

電子加熱が原始惑星系円盤に与える影響

～磁気乱流の抑制とダストの帯電反発～

概要

原始惑星系円盤内で磁気回転不安定が発達すると、磁場の成長に伴い強磁場が生成される。近年そのような強電場により円盤内の電子が加熱され、ダストに効率よく吸着され、気相中の電離度が減少し磁気乱流が弱まる可能性が指摘されている。我々は、電子加熱が原始惑星系円盤のどこでどれ程磁気乱流を抑制するかを調べた。その結果、広い領域で電子加熱が磁気乱流を大きく抑制しうることを見出した。さらに、負に帯電したダストが静電反発力によりダスト同士が衝突しにくくなり、合体成長が妨げられる可能性があることも分かった。詳しくは論文(Mori & Okuzumi, submitted; arxiv#: 1505.04896)を参照。

森 昇志

mori.s@geo.titech.ac.jp

東京工業大学/名古屋大学 M2

共同研究者 奥住 聡 (東工大)



1 背景：原始惑星系円盤でのMRI

- 原始惑星系円盤内の乱流は、円盤の散逸やダスト成長に大きな影響を与える
円盤内における乱流状態の理解は惑星形成を解き明かす鍵

- 磁気回転不安定(MRI)は乱流起源の有力な候補
MRIの成長には十分な電離度が必要：

十分電離した領域では発達し乱流を生成

低電離領域では磁場が散逸し、安定

安定化条件 $R_m = v_A^2 / \eta \Omega < 1$
(v_A : アルフベン速度 η : 磁気拡散係数 $\propto$ 電離度⁻¹ Ω : ケプラー角速度)

