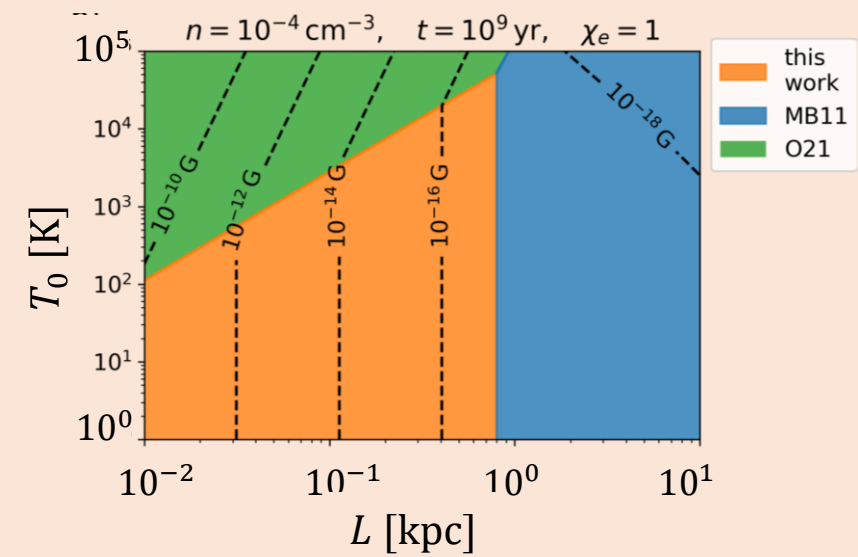
(Spitzer resistivity)



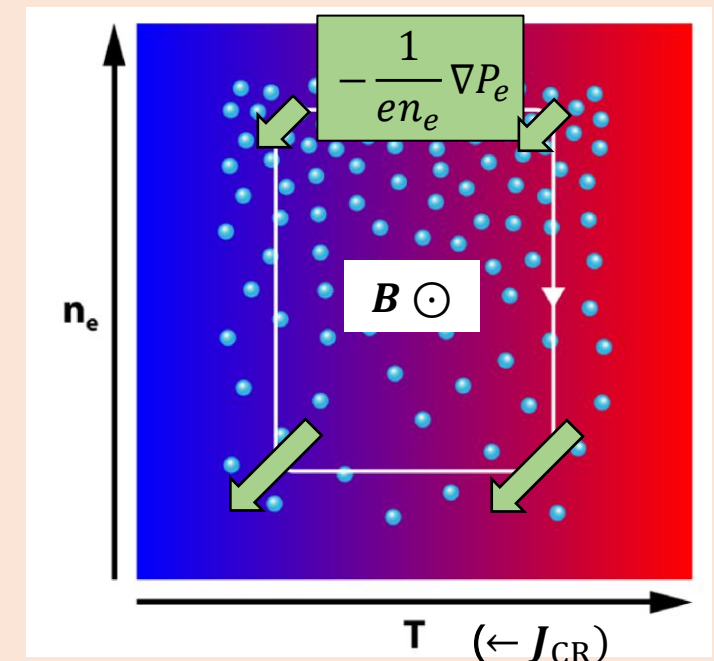


# 抵抗性加熱による磁場生成

- プラズマは宇宙線による抵抗性加熱により非一様に加熱される。
- 抵抗性加熱による温度勾配と、銀河間空間の密度勾配の不一致 ( $\nabla n_e \times \nabla T_e \neq 0$ ) により、磁場が生成される (Biermann battery 効果)。
- 銀河周辺の磁場生成を考え、宇宙線による他の生成機構との比較を行った (Yokoyama & Ohira 2022)。
- この過程により作られる磁場は、現在の銀河磁場の種磁場として十分な強度になりうる ( $B \gtrsim 10^{-18}$  G)。
- この過程は比較的、小スケール、低温、高電離度の環境で支配的になる。



(Yokoyama & Ohira, 2022)

