

電子加熱が磁気乱流に与える影響

森 昇志 (東京工業大学大学院 理工学研究科)

概要

原始惑星円盤内の乱流はその角運動量を外側へ輸送する一方で、サブミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの微惑星までその成長に影響を及ぼす。円盤で乱流を起こす機構の1つとして磁気回転不安定性が考えられている。この不安定性は電離度に依存しており、低電離度では不安定は発達しない。円盤内ではダストが荷電粒子を吸着し、低電離度になるために乱流が起きない場所があり、デッドゾーンと呼ばれる。これまでデッドゾーンの外側では激しい乱流が起きていると考えられていた。しかし、その発達した磁気乱流によって作られる強い電場が電子を加熱し (電子加熱)、加熱された電子がダストに効率よく吸着され、電離度が減少し、磁気乱流が弱まる可能性が指摘されている。我々は、電子加熱が原始惑星系円盤中のどの領域で起こりうるかを調べ、どの程度磁気乱流が抑制されるかを推定した。その結果、デッドゾーンの外側の 20 AU から 80 AU という広い領域で電子加熱が起きうることを明らかにした。また、磁気乱流は従来の理解に対し、著しく弱まることが示唆された。さらに、負に帯電したダストが静電反発力によってダスト同士が衝突しにくくなる影響についても議論する予定である。

1 導入

原始惑星系円盤は形成初期の角運動量を磁気回転不安定 (MRI) 由来の磁気乱流によって円盤の外側へと輸送すると考えられている (e.g., Balbus & Hawley 1991)。MRI は磁場が貫いている十分電離した差動回転円盤で普遍的におきる不安定である。しかし、原始惑星系円盤で十分に電離源が届かない領域では、低電離度のために MRI が発達しない領域 (デッドゾーン) が存在する (Gammie 1996; Sano et al. 2000)。一方で、デッドゾーンの外側の MRI 活性領域では、磁気乱流が発達していると考えられている。

近年、MRI 活性領域で磁気乱流の成長後に磁気散逸が起こるために、磁気乱流が抑制される可能性が指摘された (Okuzumi & Inutsuka 2015)。ここでの重要な機構は以下の通りである。磁気回転不安定領域において、磁気乱流は磁場の成長に伴い強電場も同時に形成する。一方で弱電離気体中の電子は強電場によって加速され、そのエネルギーは中性粒子との衝突で熱に変換される (電子加熱; Inutsuka & Sano 2005)。加熱電子は、その高い熱速度のために、ダストに衝突しやすくなり、気相中の電子は減少する。電子の電離度が減少すると電気抵抗が大きくなり、乱流は安定化すると考えられる。

このような磁気乱流による電子の加熱はこれまで

無視されてきた効果である。電子加熱は電離度を減少させ、磁気乱流を安定化させることが期待される。本研究では、原始惑星系円盤内で電子加熱が起こる場所を特定することを目標とする。また以下の内容は現在投稿中の論文 (Mori & Okuzumi 2015, arXiv#: 1505.04896) を簡略化したものであり、詳しくは論文を参照されたい。

2 モデル

2.1 円盤モデル

円盤モデルとして、面密度は最小質量円盤モデル、温度分布は光学的に薄い円盤を考える。

磁場は円盤を垂直に貫く縦磁場を考え、磁場強度は赤道面におけるガス圧に対する磁気圧の比 ($\beta_c = 8\pi P/B_{z0}^2$ ここで P はガス圧、 B_{z0} は初期の縦磁場の強さ) を一定にすることで与える。本研究では $\beta_c = 1000$ とする。

円盤内の電離反応を解くにあたって、ダストが荷電粒子を吸着する反応が重要である。ダストの個数密度は空間あたりのダストとガスの質量比 f_{dg} から与えられる。本研究では星間空間における典型的な値である $f_{dg} = 0.01$ を用いる。

