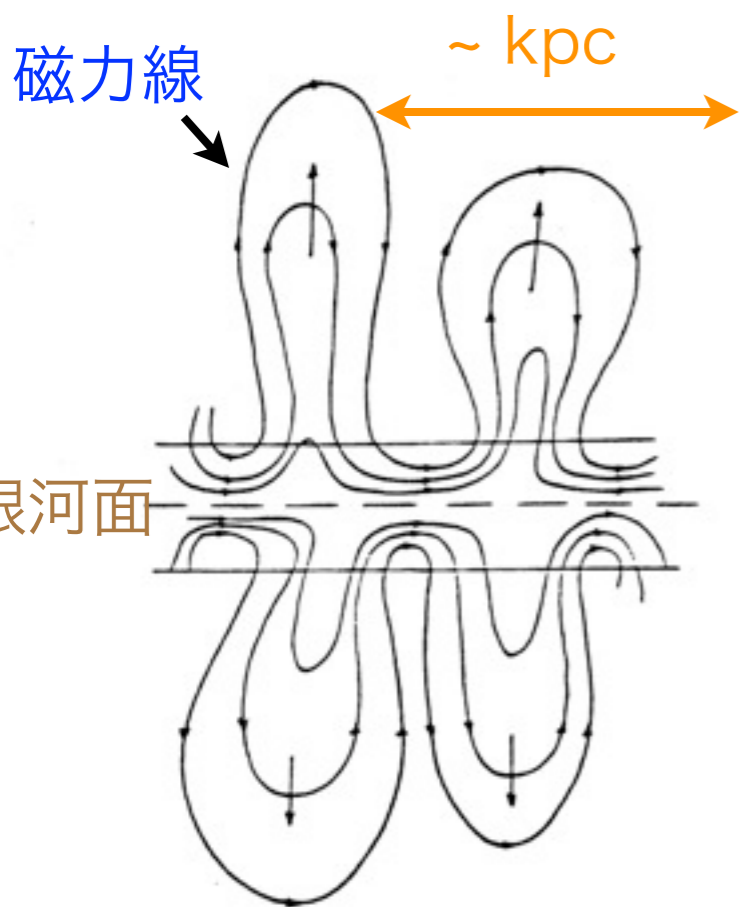


宇宙線パーカー不安定性 の非線形発展

工藤哲洋（国立天文台）、工藤祐己（千葉大）
横山央明（東大）、松元亮治（千葉大）

研究の背景と動機



- 重力成層した星間ガスに磁場があると、パーカー不安定性が成長し、ガスの構造に影響を与える。
- 星間ガスには「宇宙線」も存在する。宇宙線の圧力はパーカー不安定性を促進させる。

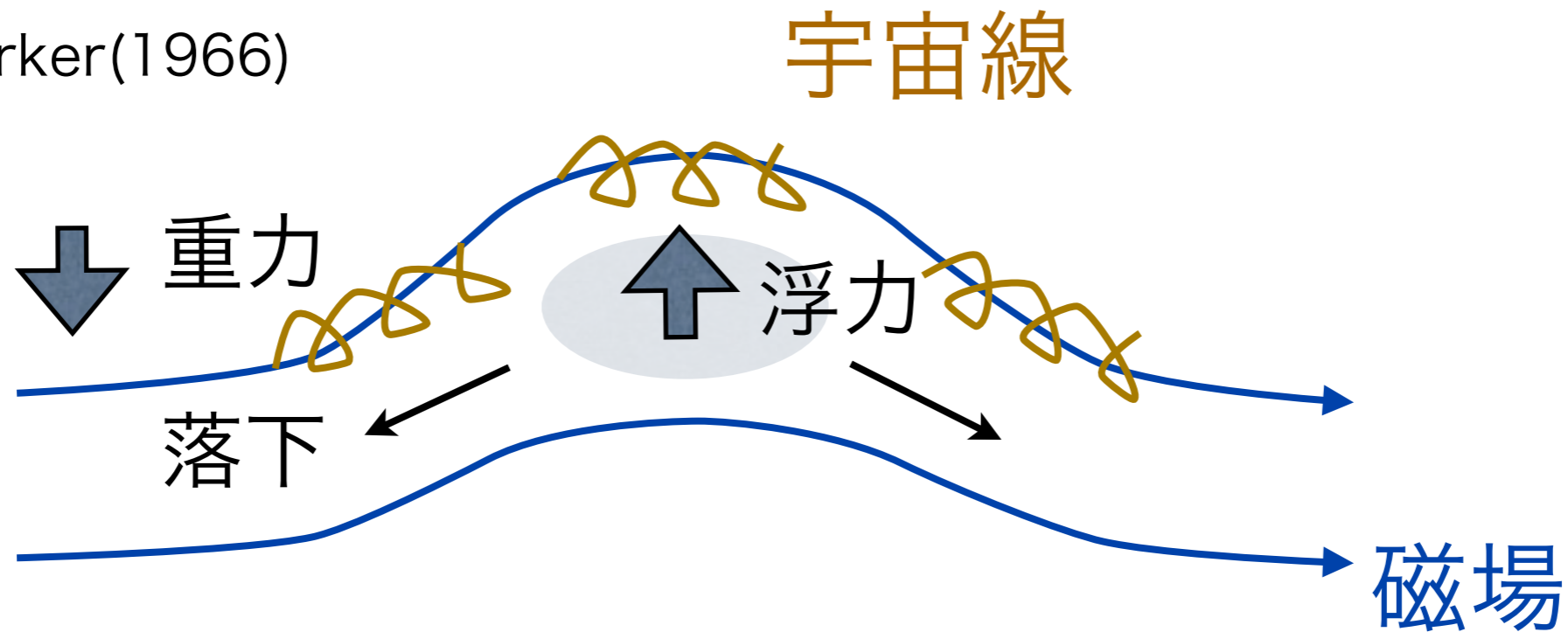
- 宇宙線の圧力を含めたパーカー不安定性の数値シミュレーションを行い線形解析と比較した。

FIG. 2.—Schematic of the extended magnetic lobes inflated outward from both faces of the gaseous disk of the galaxy.

