

銀河宇宙線を考慮した パーカー不安定性の時間発展

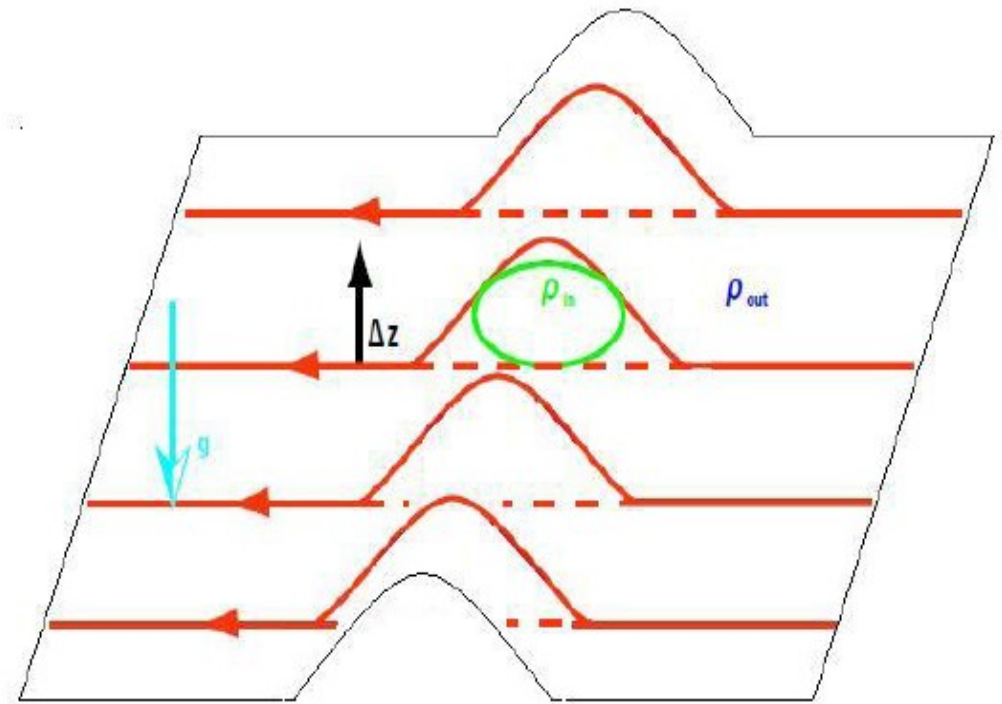
千葉大学 宇宙物理学研究室
M1 工藤 祐己

Introduction

- 銀河磁場は分子雲や星間乱流の生成をもたらす原因と考えられるため、磁場の構造を知ることは重要である。一方で、3次元磁気流体シミュレーションによって銀河磁場の時間発展が計算された。(Nishikori et al. 2006)
- しかし、エネルギー等分配から磁場と同程度のエネルギー密度を持つと考えられている、銀河宇宙線を考慮する必要がある。
- このために宇宙線に対して磁場がどの程度影響を受けるかを知る必要がある。
- 今回は、パーカー不安定性について、銀河宇宙線+MHDの線形解析と局所的シミュレーションについて見ていく。

パーカー不安定性について

- ・シート上に一様な磁場・密度が分布しているとする。
また、シートに垂直に重力が働くものとする。
- ・ここで、シートに対して磁力線を曲げるような摂動を与えることを考える。
- ・もし、シート上の密度がまわりの密度より薄くなるような、磁気張力より浮力が勝る場合、磁力線が浮上して不安定な状態となる。



状況設定

- 宇宙線は磁力線に沿って拡散する。
- 自己重力は考慮しない。
また、重力加速度は一定。
- 座標系の設定 $(x, z) \rightarrow (\phi, z)$
- 0次の物理量について、

