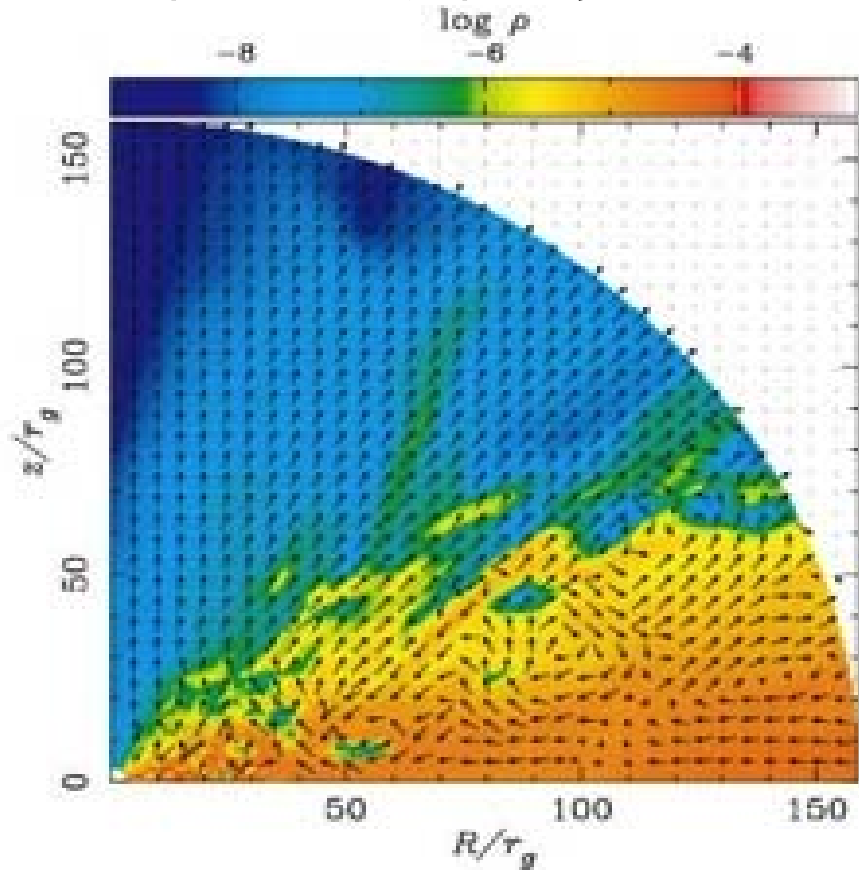


応用課題： 輻射磁気流体

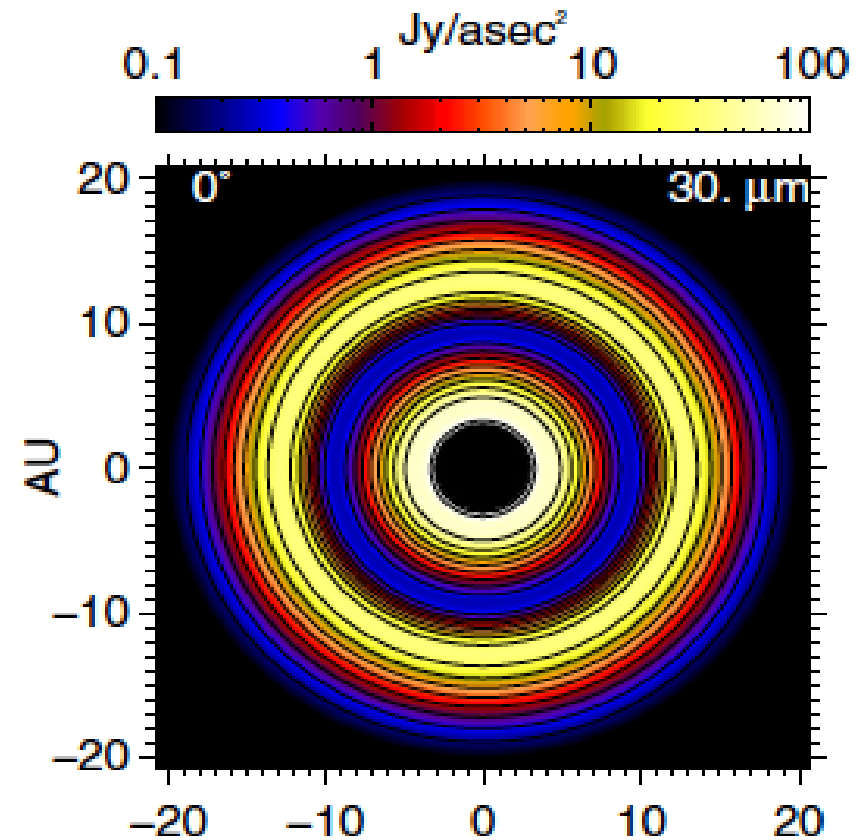
モーメント法を用いた 相対論的輻射流体の数値解法

ブラックホール降着円盤の
輻射磁気流体計算



Osuga (2006)

原始惑星系円盤の輻射流
体計算



Hannah et al. (2012)

輻射のモーメント方程式

輻射輸送方程式

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I = \chi(S - I)$$

右辺についてローレンツ変換して実験室系にそろえてみる

輻射のエネルギー式

$$\partial_t E_r + \partial_j F_r^j = \rho \kappa \left(4\pi \gamma B - c \gamma E_r + \frac{u_j F_r^j}{c} \right)$$

κ : 吸収係数、 σ_s : 散乱係数、
B: 黒体放射強度

$$- \rho \sigma_s \left[\frac{\gamma \mathbf{u}^2 E_r}{c} - \frac{\gamma u_i u_j P_r^{ij}}{c} - \left(\gamma^2 + \frac{\mathbf{u}^2}{c^2} \right) \frac{u_j F_r^j}{c} \right] = -G^0$$

輻射の運動量の式

$$\frac{1}{c^2} \partial_t F_r^i + \partial_j P_r^{ij} = \rho \kappa \left(\frac{4\pi u^i B}{c^2} - \frac{\gamma F_r^i}{c} + \frac{u_k P_r^{ik}}{c} \right)$$

$$- \rho \sigma_s \left[\frac{\gamma F_r^i}{c} - \frac{\gamma^2 u^i}{c} E_r - \frac{u_k P_r^{ik}}{c} + \frac{u^i}{c} \left(\frac{2\gamma u_j F_r^j}{c^2} - \frac{u_j u_k P_r^{jk}}{c^2} \right) \right] = -c^2 G^i$$

