

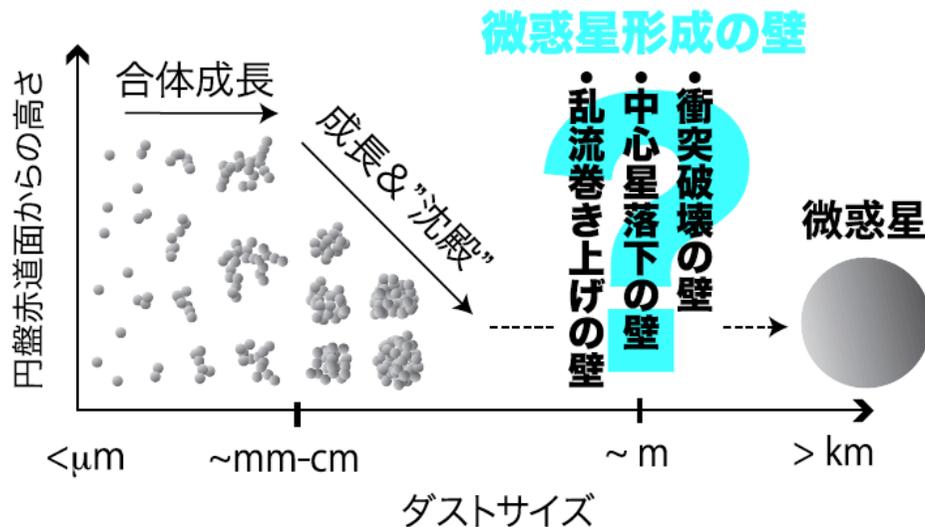
デッドゾーンがある円盤中での ダスト拡散

奥住 聡 (名大理)

廣瀬 重信 (JAMSTEC)

微惑星形成シナリオと「成長の壁」

- (1) ダスト粒子同士の合体成長 ←ダスト帯電による成長凍結 (Okuzumi 09)
- (2) 赤道面沈澱・ダスト層形成
- (3) **ダスト層重力不安定?** ←**乱流による巻き上げ** (Weidenschilling & Cuzzi 93)
or **直接合体成長?** ←**中心星落下, 乱流駆動の衝突破壊** (Brauer+ 08)



微惑星形成の可能な
進化経路の発見には、
円盤乱流のより具体的
なモデル化が重要

本研究の注目点：磁気乱流とダストの共進化

＊ **磁気回転不安定性(MRI)** (Balbus & Hawley 1991)

- 「**差動回転する円盤+(弱い)磁場**」で起こる、MHD起源の不安定性。
- 磁気乱流を生成・維持 → 乱流粘性の起源の最有力候補。

＊ ただし、MRIは**電離度の低い(=磁気拡散係数の大きい)領域**では安定化。

➡ **磁気的不活性領域, “デッドゾーン”** (Gammie 1996)

＊ 円盤電離度は何で決まっているか？

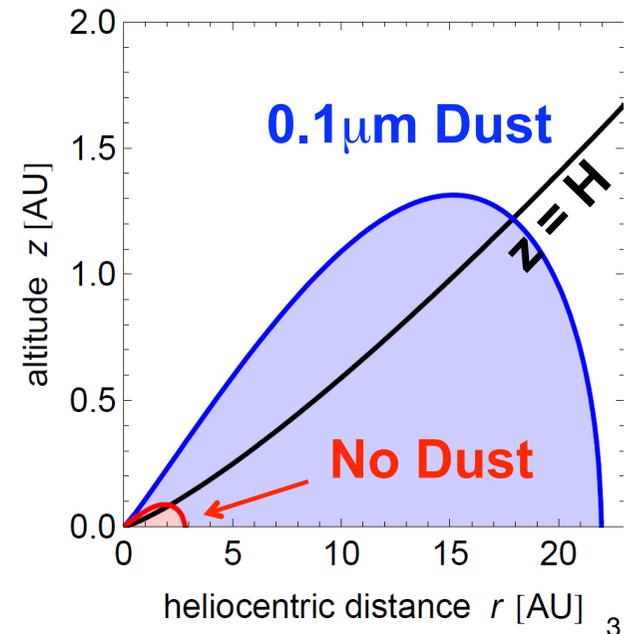
➡ (ダストがあるうちは)**ダストの電離ガス捕獲**
(Umebayashi 83; Sano+00)

“ダストの磁気乱流殺し”

ダストは、自らの成長を阻害するMRIを、
(ある程度)自分自身の力で抑えることができる！？

(期待する人々: e.g., Bai & Stone 2010)

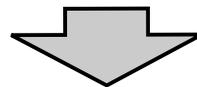
ある程度←どのくらい？



本研究の目的・方針

- 「ダストの磁気乱流殺し」の有効性を定量的に明らかにする。
- ダストの進化(成長/破壊/沈殿/拡散)と乱流の進化を矛盾無く扱うための理論を準備する。

現在の計算機資源では、タイムスケールが異なる磁気回転乱流とダストの合体成長を同時に解くのは困難。



**デッドゾーン中での乱流強度の垂直構造を
磁気拡散係数分布 (=ダスト分布) の関数として
あらかじめモデル化できると嬉しい。**

ダストの沈殿-拡散-合体成長方程式

乱流中でのダストの進化が、以下の簡単な方程式で記述できたら嬉しい：

$$\frac{\partial \rho_d(M, z)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[\langle V_z \rangle \rho_d + D_{zz} \rho_g \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_d}{\rho_g} \right) \right] + \text{Coag}[\rho_d]$$

