

原始惑星系円盤での 大局磁場と面密度の進化

竹内拓 (東工大)

奥住聡 (東工大)

武藤恭之 (工学院大)

MHD乱流/windによる円盤降着

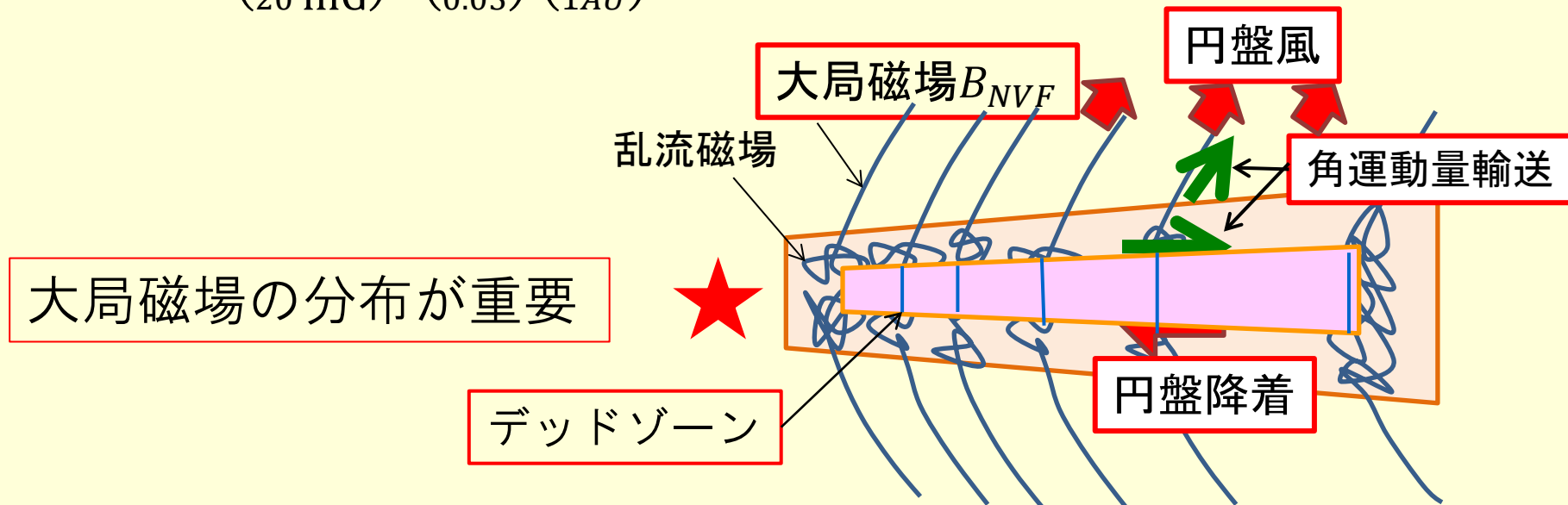
- 磁場による角運動量輸送

- Maxwell stress $w_{r\theta} = \frac{\langle -B_r B_\theta \rangle}{4\pi}$, $w_{\theta z} = \frac{\langle -B_\theta B_z \rangle}{4\pi}$

- 大局的な縦磁場に依存

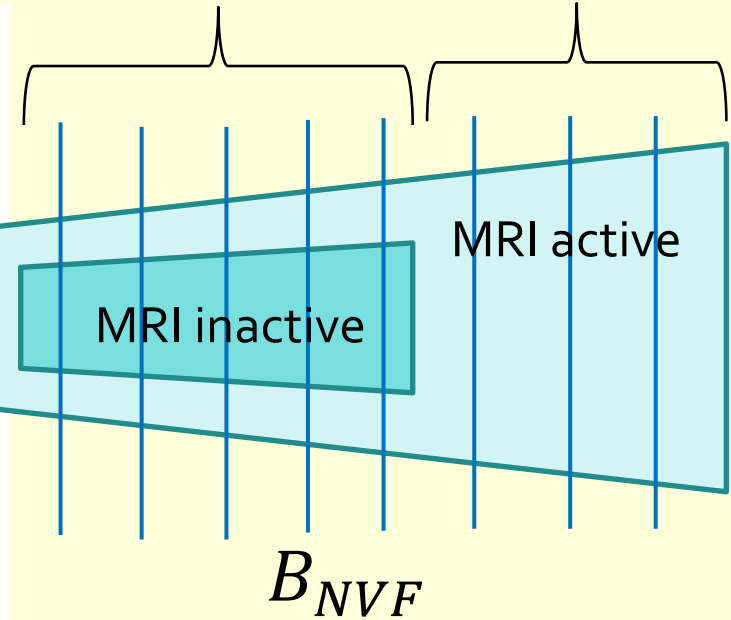
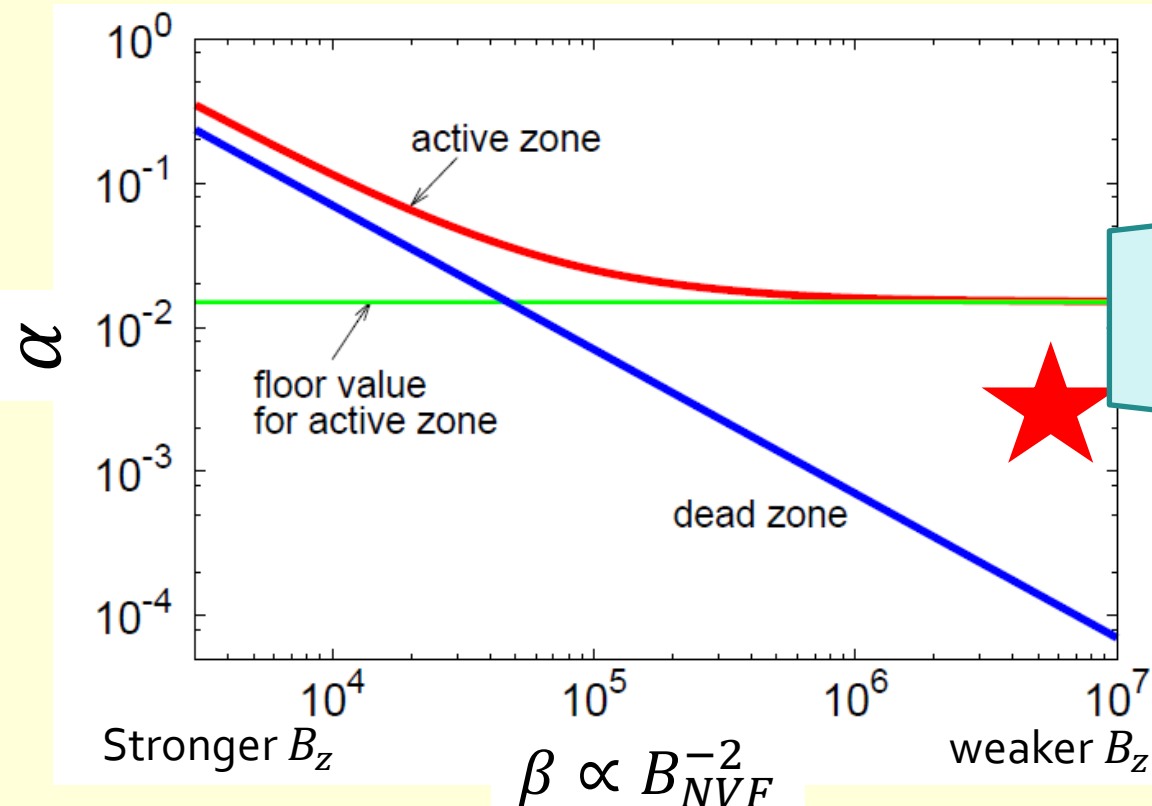
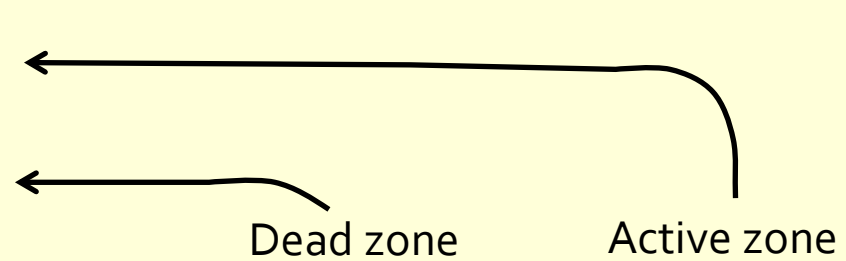
- デッドゾーンがある場合---- Okuzumi & Hirose 2011
 - 円盤風 --- Bai+ 2013