Parker(1992)

パーカー不安定性と宇宙線

Parker(1966)



磁力線に沿ってガスが落下すると、圧力が周囲に比べて減少するため浮力が生じ上昇する。宇宙線は磁力線に沿った方向にすばやく動き、その方向にほぼ等圧となるので浮力に貢献する。

先行研究との関係

- パーカー不安定性における宇宙線の重要性は Parker(1966)で既に指摘されている。
- しかし、数値シミュレーションは Hanasz & Lesch(2003)やKuwabara et al. (2004)で初めて行われた。
- 今回、先行研究で仮定されていた銀河面対称性をはずし、かつ一様でない銀河の重力場を用いて数値シミュレーションを行い、線形解析と比較した。

基礎方程式

MHDの運動方程式に宇宙線の圧力が加わる

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla (p + p_{cr}) + \frac{1}{\rho} \vec{j} \times \vec{B} + \vec{g}$$

宇宙線圧力

宇宙線の圧力は流体近似の移流拡散方程式を解く

$$\frac{\partial p_{cr}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) p_{cr} + \gamma_{cr} p_{cr} (\nabla \cdot \vec{v}) = \nabla \cdot (\kappa_{\parallel} \vec{b} \vec{b} \cdot \nabla p_{cr})$$

磁力線方向への拡散

拡散係数は磁力線方向と垂直方向とで値が異なる
(簡単のため垂直方向の拡散はゼロとした)

(Kuwabara et al. 2004, Hanasz & Lesch 2003)

