

原始惑星系円盤の加熱機構と温度構造

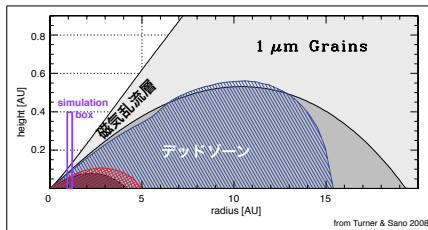
廣瀬 重信 (海洋研究開発機構)

collaboration with Neal Turner (JPL/Caltech), 佐野孝好 (大阪大学)

2011 年 1 月 11 日
CfCA Users' Meeting 2010
国立天文台

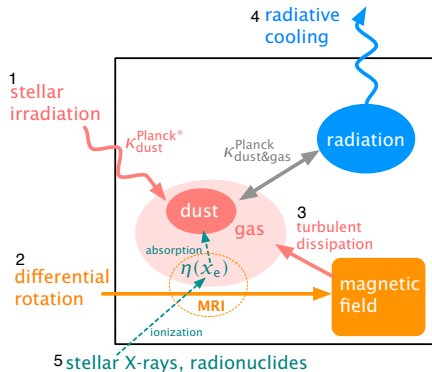
本研究の目的とアプローチ

- ▶ 原始惑星系円盤の温度はガス・ダストの進化を理解する上で重要な物理量
- ▶ 原始惑星系円盤の加熱と冷却
 - ▶ 加熱：中心星からの可視光照射 ($\sim 1 \times 10^5 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$)
降着エネルギーの散逸 ($\sim 3 \times 10^{3-4} \text{ erg/cm}^2/\text{s}$)
 - ▶ 冷却：円盤表面からの赤外輻射
- ▶ 原始惑星系円盤の質量降着
 - ▶ $\dot{M} \sim 1 \times 10^{-8} \sim 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr} \iff \alpha \sim 10^{-3} \sim 10^{-2}$
 - ▶ 磁気乱流層とデッドゾーンの二層構造



- ▶ 輻射磁気流体力学シミュレーションによる直接数値計算で温度構造を求める
 - ▶ シアリングボックス近似を用いて円盤の一部分 (動径スライス) の降着流を再現
 - ▶ 加熱および冷却過程を“第一原理”から計算し (準定常的) 熱平衡状態 を求める

原始惑星系円盤における熱力学



▶ 本数値シミュレーションで取り扱う主な物理過程

1. 中心星の可視光照射によるダスト加熱
2. 速度シア (重力エネルギーの解放) による磁気乱流の駆動
3. リコネクション・ショックによる磁気乱流の散逸とガス加熱
4. ダストによる赤外線放射とそれによる円盤ガスの冷却
5. 電離平衡 (中心星の X 線による電離 ⇄ ダストによる自由電子の吸着)

基礎方程式

- ▶ 輻射磁気流体力学方程式
 - ▶ エネルギー保存型
 - ▶ 輻射場: 周波数平均・制限拡散近似
 - ▶ ダスト-ガス間の熱平衡: $T = T_{\text{dust}} = T_{\text{gas}} (\neq T_{\text{rad}})$
 - ▶ thermally averaged opacity: dust & gas mixture (Semenov+ 2003)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \frac{\kappa_{\text{dust\&gas}}^R \rho}{c} \mathbf{F}$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e \mathbf{v}) = -(\nabla \cdot \mathbf{v}) p - (4\pi B - cE) \kappa_{\text{dust\&gas}}^p \rho + \eta j^2$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (E \mathbf{v}) = -\nabla \mathbf{v} : \mathbf{P} + (4\pi B - cE) \kappa_{\text{dust\&gas}}^p \rho - \nabla \cdot \mathbf{F}$$

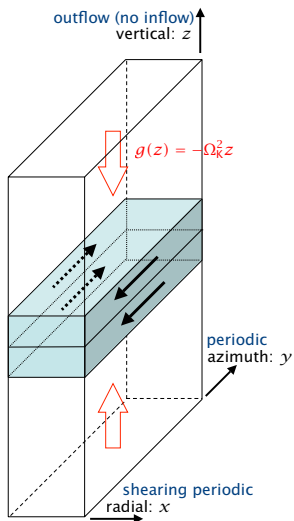
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \eta \mathbf{j}) = 0$$

$$\mathbf{F} = -\frac{c\lambda}{\kappa_{\text{dust\&gas}}^R \rho} \nabla E \quad \text{制限拡散近似}$$

