

原子惑星系円盤の磁気乱流による電子の加熱と電離度の減少

森 昇志 (東京工業大学大学院理工学研究科)

概要

原始惑星系円盤では、磁気回転不安定性に起因する磁気乱流によって、角運動量輸送が外側へ輸送され、質量降着が起きると考えられている。しかし、磁気回転不安定性がおきるかどうかは、そこでの電離度に依存しており、原始惑星系円盤では、赤道面内側が低電離であるため安定な領域が存在する。本研究では電子の電場加熱による電離度の減少に着目する。これまでの原始惑星系円盤の磁気乱流に関する研究は、電子の温度は中性ガスの温度に等しいとしていた。しかし、発達した磁気乱流は強い電場を作り、電場による電子の加熱が起これる。電子の熱速度が大きくなるとダストに吸着しやすくなり、気相の電子の数密度は減少する。これらの結果として、ある程度強い電場では電場の上昇に伴い電離度が減少する。電離度は乱流の強さに影響するため、電子の電場加熱の重要性を検討する必要がある。本研究では、原始惑星系円盤の磁気回転不安定な領域で、電子の電場加熱による電離度の減少がどこで起こるかを求め、電離度の値を見積もった。その結果、ダストサイズ $0.1\mu\text{m}$ 、ダストガス質量比 0.01 の最小質量円盤では、 $20\text{--}70\text{AU}$ まで電場加熱によって電離度が減少することを明らかにした。また、この領域では従来の理解よりも $1\sim 2$ 桁程度電離度が低いことが分る。この領域では磁気乱流が成長することで電離度が減少するために、弱い磁気乱流になると考えられる。

1 イントロダクション

原始惑星系円盤は形成初期に持っていた角運動量を磁気回転不安定性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 and Hawley, 1991)。磁気回転不安定性は磁場が貫いている十分電離した円盤が差動回転する事によって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、低電離度のために磁気乱流を維持できない領域 (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不安定領域では、磁気乱流が発達していると考えられている。

しかし近年、その不安定領域で磁気乱流の成長後に磁気拡散が起こるために、激しい磁気乱流が起きない可能性が指摘された (Okuzumi and Inutsuka, in prep)。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とともに強い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 (電子の電場加熱と呼ぶ; Inutsuka and Sano, 2005)。加熱

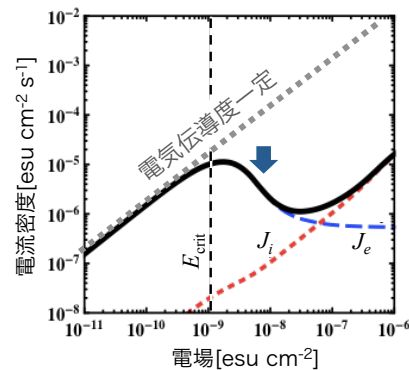


図 1: Okuzumi and Inutsuka. (in prep) で示した電流密度-電場関係。ここで E_{crit} は電子の電場加熱がおきる電場、 J_e と J_i はそれぞれ電子と陽イオンの電流密度である。電流密度は電子の電流密度と陽イオンの電流密度の和でかけるが、一般的に電子の電流密度が支配的である。

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 Okuzumi and Inutsuka. (in prep) で示した電流密度-電場関係は図1である。電子の電場加熱が起きると電流密度が減少していることが分る。これは電子の電離度が大きく減少したことの結果である。

本研究では、原始惑星系円盤において、この電離度の減少がおきる領域を求める。また磁気乱流の平衡状態を仮定することで具体的な電離度の値についても求める。

2 方法

2.1 電流密度モデル

電流密度 J はオームの法則によれば、電気伝導度 σ を用いて、

$$J = \sigma E, \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{e^2 n_e \Delta t}{m_e}, \quad (2)$$

と表される。したがって一般的な電場と電流の関係を求めるには、電子の数密度が必要になる。そこで我々は、荷電粒子の数密度をダスト吸着を考慮した電離平衡から導いた。また電離反応の程度は電子が加熱されると大きく変化するため、それも考慮して計算を行った。以下により詳細な方法について見る。