初期条件

初期のガス圧（色）と磁力線（白線）

- 円盤面に低温ガス、その上下に高温ガスがあると仮定する。

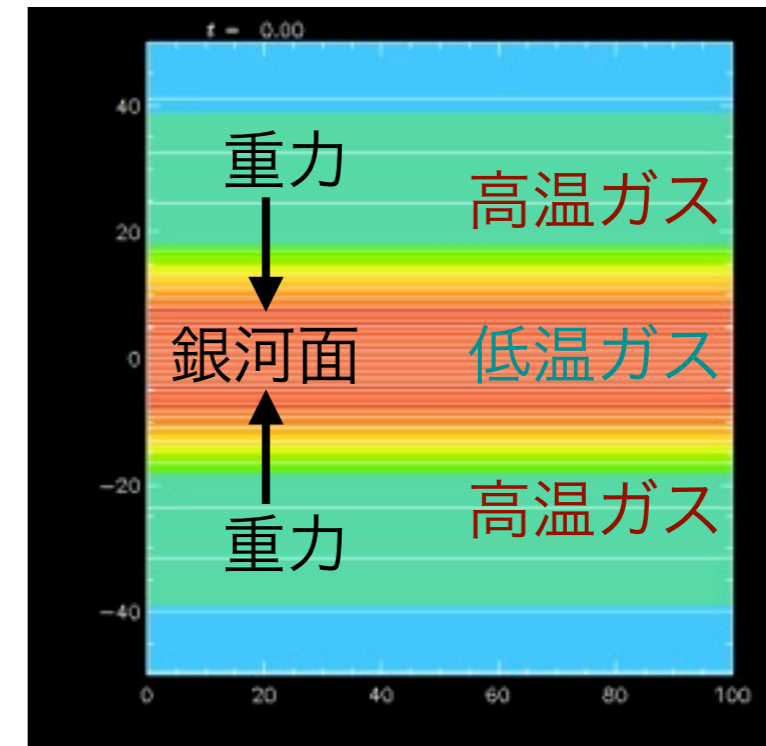
- 重力は星の作る外場とする。

銀河面近くでは高さに比例して増大し、ある程度離れたら一定の値とした。

- 初期の力の釣り合いは

$$\text{ガス圧} + \text{磁気圧} + \text{宇宙線圧} - \text{重力} = 0$$

全圧力を一定に保ち、宇宙線圧力がない場合と宇宙線圧力の割合が大きい場合とを比較した。

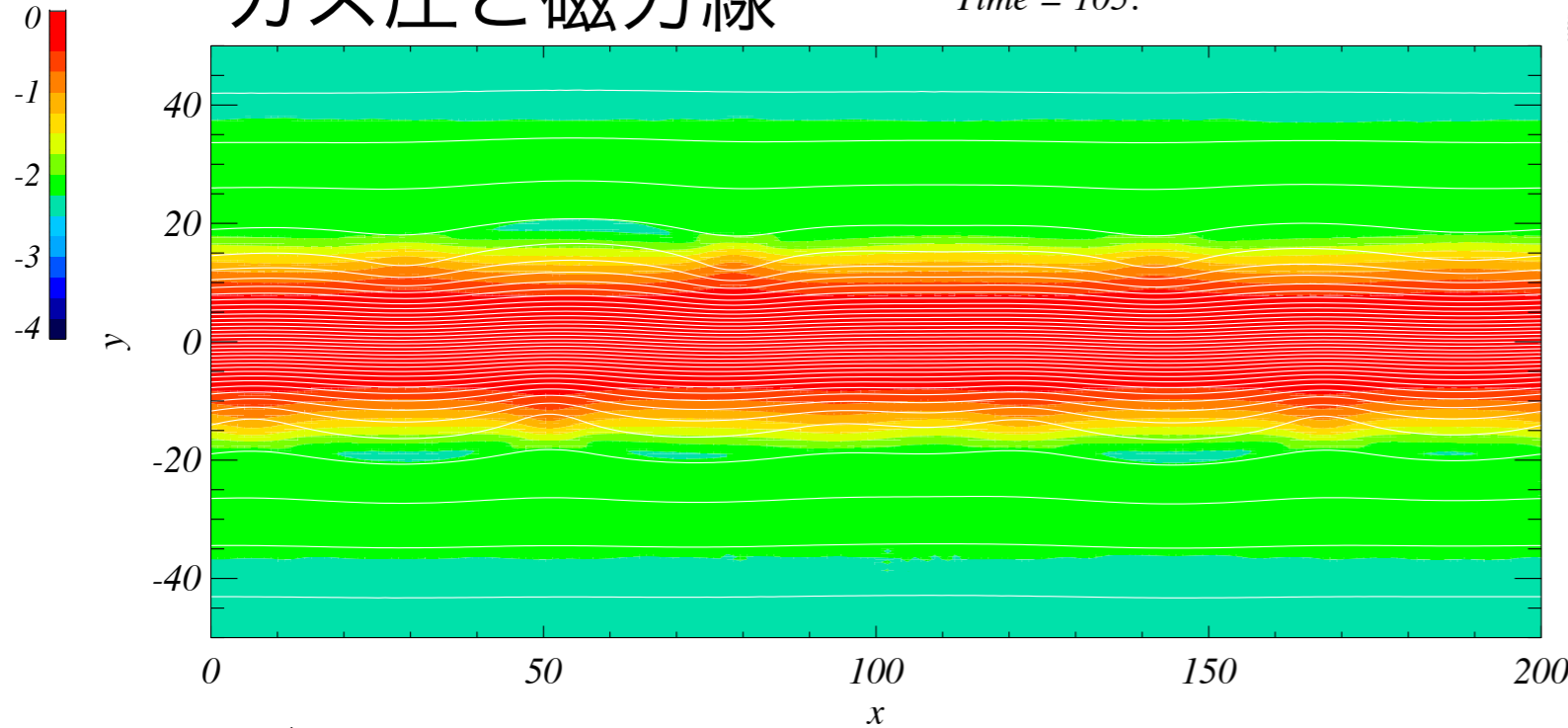


速度に微小なランダムな揺らぎを与える。

結果(1) : 線形に近い段階

ガス圧と磁力線

Time = 105.



