

標準降着円盤の熱平衡曲線

(特に水素電離を伴う降着円盤の場合)

廣瀬重信 (JAMSTEC)

Collaborators:

Omer Blaes, Matt Coleman (Santa Barbara)

Julian Krolik (Johns Hopkins)

Takayoshi Sano (Osaka University)

標準降着円盤モデルの基礎方程式

質量保存則と角運動量保存則から、面密度 Σ に関する時間発展方程式が得られる。

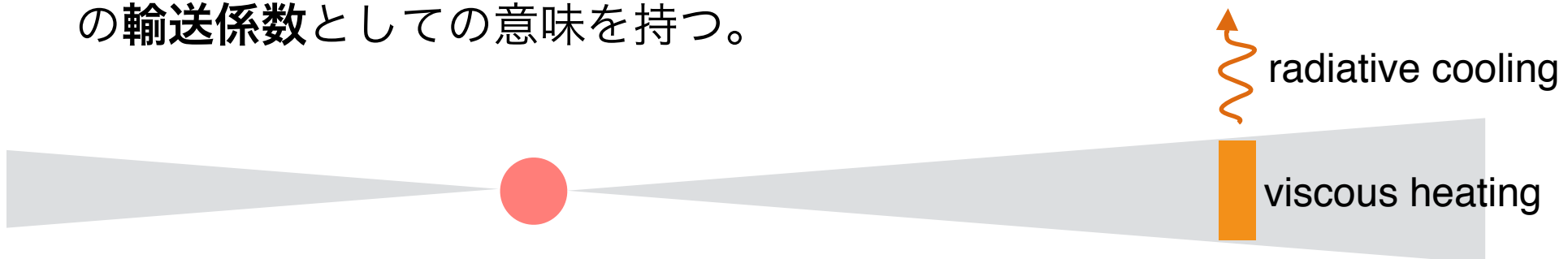
$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{2}{r\Omega} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 W_{r\phi}) \right) = 0$$

局所熱平衡の仮定から、シアストレスの積分値 $W_{r\phi}$ は面密度 Σ (と半径 r) の関数として表すことができる。

$$W_{r\phi} = W_{r\phi}(\Sigma; r)$$

熱平衡曲線

このとき、上記方程式は、面密度 Σ の拡散方程式となり、熱平衡曲線はその**輸送係数**としての意味を持つ。



熱平衡曲線

熱平衡を考えているので、ストレス $W_{r\phi}$ の代わりに有効温度 T_{eff} が面密度 Σ の関数であると考えても良い

熱平衡曲線 $T_{\text{eff}} = T_{\text{eff}}(\Sigma; r)$ は、半径 r におけるコラムでの熱平衡条件から計算される:

$$\underbrace{2\sigma_{\text{B}}T_{\text{eff}}^4}_{\text{cooling } Q^-} = \underbrace{\frac{3}{2}\Omega \int w_{r\phi} dz}_{\text{heating } Q^+} = \frac{3}{2}\Omega\alpha \int p dz \approx \frac{3}{2}\Omega\alpha\Sigma T_{\text{mid}}$$

$$\Rightarrow \frac{T_{\text{eff}}^4}{T_{\text{mid}}(T_{\text{eff}})} \sim \alpha\Sigma$$

この依存性は垂直構造を解いて決まる

オパシティは
水素電離温度
近傍でピーク
になる

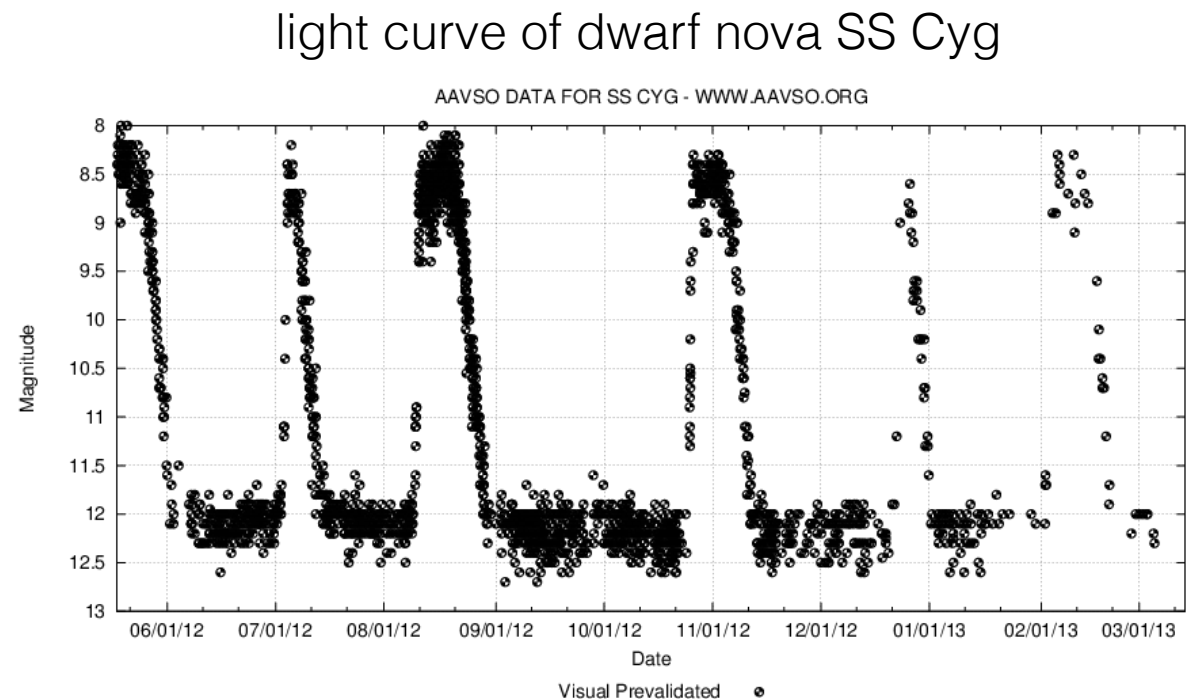
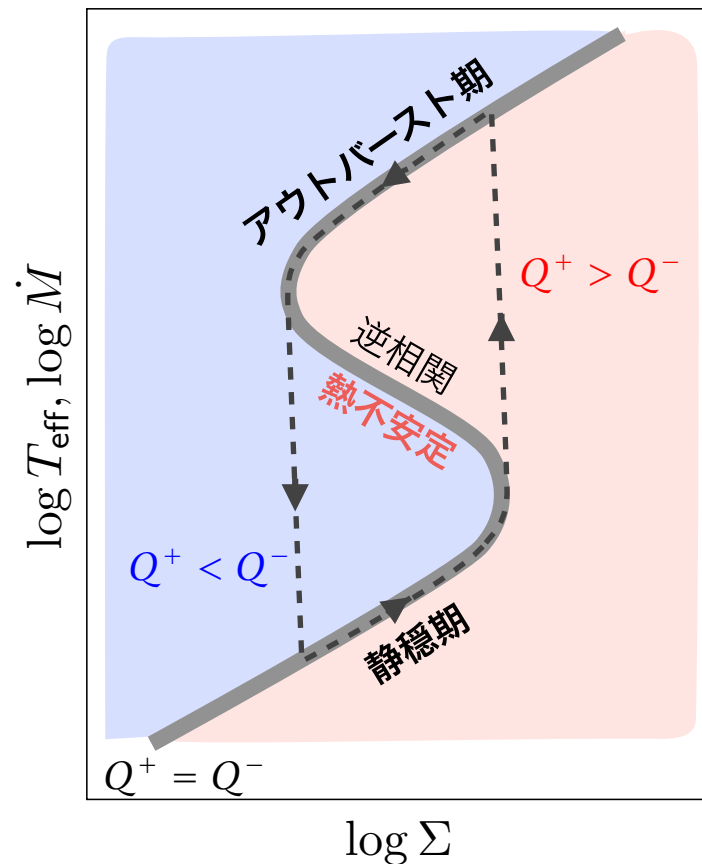
通常、 T_{eff} は Σ と正の相関があるが、赤道面温度 T_{mid} が T_{eff} に強く依存する場合に逆相関となる。ガス温度が水素電離温度近傍では、対流発生とオパシティの強い温度依存性から、このような逆相関が起きると考えられる。