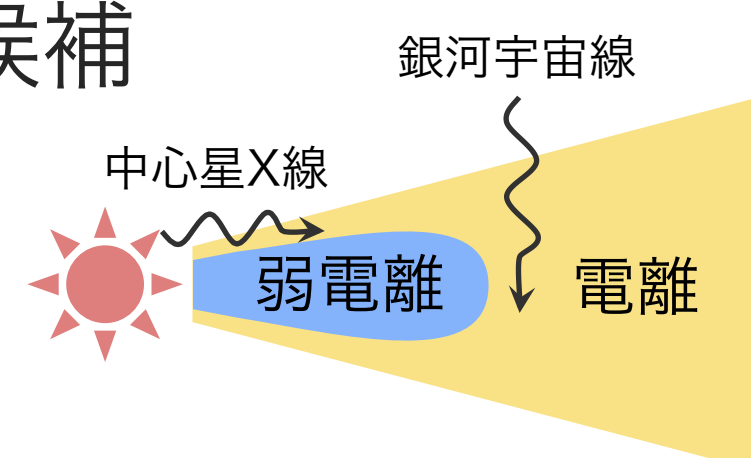
MRI

+

電離度

→

乱流



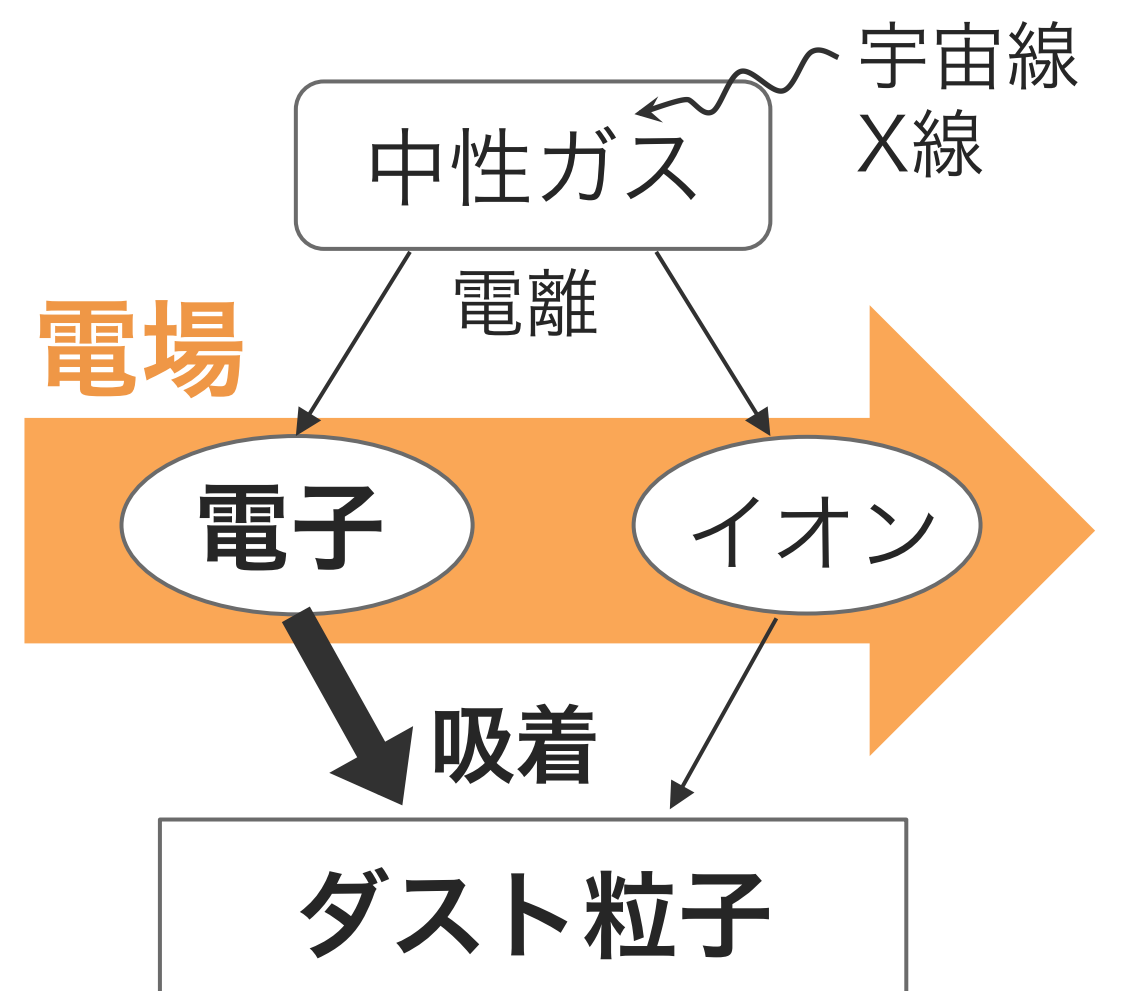
2 電子加熱

MRI由来の磁気乱流は、電子を加熱するほどの強電場を作る！
(Inutsuka & Sano 2005)

加熱された電子はダストへと衝突&吸着され、電離度が減少する
(Okuzumi & Inutsuka 2015)

磁気乱流は抑制されるかも？

電子加熱時の電離反応



研究目的

電子加熱が円盤のどこで・どのくらい影響を及ぼすか調べる

3 手法：電子加熱の判断

電子加熱を考慮した電流—電場関係
(Okuzumi & Inutsuka 2015)

MRIは電流の上限値がある
(Muranushi et al. 2012)