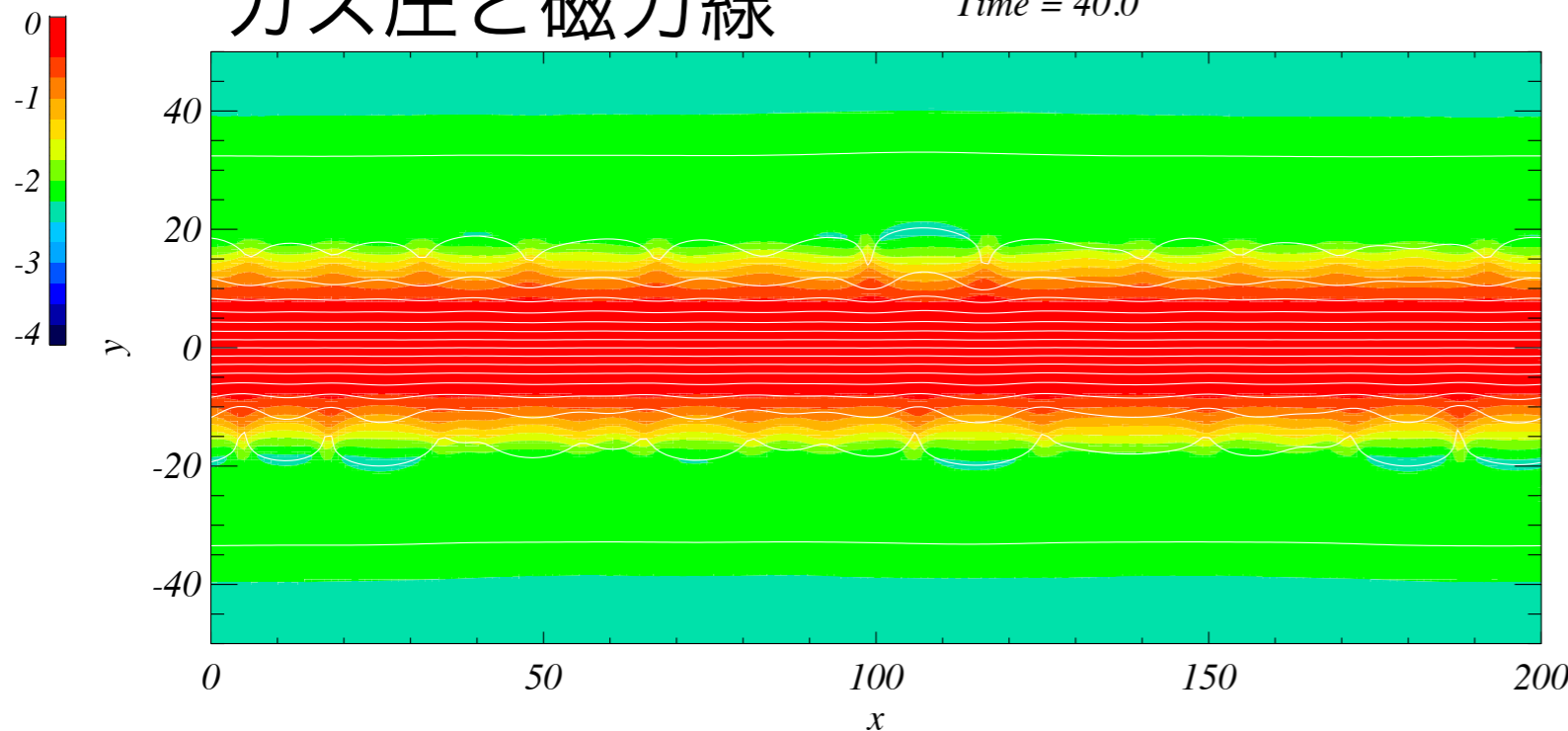
宇宙線無

$$\frac{P_{mag}}{P_{gas}} = 1.0 \quad \frac{P_{CR}}{P_{gas}} = 0.0$$

赤道面 ($y=0$) を挟んで「ずれ対称」にループ構造が成長する。成長波長は $x \sim 40 \sim 2$ kpc

ガス圧と磁力線

Time = 40.0



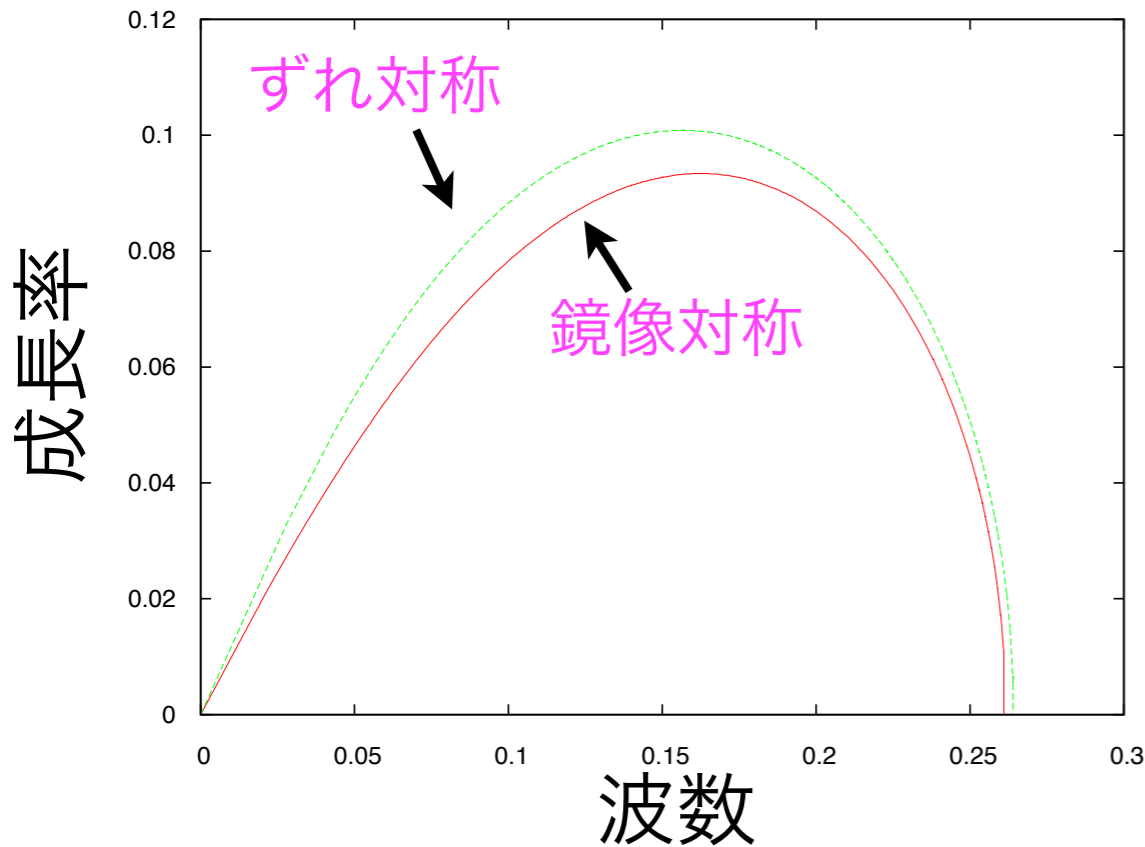