- $\dot{M} \approx \left(\frac{B_{NVF}}{20 \text{ mG}}\right)^2 \left(\frac{h/r}{0.05}\right) \left(\frac{r}{1AU}\right)^{\frac{5}{2}} 10^{-8} M_{sun}/\text{yr}$ (MHD乱流)

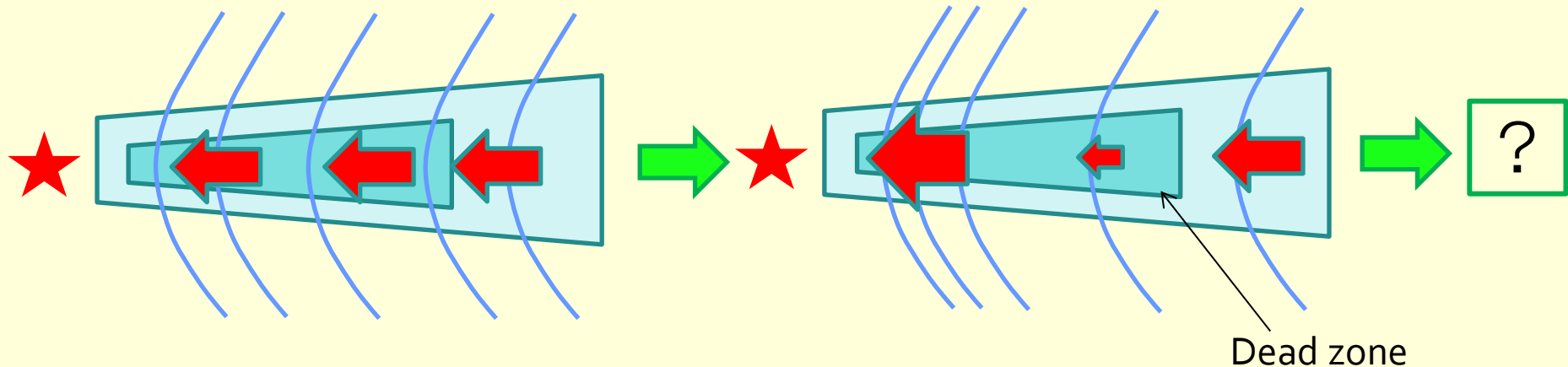


MRI乱流の強さ

- Active zone : $\alpha \sim 10^{-2}$
- Dead zone: $\alpha \propto B_{NVF}^2$



円盤ガスと磁場の進化



ガス円盤の降着 磁場の引きずり 磁場の進化
降着率 $\dot{M} \propto B_{NVF}^2$

- 目的：ガス円盤と大局磁場の進化を同時に解く
- 今回：磁場の構造のみ解く

大局磁場進化の簡単なモデル

Lubow+ 1994

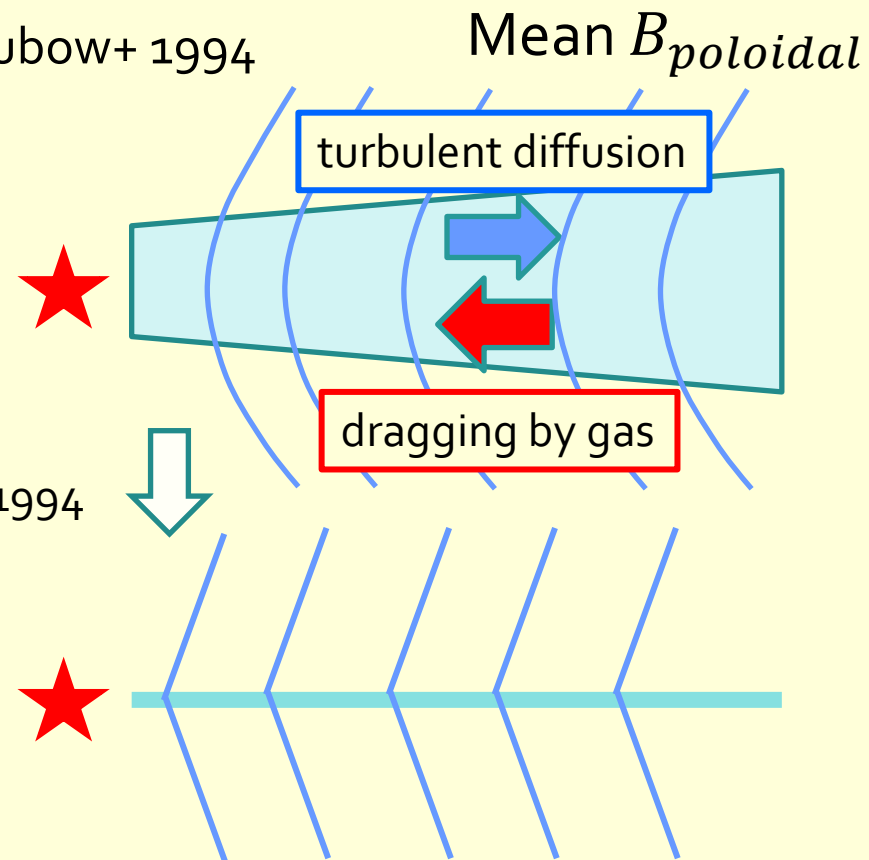
- 平均場の誘導方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{B} \times \mathbf{v}) + \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}) = 0$$

