

Chap. 13.4.2 円盤の動力学的進化

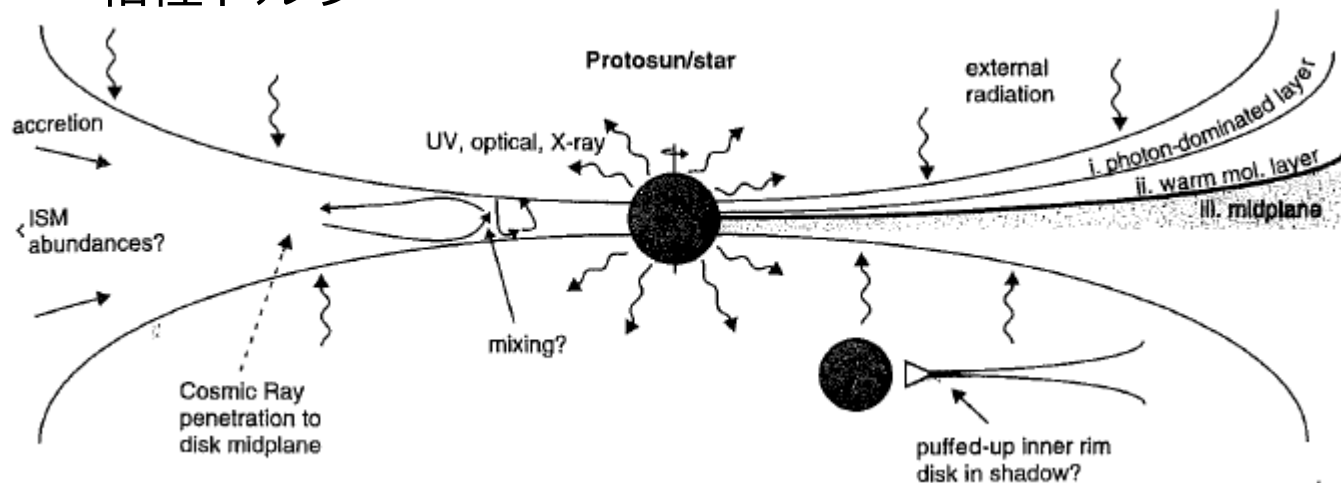
やさしい惑星科学入門ゼミ2020

Planetary Sciences 2nd Edition

Written by Imke de Pater and Jack J. Lissauer

円盤内の物質輸送について

- この節では円盤内の角運動量輸送について述べている。
 - 円盤の構造及び進化は角運動量と熱輸送にて決まる。
 - 角運動量輸送は以下の三つの方法が支配的
 - 磁気トルク
 - 重力トルク
 - 粘性トルク



磁気トルク

- 主星の持つ磁場によって引き起こされる角運動量のやり取り.
- 主星磁場と高温電離ガス間で起きる作用
 - 中心星の自転角速度より低速で公転する電離ガスは角運動量を得る.
 - 電離ガスは恒星磁場と同様に高速回転を始めるが、ケプラー速度で周回するガスとの相互作用で速度が低下する.
- 星から円盤へと角運動量を輸送する.
 - 低温な円盤内部には電離ガスが存在せず、恒星磁場も弱くなるため、より遠くへの輸送は行われない.

磁気トルク

角運動をうしなったガスの一部は恒星付近まで流れ落ちる

- 流れ落ちたガスの多くは遠心力によって主星の両極方向のジェットを放出する
 - 星の極と完全には一致しない方向にジェットを放出するため、角運動量を持ち去ることができる。
 - これにより主星の自転速度はBreakup Speedよりも遅くなることが考えられる。
 - この時ガスとともに排出された固体粒子が主星の地殻で加熱されてコンドリュールやCAIとなる可能性がある(Chap. 8.7.2)



Credit: C. Burrows (STScI & [ESA](#)), the WFPC 2 Investigation Definition Team, and [NASA](#)

重力トルク

- 重力不安定によって引き起こされる物質, 角運動量輸送.
- 円盤内にらせん状の密度波を発生させることで再度安定化するまで角運動量を輸送する.
 - 円盤内に大型の原始惑星を配置したときも右図のような密度波を生成することがある
 - これは土星の輪のようなより小さなスケールでも観測されている.
 - この重力トルクは角運動量を外側に輸送する.