宇宙線有

$$\frac{P_{mag}}{P_{gas}} = 0.2 \quad \frac{P_{CR}}{P_{gas}} = 0.8$$

「鏡像対称」と「ずれ対称」いずれのループも成長する。成長波長は $x \sim 15 \sim 0.75$ kpc

← ~ 5kpc →

結果(2) : 線形解析



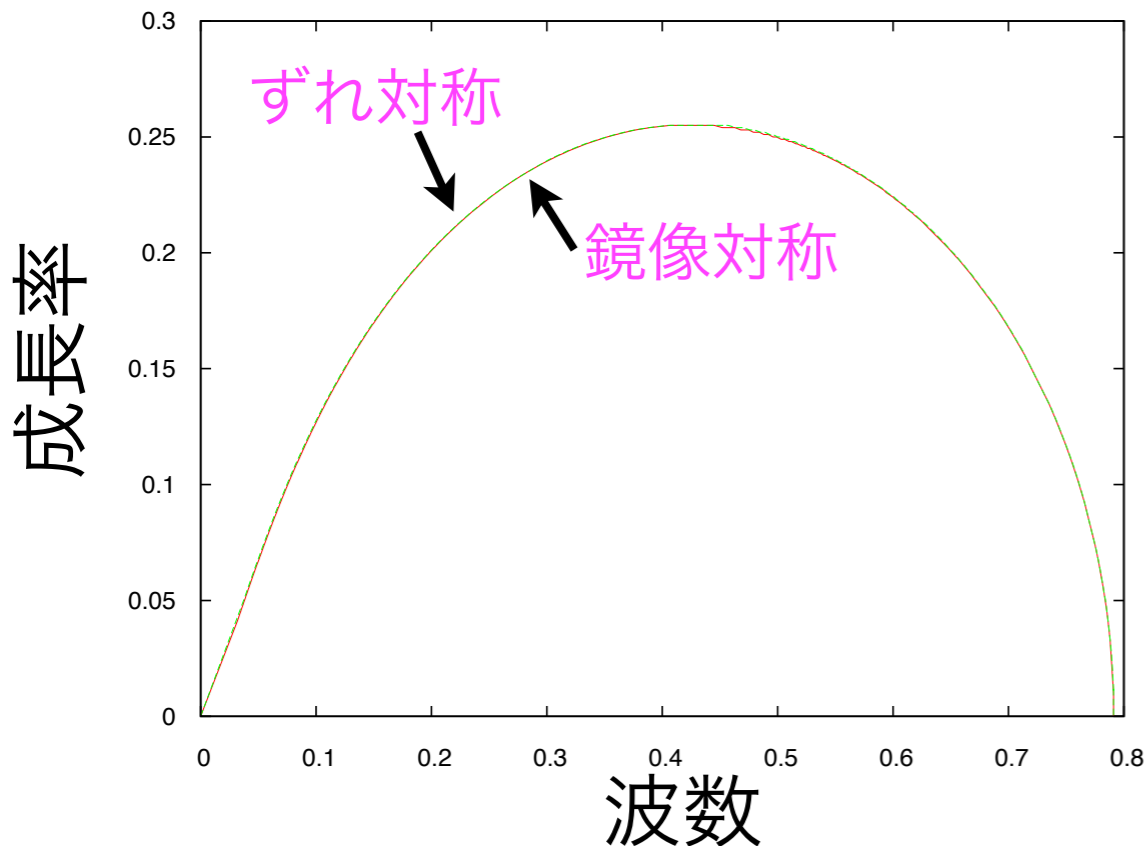
宇宙線無