0次 $E_r = \frac{1}{c} \int d\nu d\Omega I$ 光のエネルギー密度

Prを決める方程式が必要
(光の状態方程式)

1次 $F_r^i = \int d\nu d\Omega I n^i$ 光の運動量密度

$$P_r^{ij} = D(E_r, F_r)^{ij} E_r$$

2次 $P_r^{ij} = \frac{1}{c} \int d\nu d\Omega I n^i n^j$ 光による応力

詳しくはテキスト
(6.11)-(6.14)参照

二次元輻射場の伝播(日陰問題)

- 問題設定：

ある密度, 温度で平衡にある静的な一様媒質中に、
密度の十分大きいクランプを置く。
この系に対して、媒質より高い温度の輻射を照射する。

- 次の二つの場合について考える:

①吸収は考えるが,散乱は考えない

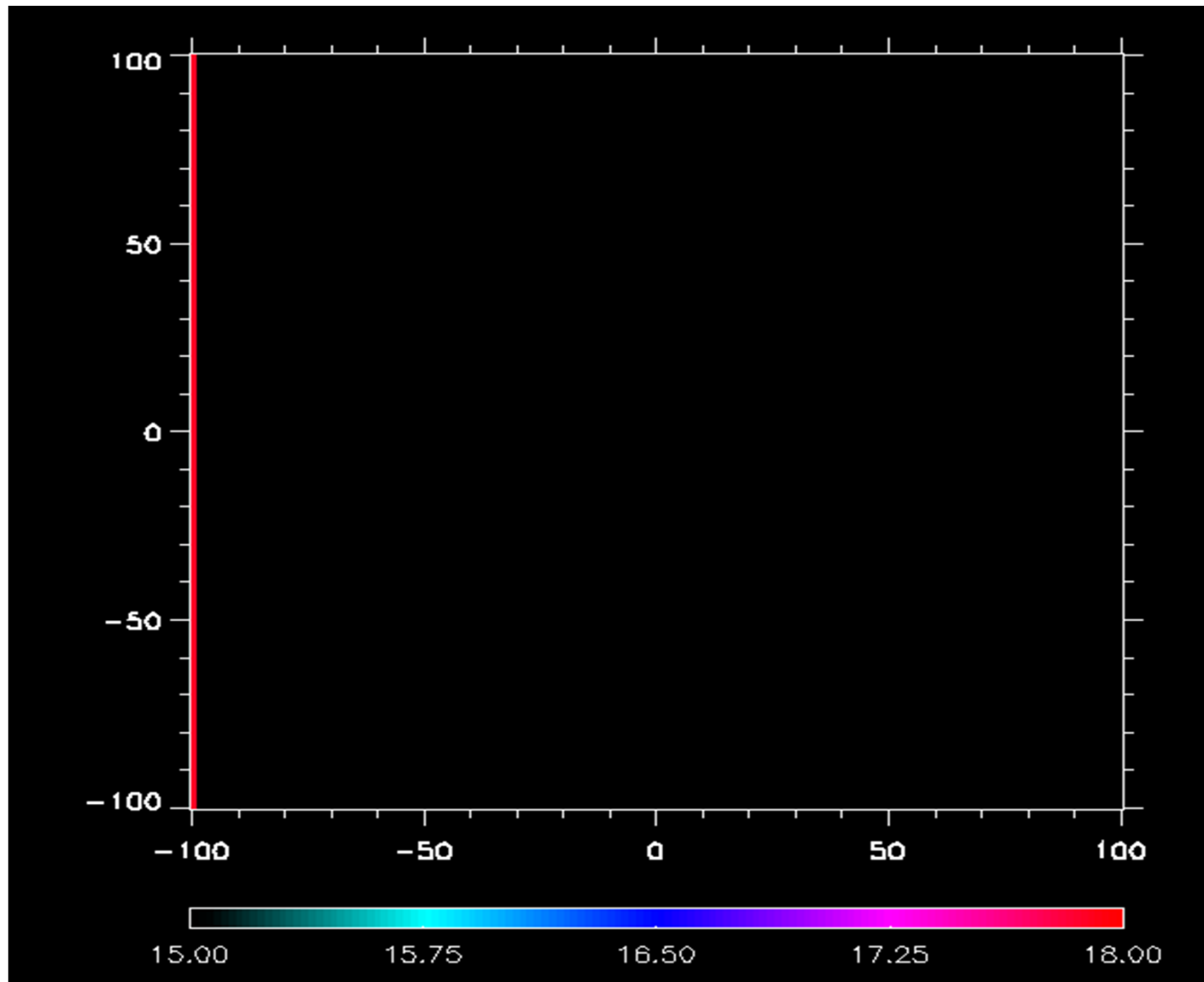
②散乱は考えるが,吸収は考えない

- さらに、クロージャー関係として、次の二つを考える:

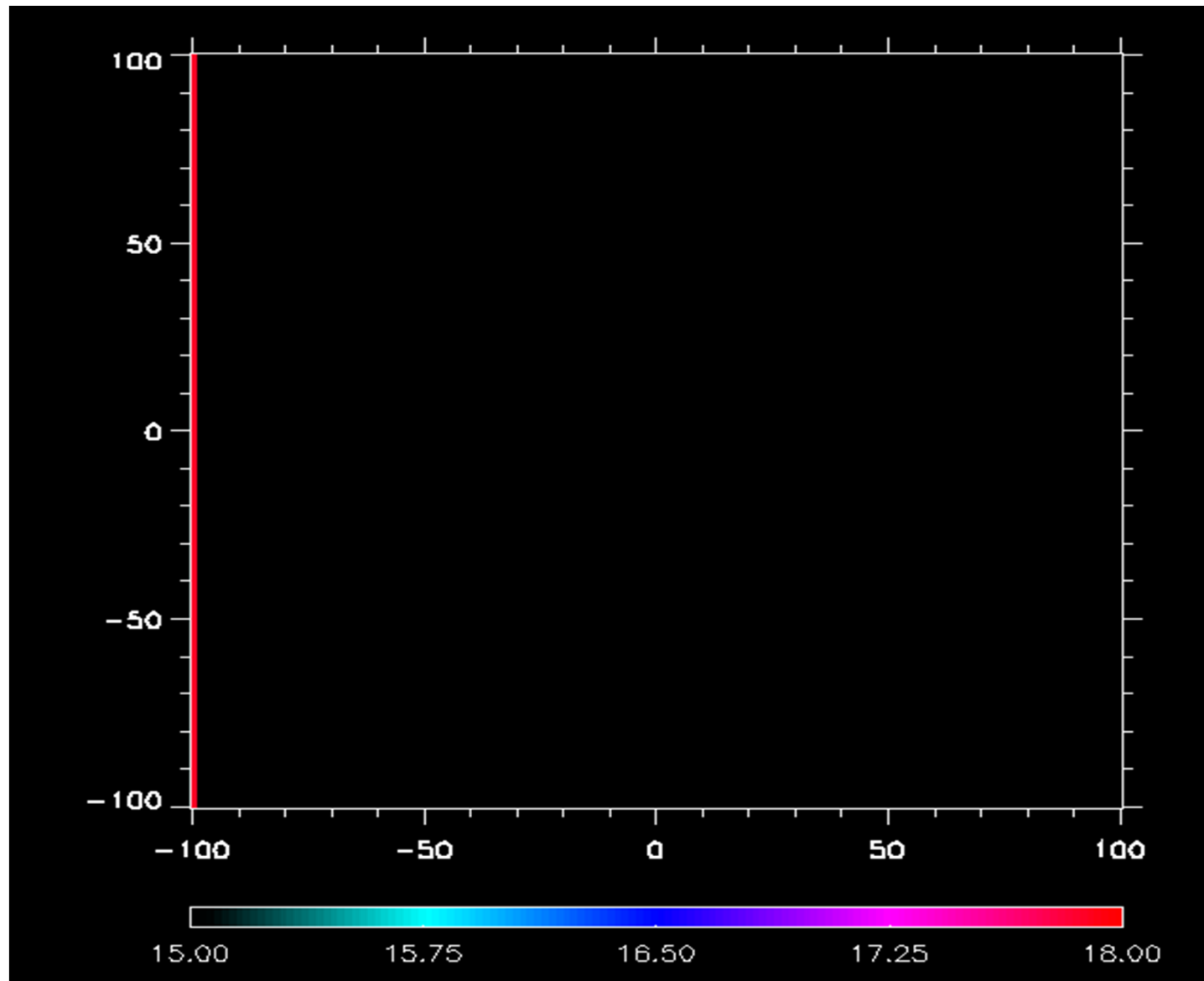
・M-1クロージャー： $P^{ij} = n^i n^j E$ (optically thinで)

・Eddington近似： $P^{ij} = \frac{1}{3} \delta^{ij} E$

二次元輻射場の伝播①(M-1)



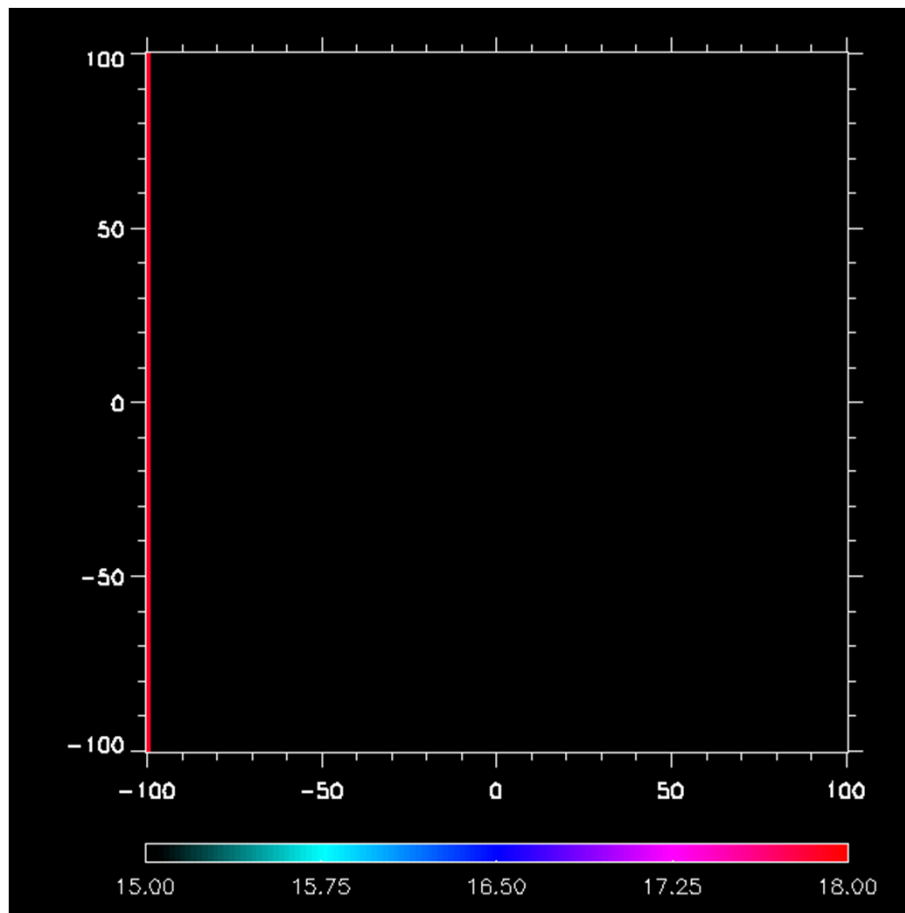
二次元輻射場の伝播①(Eddington)