T_{eff} と Σ の逆相関 $\Rightarrow$ 熱不安定性・永年不安定性

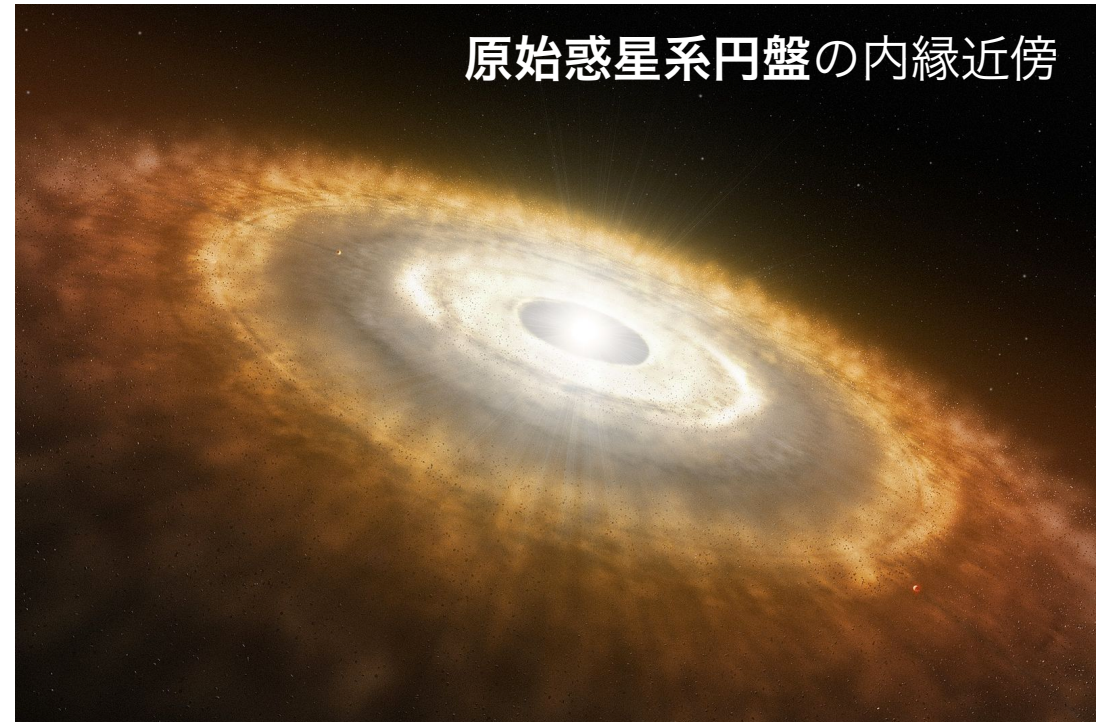
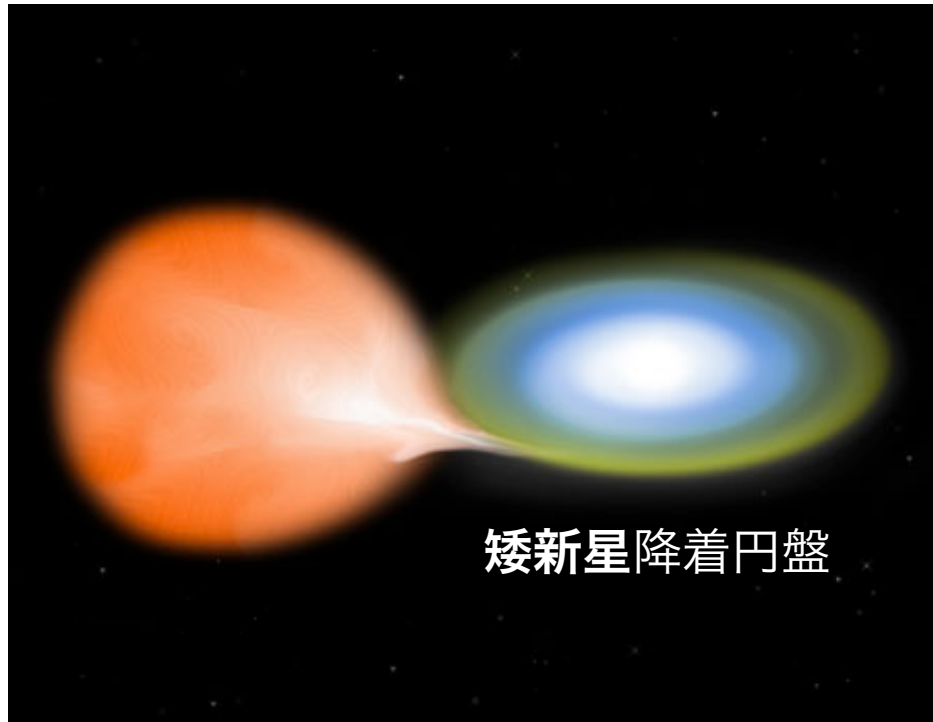
矮新星の円盤不安定モデル

熱平衡曲線は、水素電離温度近傍 $T \sim 10^4$ K で"S字型"になることが予想される。この場合、中間の解ブランチは**熱的に不安定**であるため、条件によっては、高温ブランチと低温ブランチの間で**リミットサイクル**が起きる。