$$\frac{P_{mag}}{P_{gas}} = 1.0 \quad \frac{P_{CR}}{P_{gas}} = 0.0$$

ずれ対称の方が成長率が大きい。

最大成長率 ~ 0.1

最大成長波長 $\sim 2\pi/0.16 \sim 39$



宇宙線有

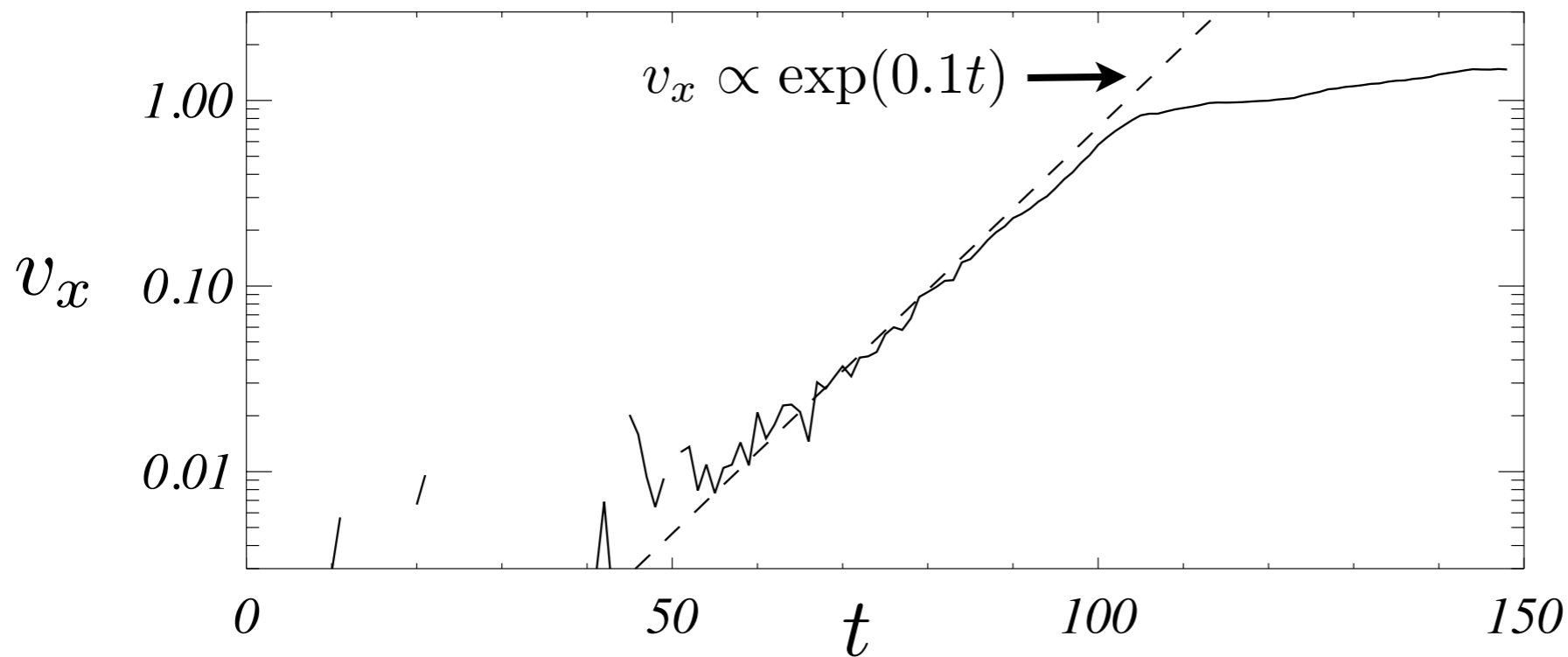
$$\frac{P_{mag}}{P_{gas}} = 0.2 \quad \frac{P_{CR}}{P_{gas}} = 0.8$$