- $\langle V_z \rangle$: ダストのz方向の速度 (の平均)

e.g. Dubrulle et al.(1995)

- D_{zz} : ダストのz方向の拡散係数

*ダストが十分小さい (摩擦制動時間 < ケプラー時間) なら、

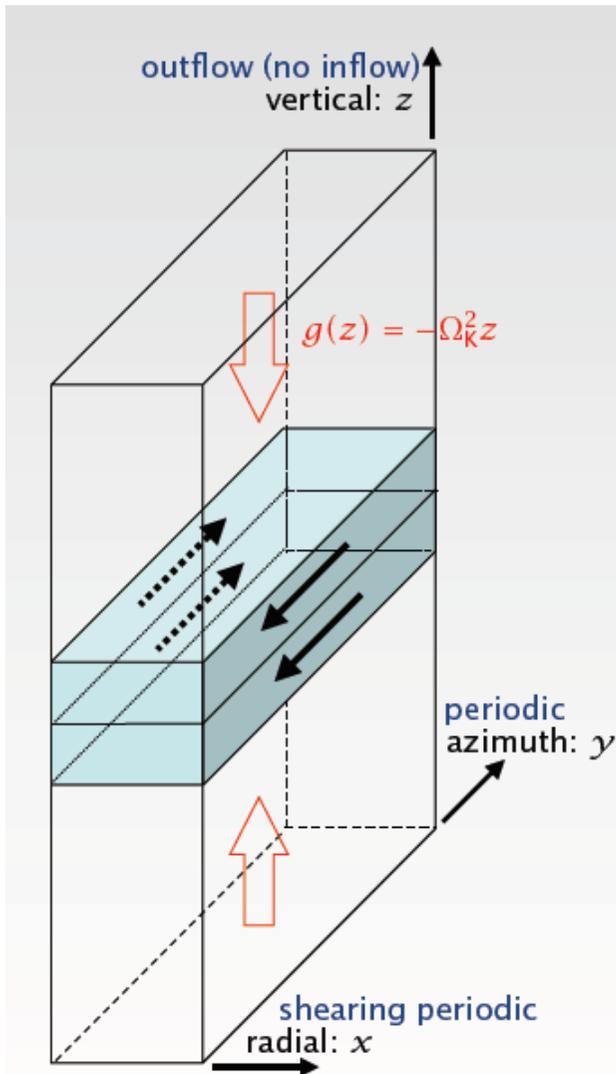
$\langle V_z \rangle = \langle v_z \rangle - \Omega^2 z \tau_f$ $\langle v_z \rangle$: ガスのz方向の平均速度

$D_{zz} \sim \langle \delta v_z^2 \rangle \tau_{\text{corr}}$ $\langle \delta v_z^2 \rangle$: **ガス**のz方向の速度の分散

τ_{corr} : 乱流の相関時間 ($\approx 1/\Omega$ Fromang & Papaloizou 06)

ガス乱流の速度分散の空間分布がわかれば、上の式は使える。

磁気流体シミュレーションで調べる



▶成層構造入り・磁気拡散入り局所MHD計算

▶境界条件： r, Φ 方向は周期境界

z 方向は流れ出し境界

▶等温 → $H = c_s / \Omega_K$ は定数

▶初期条件：

$$\rho(t = 0, z) = \rho_0 e^{-z^2/2H^2}$$

$$\mathbf{B}(t = 0, \mathbf{x}) = B_0 \mathbf{e}_z + \text{微小摂動}$$

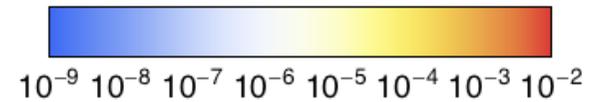
▶パラメータ

- 初期赤道面プラズマベータ

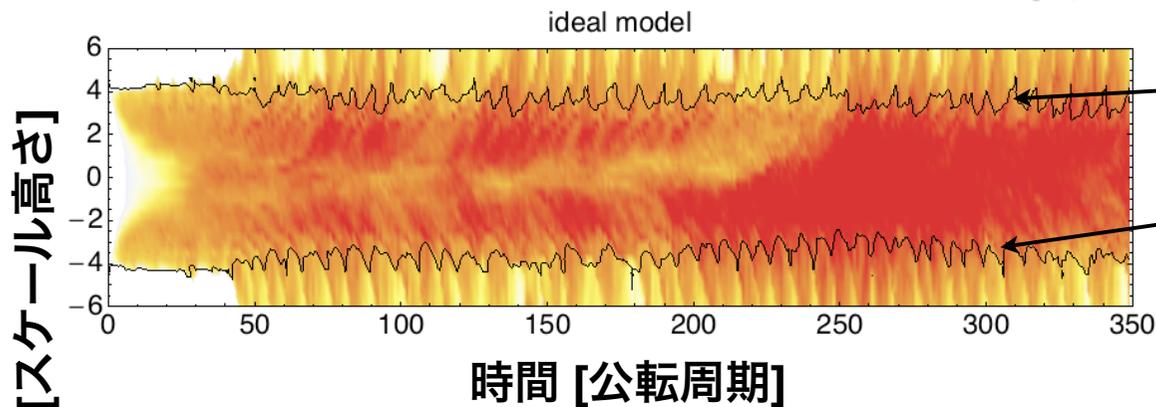
$$\beta_{0,\text{mid}} \equiv 8\pi\rho_0 c_s^2 / B_0^2 = 2c_s^2 / v_{Az,0,\text{mid}}^2$$

- 電離度の分布 (計14モデル)