⇒ **矮新星**のアウトバーストサイクル



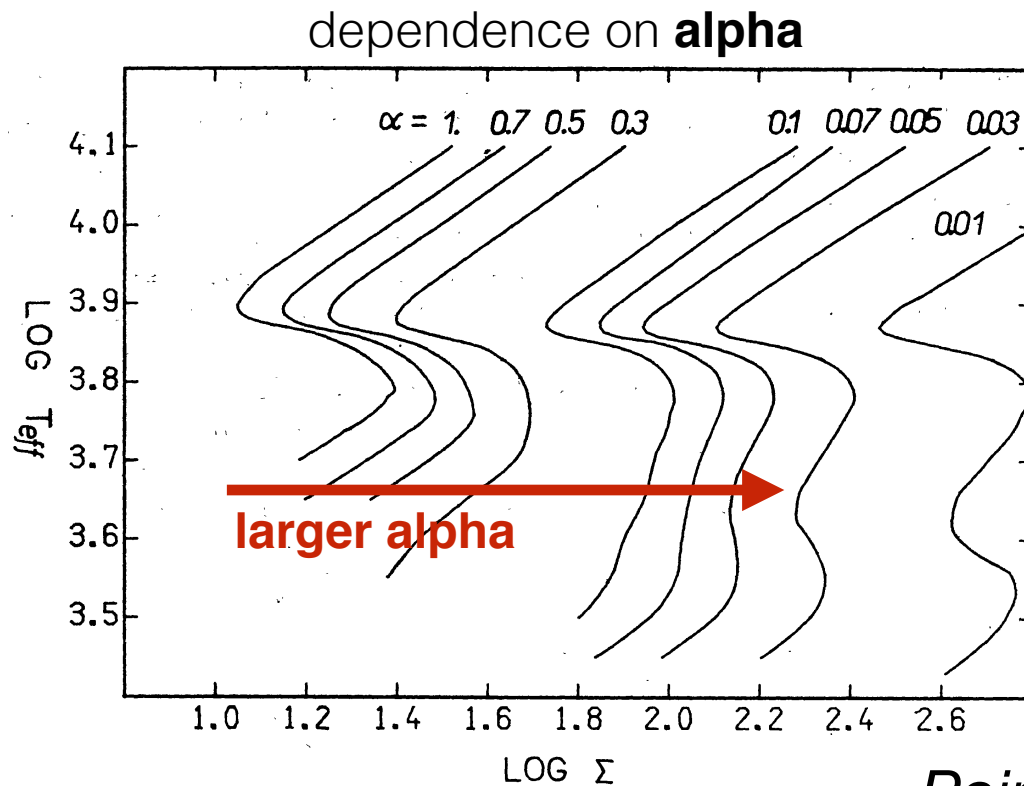
水素電離温度近傍の領域



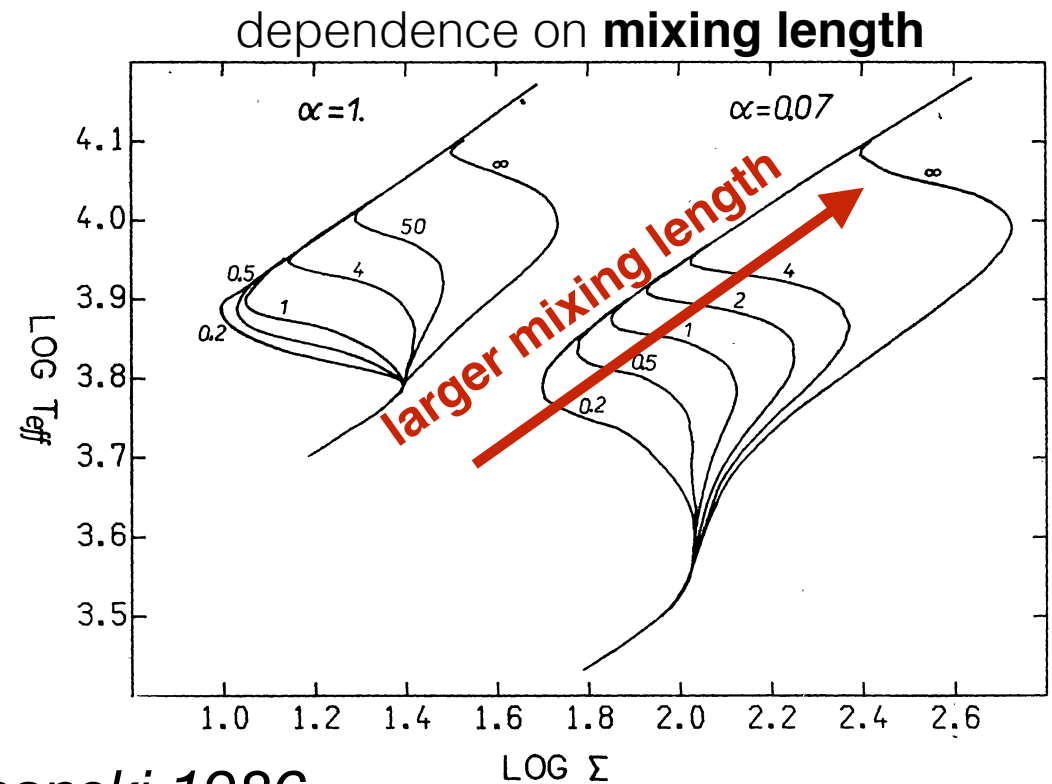
円盤不安定モデルにおけるパラメータ

円盤不安定モデルでは、加熱に関しては α モデル、対流冷却に関しては混合距離理論を採用しており、それぞれのパラメータは定数と仮定。

- ・ 得られる熱平衡曲線の形は、これらのパラメータに強く依存する。
- ・ そもそもS字型になるのは、 α モデルの仮定に依る (Cannizzo 93)