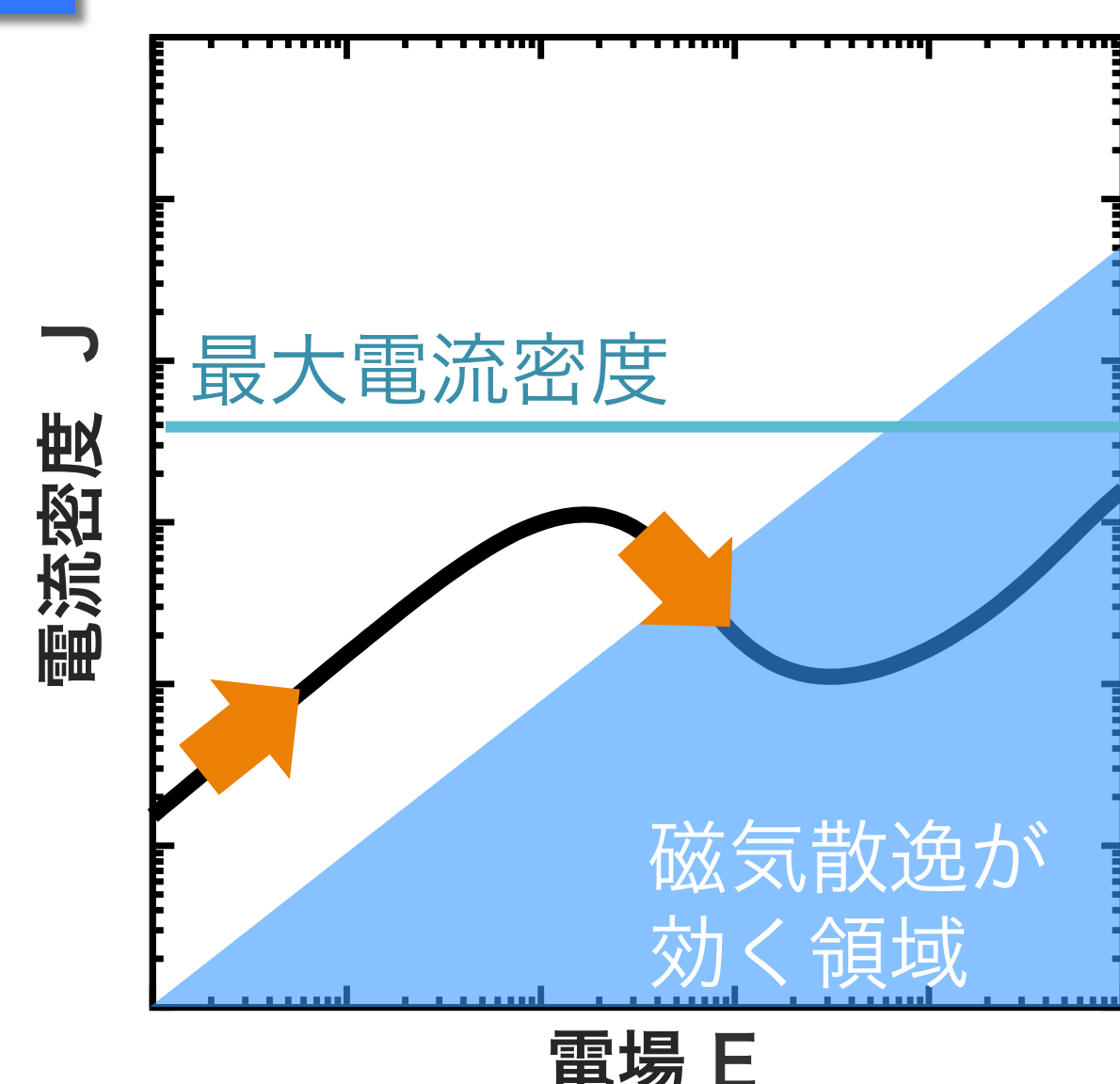
磁気散逸はMRIを安定化する
(磁気レイノルズ数 $R_m < 1$)