乱流の時間進化 (デッドゾーンなし)

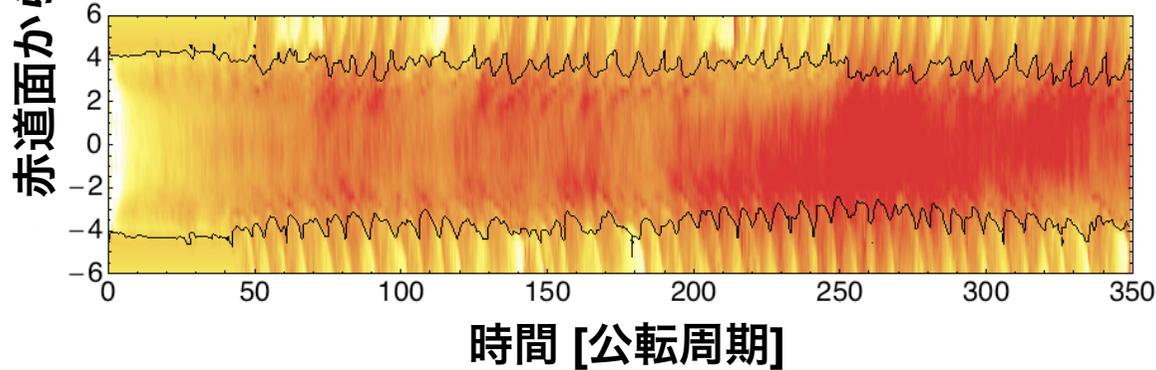


磁気エネルギーゆらぎ $\langle \delta E_{\text{mag}} \rangle = \frac{\langle \delta B^2 \rangle}{8\pi}$



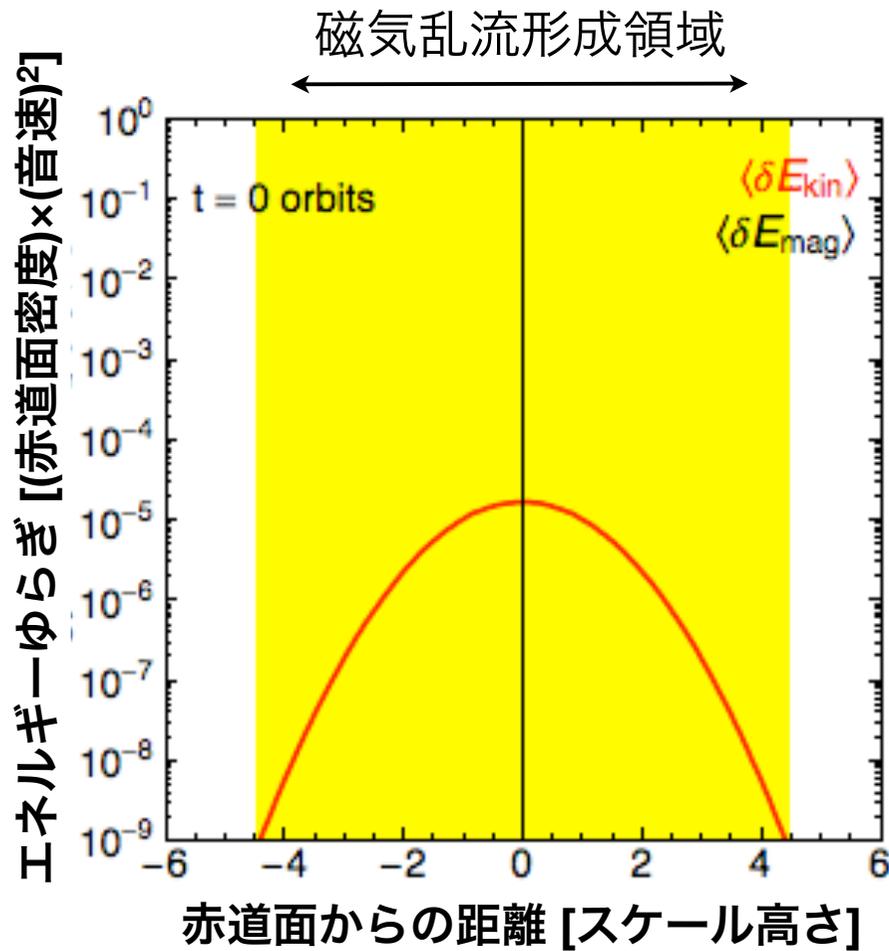
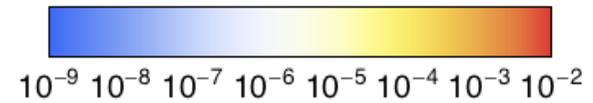
ここより上層では、ガス圧が弱すぎて磁気乱流が起きない。

運動エネルギーゆらぎ $\langle \delta E_{\text{kin}} \rangle = \frac{\rho g}{2} \langle \delta v^2 \rangle$



磁気乱流形成領域で
 $\langle \delta E_{\text{mag}} \rangle \approx \langle \delta E_{\text{kin}} \rangle \approx \text{const.}$
 $\rightarrow \langle \delta v^2 \rangle \propto \frac{1}{\rho g}$

乱流の時間進化 (デッドゾーンなし)

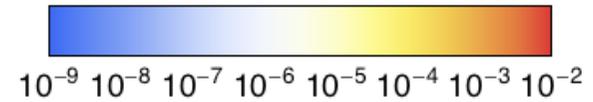


磁気乱流形成領域で

$$\langle \delta E_{mag} \rangle \approx \langle \delta E_{kin} \rangle \approx \text{const.}$$