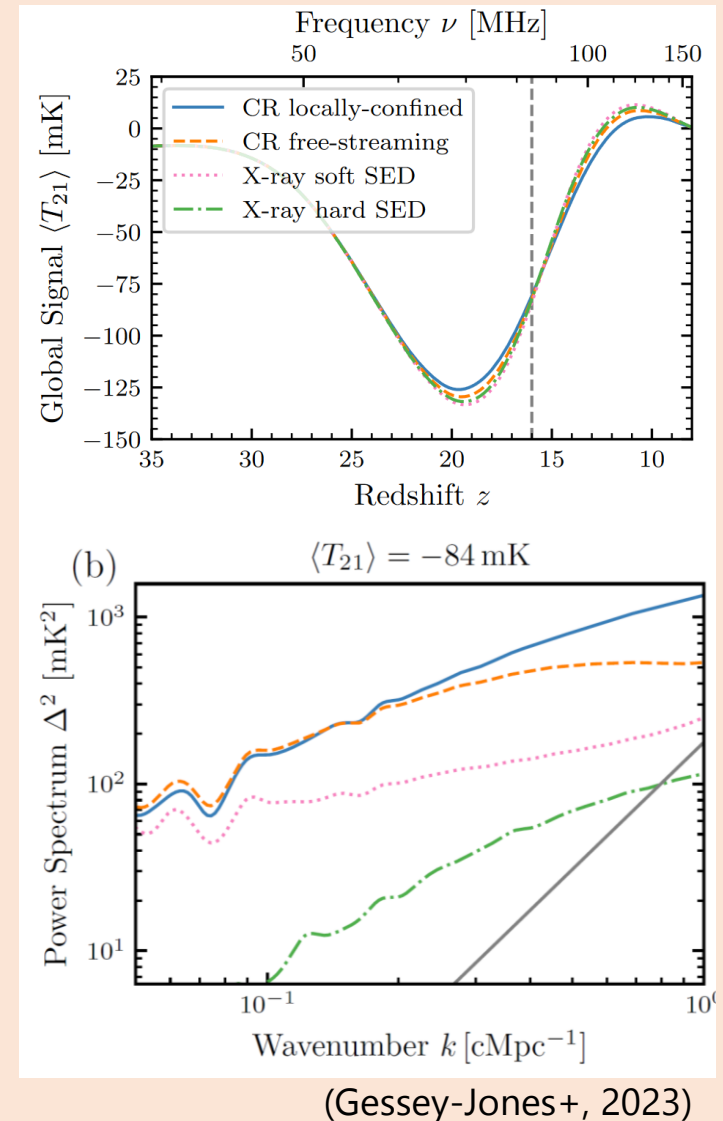


(Zweibel, 2013)

# 初代宇宙線が誘起する抵抗性加熱による 銀河間空間の加熱

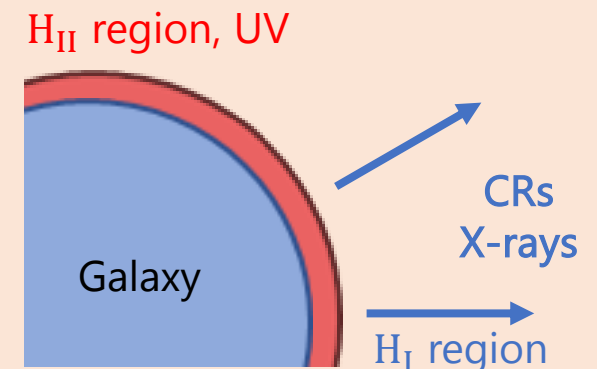
# 宇宙再電離

- 宇宙再電離は宇宙誕生後約  $10^9$  年 ( $z \sim 6$ ) までに完了したことが、観測的に知られている (e.g., McQuinn, 2016)。
- 宇宙再電離の過程は、銀河形成進化史を反映し、宇宙論的にも重要である。
- 中性水素からの 21-cm 線放射は銀河間空間の温度を反映し、将来の電波観測計画 SKA (Square Kilometer Array) の主要ターゲット (e.g., Shimabukuro et al. 2023)。
- 宇宙線による加熱は、他のX線などによる加熱に比べ局所的で、21-cm 線のパワースペクトルの観測により区別可能 (Leite et al. 2017; Gessey-Jones et al., 2023)。
- 本研究では、初代宇宙線による銀河周辺の加熱・電離について調べる。



# 銀河間空間の加熱

- 星や銀河からの放射だけでなく、初代宇宙線も銀河間空間の加熱・電離に寄与する (e.g., Leite et al. 2017)。
- 光電離による加熱
  - ✓ 紫外線: 銀河周辺を電離し、半径  $r \lesssim 10$  kpc 程度の高温電離領域 ( $H_{II}$  領域) を形成する (e.g., Cen 2006)。
  - ✓ X線: 紫外線より遠くまで伝播し、 $H_{II}$  領域の外側 ( $H_I$  領域) を加熱。約 20 % のエネルギーが加熱に使われる (Furlanetto & Stoever, 2010)。
- 宇宙線による加熱
  - ✓ 直接加熱 (電離 & Coulomb 相互作用, e.g., Leite et al. 2017)
  - ✓ 抵抗性加熱 (Miniati & Bell 2011; [Yokoyama & Ohira 2023](#))
  - ✓ プラズマ不安定性による加熱