MRIが $E=0$ から成長すると、電流が減少し、オーム散逸が効く

→ 電子加熱が起き、磁気乱流を抑制すると判断できる

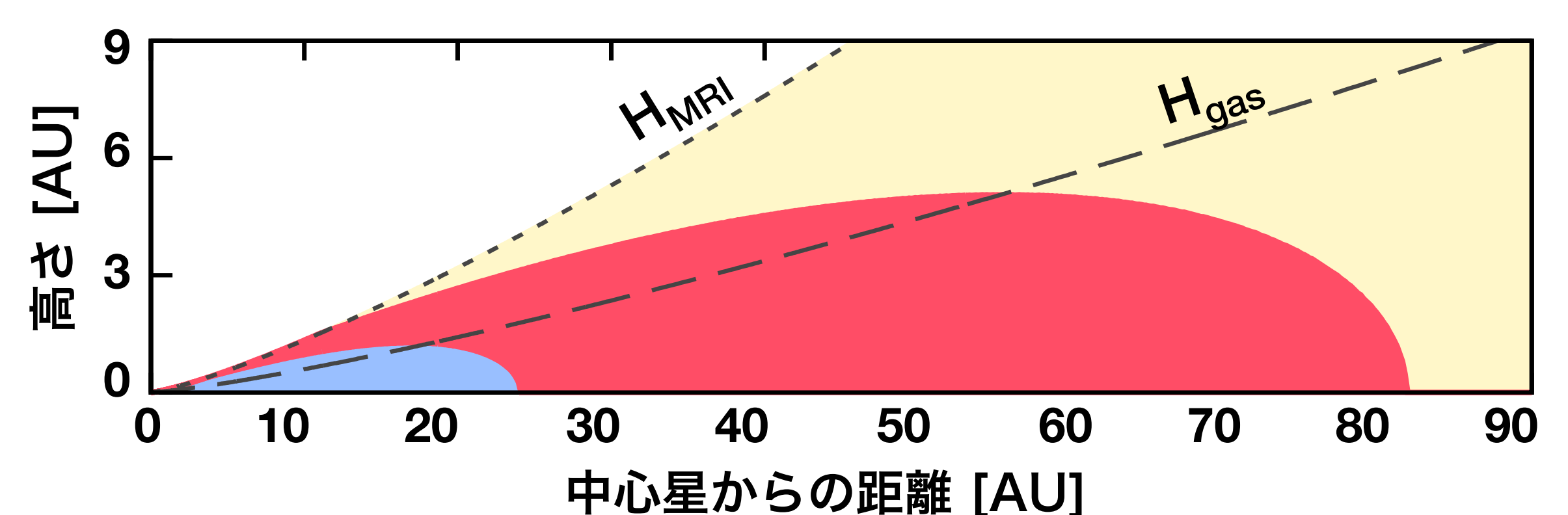
円盤の全領域でこの図を描き、
電子加熱が磁気乱流に影響を与える場所を調べる

円盤内のある一例



4 結果：電子加熱領域

- デッドゾーン : MRIは安定化される
- 電子加熱領域 : 電子加熱が磁気拡散を増幅
- MRI活性領域 : 激しいMRI乱流を維持



電子加熱領域が80AUまで及ぶ

→ 広い領域で電子加熱が起こる

(Mori & Okuzumi, submitted)

円盤モデル

- 密度: MMSN
- 温度: 光学的に薄い
- 赤道面 β ($= P_{\text{gas}} / P_{\text{mag}}$) = 10^3
- ダスト粒子:
 - 半径 = $0.1 \mu\text{m}$, 物質密度 = 3g/cm^3
 - ダストガス比 = 0.01
- 電離源: 銀河宇宙線・中心星X線

5 磁気乱流の抑制

電流が最大値に達しない → 乱流も十分発達しないと考えられる

α は乱流の強さを表す
(Shakura & Sunyaev 1973)

電子加熱を考慮して電流を計算し、電流と α のスケーリング則を用いた
(Mori & Okuzumi submitted)