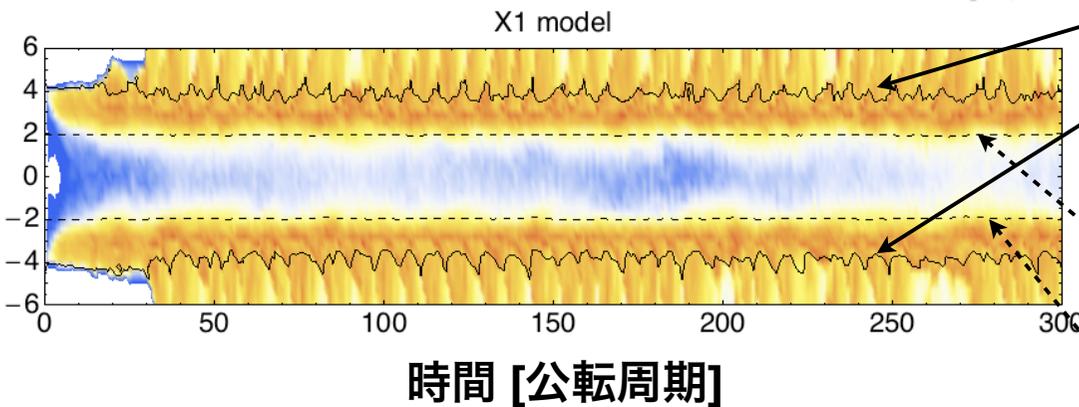
$$\rightarrow \langle \delta v^2 \rangle \propto \frac{1}{\rho g}$$

乱流の時間進化 (デッドゾーンあり)



磁気エネルギーゆらぎ $\langle \delta E_{\text{mag}} \rangle = \frac{\langle \delta B^2 \rangle}{8\pi}$

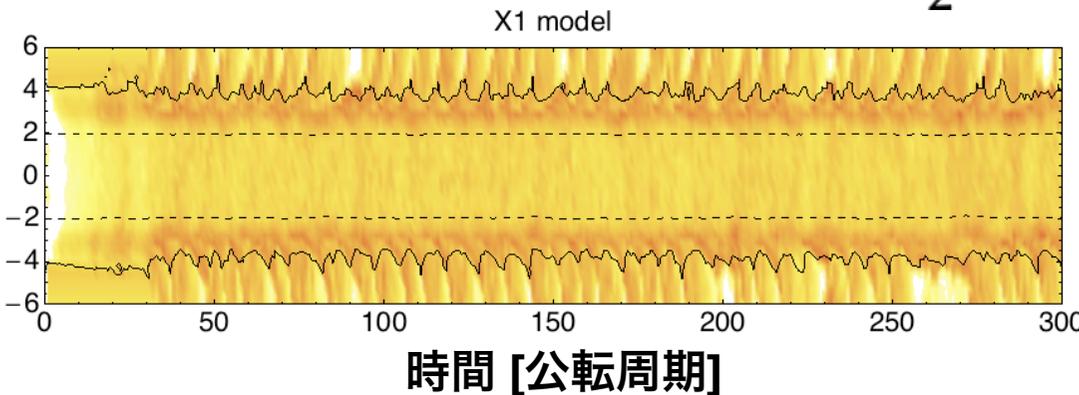
赤道面からの距離 [スケール高さ]



ここより上層では、ガス圧が弱すぎて磁気乱流が起きない。

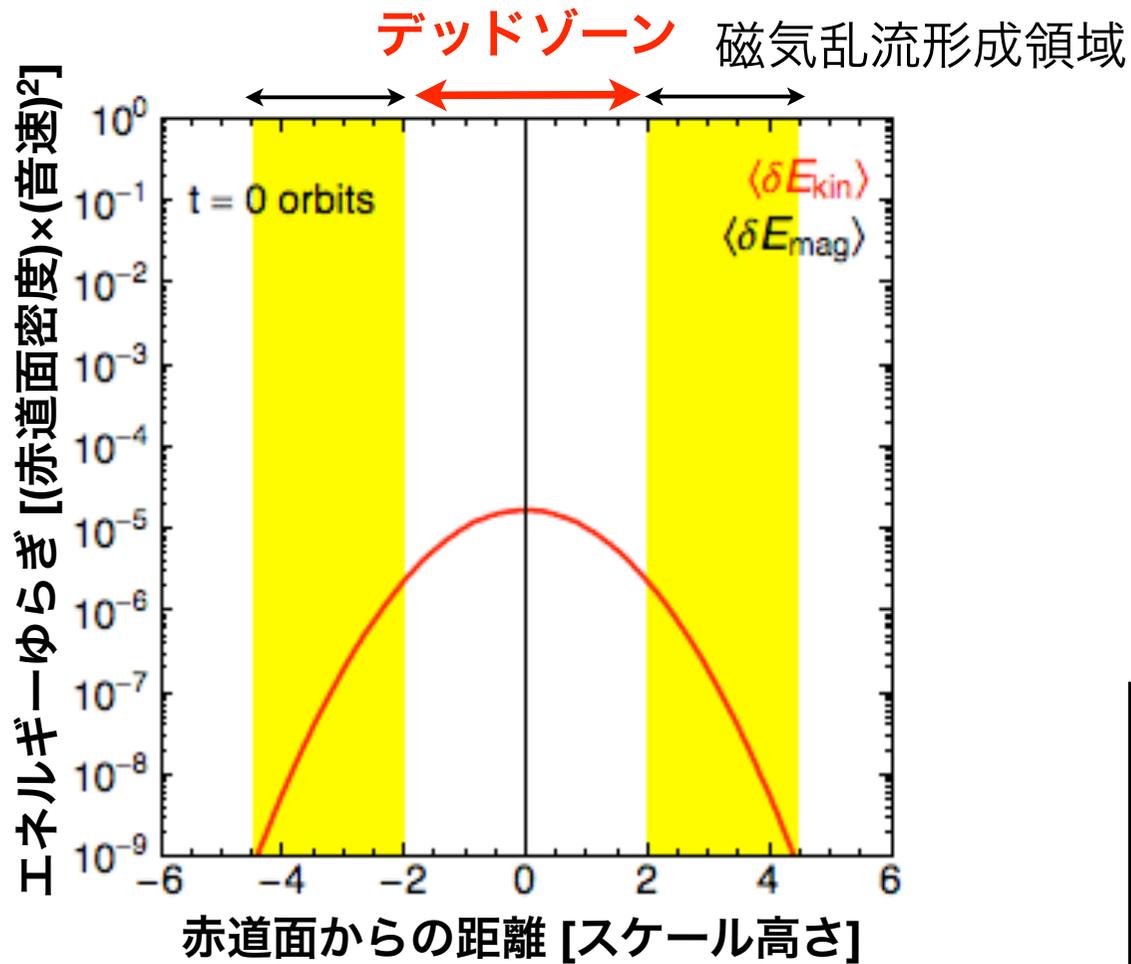
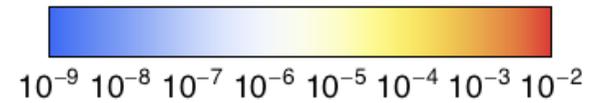
ここより下層では、電離度が低すぎて磁気乱流が起きない。
(=デッドゾーン)