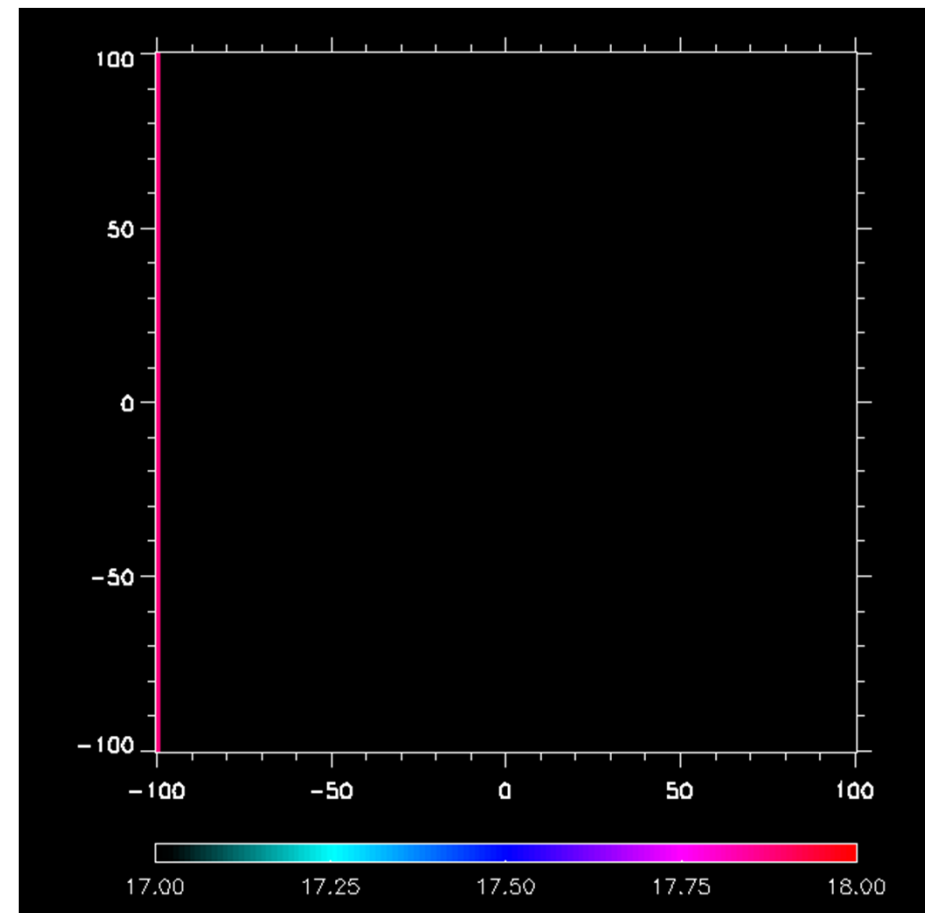
二次元輻射場の伝播②

- 吸収係数をゼロ
- M-1でも輻射が少し回り込む
- 散乱の効果を入れる
- クランプで反射した輻射

Eddington closure



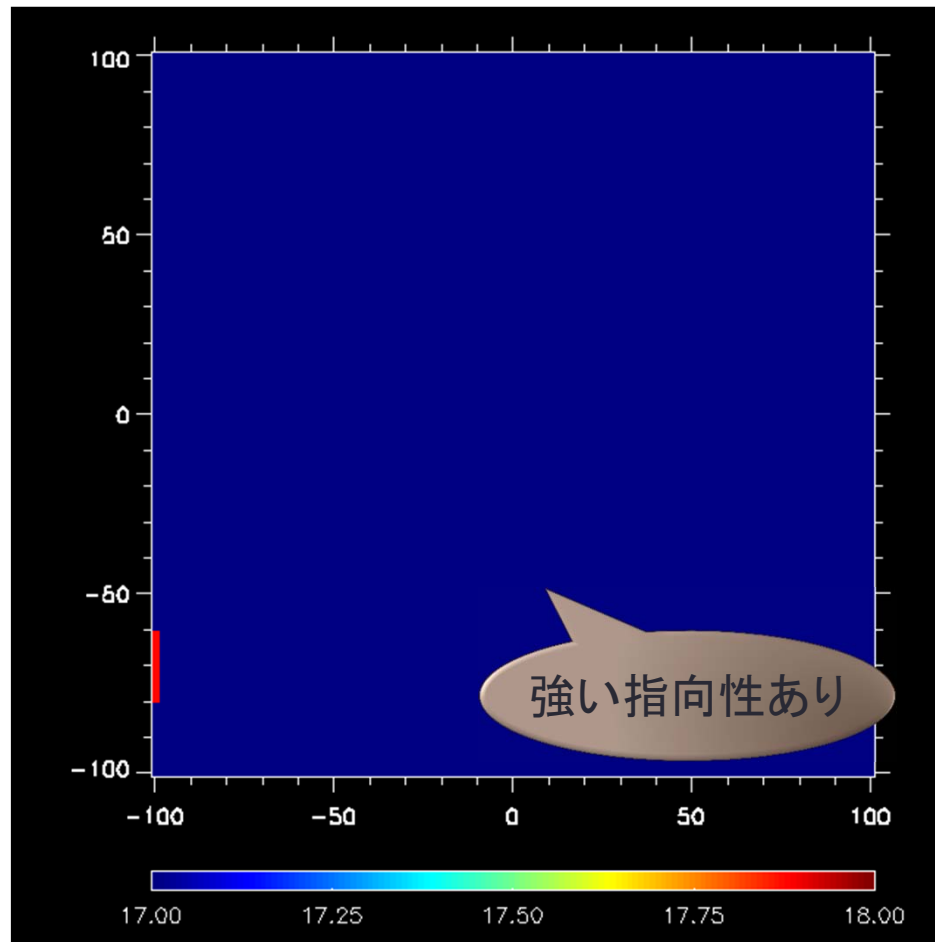
M-1 closure



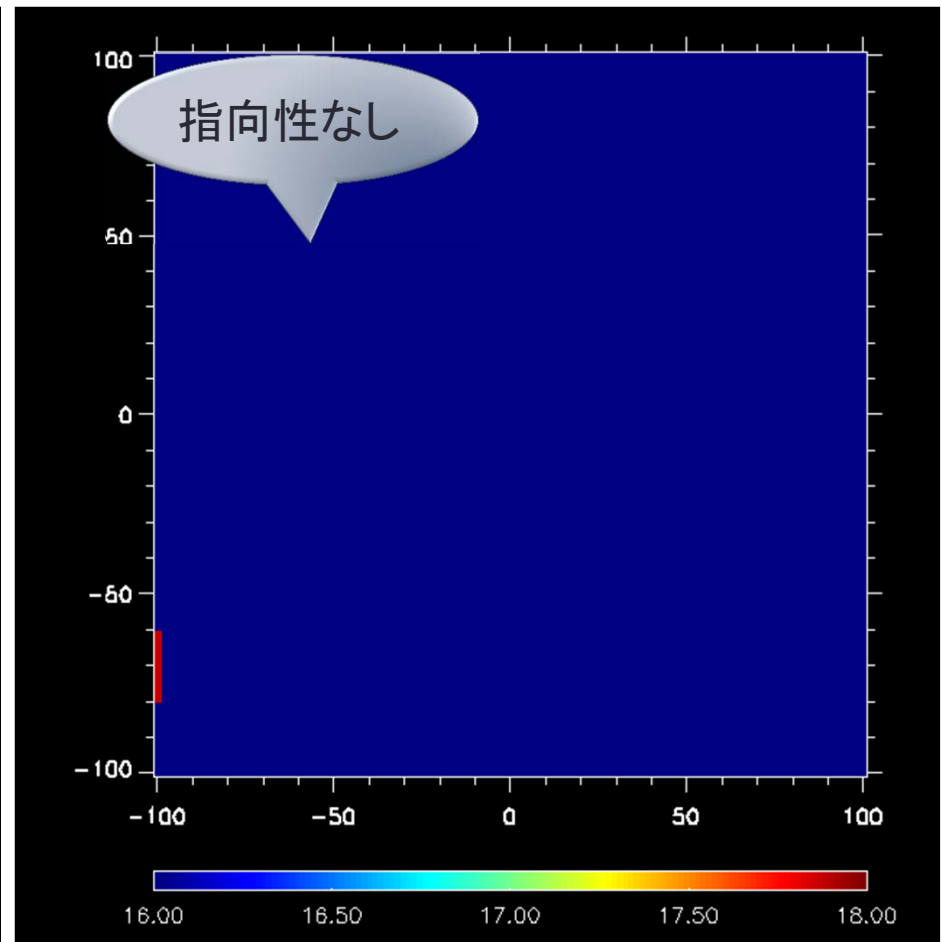
二次元輻射場における輻射の伝播

～ Eddington近似 と M-1 closure ～