- 最も簡単な2次元モデル --- Lubow+ 1994

- 無限に薄い円盤
- 円盤の外部はforce free
- toroidal field B_θ なし

Model of Lubow+1994



Part 1. 静的磁場

ガス円盤形状が与えられたとして、磁場の定常解を求める

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{B} \times \mathbf{v}) + \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 4\pi \mathbf{J}/c$$

鉛直積分: $\int_{-h}^h \dots (1/\eta) dz$ --- 電気伝導度 $1/\eta$ で重みづけ

Ogilvie & Livio 2001

定常状態は

$$B_z - \frac{D}{2} \frac{4\pi J_\theta^S}{c} = 0$$

ここで、磁場の拡散と移流の強さの比

$$D = -\frac{\bar{\eta}}{\bar{v}_r h}$$

典型的長さは h

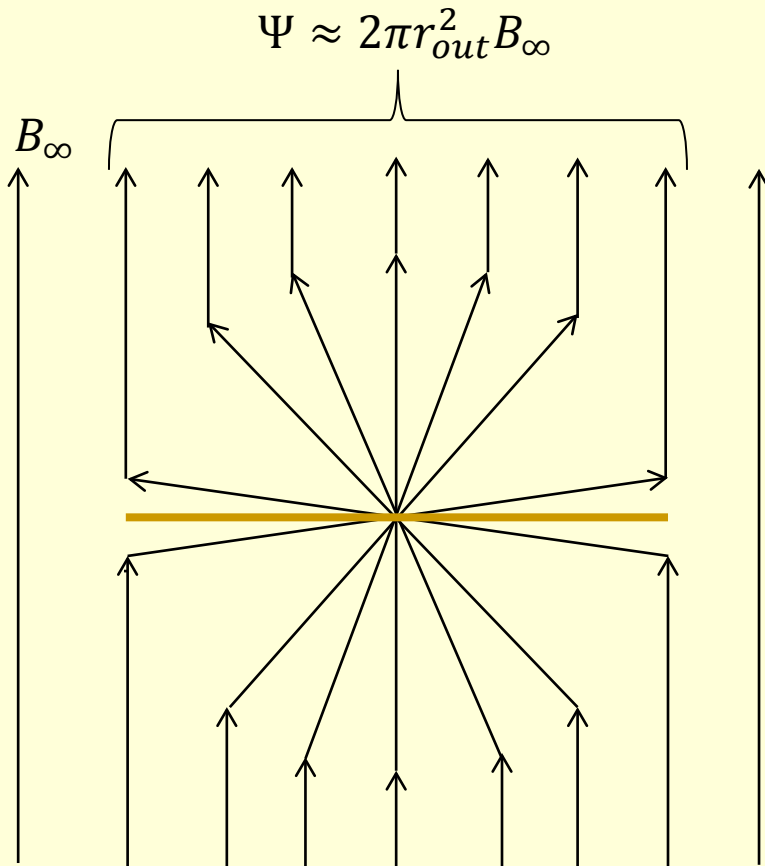
$$(\nabla \times \mathbf{B})_\theta = \frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r}$$

静的磁場

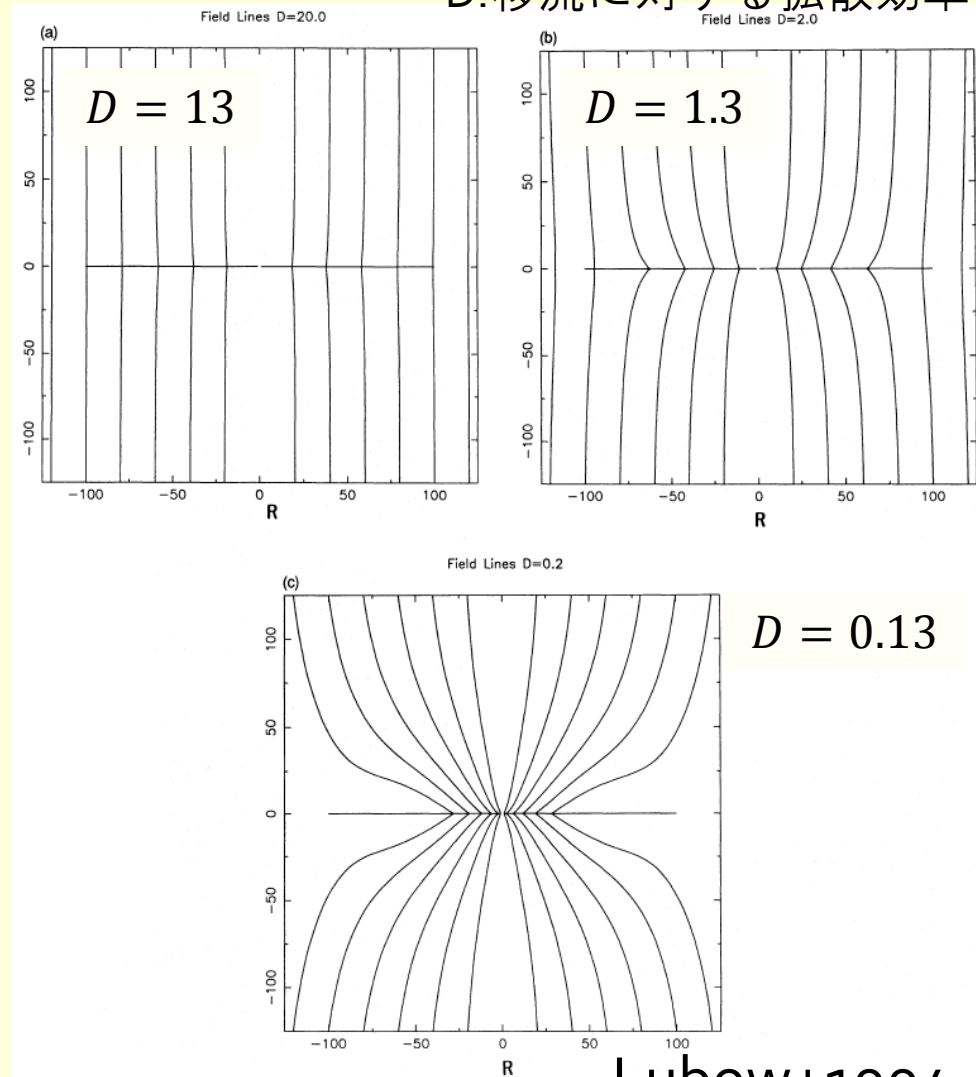
- 磁場の引きずりが強いとき：Split monopole

- $|B| \propto R^{-2}$ ($R^2 = r^2 + z^2$)
- 円盤表面で $B_r \propto r^{-2}$, $B_z \ll B_r$