運動エネルギーゆらぎ $\langle \delta E_{\text{kin}} \rangle = \frac{\rho g}{2} \langle \delta v^2 \rangle$



デッドゾーンで
 $\langle \delta E_{\text{mag}} \rangle \ll \langle \delta E_{\text{kin}} \rangle$
 $\langle \delta E_{\text{kin}} \rangle \approx \text{const.}$

乱流の時間進化 (デッドゾーンあり)

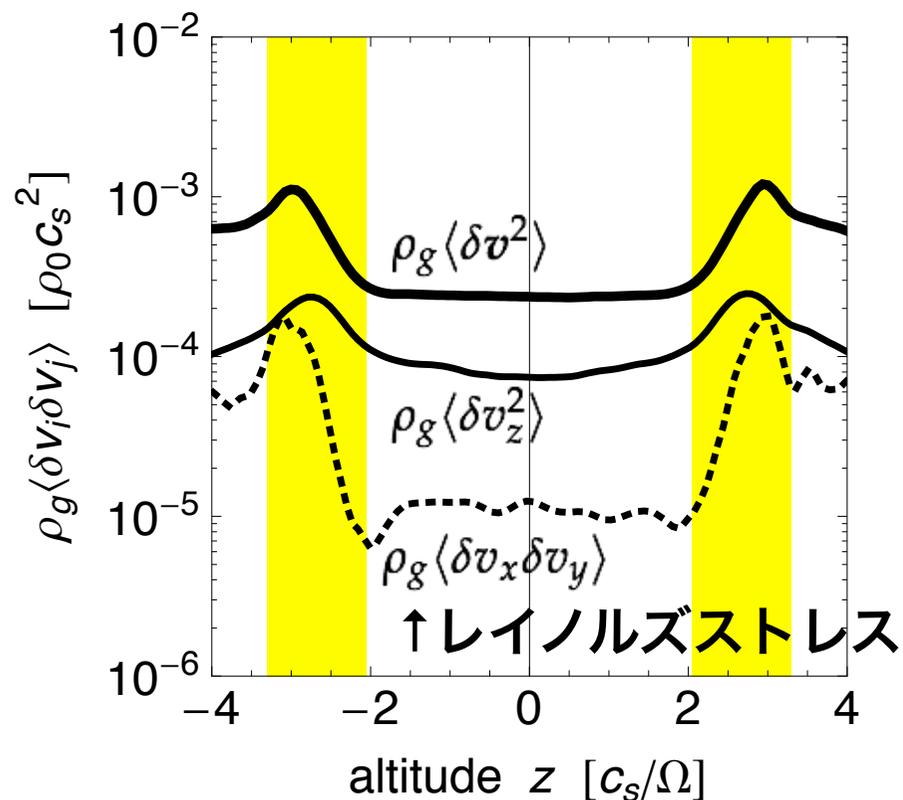


デッドゾーンで

$\langle \delta E_{mag} \rangle \ll \langle \delta E_{kin} \rangle$

$\langle \delta E_{kin} \rangle \approx \text{const.}$

デッドゾーンでの速度分散の垂直構造（時間平均量）



(密度) × (速度分散) の組み合わせで定数

↑ 「**音波**のエネルギーフラックス一定」

$$F_{\text{sound}} = \delta\rho_g \delta v c_s^2$$

$$\frac{\delta\rho_g}{\rho_g} \approx \pm \frac{\delta v}{c_s} \rightarrow |F_{\text{sound}}| \approx \rho_g \delta v^2 c_s$$