ずれ対称と鏡像対称の成長率はほぼ同じ。

最大成長率 ~ 0.255

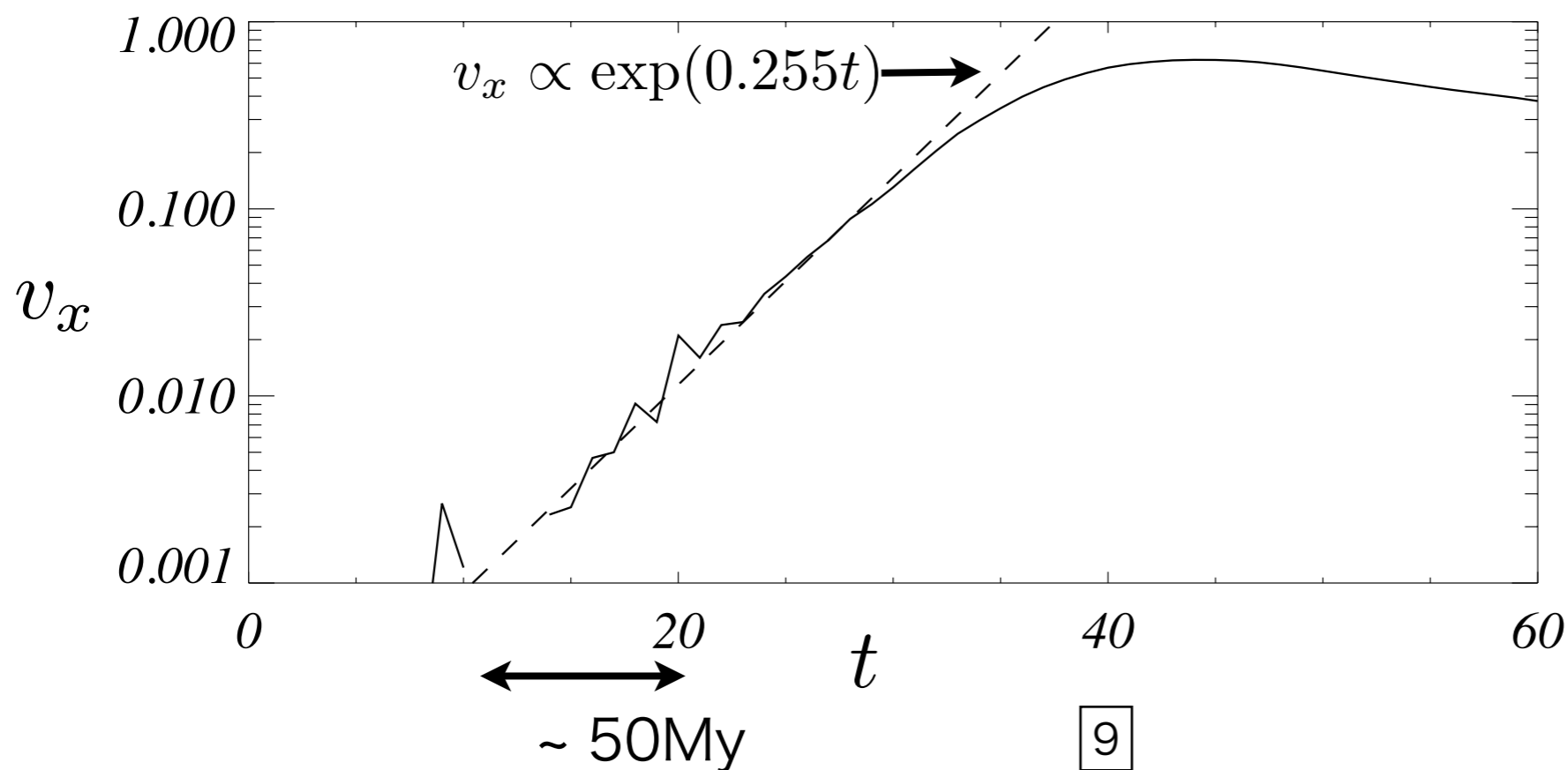
最大成長波長 $\sim 2\pi/0.43 \sim 14.6$

結果(3)：成長率の比較



宇宙線無

v_x at $(x, y) = (110, 17.3)$
の時間変化。



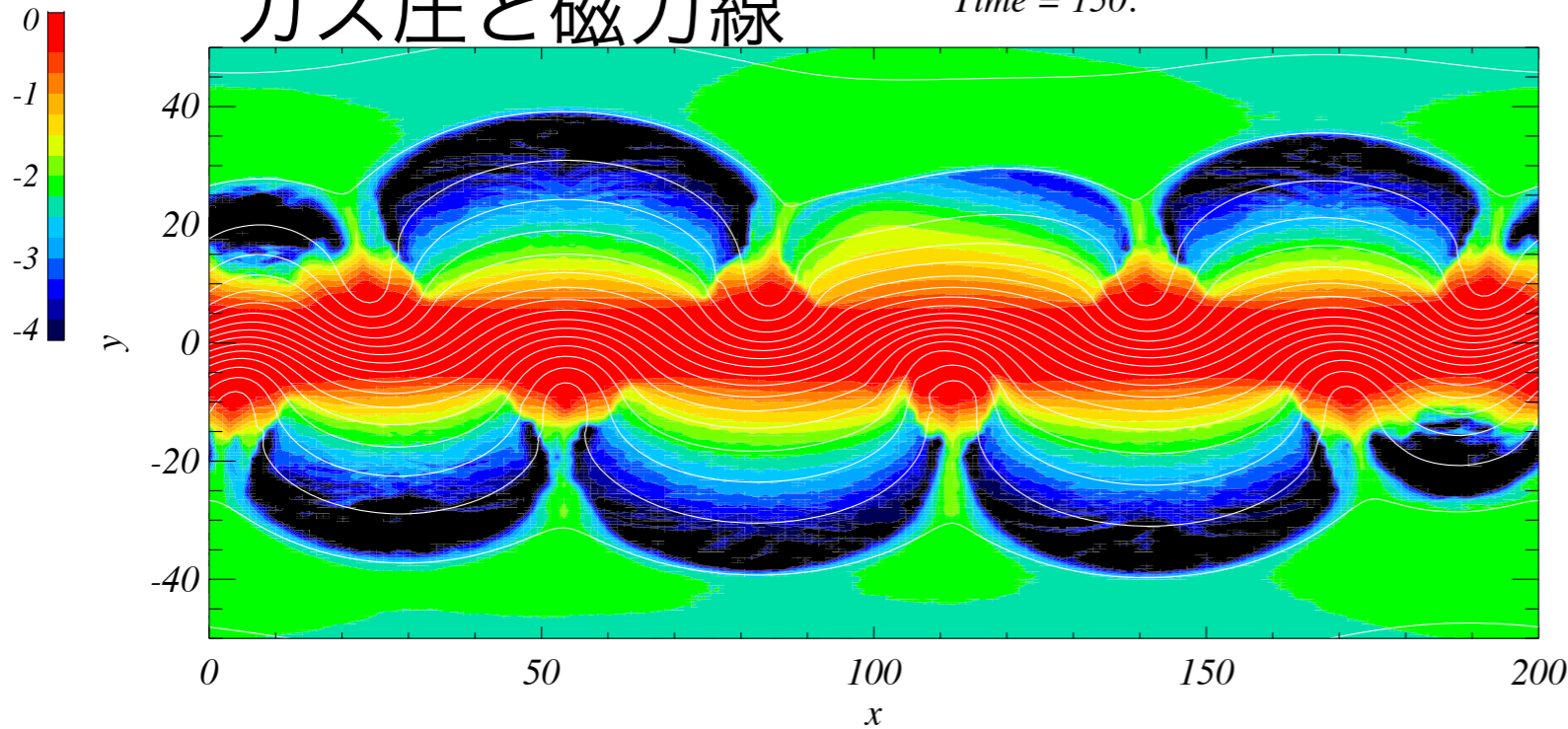
宇宙線有

v_x at $(x, y) = (64.5, 18.5)$
の時間変化。

結果(4) : 非線形段階

ガス圧と磁力線

Time = 150.