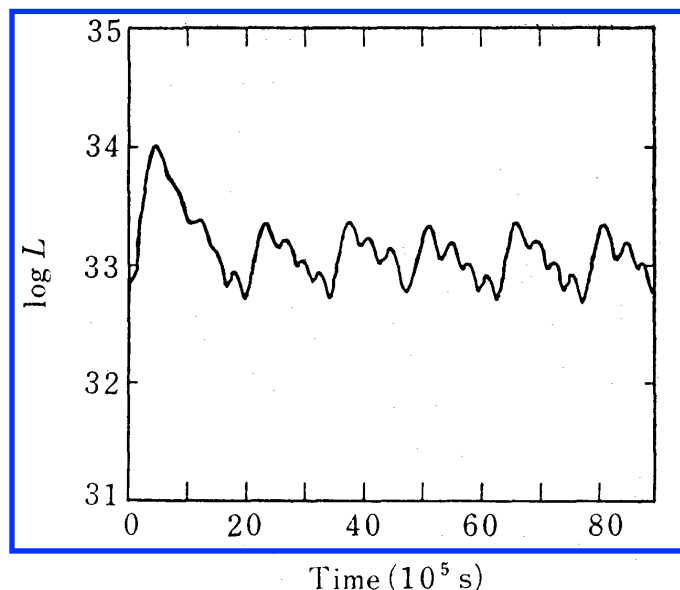


Pojmanski 1986

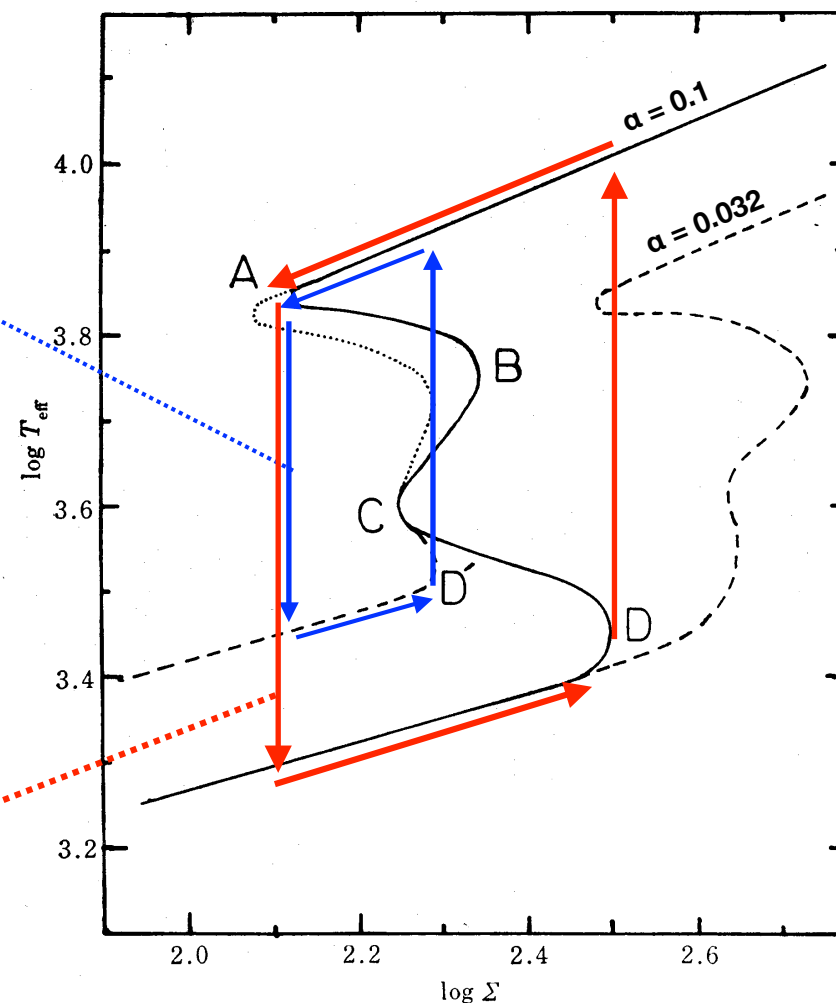
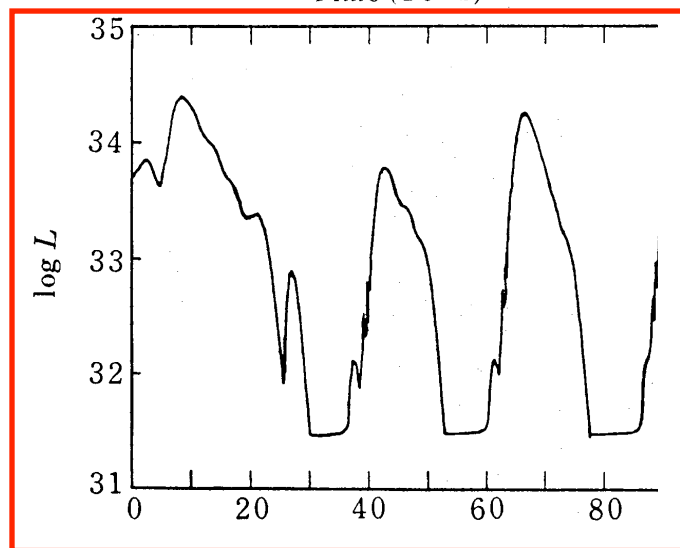