$F_{\text{sound}} \approx \text{const.}$ なら

$$\rho_g \langle \delta v^2 \rangle \approx \text{const.}$$

デッドゾーンでの速度分散の起源は
上層の活動領域から伝搬してくる**音波**

速度分散のスケーリング関係

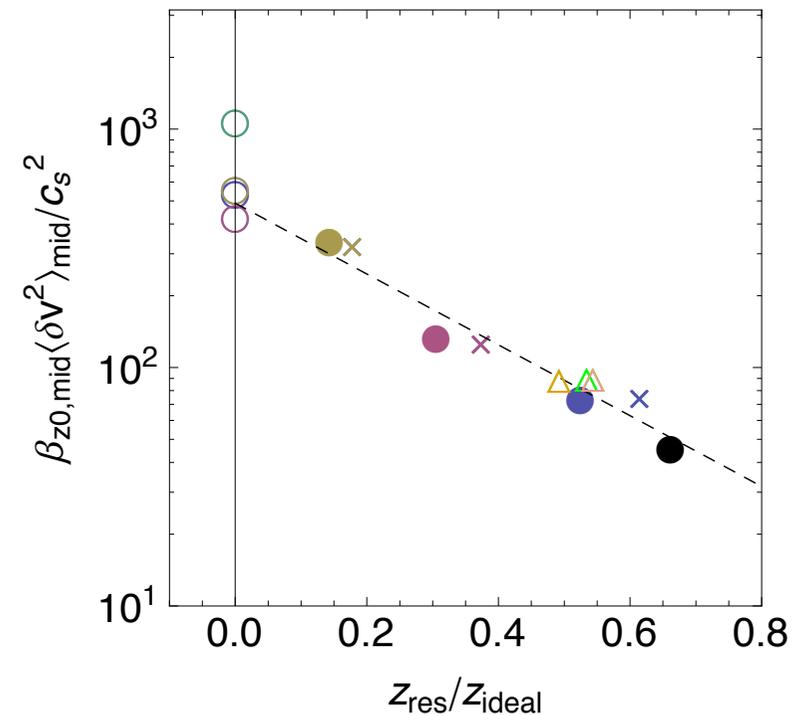
赤道面速度分散と $(\beta_{z0,\text{mid}}, \eta)$ との関係 (経験則)

$$\frac{\langle \delta v_{\text{mid}}^2 \rangle}{c_s^2} = \frac{489}{\beta_{z0,\text{mid}}} \exp\left(-3.42 \frac{z_{\text{res}}}{z_{\text{ideal}}}\right)$$

$$2\pi \frac{v_{\text{Az}}(z_{\text{ideal}})}{\Omega} = H \quad 2\pi \frac{\eta(z_{\text{res}})}{v_{\text{Az}}(z_{\text{res}})} = H$$

cf: 理想MHDでは (e.g. Suzuki et al. 2010)

$$\frac{\langle \delta v_{\text{mid}}^2 \rangle}{c_s^2} \approx \alpha \approx \max\left\{\frac{10^3}{\beta_{z0,\text{mid}}}, 10^{-2}\right\}$$



ダストの沈殿-拡散：MHD計算 vs 移流拡散モデル

デッドゾーンの音波はどのくらいダスト拡散に寄与するか？

→ MHD計算と**移流拡散モデル**を比較してみる。

$$\frac{\partial \rho_d(M, z)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[\langle v_{d,z} \rangle \rho_d + D_{zz} \rho_g \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_d}{\rho_g} \right) \right]$$

(Dubrulle et al. 1995)

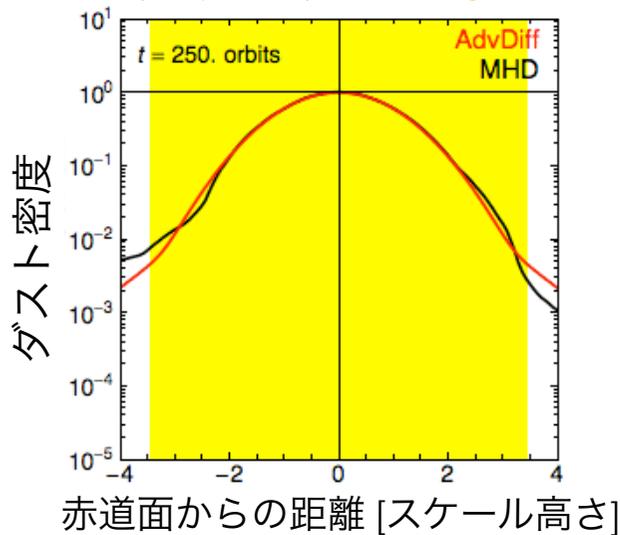
D_{zz} ：拡散係数
速度分散が拡散的なら

$$D_{zz} \sim \langle \delta v_z^2 \rangle / \Omega$$

となるはず。

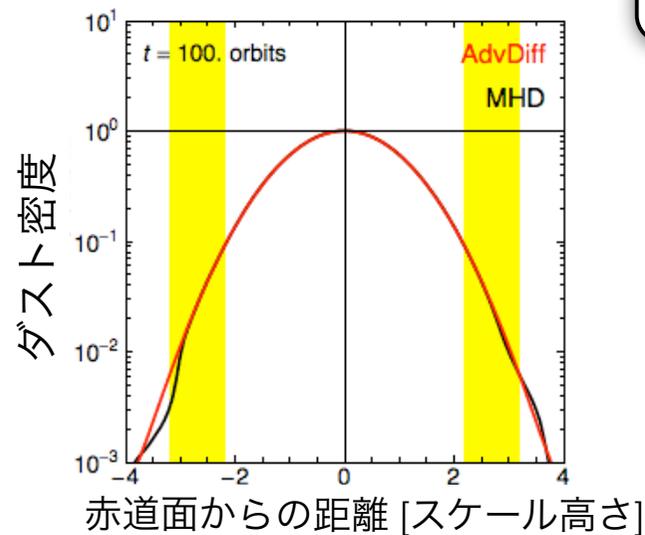
(Fromang & Papaloizou 2006)