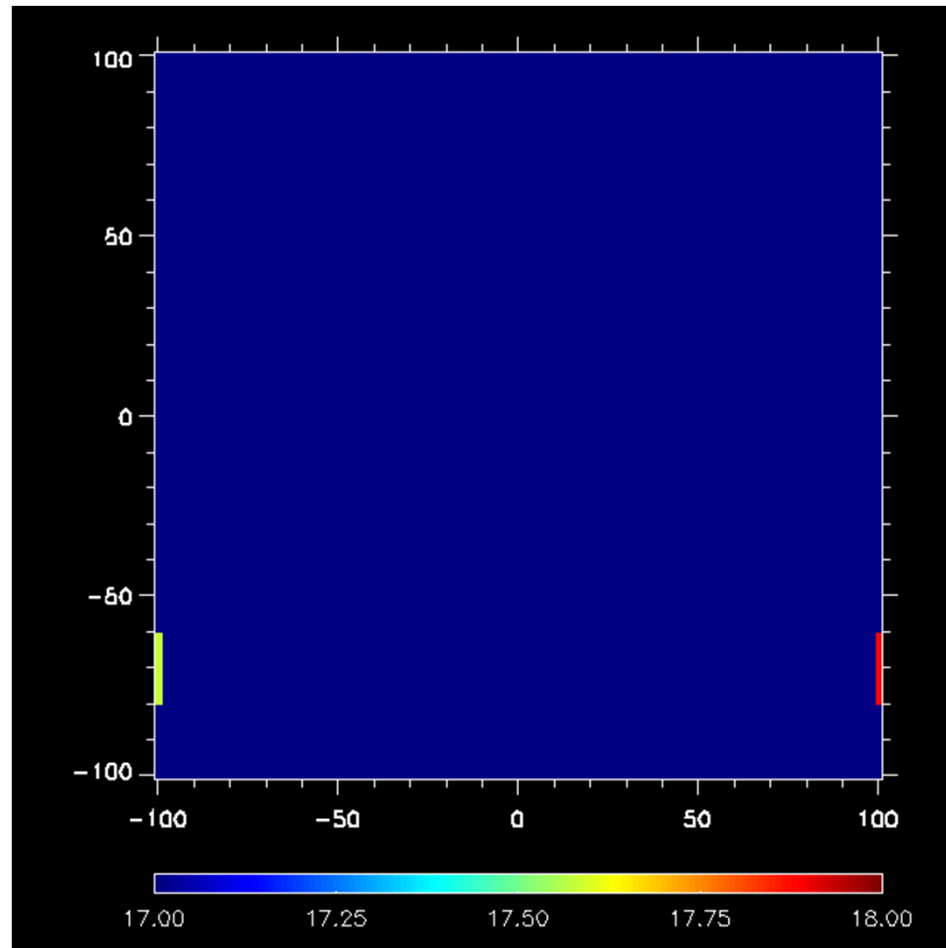
M-1 closure



Eddington近似

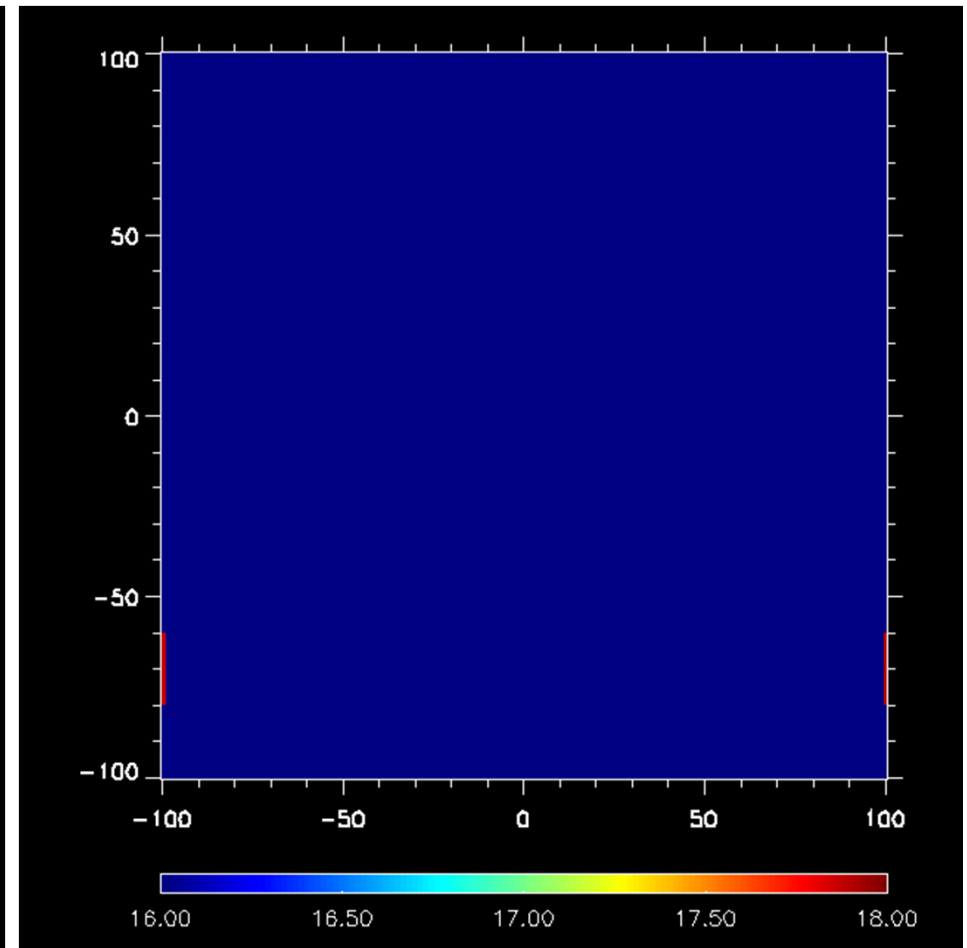


M-1 closure



衝突する

Eddington近似



衝突しない

相対論的輻射流体方程式

If optically thin

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial F_r^j}{\partial x^j} = 0$$