x(y)依存性はなく、一様に分布している。

ガスは角速度 Ω で剛体回転し、0次の速度は存在しない。

z依存性について以下の平衡の式が成り立つものとする。

$$\frac{d}{dz} \left[P_g + P_{CR} + \frac{B^2(z)}{8\pi} \right] + \rho g_z = 0$$

この時圧力比を以下の様におくことで

$$\alpha = P_B / P_g, \beta = P_{CR} / P_g$$

全圧力(ガス圧+宇宙線の圧力+磁気圧)に対するスケールハイトは、

$$H = (1 + \alpha + \beta) \frac{C_{s,0}^2}{\gamma_g g_z}$$

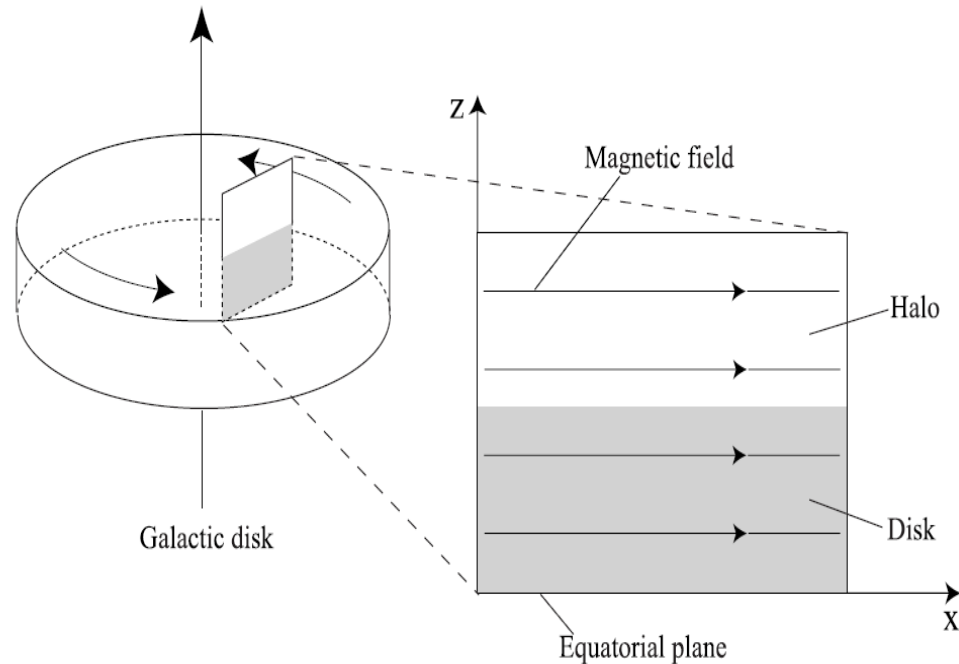


Fig. 1.—Schematic picture of the simulation model and simulation box.

基礎方程式

1. 連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

2. 運動方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot \left[\rho \mathbf{V} \mathbf{V} + \left(P_g + P_c + \frac{B^2}{8\pi} \right) \mathbf{I} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{4\pi} \right] - \rho \mathbf{g} + 2\rho \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} = 0$$

3. 誘導方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) = 0$$

4. エネルギーの式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_g}{\gamma_g - 1} + \frac{1}{2} \rho V^2 + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1} P_g + \frac{1}{2} \rho V^2 \right) \mathbf{V} + \frac{1}{4\pi} (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \right] + \mathbf{V} \cdot (\nabla P_{CR} - \rho \mathbf{g}) = 0$$

5. 宇宙線の式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_{CR}}{\gamma_{CR} - 1} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\gamma_{CR}}{\gamma_{CR} - 1} P_{CR} \right) \mathbf{V} - \mathbf{V} \cdot \nabla P_{CR} - \nabla \cdot \left[\kappa_{\parallel} \mathbf{b} \mathbf{b} \cdot \nabla \left(\frac{P_{CR}}{\gamma_{CR} - 1} \right) \right] = 0$$

線形解析について

・規格化について

長さのスケール	$H_0 = C_{s,0}^2 / (\gamma_g g_z) = 50 \text{ pc}$
速度のスケール	$C_{s,0}^2 = 10 \text{ km s}^{-1}$
密度のスケール	$\rho_0 = 1.6 \times 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$
時間のスケール	$H_0 / C_{s,0} \sim 5 \text{ Myr}$

・定数の設定 (基準値)

$$\gamma_g = 1.05, \gamma_{CR} = 4/3, \alpha = 1, \beta = 1$$
$$g_z = 6.3 \times 10^{-9} \text{ cm s}^{-2}, \kappa_{\parallel} \sim 3 \times 10^{28} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