電離反応の電離源は星間宇宙線、中心星由来の X 線、短寿命放射性核種の放射壊変による放射線を考える。

2.2 電離度計算モデル

本研究では電子加熱による電離平衡の変化に注目する。円盤の電離反応には、中性ガス粒子の電離、気相再結合、ダストへの吸着を考える。電子と陽イオンはこれらの反応によって生成と消滅を繰り返す。電離平衡状態に達すると、これらプラズマ粒子の数密度は時間変化しない。本研究では電離平衡を仮定し、数ある陽イオンの種類を 1 種類に代表させる¹ことで、電子と陽イオンの数密度 n_e, n_i を近似的・解析的に求める。解くべき方程式は、

$$0 = \zeta n_n - K_{\text{rec}}(T_e)n_i n_e - K_{de}(\phi, T_e)n_d n_e, \quad (1)$$

$$0 = \zeta n_n - K_{\text{rec}}(T_e)n_i n_e - K_{di}(\phi, T_i)n_d n_i, \quad (2)$$

となる。 ζ は電離率である。また、ここで K_{rec} は気相再結合係数であり、電子と HCO^+ の反応断面積と衝突速度 (\approx 電子の熱速度 $\propto \sqrt{T_e}$) の積で与えられる。一方、 K_{de}, K_{di} は電子と陽イオンのダストへの吸着係数であり、こちらも電子・陽イオンとダストの反応断面積と衝突速度の積で与えられる。一般にダストは帯電しているために、この係数は吸着される粒子の衝突速度だけでなく、ダストの静電ポテンシャル ϕ にも依存する。

電子加熱を理解するために、電場中の電子の運動を考えよう。電場中の電子は中性粒子に衝突するまでの間 (平均自由時間 $\sim 1-10^{-6}$ s)、電場から力を受け加速し続ける。衝突後の電子は非常に軽いために等方散乱し、熱速度 (：ランダム速度) が上昇する。これは電子の温度が上昇することを意味する。これが電場の加熱機構だが、一方で加熱電子は中性粒子と衝突をすることで中性ガスの温度程度になろうとする。そのために電場中の電子が優位に中性粒子温度に対し高くなるには、電子が電場から得たエネルギー eEl_e (l_e は平均自由行程) が中性粒子の熱エネルギー kT より大きくなる必要がある。電子の厳密な速度分布から求めると²、電子加熱が起きる電

場は

$$E_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{6m_e}{m_n} \frac{kT}{el_e}} \quad (3)$$

と与えられる。また、電子の運動方程式から電子加熱による電子温度を求めると

$$T_e = T \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2}{3} \left(\frac{E}{E_{\text{crit}}} \right)^2} \right), \quad (4)$$

と与えられ、電場が十分大きければ電子温度は $T_e \propto E$ で上昇する。

電離反応 (式 (1) と式 (2)) は電子・イオン温度に依存するため、ある電場を与えた時、その電場における電子・イオン温度での電離平衡を解くことで、電子加熱による電離度の変化を扱うことができる。電離度が十分減少すると、MRI は安定化される。そのため、電子加熱によって電離度が減少すると MRI が安定化される可能性がある。

2.3 電子加熱領域の判定法方法

MRI は成長すると、磁場が増幅され、最大成長波長が円盤の厚さ程度になると飽和状態に達する。その飽和時の電流密度 J_{max} は、

$$J_{\text{max}} \sim 10c\Omega\sqrt{\rho/8\pi} \quad (5)$$

で与えられる (Muranushi et al. 2012)。

磁気レイノルズ数 $R_m = v_A^2/\eta\Omega$ は磁気拡散が MRI を安定化させるときの指標となる。 $R_m < 1$ になると、磁気拡散は効率的となり MRI は安定化される。磁気拡散係数 η は電離度に逆比例するため、電離度が低い時、磁気拡散が有効である。

円盤のある点を電子加熱が起こる判断方法を述べる (図 1)。まず軸対称な円盤内のある一点 (r, z) を選択し、その点における磁気レイノルズ数を計算する。その際に磁気レイノルズ数が $R_m < 1$ の時、MRI は線形成長段階で安定化される。そのような点はデッドゾーンに所属される。一方 MRI が成長する条件を満たす時 ($R_m > 1$)、MRI が成長していると考え、電場を $E = 0$ から徐々に上昇させる。そうやって与えられた電場に対し電流密度を計算し、MRI の最大電流密度 (式 (5)) に達した場合 ($J = J_{\text{max}}$)、MRI がその電流密度で磁気乱流を維持するとみなし、その