高温／低温ブランチで異なる α 値？

$\alpha_{\text{hot}} = 0.1$
 $\alpha_{\text{cool}} = 0.1$



$\alpha_{\text{hot}} = 0.1$
 $\alpha_{\text{cool}} = 0.032$

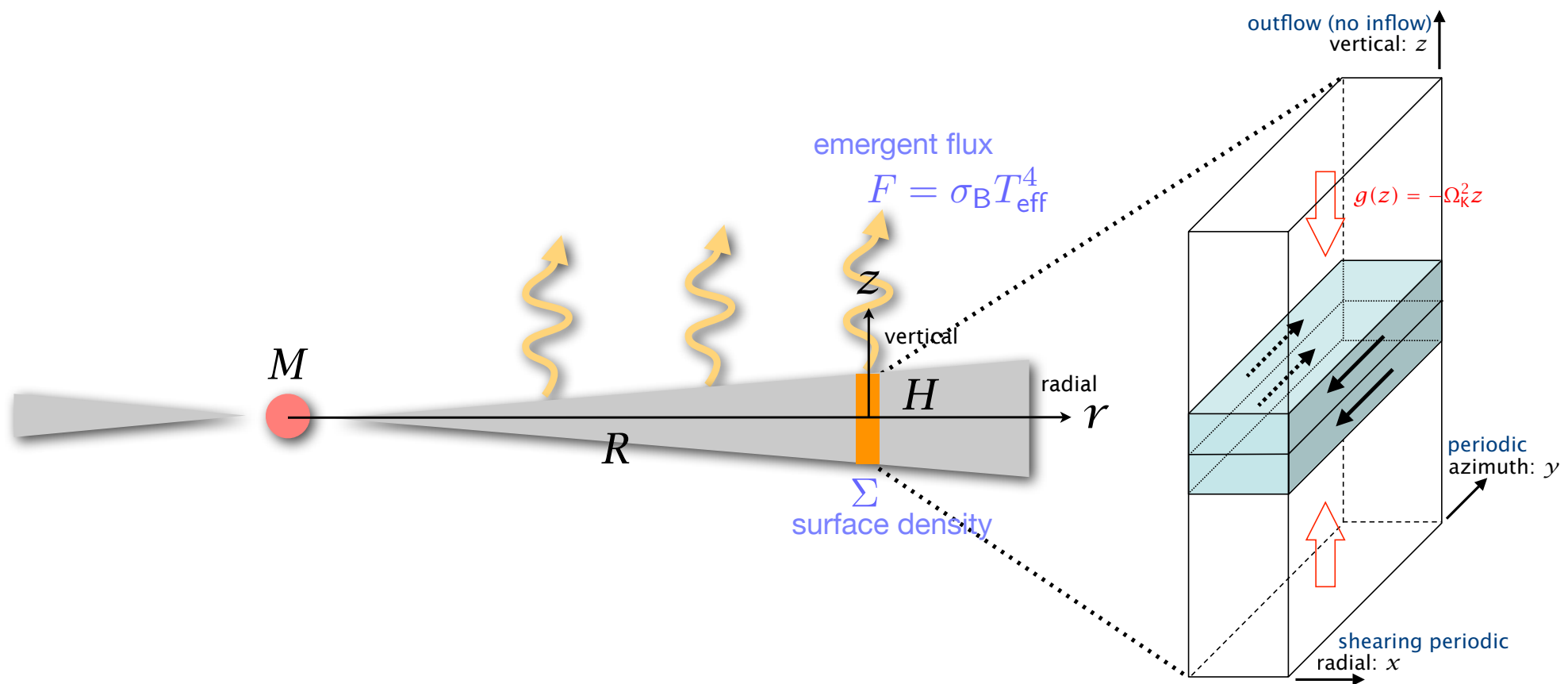


Mineshige and Osaki (1985)

To explain the observed amplitude and duty cycle, a hybrid of alphas are needed, but its physics is not clear.

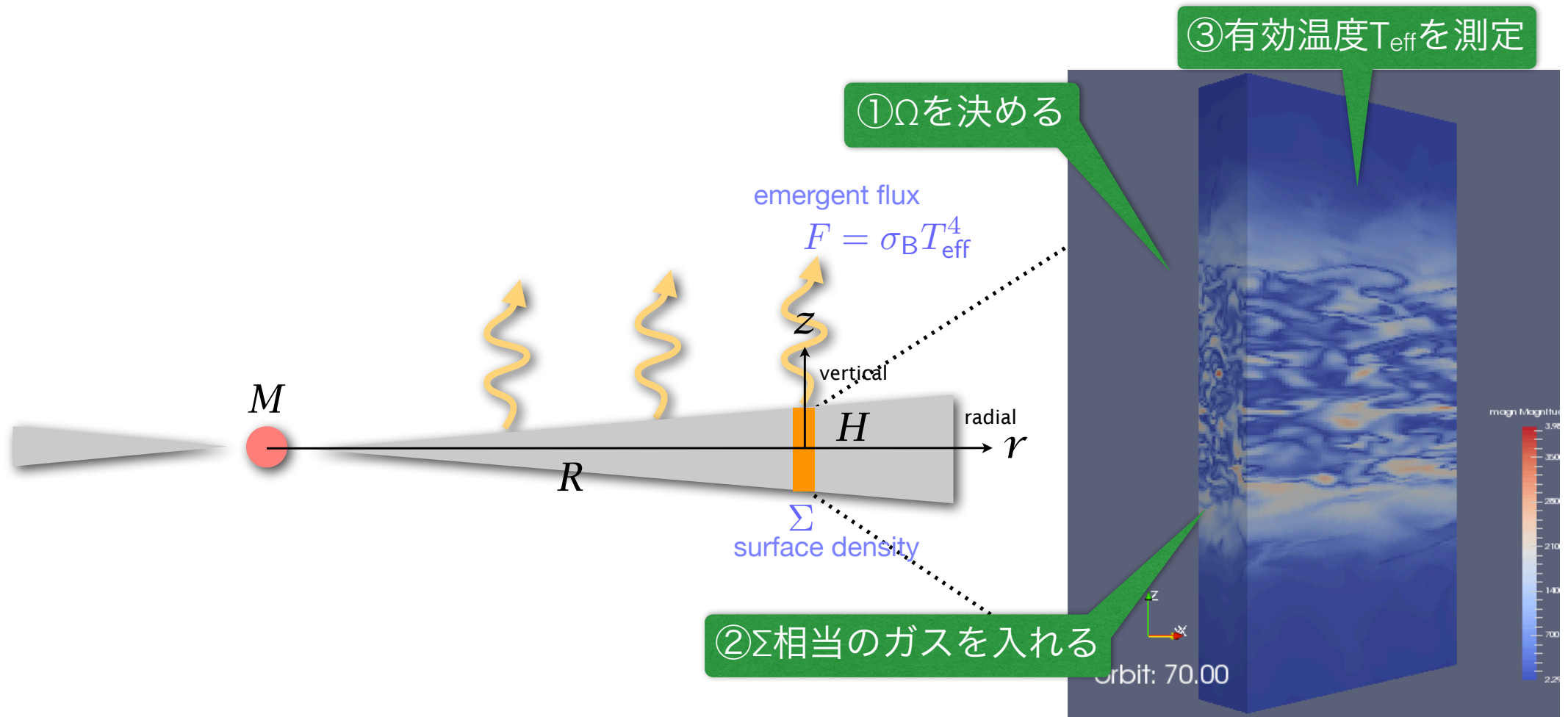
本研究では

円盤不安定モデルと同様に、降着円盤の**垂直構造**を解いて**熱平衡曲線**を求める。ただし、シアリングボックスと3次元**輻射磁気流体力学シミュレーション**を用いて、熱平衡を「第一原理」から計算する。このとき、角速度 Ω を決めると、面密度 Σ が唯一のパラメータとなる。