輻射0次モーメント式

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial F_r^i}{\partial t} + \frac{\partial P_r^{ij}}{\partial x^j} = 0$$

輻射1次モーメント式

Eddington近似 → 波動方程式

$$\frac{\partial^2 E_r}{\partial t^2} - \frac{c^2}{3} \frac{\partial^2 E_r}{\partial x^2} = 0$$

$$P_r'^{ij} = \frac{\delta^{ij}}{3} E_r'$$

M-1 closure

$$\frac{\partial^2 E_r}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 D E_r}{\partial x^2} = 0$$

$$P_r^{ij} = \left[\frac{3(1-\chi)}{2} \frac{\delta^{ij}}{3} + \frac{(3\chi-1)}{2} n^i n^j \right] E_r = D^{ij} E_r$$

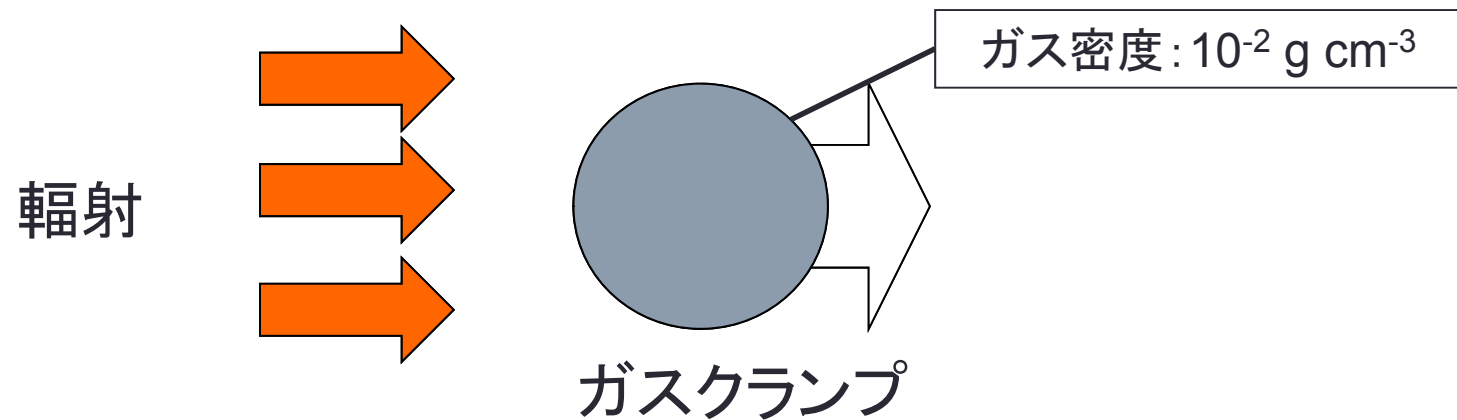
$$\chi = \frac{3 + 4f^2}{5 + 2\sqrt{4 - 3f^2}}$$

$$n^i = \frac{F_r^i}{F_r}$$

$$f^i = \frac{F_r^i}{cE_r}$$

2次元輻射場の伝播 ～ガスの加速～

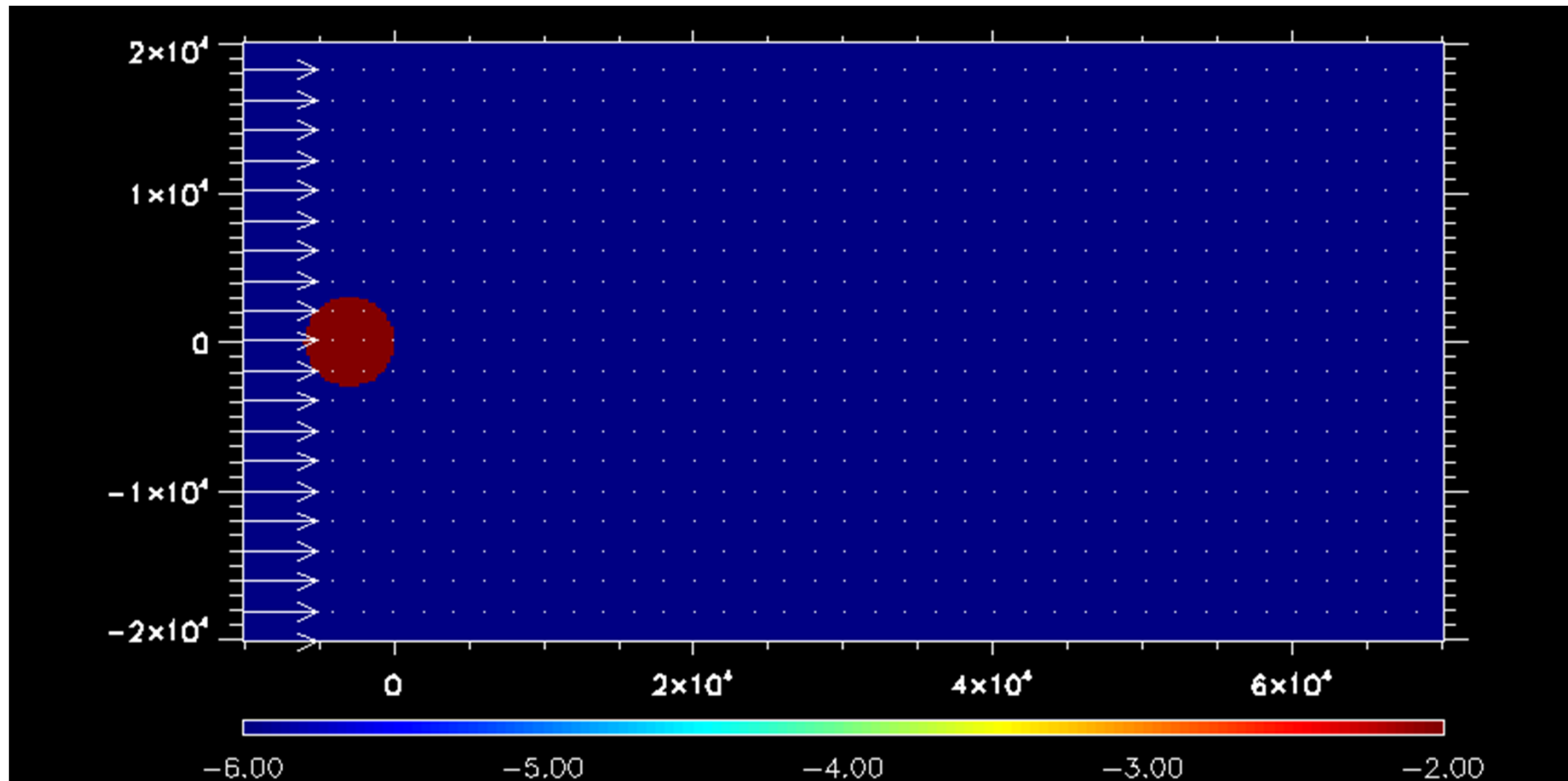
- 担当：柴垣（東大M1）、橋詰（総研大M2）
- 輻射によってガスクランプが加速されていく様子確かめた
 - ✓ 計算ボックス内を一様なガスで満たす
 - ✓ ガス密度： $10^{-6} \text{ g cm}^{-3}$ 、ガス温度： 10^9 K 、輻射温度： $3 \times 10^7 \text{ K}$



