Efficiency of Accretion Heating in Circumplanetary Disks

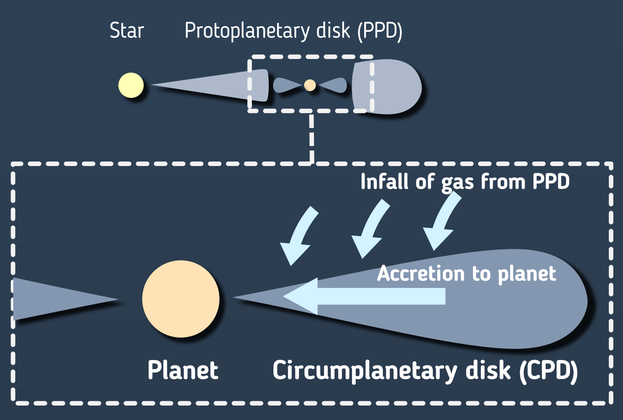
ガリレオ衛星の形成過程を解明する上で、氷の含有率は重要な制約条件の１つである。そのため形成時のスノーラインの位置とその進化を知ることが重要である。従来の研究の温度構造はα粘性モデルを用いた粘性加熱に基づいている。このモデルは乱流円盤を仮定しているが、周惑星円盤ではMRI由来の乱流は発達しない。そのため、α粘性モデルの妥当性は不確かであり、加熱率分布は注意深く計算しなければならない。

本研究では、我々は磁気流体力学シミュレーションを行い、周惑星円盤で磁気応力による降着が起きるかどうか調べた。さらにその時の温度構造を計算した。その結果、α～10^{-4}の降着応力が発生した。またその時、加熱は上層で起こり保温効果が効かないために、温度がαモデルに比べて非常に小さくなることが分かった。スノーライン(T~160K)が10 RJに位置するのは降着率が~1 MJ/Myrの時であり、これまでの研究で期待されているよりも早期に、氷衛星の形成が起きた可能性がある。

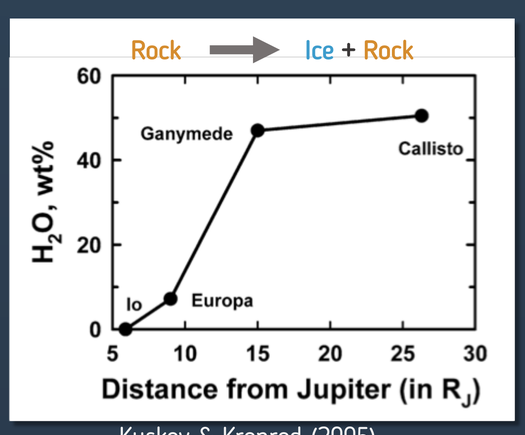
森昇志
東工大, D3
mori.s@geo.titech.ac.jp
and 芝池諭人 (東工大)

周惑星円盤におけるガリレオ氷衛星の形成

- ガリレオ衛星は周惑星円盤 (CPD)で形成された (e.g. Lunine & Stevenson 1982)
  → ガス枯渇モデル (Canup & Ward 2002, 2006)
  - 原始惑星系円盤(PPD)から流入した円盤ガスはCPDを通して中心惑星へ降着。
- 重要な制約の一つに、含水率分布がある
  - Io & Europa : 岩石
  - Ganymede & Callisto : 氷 + 岩石
  → 形成時、スノーラインは Europa と Ganymede の間にあったのではないか
  形成時の温度構造を求める必要がある

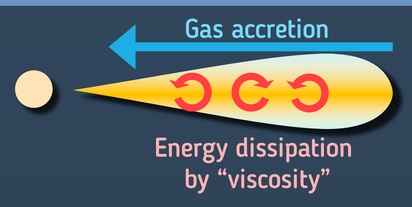


Gas starved disk model (Canup & Ward 2002)



Kuskov & Kronrod (2005)