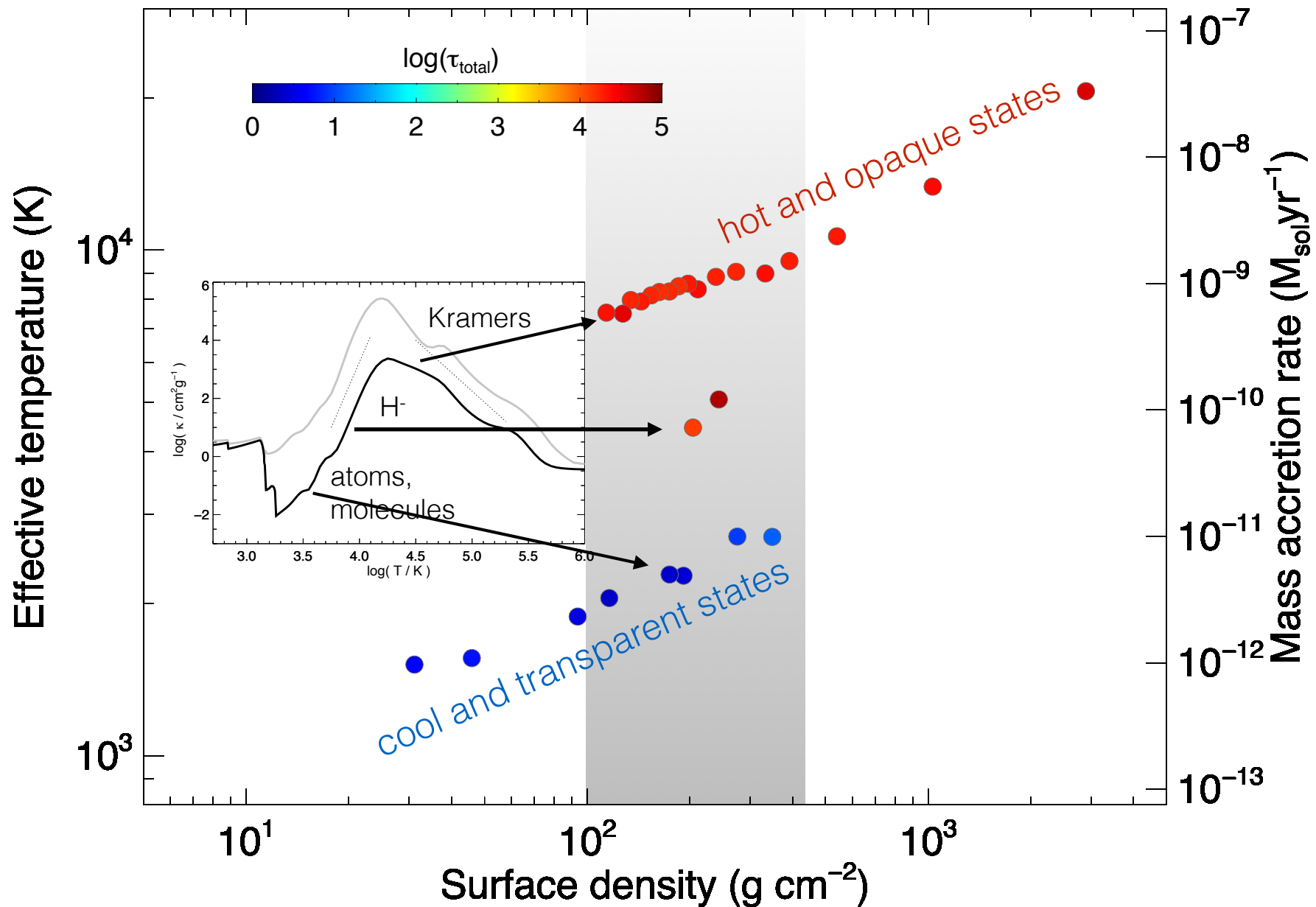
本研究では

円盤不安定モデルと同様に、降着円盤の**垂直構造**を解いて**熱平衡曲線**を求める。ただし、シアリングボックスと3次元**輻射磁気流体力学シミュレーション**を用いて、熱平衡を「第一原理」から計算する。
このとき、角速度 Ω を決めると、面密度 Σ が唯一のパラメータとなる。