¹本研究では陽イオン中で最も存在度が高い HCO^+ とする

²ずれる理由は、電子が軽いために衝突によるエネルギー損失が小さい効果のため。

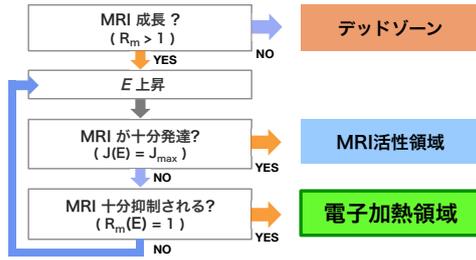


図 1: ある場所を各 MRI 状態に分類する方法の概略図。

点を MRI 活性領域と所属する。一方で、電流が最大値に達する前に、電子加熱が起こり電気伝導度が磁気乱流に影響をあたえるほど減少してしまった場合 ($R_m(E) = 1$)、その点は電子加熱が重要となる領域として“電子加熱領域”に所属される。この操作を円盤の全ての点に関して行うことで、電子加熱が重要となる領域を得る。

3 電子加熱領域

2.1 節で述べた円盤モデルに対し、2.3 節で述べた計算を行った結果が図 2 である。これを見ると赤道面付近 0-20AU にデッドゾーンがあるのに対し、20-80AU に電子加熱領域が広がっていることが分かる。電子加熱はこれまで考慮されていない効果であり、それがこのような広い領域で影響を及ぼするという事は、従来の円盤の磁気乱流に対する描像を大きく変える可能性がある。

4 磁気乱流の抑制

次に我々は、電子加熱領域における乱流強度を見積もる。電子加熱が起きると、電離度が減少することで、MRI が安定化されると考えられる。我々は Mori & Okuzumi (2015) において飽和時の電流密度と乱流強度を関係付けるスケールリング則を

$$\alpha = 0.2 (\beta_0/1000)^{-1} (J_{\text{sat}}/J_{\text{max}})^2, \quad (6)$$

と与えた。ここで J_{sat} は飽和時の電流密度、 β_0 は初期のプラズマベータである。電子加熱を考慮した電離度を計算し、飽和時電流密度を求めることで各点における乱流強度 α を計算できる。

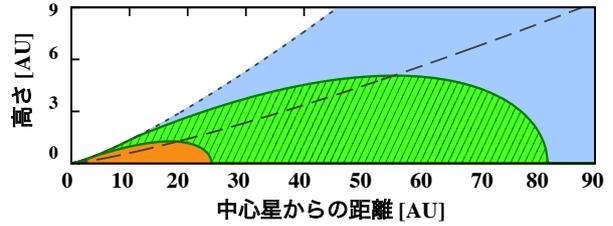


図 2: 原始惑星系円盤における電子加熱領域。縦軸が赤道面からの高さ、横軸が中心星からの距離である。橙色の領域はデッドゾーン、緑斜線領域は電子加熱領域、青色領域は MRI 活性領域を表す。上層の点線は MRI が起きるスケールハイトでそれより上空は MRI は安定化される。破線はガス密度スケールハイトを表す。

図 3 は赤道面における乱流強度 $\alpha_{\text{mid}} = \alpha(z = 0)$ と高さ方向に質量で重みつけた乱流強度 $\bar{\alpha} = \int \alpha \rho dz / \Sigma$ を表す。 $\bar{\alpha}$ は円盤のある半径における角運動量輸送効率を表す。電子加熱領域内の乱流強度は 2 桁以上減少しうることが分かった。一方で、高さ方向を積分した乱流強度としては、20-80AU まではゆるやかな減少で、10AU で急激に乱流強度が減少している。これは図 2 と対応させてみると、上層の MRI 活性層があるところでは、そこで角運動量を効率的に輸送するためあまり $\bar{\alpha}$ が減少しない。しかし MRI 活性層がなくなると一気に $\bar{\alpha}$ が減少する。このようなところでは外側で運ばれてきた質量がそこに蓄積し、重力不安定になる可能性等が考えられる。

5 ダストの静電反発

最後に我々は、ダストの帯電によって衝突が起こりにくくなる効果について議論する。円盤中のダストは基本的に負に帯電するため、小さいダスト同士の衝突成長が妨げられる可能性がある (Okuzumi 2009)。帯電ダストの衝突機構として乱流による速度分散が挙げられていたが、電子加熱によって乱流は抑制されダストは帯電するため、電子加熱がダストの静電反発をより深刻にすると考えられる。