デッドゾーンなし



$$D_{zz} = \langle \delta v_z^2 \rangle / \Omega$$

デッドゾーンあり



$$D_{zz} = 0.5 \langle \delta v_z^2 \rangle / \Omega$$

デッドゾーン中の拡散は
 $D_{zz} \sim \langle \delta v_z^2 \rangle / \Omega$ でよく
説明できる。

➡ **デッドゾーン中の音波は
拡散として寄与する。**

練習問題：「塵」と「岩」の2成分進化」

“塵”：電離度を支配 → 乱流強度を決定

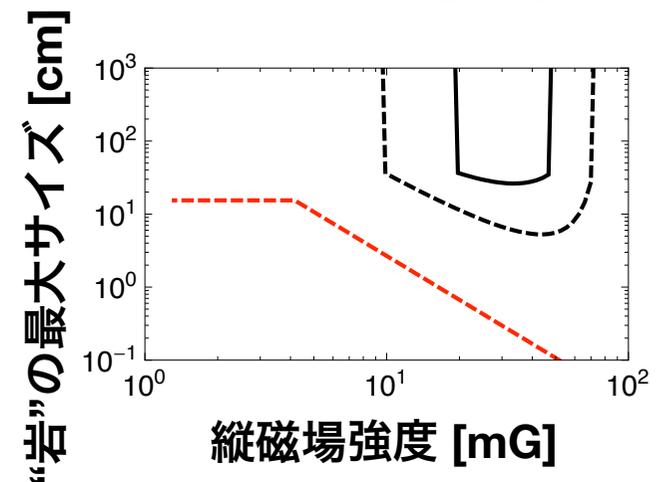
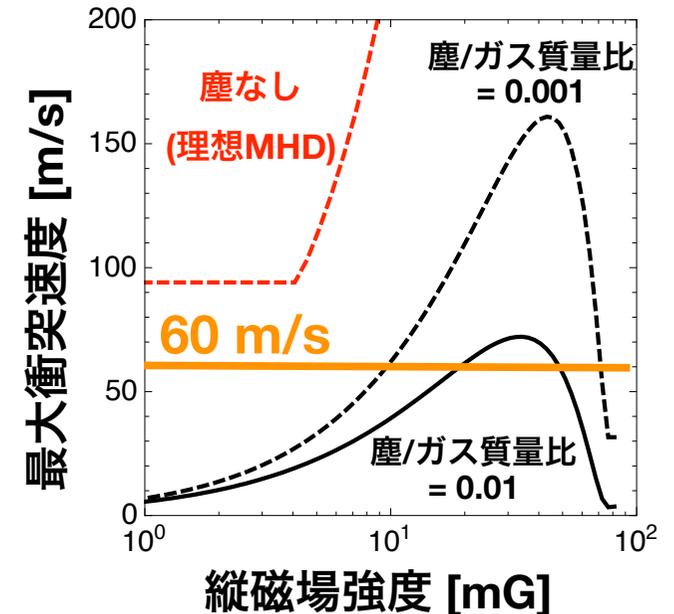
“岩”：互いに衝突して成長／破壊

“岩”を成長させるのに、
どのくらいの“塵”(=破片)が必要か？

- MMSN, 5AU, 宇宙線電離, 氷ダスト
- 臨界破壊速度 **60m/s** (Wada et al. 2009)

縦磁場強度依存性がでかい...が、

- 塵/ガス質量比 ~ 0.001 →
磁場によらずに $\sim 10\text{cm}$ まで成長可能。
- 塵/ガス質量比 > 0.01 →
磁場によらずにいくらでも成長可能。