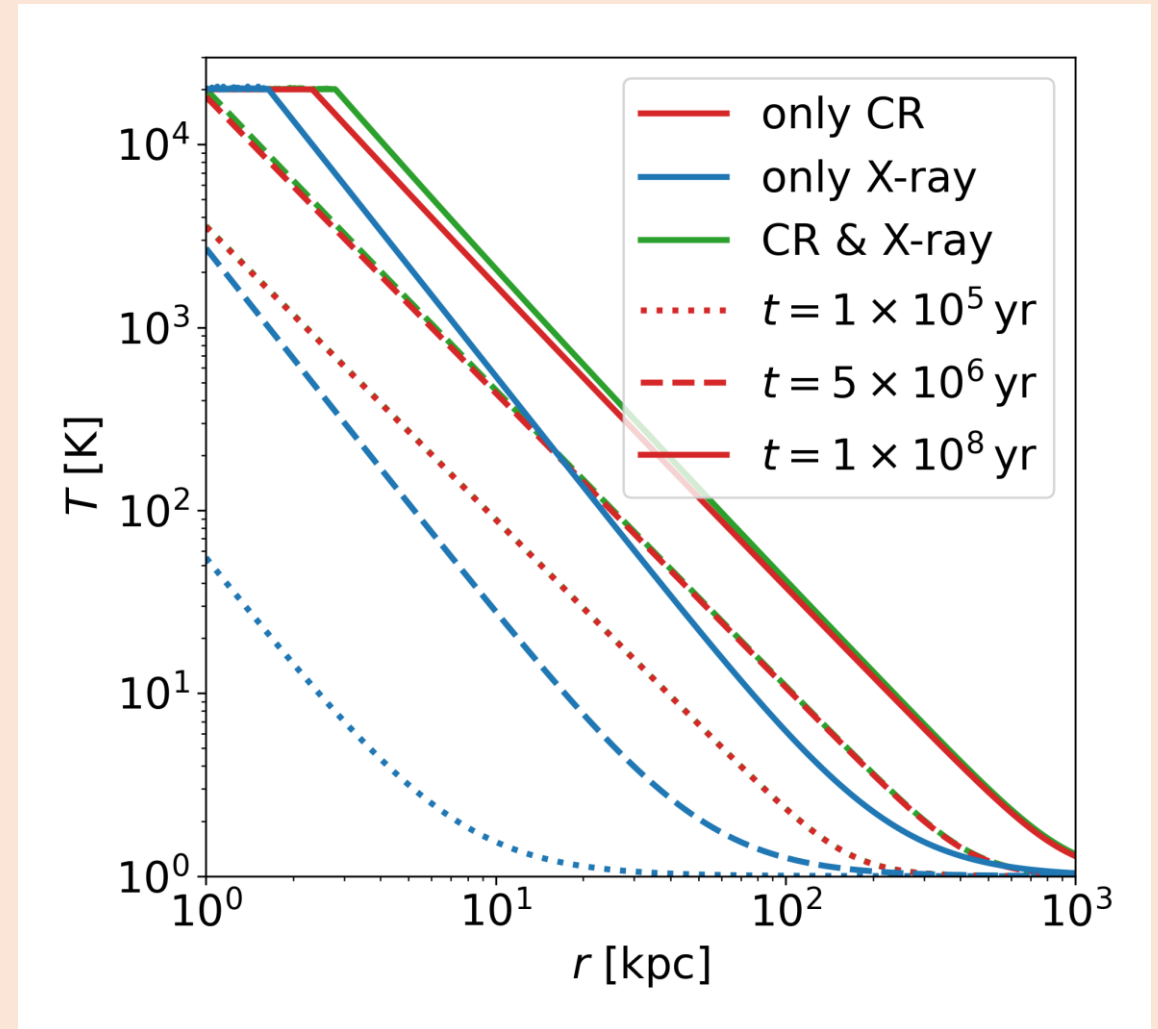


# 抵抗性加熱 (Yokoyama & Ohira, 2023)

- 初代宇宙線は帰還電流を誘起することで、銀河間空間を Joule 加熱する。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{3}{2} n_{\text{H}} k_{\text{B}} T \right) = \eta J_{\text{CR}}^2$$