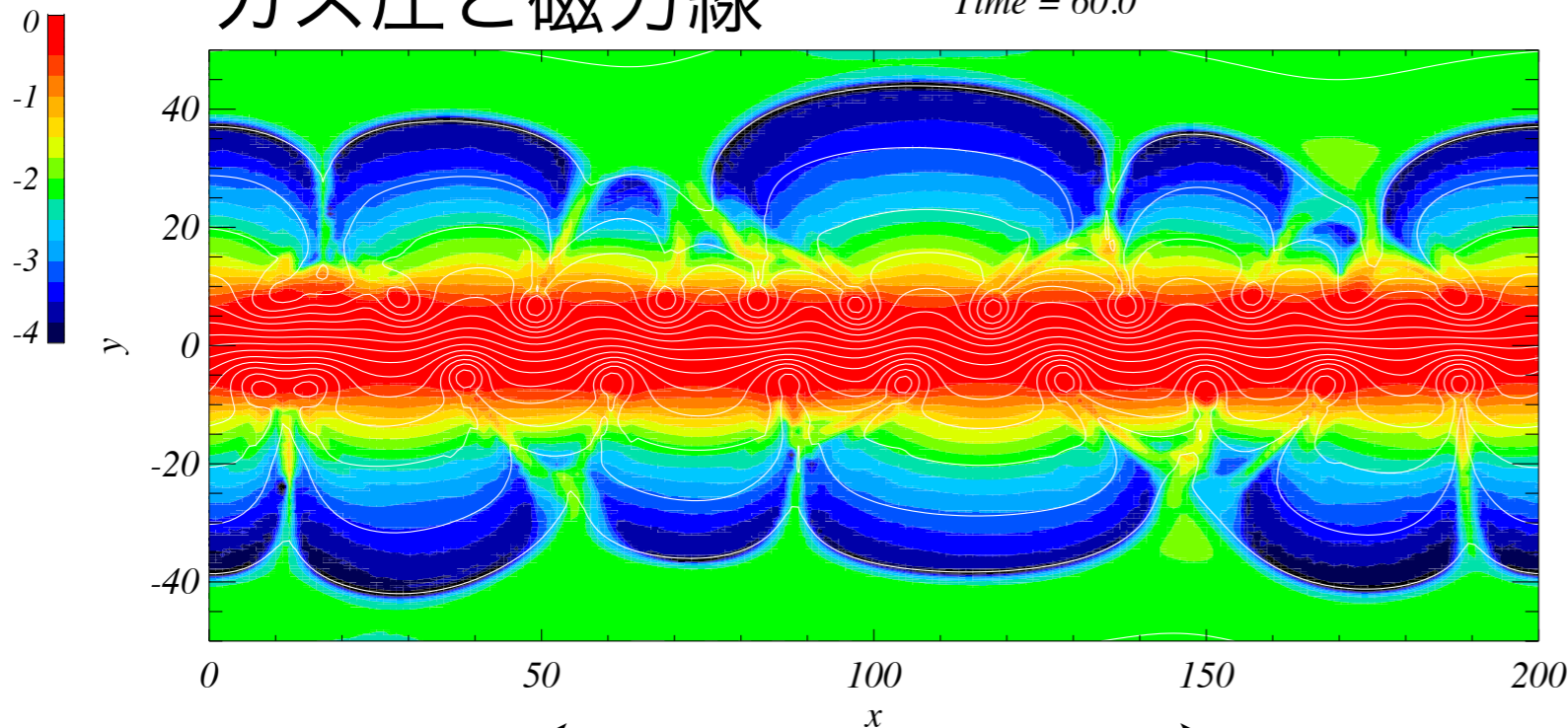


宇宙線無

線形段階での波長とほぼ同じ大きさの磁気ループが「ずれ対称」のまま成長する。

ガス圧と磁力線

Time = 60.0

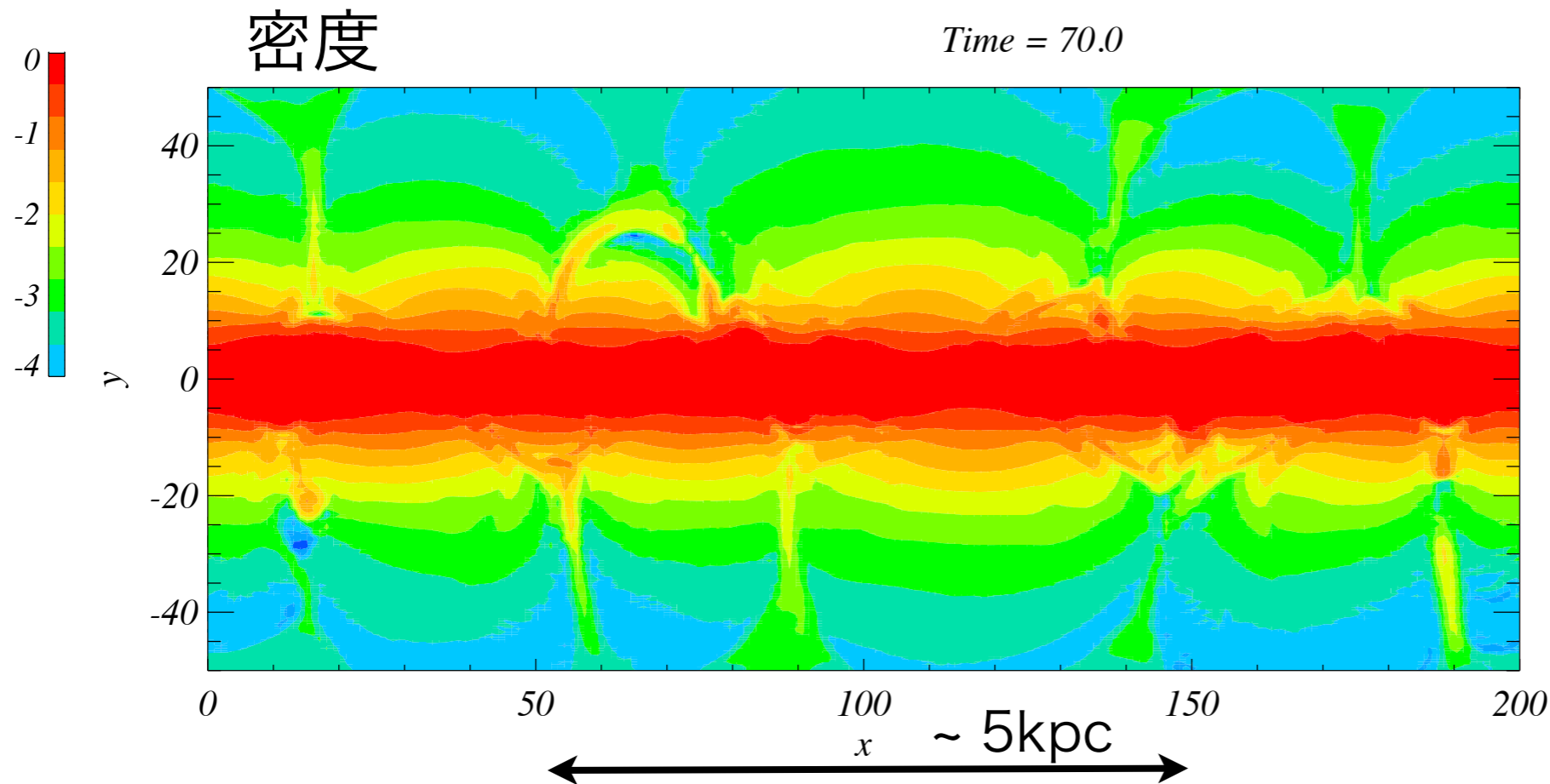


宇宙線有

宇宙線の圧力のため、上空で磁気ループが横に膨張し、より大きな構造ができる。大きくなったループは、遅れて成長してきたループの成長を妨げる。

← ~ 5kpc → 10

結果(5)：非線形段階の密度



宇宙線有

$$\frac{P_{mag}}{P_{gas}} = 0.2$$

$$\frac{P_{CR}}{P_{gas}} = 0.8$$

上空で磁気ループが衝突してガスを圧縮し、フィラメント状の密度構造ができる。その間隔はループの膨張のため、線形の最大成長波長より大きい。赤道面における対称性には規則性が見えない。

まとめ

- 宇宙線の圧力の割合が大きい時、線形成長において「鏡像対称」と「ずれ対称」の成長率がほとんど同じになる。
- 非線形段階に入ると、磁気ループが上空で膨張し線形の最大成長波長よりも大きな構造ができる。
- 上空で膨張した磁気ループが遅れて成長してきたループの成長を妨げる。最終的に、大きなループ構造と小さなループ構造が併存し、赤道面における対称性には規則性がない。