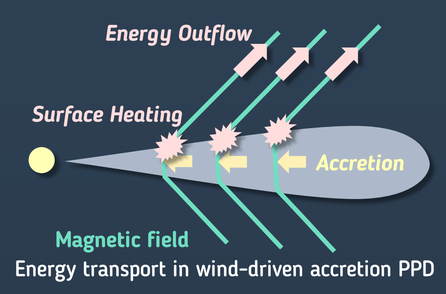
円盤の温度構造と降着加熱



- 加熱機構：
  - 粘性過熱 (e.g. Canup & Ward 2002)
  - 流入ガスのショック/圧縮過熱 e.g. Tanigawa et al. 2012, Szulágyi et al. 2016)
  - スパイラルの衝撃波過熱 (e.g. Szulágyi et al. 2014, Zhu et al. 2016) , etc.
- α粘性加熱(Shakura & Sunyaev 1973)において 、降着エネルギーは乱流粘性によって局所的に散逸する。
  → 赤道面付近の加熱 → 円盤に熱が篭る → 高温の円盤に
- 高温の円盤は氷衛星には不適切 (Szulágyi et al. 2016)
  - 低い降着率/小さいオパシティが望ましい (Canup & ward 2002)

どこで・どれだけのエネルギーが散逸するか?

- CPDではMRI乱流は発生しない (Fujii et al. 2014)
- PPDでは円盤風の磁気応力によって降着加熱が駆動される(e.g. Bai & Stone 2013)。
  → CPDでも起きるか？
- PPDの加熱分布は α粘性モデルと大きく異なる (Mori et al. in prep.)



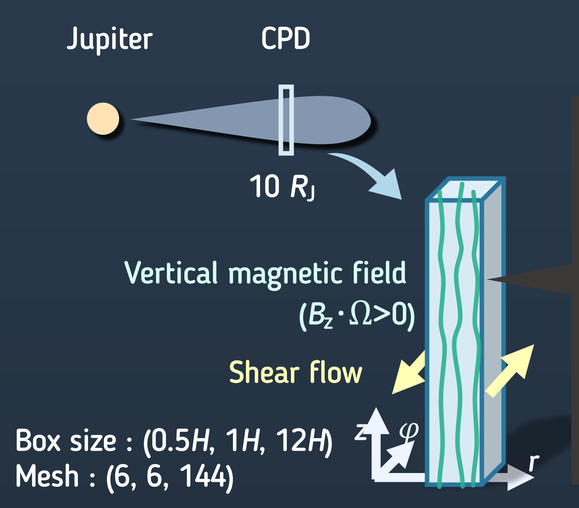
円盤表面での加熱 + 円盤風によるエネルギー流出
→ 非効率な降着加熱

手法：磁気流体力学シミュレーション

- 磁気円盤風が降着を駆動する時の円盤の温度分布を計算する。
- MHDシミュレーションを行い、加熱プロファイルを得る。
  - Athena (Stone et al. 2008, Stone & Gardiner 2010)
  - 非理想MHD効果を考慮 (オーム散逸, ホール効果, 両極性拡散)
- 誘導方程式 with 非理想MHD効果

$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = \underbrace{\nabla \times (\boldsymbol{u} \times \boldsymbol{B})}_{\text{誘導項}} - \nabla \times \boldsymbol{E}' \qquad \boldsymbol{E}' \equiv \underbrace{\eta_O \boldsymbol{J}}_{\text{オーム散逸}} + \underbrace{\eta_H (\boldsymbol{J} \times \hat{\boldsymbol{B}})}_{\text{ホール効果}} + \underbrace{\eta_A \boldsymbol{J}_\perp}_{\text{両極性拡散}}$$