- $2\pi r_{out}^2 B_\infty$ 程度の磁束が原点に

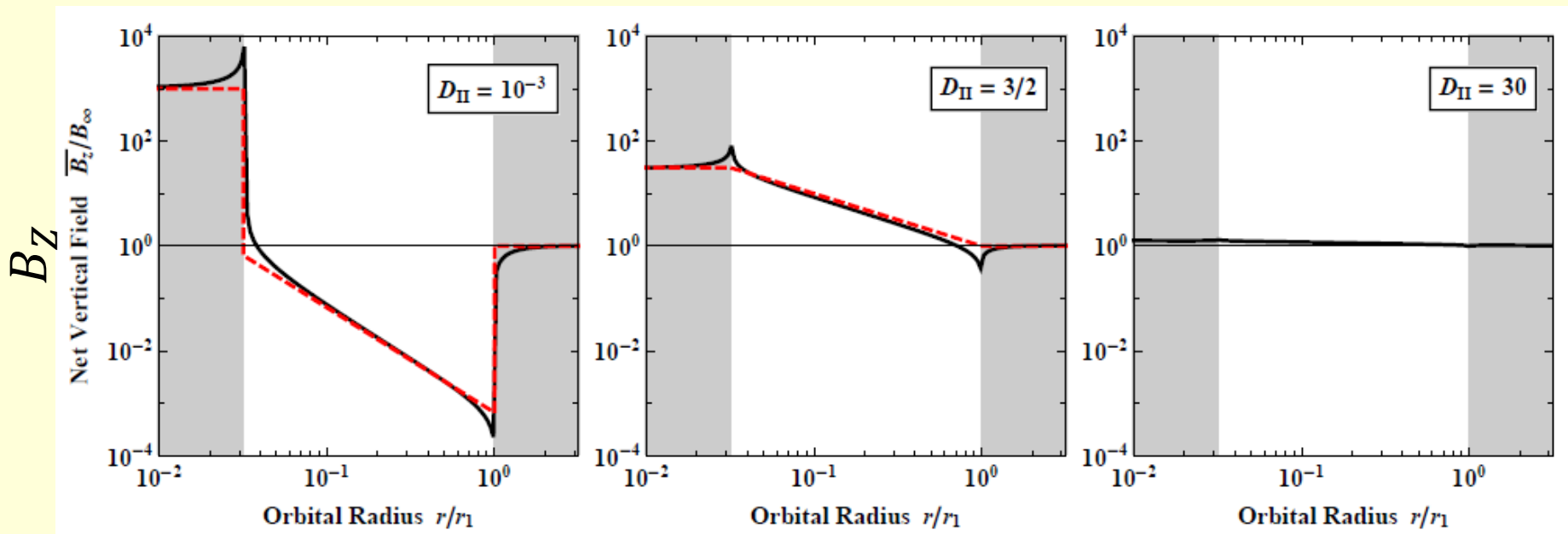
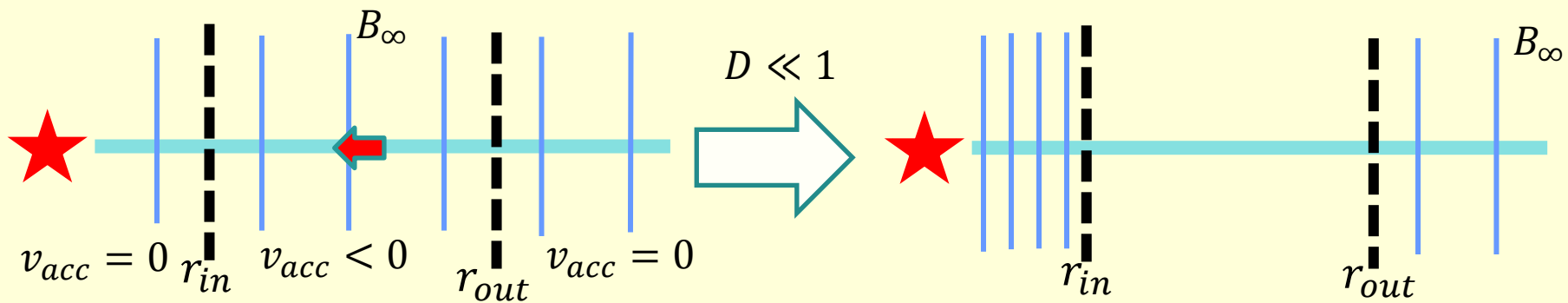