基礎方程式

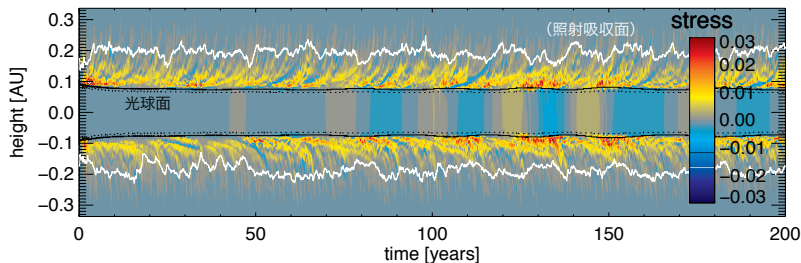
- ▶ 輻射磁気流体力学方程式
 - ▶ エネルギー保存型
 - ▶ 輻射場: 周波数平均・制限拡散近似
 - ▶ ダスト-ガス間の熱平衡: $T = T_{\text{dust}} = T_{\text{gas}} (\neq T_{\text{rad}})$
 - ▶ thermally averaged opacity: dust & gas mixture (Semenov+ 2003)
- ▶ 電気抵抗 (電離度) の計算
 - ▶ 電離源: 中心星からの X 線、放射性元素崩壊
 - ▶ simplified recombination network including reactions on grains (Ilgner & Nelson 2006) の平衡解
 - ▶ 上限値: $5 \times 10^{16} \text{cms}^{-1} \leftarrow \text{dynamical time step}$ で陽的に解くため
- ▶ ダスト-ガス比
 - ▶ 時間・空間的に一様を仮定
- ▶ 数値解法
 - ▶ MHD (explicit): ZEUS + MOCCT
 - ▶ radiative transfer (implicit): multigrid SOR

シミュレーション方法



- ▶ シミュレーションボックス
 - ▶ シアリングボックス近似
 - ▶ 中心星 ($M_* = 0.5M_\odot$) からの距離 1AU
 - ▶ 解像度: $\left(\frac{1H}{32}, \frac{4H}{64}, \frac{10H}{320}\right)$
 - ▶ $H = 0.07\text{AU}$ は、初期静水圧平衡 ($T = 280\text{K}$) のスケールハイト
- ▶ 中心星からの輻射輸送
 - ▶ 可視光による照射: 吸収のみ ($T_* = 4000\text{K}$ で平均した Planck mean opacity)
 - ▶ X 線による電離: 散乱を考慮した Igea & Glassgold (1999) をテーブル化
 - ▶ 水平方向に平均した密度分布を用いて計算
- ▶ パラメータ (括弧内は fiducial 計算の値)
 - ▶ 表面密度 (1000 g cm^{-2})
 - ▶ 垂直磁場強度 (0.02 Gauss)
 - ▶ ダスト-ガス比 (1×10^{-4})
 - ▶ dust opacity、放射性元素崩壊による電離率・ダスト表面反応断面積は、この値でスケールアップされる