練習問題：「“塵”と“岩”の2成分進化」

“塵”：

“岩”：

どの

●MMS

●臨界

縦磁

●塵/ガ

磁場

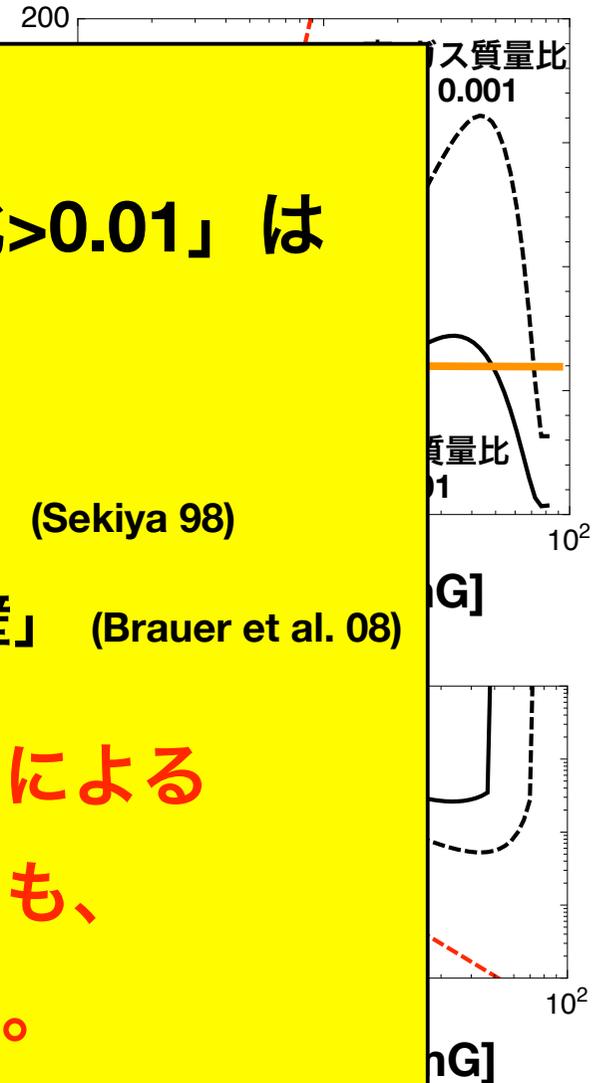
●塵/ガ

磁場

条件「局所的にダスト/ガス比 >0.01 」は
微惑星形成に有利！

- 重力不安定 over 「シア不安定の壁」 (Sekiya 98)
- 直接合体成長 over 「中心星落下の壁」 (Brauer et al. 08)

「ダストの磁気乱流殺し」による
「衝突破壊の壁」の解消も、
同じ条件で効いてくる。



まとめ

デッドゾーン中でのガスの速度分散構造をMHD計算で調べた。

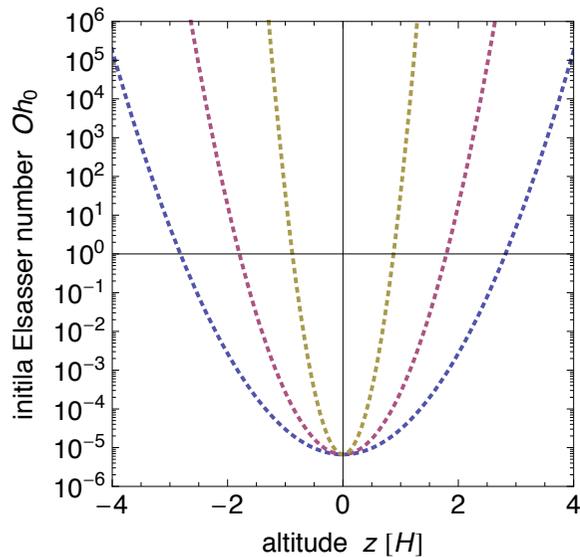
- **デッドゾーンは完全に“静か”ではない**（上層のactive layerからの音波がそれなりに大きな速度分散を作るため。）
- 速度分散は密度の逆数 → 赤道面の値だけわかればよい。
- 速度分散分布を、磁気拡散係数分布と縦磁場強度の関数として経験公式化した。
- **ダスト／ガス比 >0.01 ではダストの乱流殺しは有効に働く。**
- **円盤の形成初期条件（縦磁場強度）も重要。**

拡散係数の分布

$$Oh_0(z) = \frac{v_{Az,0}(z)^2}{\eta(z)\Omega_K} = \frac{2c_s^2 e^{z^2/2H^2}}{\eta(z)\Omega_K\beta_{0,mid}}$$

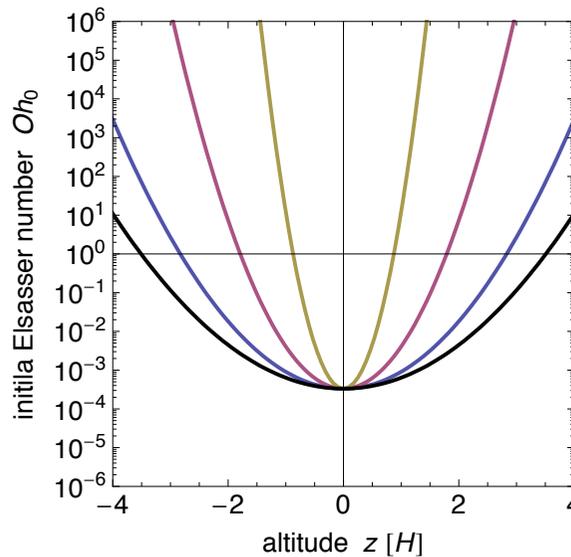
→ $\tilde{\eta}(z) \equiv \eta(z)c_s^2/\Omega_K$ の分布が磁気拡散構造を決める。

W model (W1-W3)



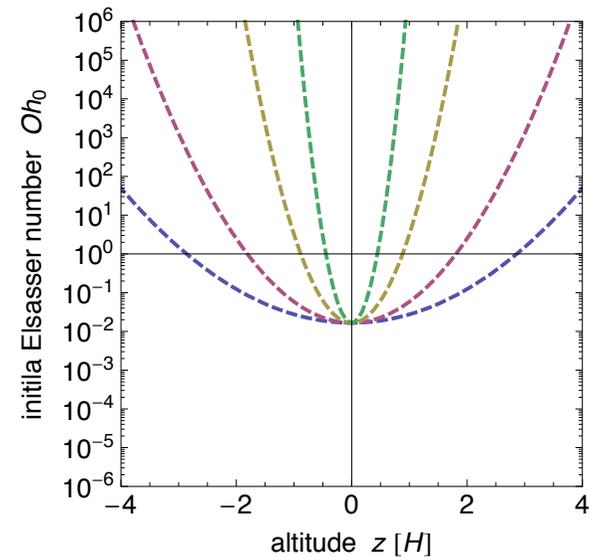
$$Oh_0(0) = 10^{-5.2}$$

X model (X0-X3)



$$Oh_0(0) = 10^{-3.5}$$

Y model (Y1-Y4)



$$Oh_0(0) = 10^{-1.8}$$