D: 移流に対する拡散効率



拡散効率Dの依存性

- $D \downarrow \rightarrow B_z$ のべきは2に近づく
 磁束は原点に集中
- } 磁場強度に上限



磁場の最大値

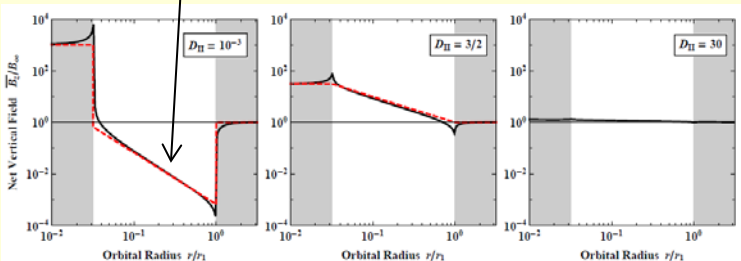
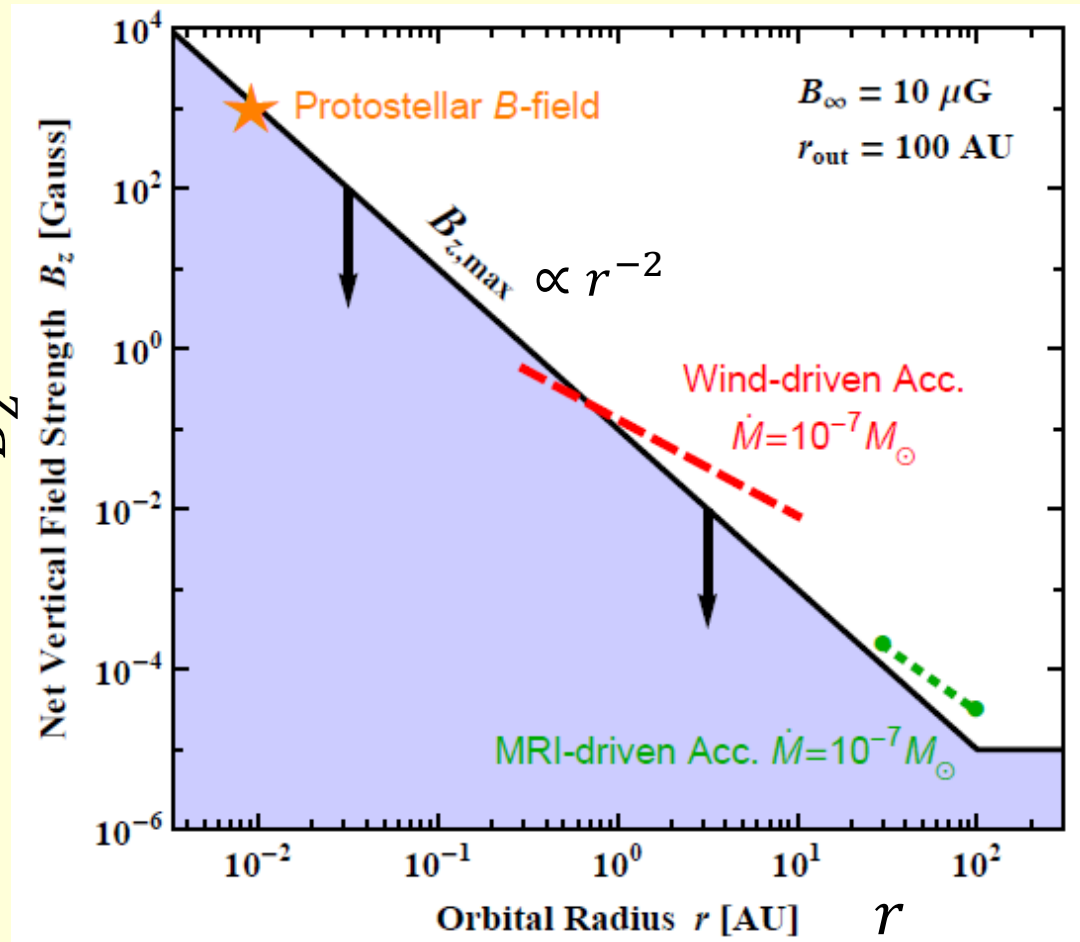
- $D \approx 1$ で磁場強度最大
- 最大磁場強度 $\Rightarrow \dot{M} \sim 10^{-7} M_{sun}/yr$

Okuzumi+ in prep

円盤形成期に大量の磁束が持ち込まれたら？
 → 時間発展

べきの最大 ~ 2

B_z



Part 2. 磁場の時間進化

- 円盤進化

$$- \frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (r^{1/2} \tilde{v}_{gas} \Sigma) \right]$$

質量で重みつき平均

$$\tilde{v}_{gas} = \frac{\int \rho v dz}{\Sigma}$$

- 磁場

$$- \frac{\partial \psi}{\partial t} = - \overline{u_r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{r \bar{\eta}}{2h} \frac{4\pi J_\theta^S}{c}$$

磁束: $\psi = \int r B_r dr$

- 進化の時間スケール

- 円盤ガス: $\tau_{disk} \sim r^2 / \tilde{v}_{gas}$

- 磁場の拡散: $\tau_{dif} \sim \left(\frac{h}{r}\right) P_{m,eff} \tau_{disk}$ $P_{m,eff} = \frac{\tilde{v}_{gas}}{\bar{\eta}}$

- 磁場の移流: $\tau_{adv} \sim C_u \tau_{disk}$

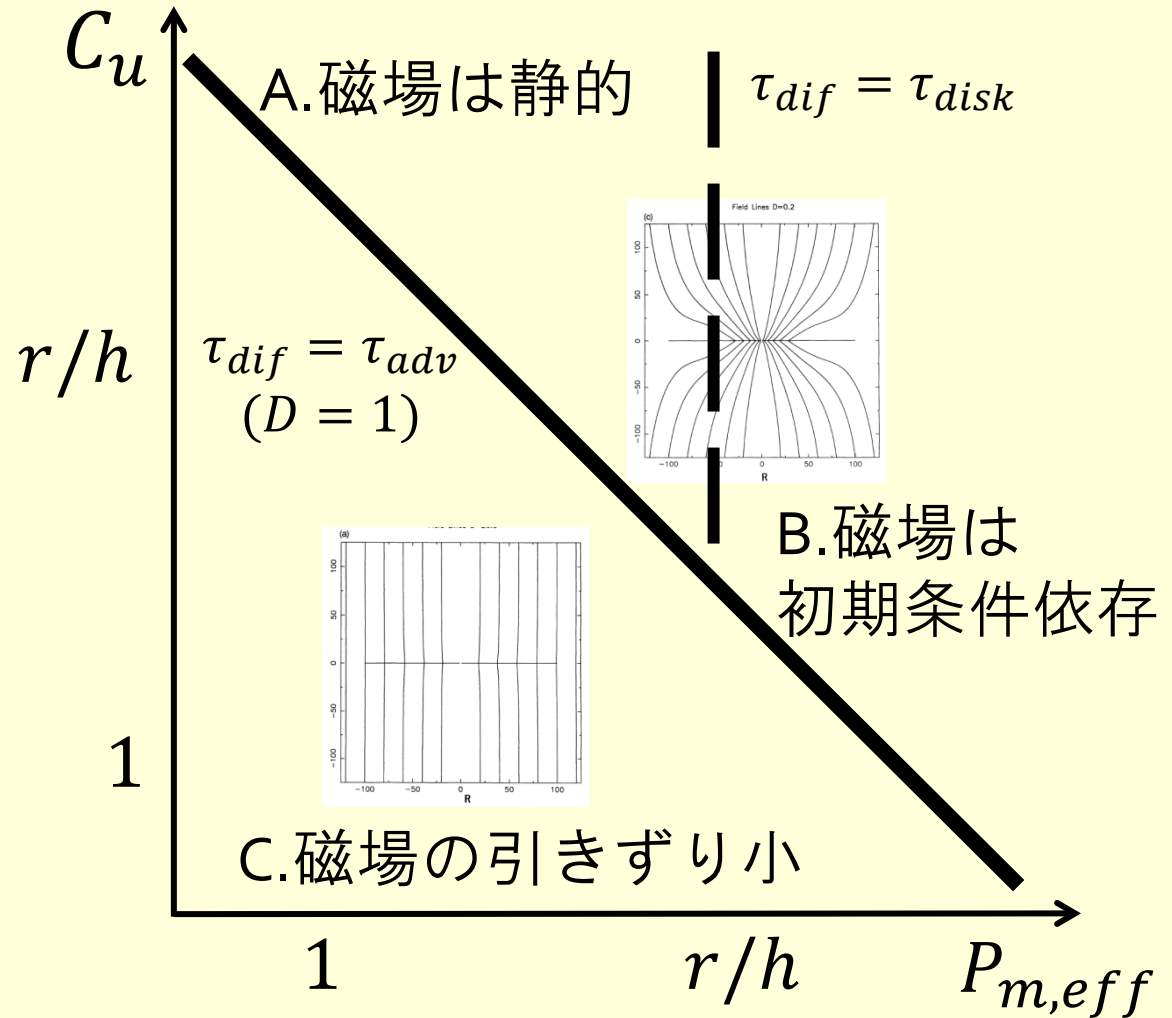
$$C_u = \frac{\overline{u_r}}{\tilde{u}_{gas}} \quad u_{gas} = \frac{\int \rho u_r dz}{\Sigma}$$