但し簡単化のために $k_y = 0$

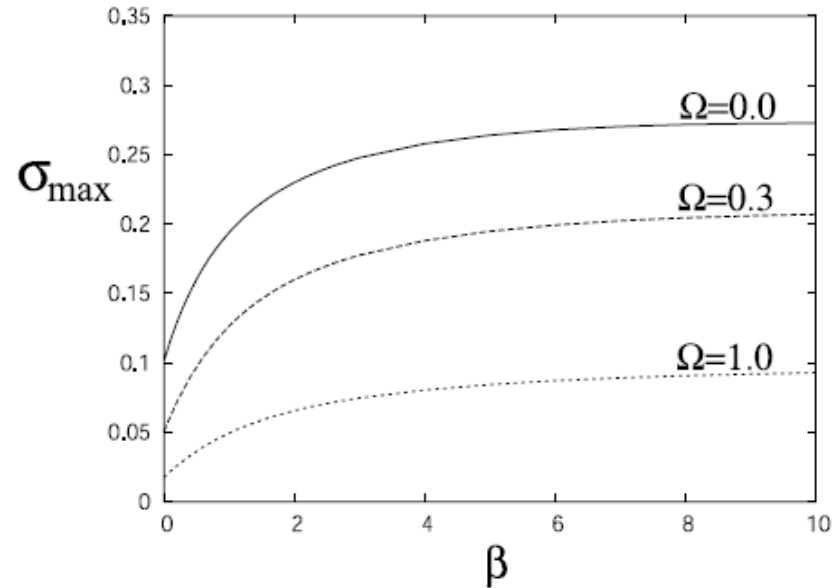
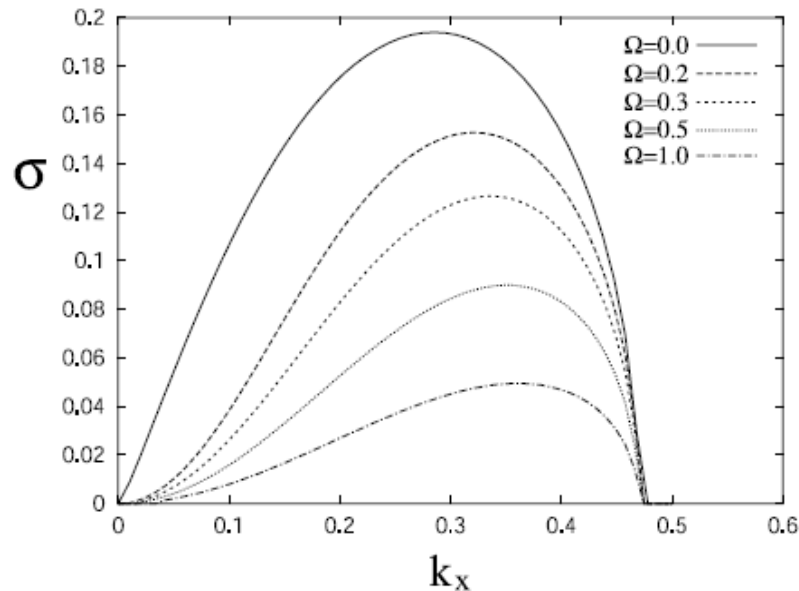
・摂動について

等温的に摂動を加え、 $\xi = \xi(z)e^{\sigma t + i(k_x x + k_y y)}$ の様に展開。
zについての微分方程式が出来るので、2つの境界条件
($z=0, z \rightarrow \infty$)をおくことで数値的に積分を行う。