- エネルギー散逸はジュール加熱で起きる。



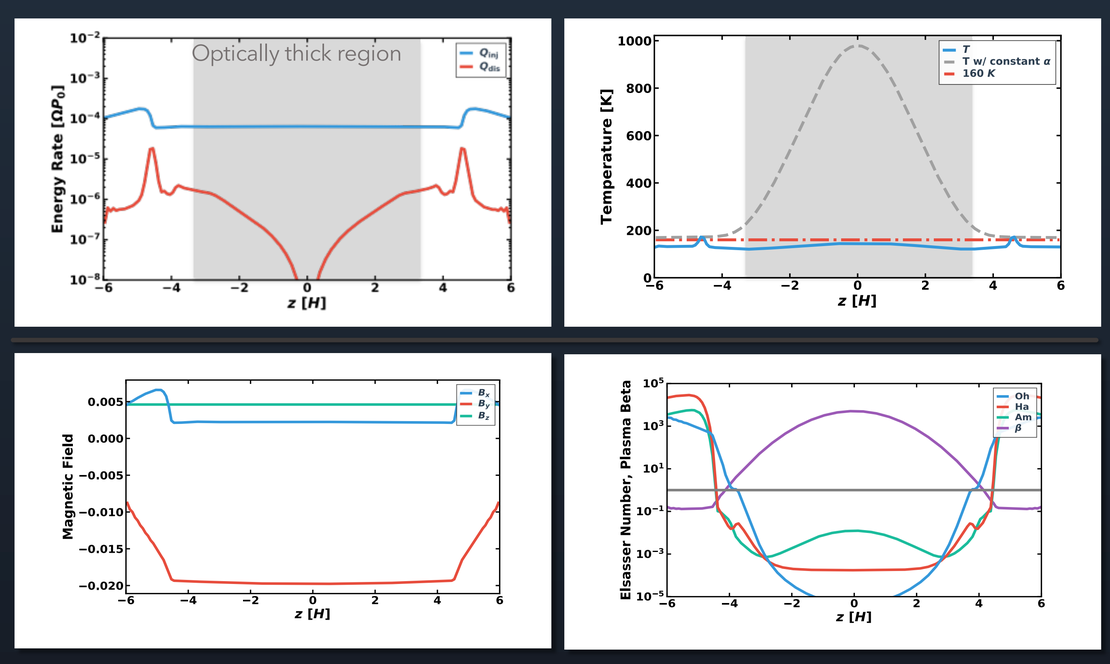
CPD モデル：
- Σ = 5000 g/cm²
- ダストガス比= 10^{-3}
- ダストサイズ= 0.1um
- オパシティ = 0.5 cm³/g
- P_{gas}/P_{mag} = 10^5

電離源:
- 宇宙線, 中心星X線, 放射性核種, 直達FUV*

*実際にはFUV は直接届かないが、散乱によってある程度CPDの表面を電離する可能性がある。

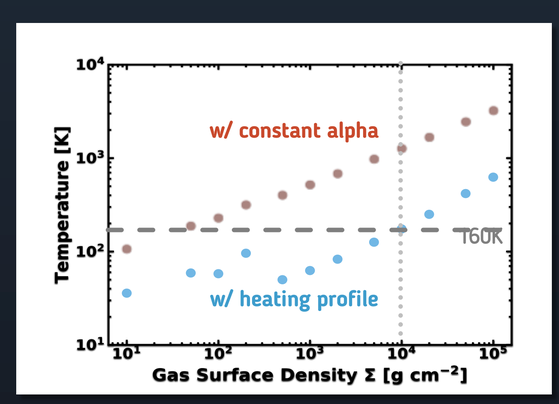
結果：代表的な例

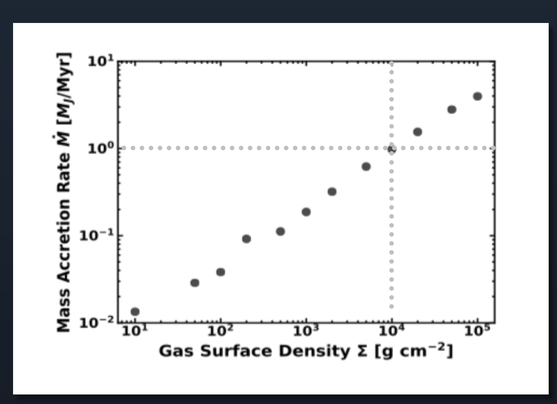
- エネルギー散逸(ジュール加熱)は光学的に薄い高高度で起きる。
- 赤道面温度は、α モデルの場合に比べ、非常に小さい。



結果：面密度の依存性

- ガス面密度= 10 -- 10^5 g/cm² を変えて同様の計算を行った。
- 赤道面温度はα モデルに比べ 0.2—0.5 倍下がった。
- スノーライン(T~160K)が10 R_Jに位置するのは降着率が~1 M_J/Myrの時
  → 低いオパシティと低い降着率は必要ない
- これまでの研究で期待されているよりも早期に、氷衛星の形成が起きたかもしれない。





結論

CPDにおいて円盤風の磁気応力が降着を駆動する際に、どのような温度分布になるか調べた。その結果、CPDにおける降着加熱は、α粘性モデルよりかなり非効率になることが分かった。他に加熱源が存在しなければ、円盤温度はかなり低いものになるだろう。