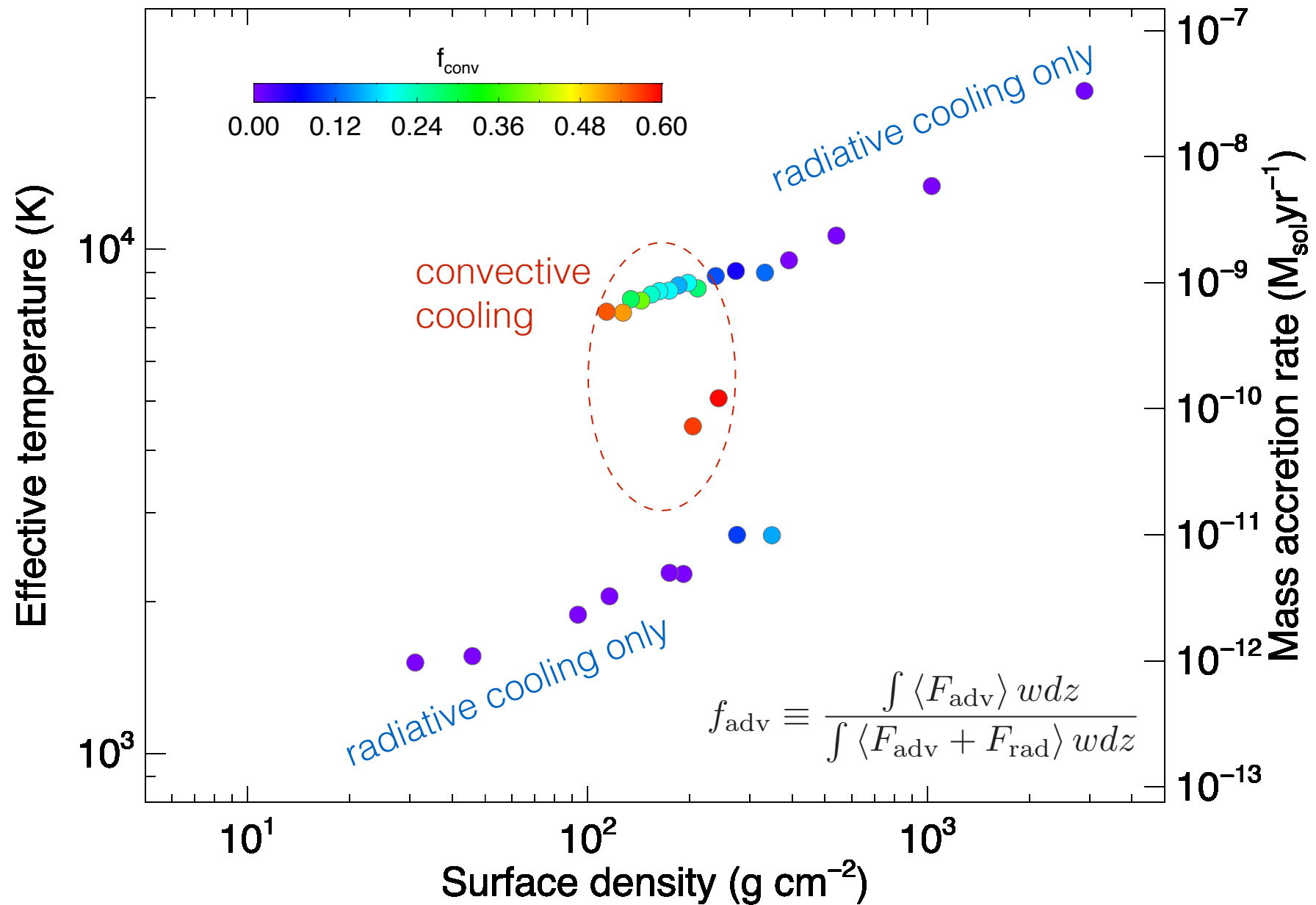


Thermal equilibrium curve for a CV case

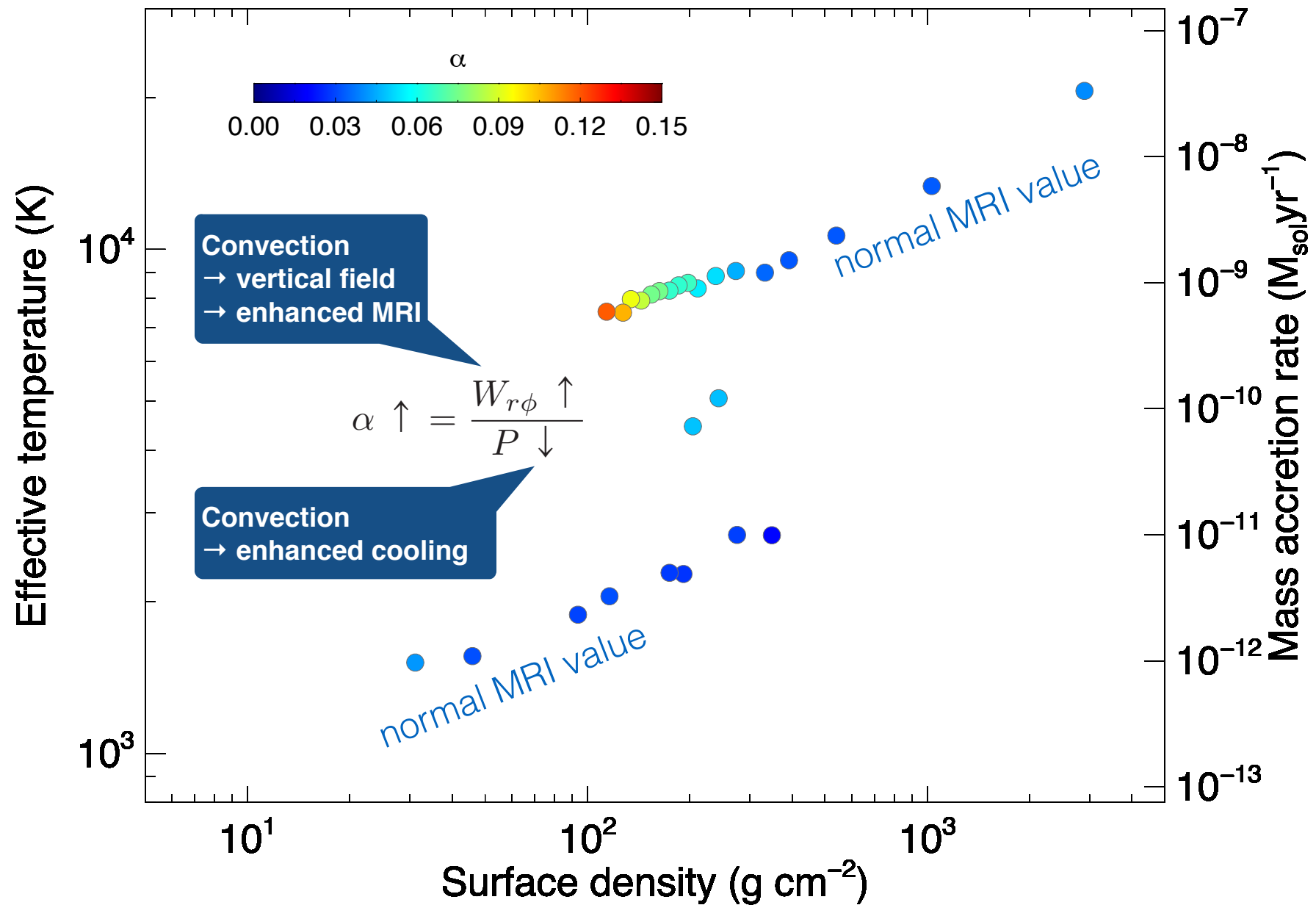
consisting of stable solutions that lasted at least several t_{therm}



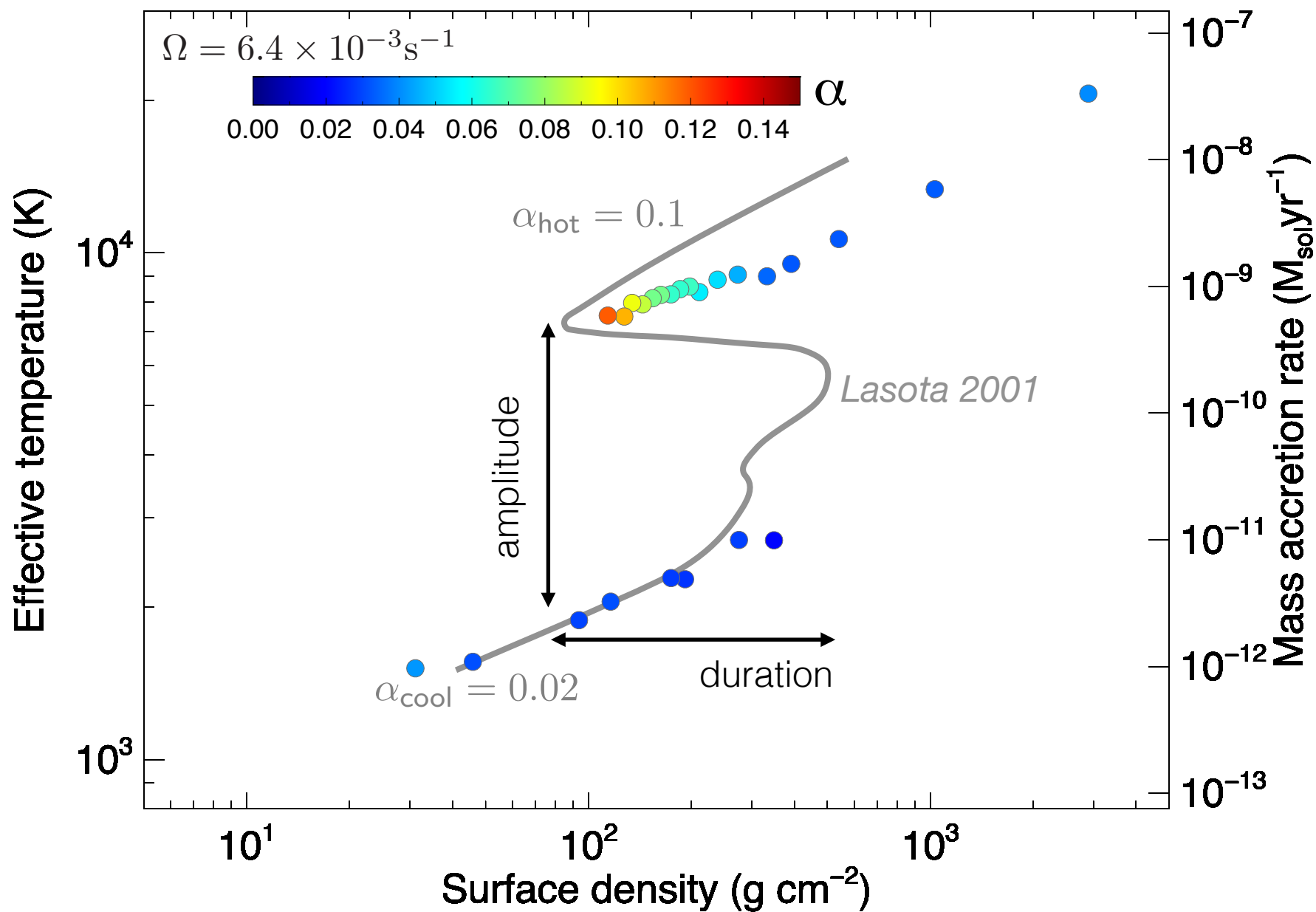
Heat transport: convection vs. radiative diffusion