線形解析結果1

(1) 回転の効果について

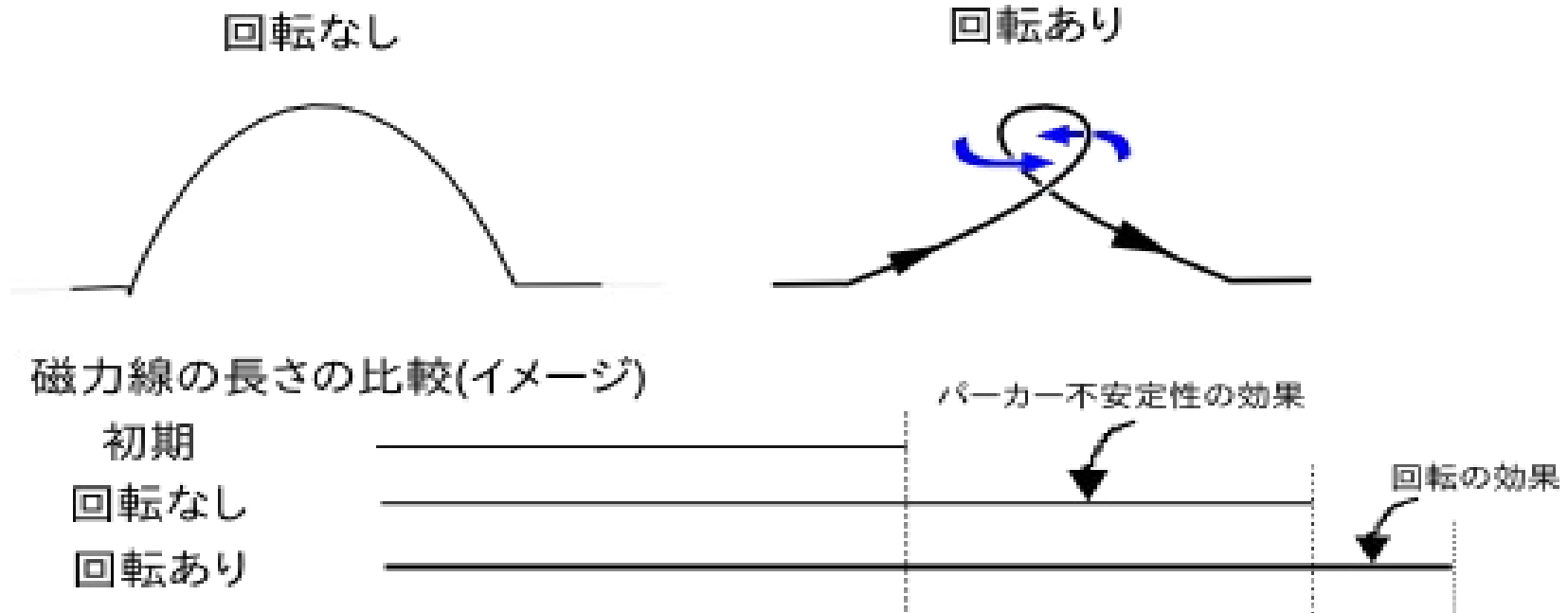
($\alpha=1$ 、 $\beta=1$ 、拡散係数=一定)



- 回転速度が大きいほど成長がわるくなる。
→ コリオリ力により磁力線のループが捻れ (α 効果)、捻れのみだけ磁力線が伸びるため、磁気張力が増す。
- 波長が大きいほど成長が悪くなる。
→ コリオリ力の効果が受けやすくなる

線形解析結果1

(1) 回転の効果についてのイメージ

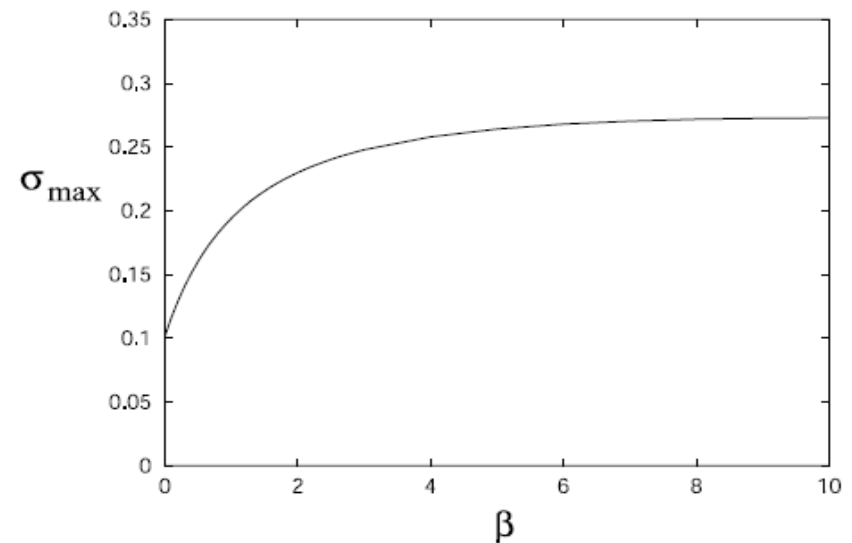
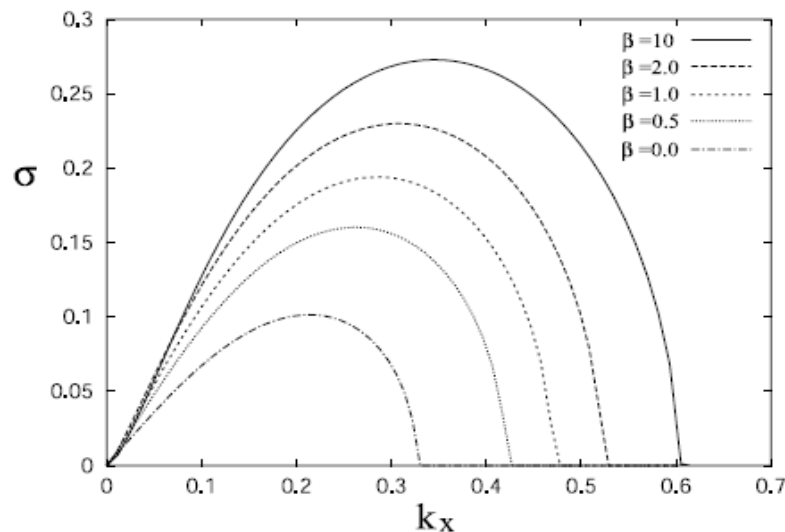