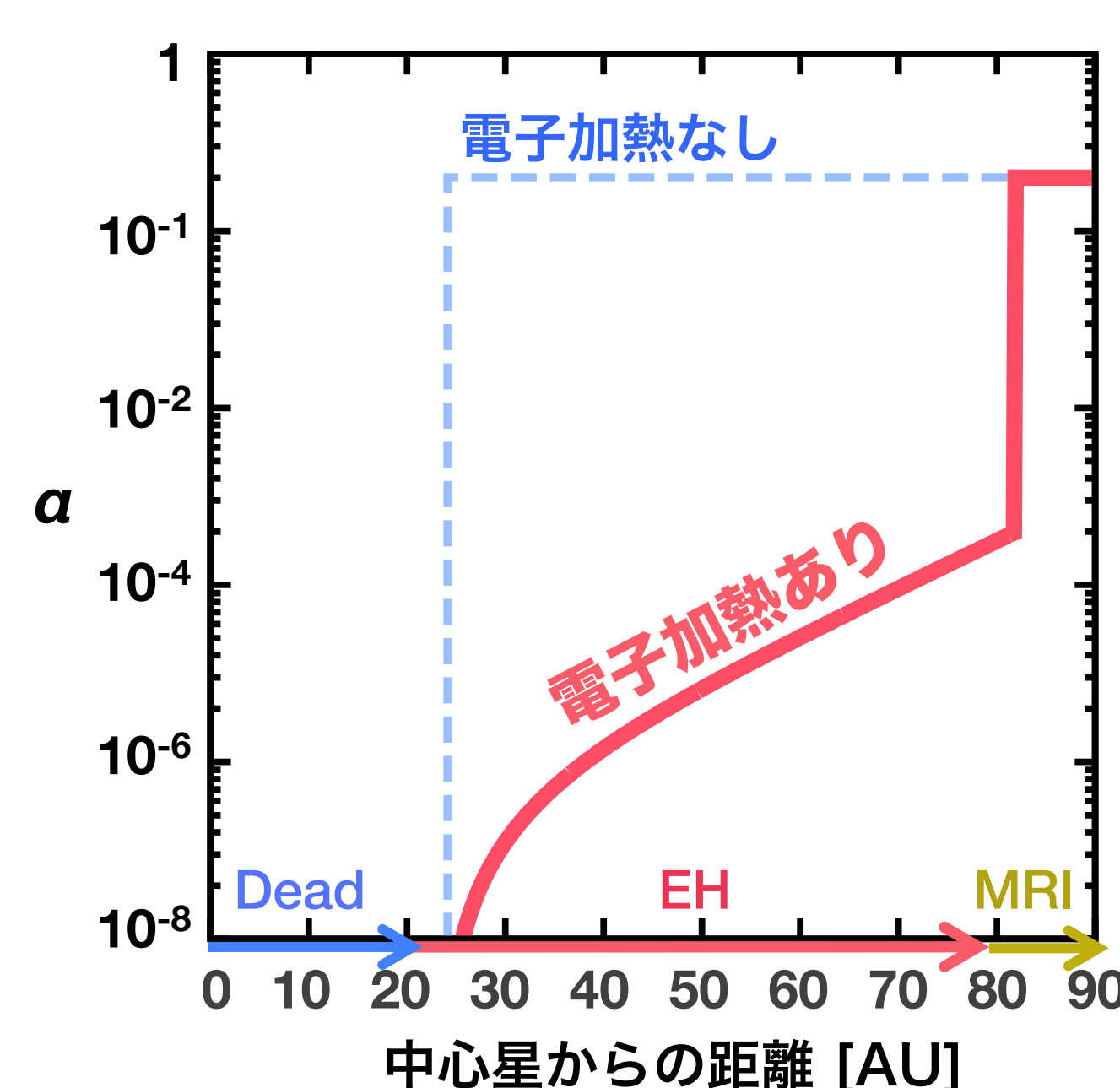
$$\alpha \approx 0.2 \left(\frac{\beta_c}{10^3} \right)^{-1} \left(\frac{J_{\text{sat}}}{J_{\text{max}}} \right)^2 \exp \left(\frac{z^2}{2H^2} \right)$$

↑
シミュレーション
(Sano et al. 2004)の値から

α は2桁以上減少

→ 磁気乱流を大きく抑制しうる

モデル
・デッドゾーンの α は0
・表層の α は0



6 ダストの静電反発

ダストの静電反発 (Okuzumi 2009)

帯電した小さなダスト粒子は衝突出来ない：

$$\underbrace{\text{静電反発} E \sim Q^2 / 2a}_{E_{\text{elc}}} > \underbrace{\text{ブラウン運動} E \sim kT}_{E_{\text{col}}} + \underbrace{\text{乱流衝突} E \sim m \Delta v^2 / 2}_{E_{\text{col}}}$$