ダストの静電エネルギーを \mathcal{E}_{elc} 、衝突時のダストの衝突エネルギーを \mathcal{E}_{col} とすれば、ダストの静電反発による衝突の阻害は

$$\mathcal{E}_{\text{elc}} > \mathcal{E}_{\text{col}} \quad (7)$$

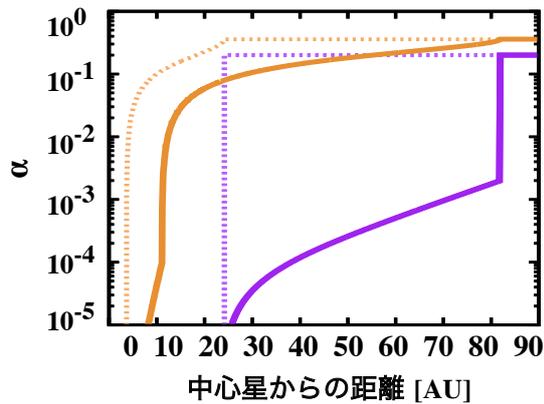


図 3: 電子加熱領域での乱流強度の減少。実線が電子加熱を考慮した場合を表し、点線が電子加熱を考慮しない場合である。紫色の線は赤道面の乱流強度 α_{mid} 、橙色の線は高さ方向に平均した乱流強度 $\bar{\alpha}$ を表す。

のとき起こる。ここでは簡単のため同サイズの帯電ダストを互いに衝突させる場合を考える。また、ダストの衝突を導く相対速度はダストの熱運動(ブラウン運動)、乱流、ダストの沈殿から生じると考え、 \mathcal{E}_{col} を評価する。以下の結果は簡単のために赤道面を考える。そのためダストの沈殿による衝突は起きない。

図 4 はダストの帯電反発効率として $\mathcal{E}_{\text{elec}}/\mathcal{E}_{\text{col}}$ を各ダストサイズで評価した図である。これによればサブミクロンサイズのダストは静電反発が効き、互いに衝突できないことが分かる。従って、電子加熱による静電反発によってサブミクロンサイズのダスト成長が妨げられると考えられる。

解決方法としては、電子加熱領域の弱い乱流によって、ダストを電子加熱領域から脱出させ、MRI 活性層の乱流で衝突させる。あるいは、異なるサイズのダストが電子加熱領域内で落下時に衝突することで、衝突できる可能性がある。いずれにしても、帯電反発が惑星形成の問題となりうるかどうかは議論の余地がある。

6 まとめ

我々は電子加熱が磁気乱流円盤に与える影響を明らかにするために、電子加熱が起こる場所と電子加

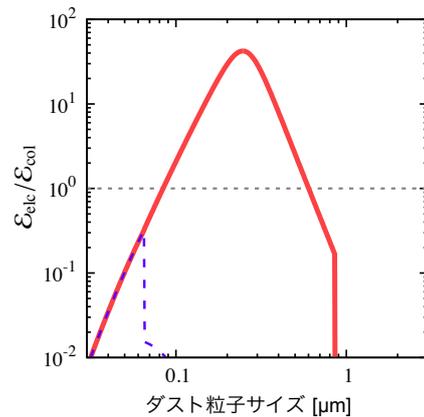


図 4: 電子加熱によるダストの静電反発のダストサイズ依存性。赤色の実線は電子加熱を考慮した場合で、青色の点線は電子加熱を考慮しない場合である。

熱領域における乱流強度を調べた。また電子加熱領域におけるダストの静電反発についても議論した。その結果、電子加熱は円盤の非常に広い領域で起こることが分かり、そこでは乱流は大きく抑制されることが示唆された。またダストの静電反発もより重大になることも示唆された。

謝辞

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。また、本研究をするにあたって奥住聡先生には大変お世話になりました。

参考文献

- Balbus, S. A., & Hawley, J. F. 1991, ApJ, 376, 214
- Gammie, C. F. 1996, ApJ, 457, 355
- Inutsuka, S., & Sano, T. 2005, ApJ, 628, L155
- Mori, S., & Okuzumi, S. 2015, arXiv:1505.04896v1
- Muranushi, T., Okuzumi, S., & Inutsuka, S. 2012, ApJ, 760, 56
- Okuzumi, S. 2009, ApJ, 698, 1122
- Okuzumi, S., & Inutsuka, S. 2015, ApJ, 800, 47
- Sano, T., Miyama, S. M., Umebayashi, T., & Nakano, T. 2000, ApJ, 543, 486