- 回転速度が大きいほど成長がわるくなる。
→ コリオリ力(青矢印)により磁力線のループが捻れ(α 効果)、3次元的に捻れのみで磁力線が伸びる。磁力線が伸びた分だけ復元力である磁気張力が増すため、摂動は成長しにくい。

線形解析結果2

(2) β (宇宙線圧力)の効果について

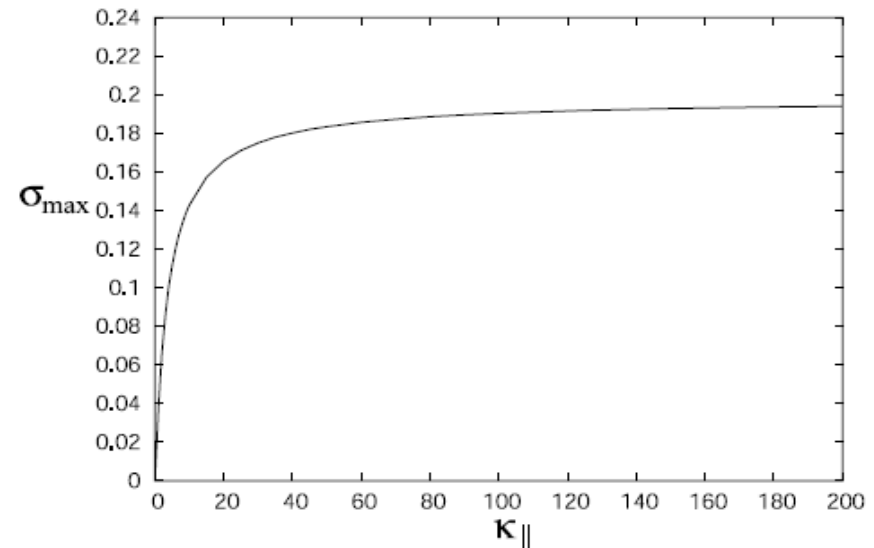
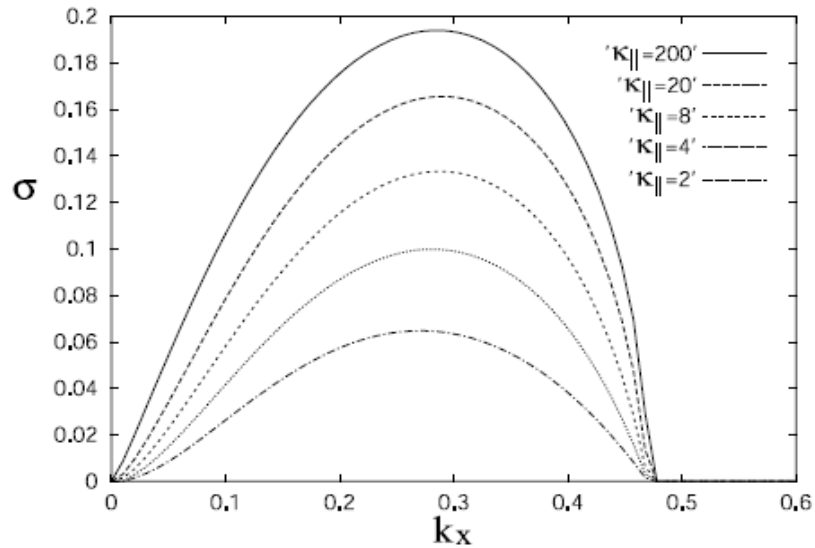
($\alpha=1$ 、 $\Omega=0$ 、拡散係数=一定)