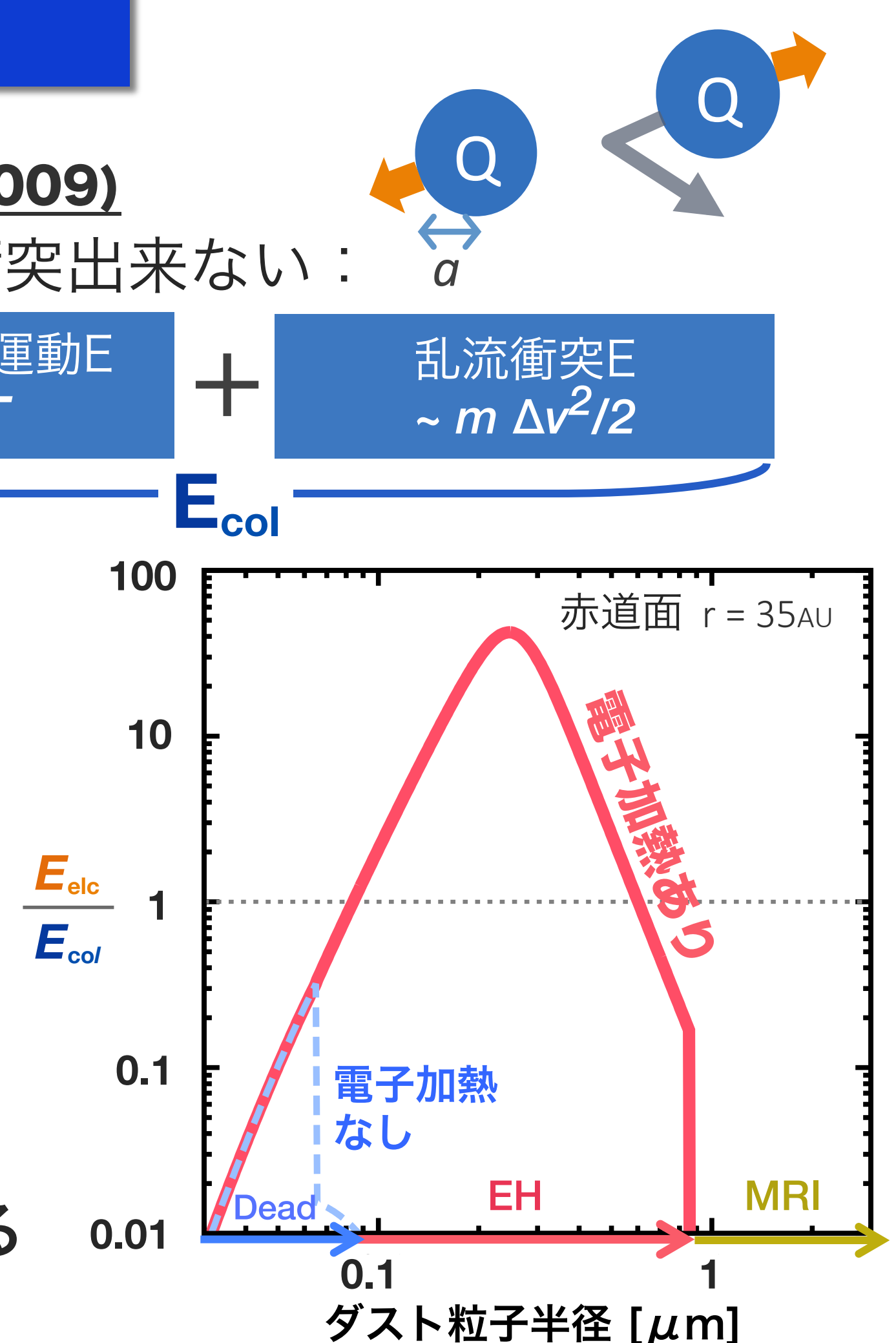
$E_{\text{elc}} / E_{\text{col}}$ (: 静電反発効率) > 1

→ 衝突成長が難しい

電子加熱領域では、

- 乱流抑制効果
- ダストの帯電効果

によって、衝突成長は厳しくなる



7 結論

電子加熱は円盤の広い領域で起こり、磁気乱流を大きく抑制する。また、ダストを帯電させ、静電反発によりダストの合体成長を妨げる。電子加熱は磁気乱流において重要な効果となるだろう。