- $P_{m,eff}, C_u$ はz方向の構造による

時間スケールの比較

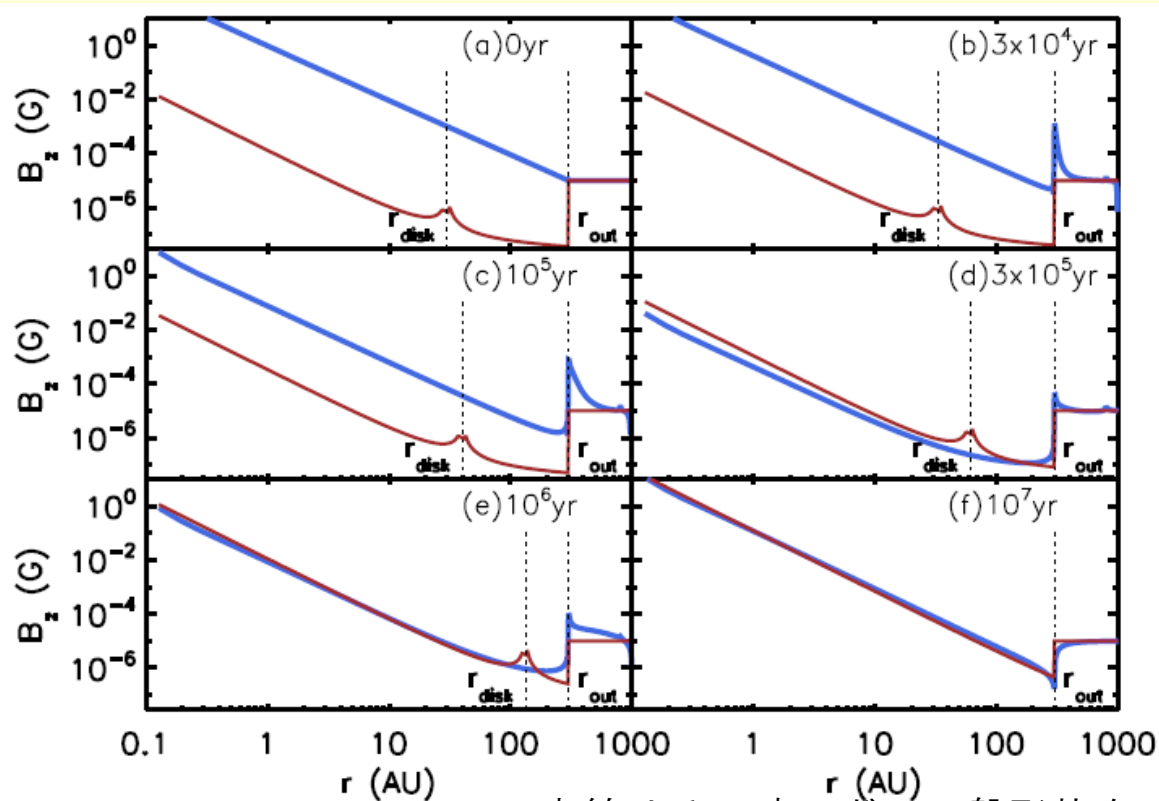
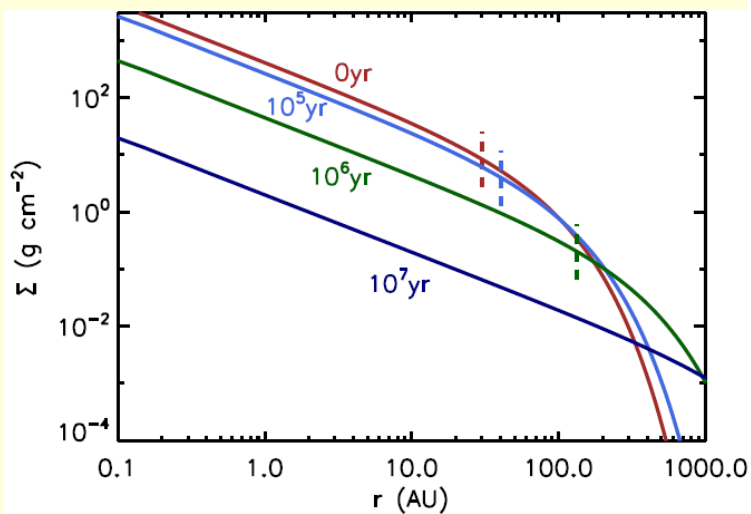
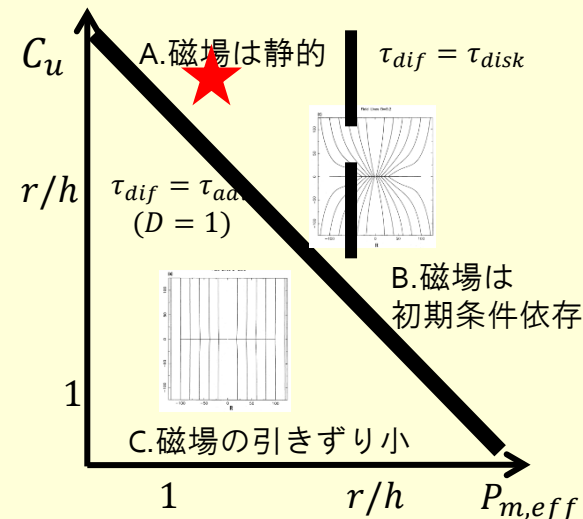
- $P_{m,eff} = \frac{\tilde{v}_{gas}}{\bar{\eta}}$