$$\rho \frac{Dv^i}{Dt} = - \frac{\partial p_g}{\partial x^i} + \rho \sigma_0 \frac{F_r^i}{c}$$

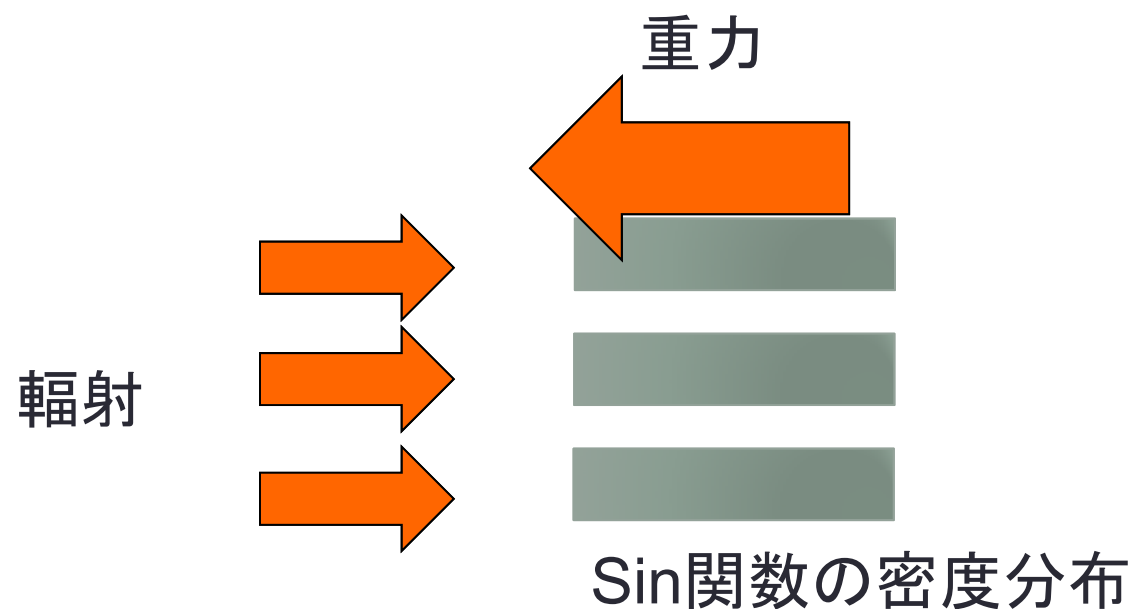
輻射による力

- 計算結果

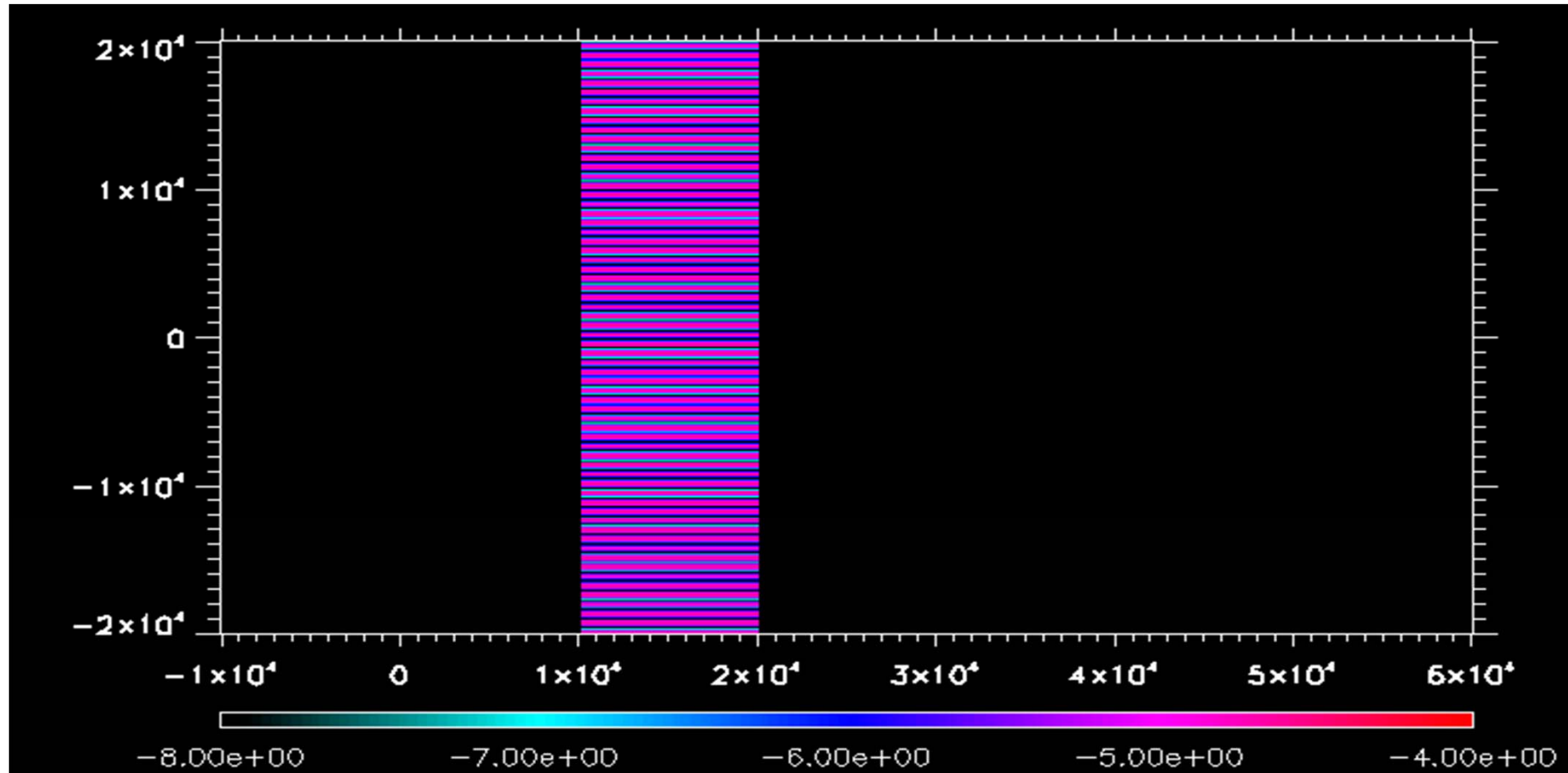


- ✓ color barは密度[g/cm³]、ベクトルは輻射による力