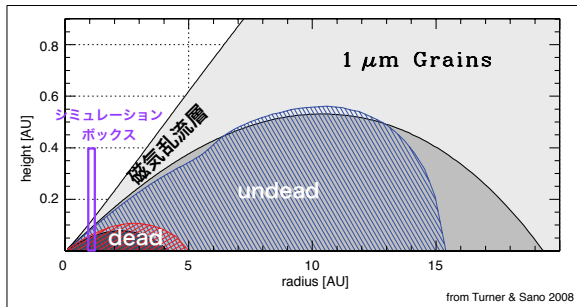
磁気ストレス vs. Height and Time



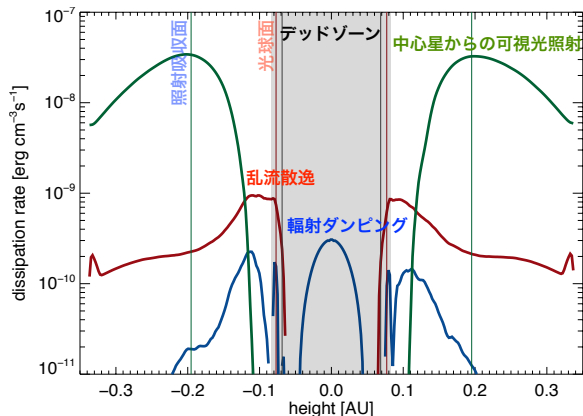
- ▶ 「乱流表層」と「デッドゾーン」の二層構造
 - ▶ “大気”は(中心星からのX線電離により)磁気乱流ストレスが維持される
 - ▶ 電離度が低い“内部”はデッドゾーンとなるが、ストレスはゼロとまらない
 - ▶ デッドゾーン境界は、光球面(ダスト-ガス比に依存)にたまたま一致する
- ▶ ストレスの空間積分は質量降着率 $1.4 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$ に相当
- ▶ 中心星照射の吸収面の位置は 磁気乱流 の影響で変動する

磁気ストレス vs. Height and Time (2)

- ▶ デッドゾーンは、実際は “undead zone” (Turner and Sano 2008)
 - ▶ 磁気乱流はないが、速度シアによる B_y の増幅によってストレスが働く
 - ▶ 乱流層 $\Rightarrow B_x \Rightarrow$ undead zone $\Rightarrow B_y \Rightarrow$ 乱流層
 - ▶ ただし、これらはおそらく resistivity cap の artifact
 - 実際の赤道面の resistivity は $10^{7\sim 8}$ 倍大きいので、少なくとも赤道面近傍は、磁氣的活動が全くない本当の “dead zone” と推測される

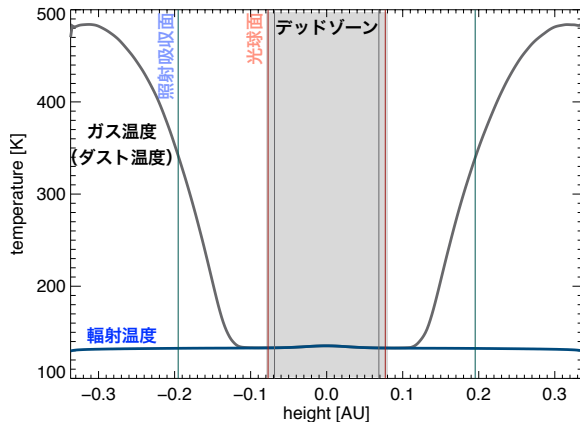


加熱率分布



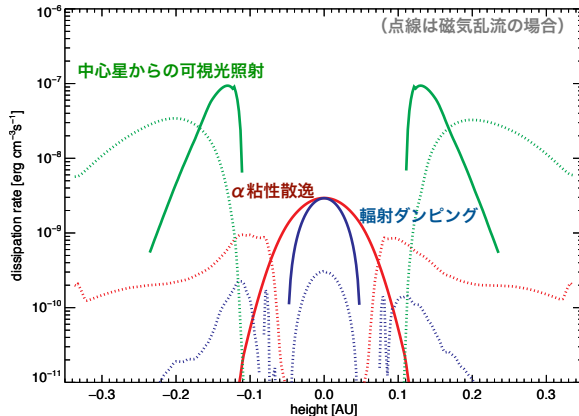
- ▶ 円盤大気では、中心星からの可視光照射が卓越する
 - ▶ しかし、加熱プロファイルは 磁気乱流によるガスの持ち上げ具合 で決まる
- ▶ 円盤大気下部 (デッドゾーン境界) で、乱流散逸が最も効く
- ▶ 円盤内部 (デッドゾーン) でも 輻射ダンピング による散逸がある
 - ▶ 円盤ガス中の非軸対称音波 (spiral wave) の散逸 (cf. 輻射圧優勢降着円盤)