- β が大きいほどよく成長する。(左図)
 - 宇宙線圧力が大きくなることで浮力が増す
 - $\beta = 0$ の場合は宇宙線を考慮しない場合の様子
- β を大きくしていくと、最大成長率はほぼ一定値に落ち着く

線形解析結果3

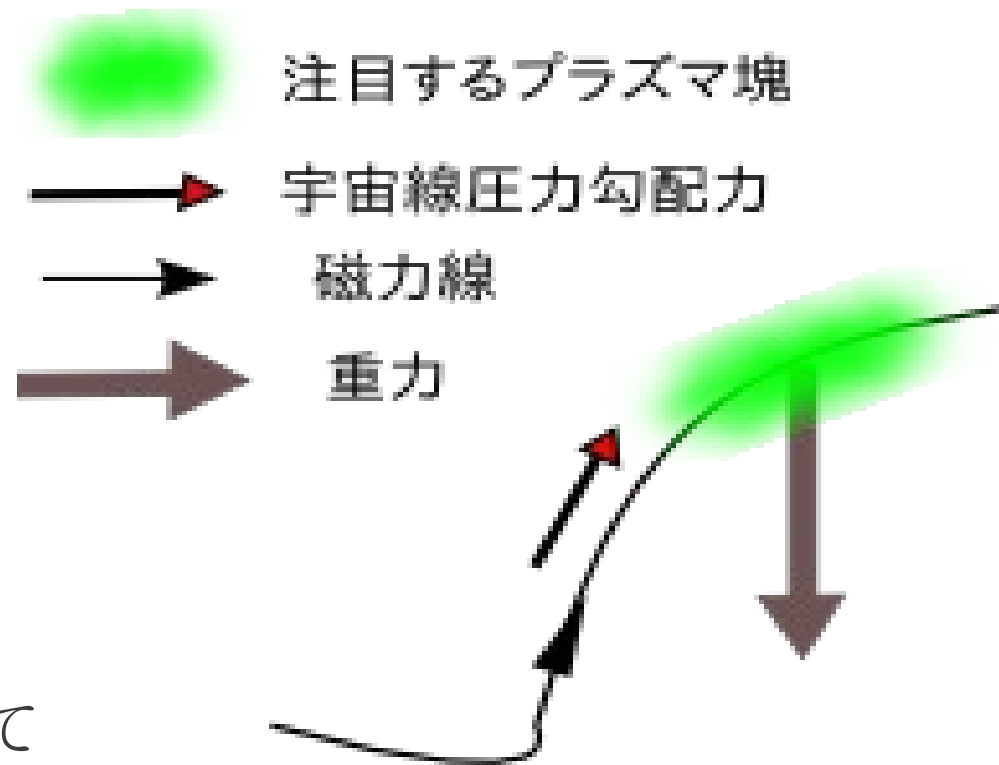
(3) 拡散係数の効果について ($\alpha=1$, $\beta=1$, $\Omega=0$)



- 拡散係数が大きいほどよく成長する
 - 摂動を与えると、ガスは磁力線に沿って落ち込むことが分かっている。一方、宇宙線は磁力線に沿って圧力勾配ができる。
 - ガスが落ち込むとさらに浮力が増すため不安定になるが、宇宙線の圧力勾配によってガスの落ち込みを抑える。
 - 拡散が効くと圧力勾配がすぐなくなるためよく成長する。
- 拡散が効くと、最大成長率がほぼ一定となる
 - 宇宙線の圧力勾配がなくなるため

線形解析結果3

(3) 拡散係数の効果のイメージ



・拡散係数が大きいほどよく成長する

→ 摂動を与えると、ガスは重力によって磁力線に沿って落ち込むことが分かっている。

一方、宇宙線は磁力線に沿って圧力勾配ができる。

→ ガスが落ち込むとさらに浮力が増すため不安定になるが、宇宙線の圧力勾配によってガスの落ち込みを抑える。

拡散が効くと圧力勾配がすぐなくなるため、ガスは落ち込み、元々ガスがあったところでは軽くなるため浮力が大きくなる。

結果、摂動がよく成長する