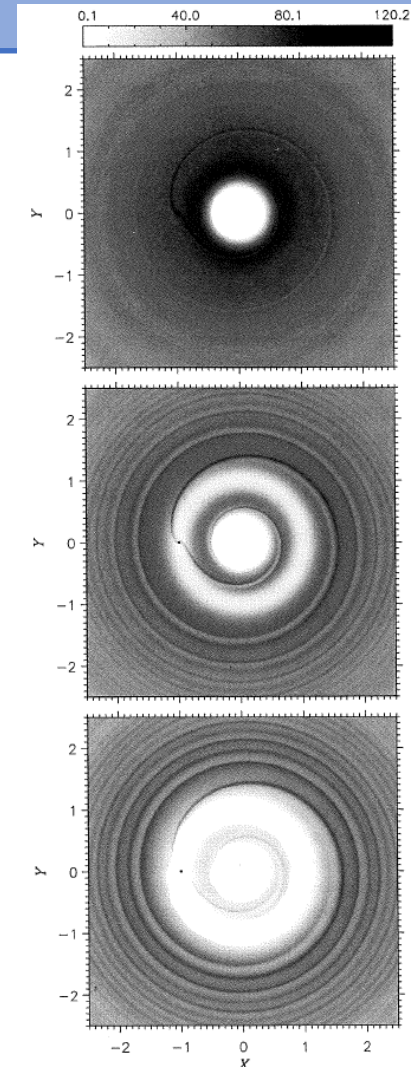


図 13.23

粘性トルク

- 分子は主星の周りをほぼケプラー速度で回転している

- 内側の方が速く, 外側が遅く公転する

- ガスの衝突により, 角運動量が外側へ
- 物質は内側へ拡散してゆく.

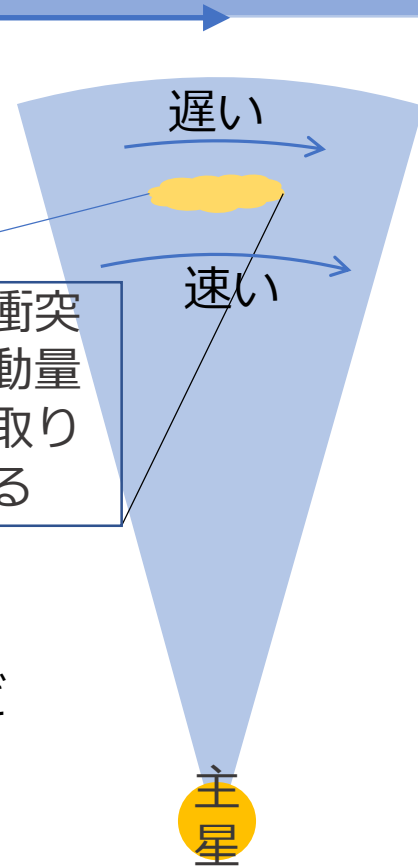
- 進化の時間スケールは $t = \frac{l^2}{\nu_v}$ (11.10式)

- l は円盤半径及び検討対象の部分の大きさ

- ν_v は動粘度: 粒子の速度と光学的厚さに依存

- 動粘度がほぼ一定であれば円盤の内側ほど早く粘性拡散を起こす。(原始惑星系円盤の動粘度は数桁不確かだから注意してね!)