- $C_u = \frac{\overline{u_r}}{\tilde{u}_{gas}}$



$$A. C_u = \frac{\overline{u_r}}{\tilde{u}_{gas}} > r/h$$

- $\tau_{dif} = 2 \times 10^4 \text{ yr} \ll \tau_{disk}$
- 磁場形状は（初期段階を除き）静的解

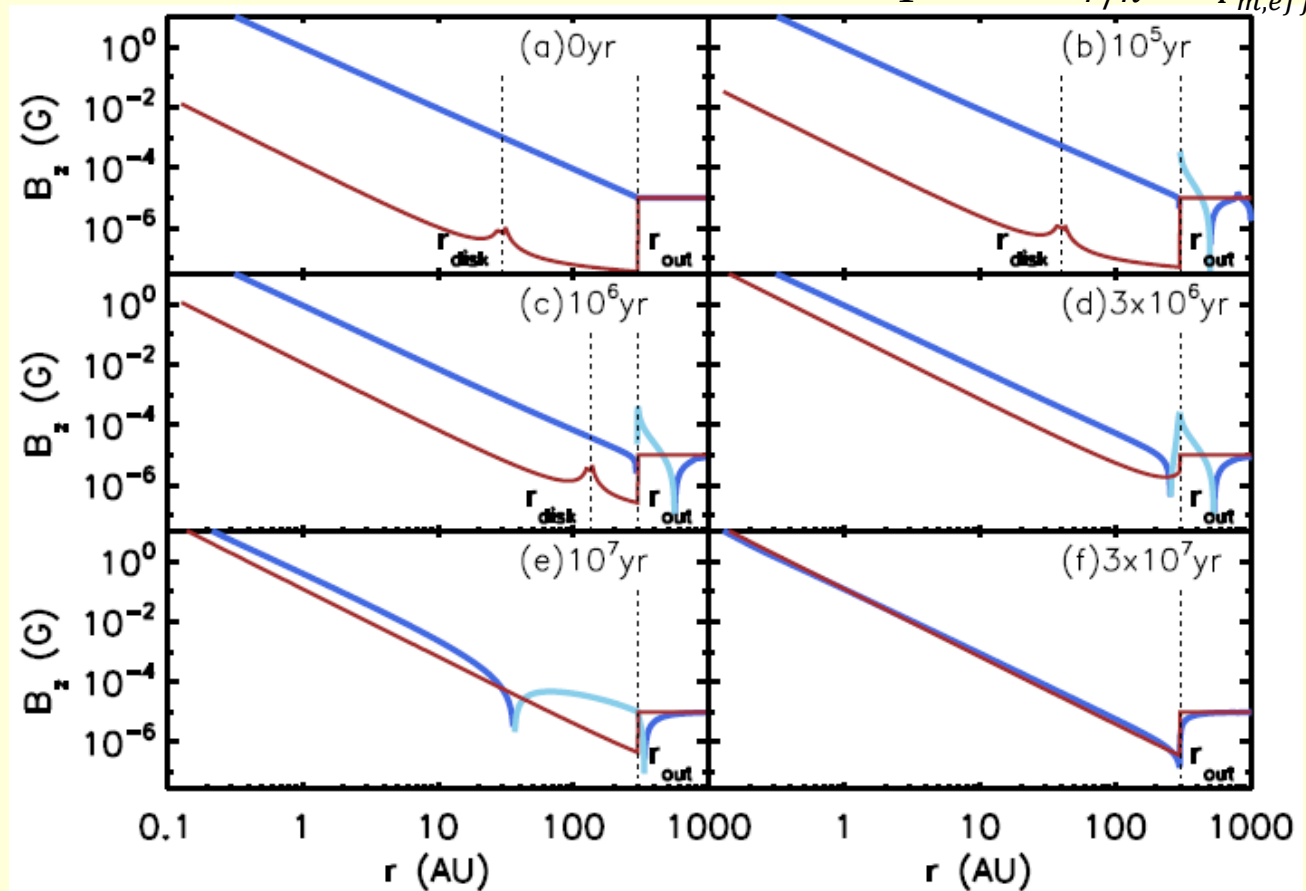
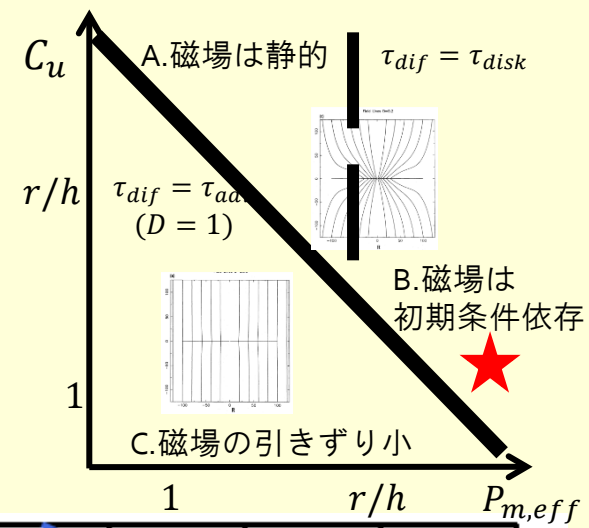