Enhancement of alpha



円盤不安定モデルとの比較



まとめ

- 水素電離を伴う降着円盤の熱平衡曲線を第一原理から求めた
- リミットサイクルを示唆するS字型曲線が得られた
- 高温ブランチでは熱対流によってMRI乱流の α 値が強められる (cf. Lesur & Ogilvie 11)

乱流熱対流による角運動量輸送の可能性

- ・ 非常に小さく ($\alpha \sim 10^{-4}$)、レイリー数が小さい場合は、負にもなる (e.g. Stone & Balbus 96, Lesur & Ogilvie 10)
- ・ ただし、シア流がエネルギー源でない場合の話

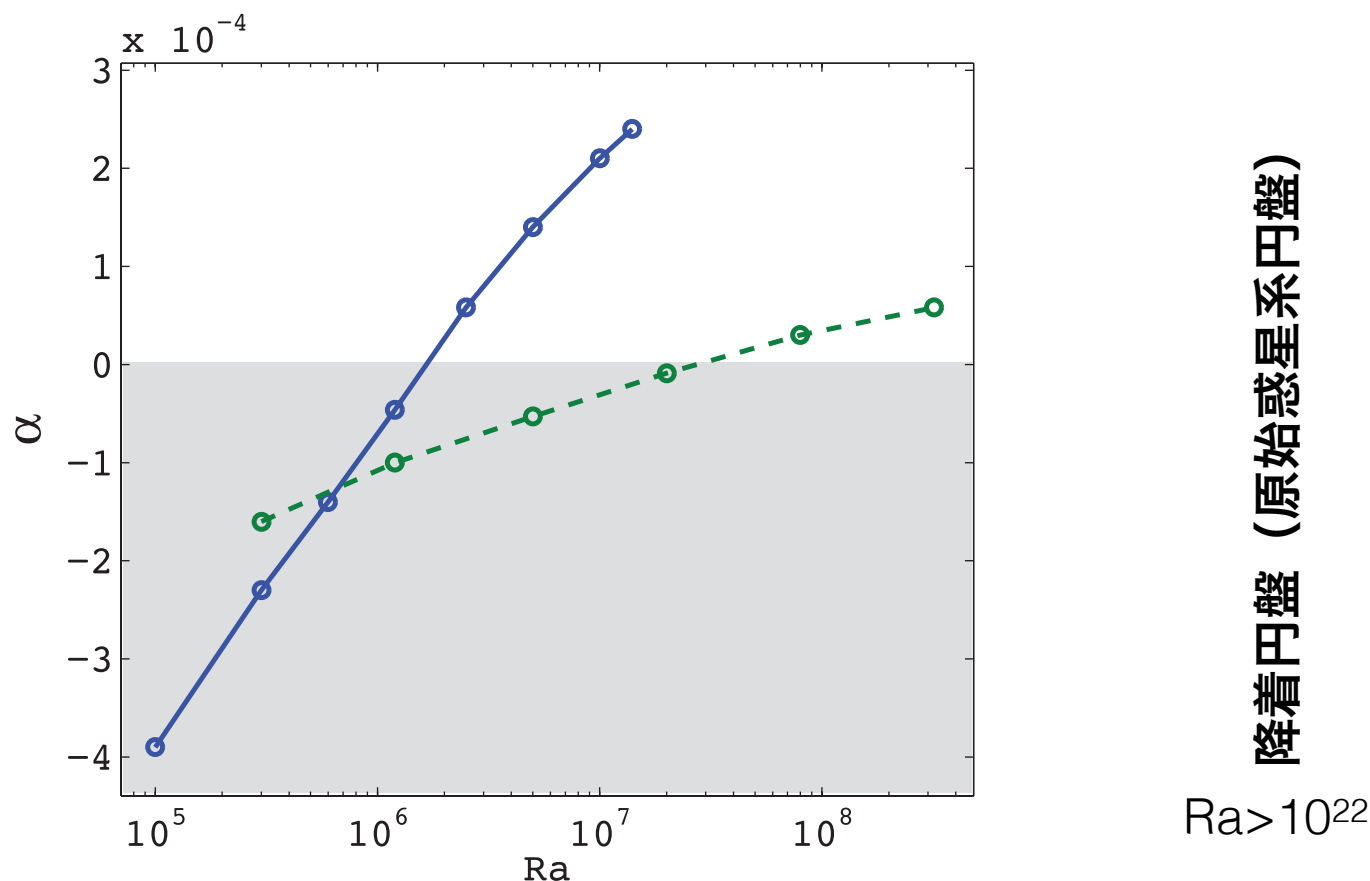


Figure 2. Correlation between the turbulent transport and Ra for $Ri = 0.4$ (plain line) and $Ri = 0.2$ (dashed line).

Lesur & Ogilvie 2010

まとめ

- 水素電離を伴う降着円盤の熱平衡曲線を第一原理から求めた
- リミットサイクルを示唆するS字型曲線が得られた
- 高温ブランチでは熱対流によってMRI乱流の α 値が強められる (cf. Lesur & Ogilvie 11)
- 矮新星の円盤不安定モデルとは、だいたい整合する
- 整合しないFU Oriアウトバーストは、熱不安定リミットサイクルとは別メカニズムか？