温度分布



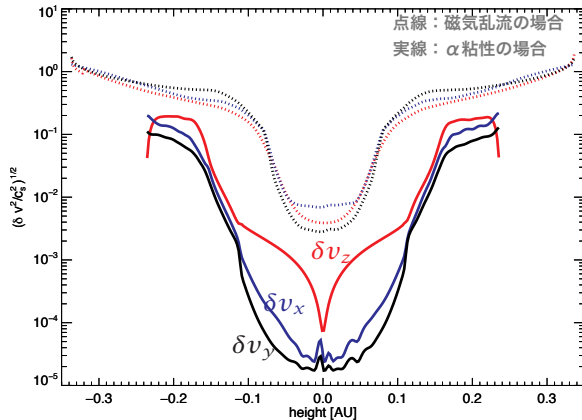
- ▶ (光学的に薄い) 大気の上層は、可視光照射により 500K 程度になる
 - ▶ ダストの可視光吸収効率が赤外線放射効率よりも良いため
- ▶ (光学的に厚い) デッドゾーンは、散逸がほとんどないためほぼ等温 (130K)
 - ▶ 赤道面の小さな バンプ は輻射ダンピングによるもの

加熱率分布 (α 粘性の場合)



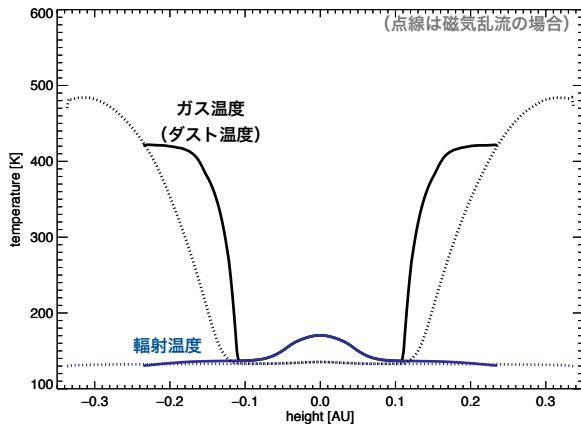
- ▶ 可視光照射はより低い高度で吸収される
 - ▶ 磁気圧による円盤大気サポートがなくなるため
- ▶ α 粘性散逸は赤道面に集中する
 - ▶ α 粘性モデルでは、散逸率は密度に比例すると仮定されるため
- ▶ 円盤内部 (デッドゾーン) の **輻射ダンピング** が α 粘性散逸と 同程度 になる
 - ▶ 円盤ガスの垂直方向音波 (breathing mode) の散逸

速度分散の比較



- ▶ 磁気乱流： δv_x 、 δv_y 、 δv_z は同程度
- ▶ α 粘性： δv_z が卓越 $\Leftarrow$ 垂直方向音波 (breathing mode)

温度分布 (α 粘性の場合)



- ▶ 磁気乱流の場合に比べて、赤道面に 40K ほどのバンプが見られる
 - ▶ α 粘性散逸が赤道面に集中するため
 - ▶ 輻射ダンピングが赤道面で (α 粘性散逸と同程度に) 効くため
- ▶ 円盤大気は磁場乱流の場合に比べて低くなる
 - ▶ 磁気圧サポートがなく、円盤大気的气体密度が低い

まとめ

- ▶ 原始惑星系円盤 (1 AU 近傍) の降着流を輻射磁気流体計算を用いて再現し
ローカルな温度構造 $T(z)$ と質量降着率 $\dot{M} (= 1.4 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr})$ を得た
 - ▶ 表面密度 (1000g/cm^2)、垂直磁場強度 (0.02G)、ダスト-ガス比 (10^{-4})
- ▶ 降着流は、磁気乱流状態にある“大気”と“内部”(デッドゾーン)の二層構造
 - ▶ 温度は、円盤内部は 130K でほぼ等温、大気上部は 500K 程度になる
- ▶ エネルギー的には中心星の可視光照射が卓越するが、乱流散逸に関して
も磁場を考慮した正確な取り扱いが必要
 - ▶ 円盤大気の加熱プロファイル $\Leftarrow$ 磁気圧によるガスのサポート
 - ▶ 赤道面の温度 $\Leftarrow$ 乱流散逸の詳細分布
- ▶ 輻射ダンピング (第二の散逸メカニズム)
 - ▶ 非軸対称音波の散逸で、特に赤道面近傍で卓越する
 - ▶ α 粘性の場合、垂直方向音波散逸で、粘性散逸と同程度になる