- $\text{H I}$  領域の加熱を考え、主要な加熱源とされる X線と比較を行った (Yokoyama & Ohira 2023)。
- 宇宙線による抵抗性加熱は銀河近傍で支配的になり、 $10^2 \sim 10^4$  K 程度まで温度を上げることが明らかになった。
- 将来の電波観測で、初代宇宙線による加熱の兆候が観測されることが期待されている (Gessey-Jones et al. 2023)。



(Yokoyama & Ohira 2023)

# プラズマ不安定性による 銀河間空間の加熱



# プラズマ不安定性による加熱

- ビーム成分がある系は一般的にプラズマ的に不安定。
- プラズマ不安定性は、粒子衝突を介した加熱よりも早く起こる（無衝突プラズマ）。

$$\nu_{ei} \sim \frac{n_e e^4}{m_e v_{th}^3} \sim 3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1} \left( \frac{n_e}{10^{-7} \text{ cm}^{-3}} \right) \left( \frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{-3/2},$$

$$\gamma \sim \omega_{p,CR} \sim 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \left( \frac{n_{CR}}{10^{-11} \text{ cm}^{-3}} \right)^{1/2}$$

- 宇宙線はプラズマ不安定性を励起することにより、電磁場を介して熱的プラズマを加熱。
- 不安定性の飽和段階やプラズマ温度は数値シミュレーションにより調べる必要がある。
- 本研究では、電磁場の Maxwell 方程式と、荷電粒子の運動方程式を自己無撞着に解く Particle-in-cell (PIC) シミュレーションを用いて、プラズマ不安定性による加熱を調べる。

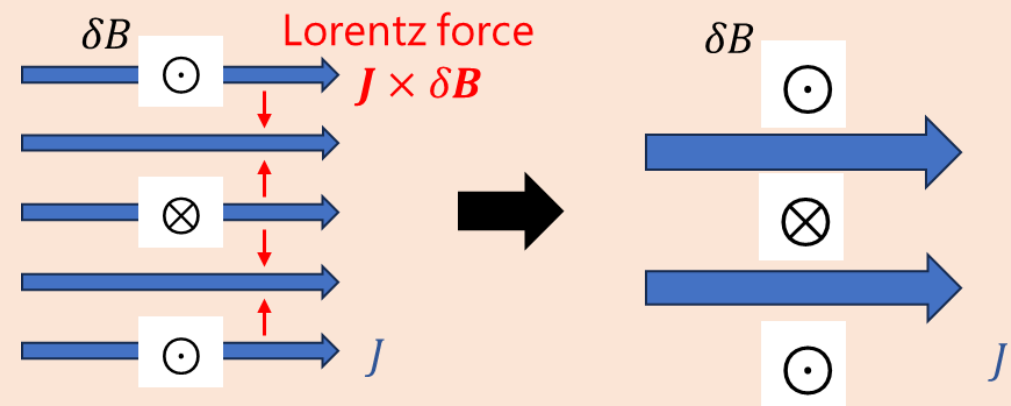
# ビーム駆動型プラズマ不安定性

## Buneman 不安定性

- ▶ ビーム成分とプラズマ静電振動との共鳴による静電不安定性 ( $kV_{CR} \simeq \omega_{pe}$ )。
- ▶ 成長率  $\gamma \sim (n_{CR}/n_e)^{1/3} \omega_{pe}$  で急速成長。
- ▶ ビームエネルギー程度まで電子が加熱される。
- ▶ 宇宙線のエネルギー分布の広がりにより、安定化されることが判明 ( $k\lambda_D > 1$ )。

## Weibel 不安定性

- ▶ 電磁不安定性 (⊗)。
- ▶ 成長率  $\gamma \sim (V_{CR}/c) \omega_{p,CR}$ 。
- ▶ Weibel 不安定性の成長は確認されたが、計算機資源の制約により電子温度の上昇は未説明。



# Summary

## [Summary]

- 宇宙線は初期宇宙の銀河でも衝撃波により加速され、様々な影響を及ぼしうる。
- 初代宇宙線は帰還電流を誘起することで銀河間空間を非一様に Joule 加熱し、Biermann battery 効果により宇宙磁場の種となりうる磁場を作る ([Yokoyama & Ohira 2022](#))。
- 抵抗性加熱は銀河間空間の温度上昇にも寄与し、 $r \lesssim 10^2$  kpc の銀河近傍でX線による加熱より支配的になりうる ([Yokoyama & Ohira 2023](#))。
- 宇宙線はプラズマ不安定性を励起することでも銀河間空間を加熱する。

## [Future works]

- プラズマ不安定性による温度上昇率の解明
- 21-cm 線による観測可能性
- より現実的な銀河周辺環境での影響の解明