ガスの衝突で角運動量がやり取りされる



粘性トルク

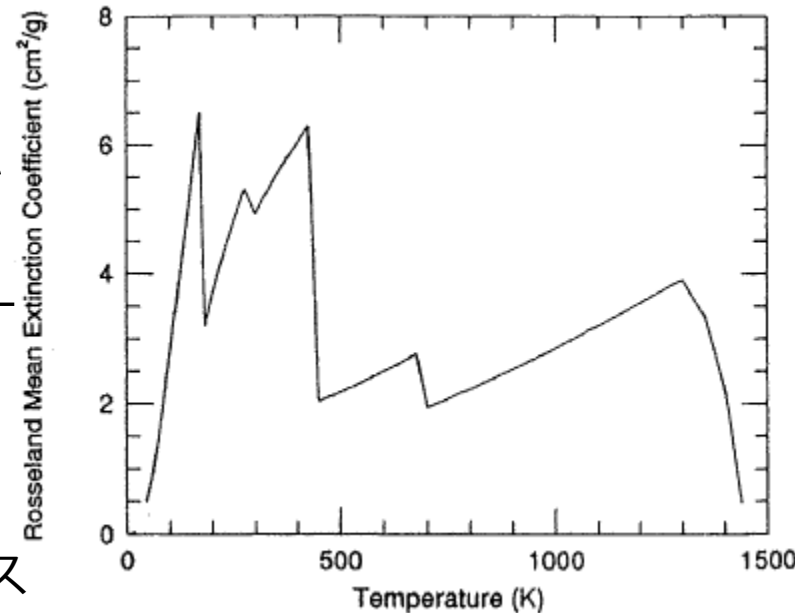
- 分子の熱運動は以下のような分子粘性を生み出す.
 - $\nu_m \sim l_{fp} c_s$ (13.12式)
 - l_{fp} は平均自由行程, c_s は音速.
 - 分子粘性は原始惑星系の寿命のタイムスケール内で粘性進化を起こすには小さい
 - しかし分子雲内の対流によって引き起こされる乱流が支配的ならば質量と角運動量を輸送できる可能性がある.
 - 円盤内の乱流の速度が音速を超えることはほとんどなく, 渦の大きさも円盤のスケールハイトほど大きくないことから動粘度(乱流粘度)は以下のようにパラメタ化されうる
 - $\nu_v = \frac{2}{3} \alpha_v c_s H_z$ (13.13式)
 - α_v は1以下の値をとる無次元化速度パラメタ

粘性トルク

- 円盤内の乱流の速度が音速を超えることはほとんどなく、渦の大きさも円盤のスケールハイトほど大きくないことから動粘度(乱流粘度)は以下のようにパラメタ化されうる
 - $\nu_v = \frac{2}{3} \alpha_v c_s H_z$ (13.13式)
 - α_v は1以下の値をとる無次元化速度パラメタ
 - 光学的に厚い円盤内における α_v は $10^{-4} - 10^{-2}$ 程度の値
 - 少なくとも円盤内部では粘性進化が顕著だとみていいのかも。
 - 円盤の進化速度は光学的深さに依存する。
 - 原始星に近いと熱すぎる: 星間粒子が凝縮できない
 - この領域では H_2O や CO の分子遷移や水素原子のイオン化により光学的厚みが増す
 - 原始星に遠いと冷たい: 2000Kを下回る。
 - 凝縮したマイクロメートルサイズのダストが光学的厚みを増す。

粘性トルク

- 不透明さの指標としてロスランド平均不透明度が存在
 - 太陽組成のガスとダスト(サイズ頻度分布は星間粒子のそれに近いと仮定)混合物を考え、温度の関数としてどれくらい光を減衰させるかを考えた値.
 - 粒子の蒸発などにより、急激に減少する場合もあるが T^2 に比例して変化.
 - 凝固した粒子が巨大な天体に含まれるときは不透明度が低くなる.
 - 1400K以下ではガスの不透明度はダストに比べて寄与が小さいため無視している(Pollack et al.1994)



粘性トルク

- 円盤の温度に関して.
 - 円盤の表面からエネルギーを放射して冷却.
 - 円盤の一部は円盤に垂直な方向に対流して円盤赤道面から表面に高温物質が移動.
 - この対流が円盤と同じように物質輸送に貢献する可能性がある.
 - 主星から遠ざかるにつれ温度が低下, 100AU以近の領域では円盤赤道面から離れるほど低下する.
- 原始惑星系円盤のイオン化された領域との関係
 - 上記の領域は磁気回転不安定性の影響を受けて時期流体力学的乱流の影響で粘性が大きくなることあり.
 - 中心星付近は中心星からの光子により, 円盤の表面や薄い領域は銀河宇宙線により電離されるため, 不安定性が働く
 - 恒星から数AUの領域の円盤中心は電離せず, 磁気回転不安定性が働かないため, 粘性進化が起きず, 物質はこのような領域に滞留する.