円盤は $\tau_{disk} = 3 \times 10^5 \text{ yr}$ で進化

赤線はその時のガス円盤形状を使って静的解を求めたもの

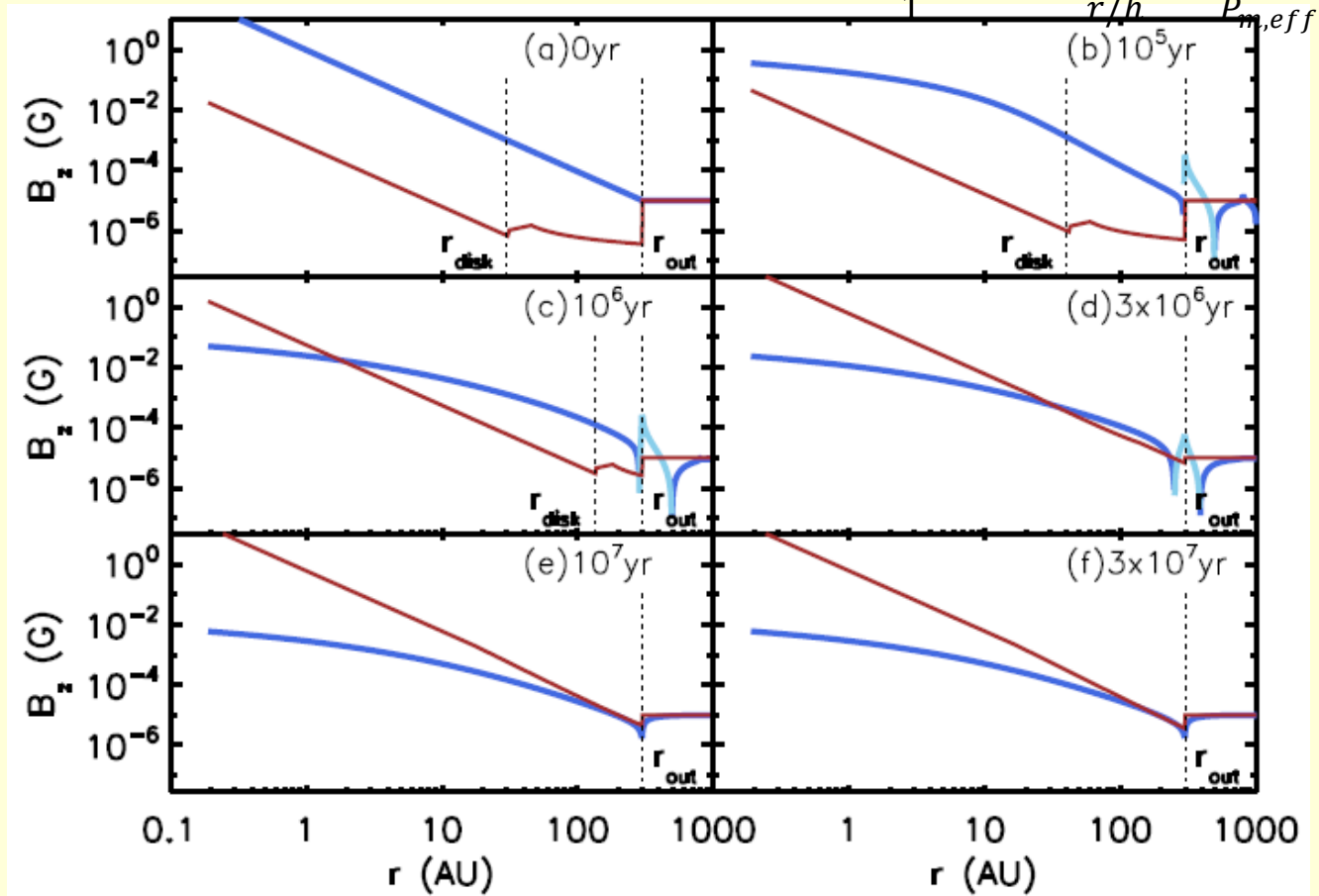
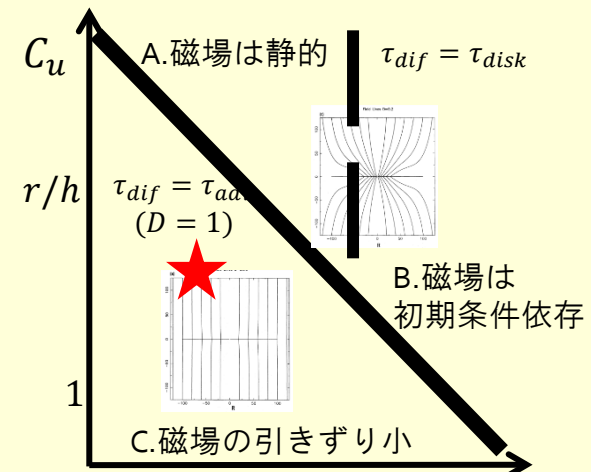
$$B \cdot P_{m,eff} > r/h$$

- $\tau_{dif} = 2 \times 10^6 \text{ yr} \gg \tau_{disk}$
- 磁場形状は初期条件に依存



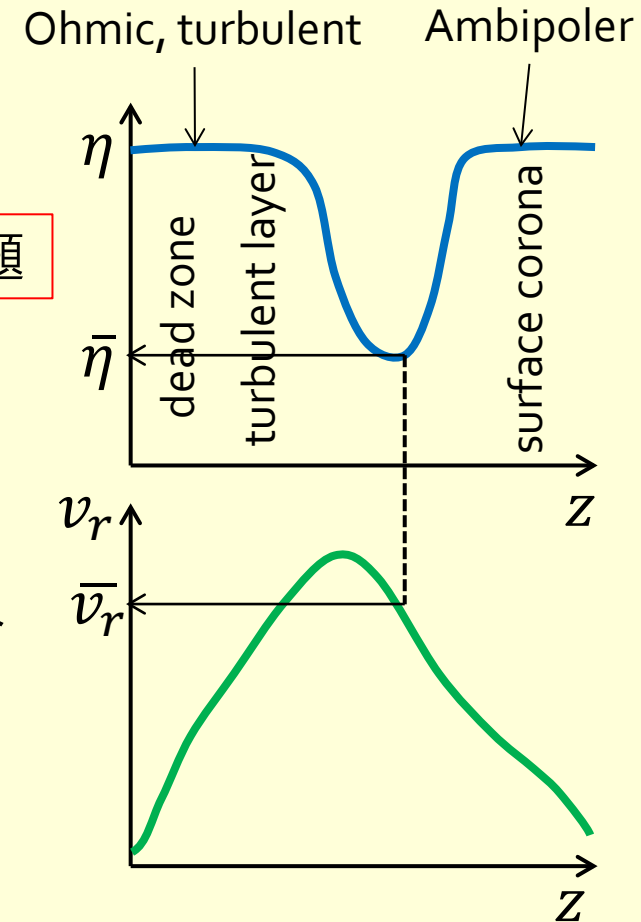
$$C.D > 1$$

- 磁場はすみやかに拡散



強い円盤磁場 $\Leftrightarrow D \sim 1$

- $D = -\frac{\bar{\eta}}{\bar{v}_r h}$
- これまで、乱流による拡散について
 - $v_r(z) \sim v_{turb}(z)/r$, $P_m(z) = \frac{v_{turb}(z)}{\eta_{turb}(z)} \sim 1$
 - $\frac{\eta_{turb}(z)}{v_r(z)h} \sim \frac{r}{h} \gg 1$ 円盤磁場が拡散してしまう問題
- 電気伝導度 $1/\eta$ での重みつき平均
 - $\bar{v}_r = \frac{\int_{-h}^h v_r(1/\eta) dz}{\int_{-h}^h (1/\eta) dz}$
- Ohmic, Ambipolar diffusion を考慮した場合
 - $D = -\frac{\bar{\eta}}{\bar{v}_r h} \lesssim 1$ となり得る?
 - 鉛直方向の η 分布が重要



まとめ

- 2次元、外部磁場force freeのモデル(Lubow+1994)を使うと
- 静的磁場形状は D で記述される $D = -\frac{\bar{\eta}}{\bar{v}_r h}$
 - $D \approx 1$ で磁場強度最大
- 進化のタイムスケールは、 $P_{m,eff} = \frac{v_{gas}}{\bar{\eta}}$ $C_u = \frac{u_{gas}}{\bar{u}_r}$ で決まる
- これらのパラメーターは、物理量を電気伝導度 $1/\eta$ で重みつけ平均したもの
 - $\eta(z)$ の分布が重要

今後の課題

- η (η_{Ohm} , η_{AD} , η_{turb})のz分布を求める
 - 課題① 電離度計算: η_{Ohm} , η_{AD}
 - 課題② MHDシミュレーションによる $\eta_{turb}(z)$ の測定
 - まずはLocal Stratifiedで
 - Lubowのモデルは、 $\eta(z)$, $u_r(z)$ が与えられれば、降着のメカニズムによらない
 - 課題③ Disk Windによる降着モデルへの応用
 - 外部磁場force freeの仮定はいいのか？
 - 課題④ 原始惑星系円盤進化への具体的な応用
 - deadzoneへのガス蓄積
 - 円盤散逸
- これまでの、a prioriに α を与えるモデルとは違う