- ✓ 渦はRayleigh-Taylor Instability

一様重力を加えた時の不安定性



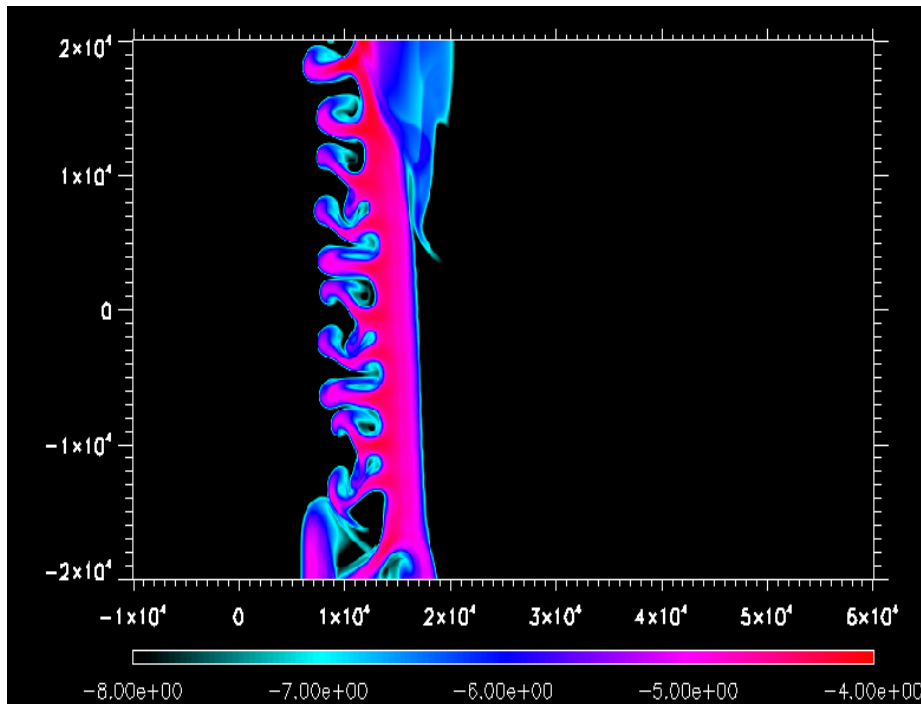
一様重力を加えた時の不安定性



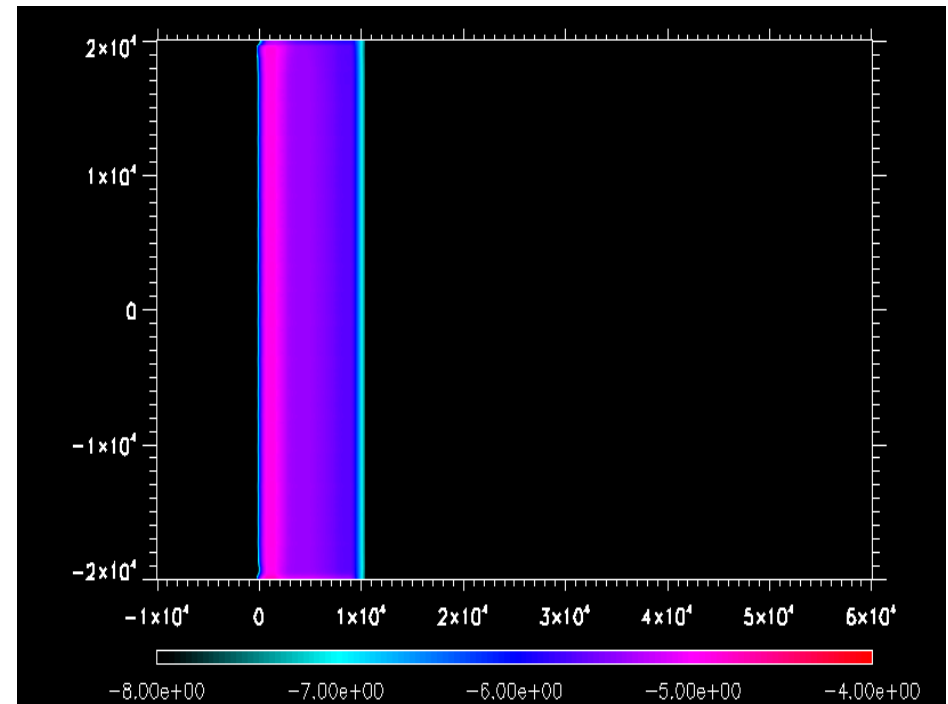
- ✓ 不安定が起こった
- ✓ 重力由来？ 輻射由来？

一様重力を加えた時の不安定性

輻射あり



輻射なし



- ✓ 輻射は必要
- ✓ 輻射による不安定 or 輻射が重力不安定を強めた