まず、ある電場に対する電場加熱を考慮した電子の温度 T_e を解析的に与える (森 and 奥住, 2014 卒論)。

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

$$E_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{6m_e k_B T}{m_n e l_e}}. \quad (4)$$

ここで E_{crit} は電子の電場加熱がおきる基準となる電場である。 $E \ll E_{\text{crit}}$ のとき電子の温度は中性ガスの温度に等しい。 $E \gg E_{\text{crit}}$ のとき電子の温度は電場の一乗に比例する。

荷電粒子の数密度は電離平衡を考えることで求まる。反応としては、宇宙線による中性ガスの電離、気相中の電子と陽イオンの再結合、電子と陽イオンのダストへの吸着を考える。平衡状態に達し、中性ガ

ス粒子の数密度を n_n 、電子の数密度を n_e 、陽イオンの数密度を n_i とすれば、

$$0 = \zeta n_n - K_{\text{rec}} n_e n_i - K_{de} n_e n_d. \quad (5)$$

ここで ζ は電離速度、 K_{rec} は気相再結合係数、 K_{de} はダスト吸着係数である。陽イオンについても同様な式を立てる。 K_{de} は電子の温度に大きく依存しており、電子温度が上昇すると、 K_{de} も上昇する。

以上の過程を経ることで、一般的なある電場に対する電流の関係を導くことができる。計算した結果は Okuzumi and Inutsuka. (in prep) と同様になることが確認できる。

荷電粒子の数密度を計算するにあたって、磁気乱流の平衡状態を定めなければならない。以下に磁気乱流が飽和する条件を示す。

2.2 磁気乱流の平衡条件

2.2.1 線形成長の飽和条件

磁気乱流の線形成長はどこまででも起きる訳ではなく、磁気乱流が十分発達すると磁場が増幅され、最大成長波長がガス密度スケールハイト以上となってしまうため、それ以上磁気乱流は発達しない。その飽和時の電流密度 J_{max} は Muranushi et al. (2012) の数値計算結果を用いる。

$$J_{\text{max}} \sim 10 \sqrt{\frac{\rho}{8\pi}} c \Omega \quad (6)$$

2.2.2 オーム散逸による安定化条件

MRI 乱流は誘導方程式に従う。

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B} \quad (7)$$

\mathbf{u} はガス速度、 η は磁気拡散係数。右辺一項目と二項目の比を磁気レイノルズ数とよび、 $R_{e,M} = v_A^2 / \eta \Omega$ と書ける。 $R_{e,M} < 1$ になると、つまり二項目が一項目より大きくなると、磁気拡散が効くため MRI は安定になる。この条件を電流密度で書き表すと、

$$J < J_{\text{OH}} \equiv \frac{c^2 \rho \Omega}{B_0^2} E \quad (8)$$

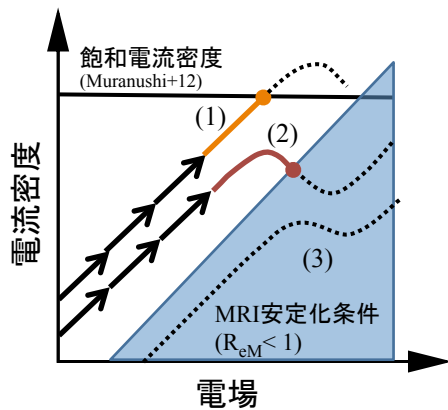


図 2: 平衡状態の場合分け。

のとき磁気拡散が支配的である。 B_0 は初期磁場。

本研究では、電流密度 J が J_{OH} となるときに平衡状態に達するとする。ただし、実際に達成する平衡状態はまだ分っておらず、あくまで仮定であるという点は注意すべきである。

以上の J_{max} あるいは J_{OH} に達した点で平衡状態に達するとする。これらの条件を図示すると図 2 のようになる。つまり、

- (1) 電子の電場加熱が起こる前に J_{max} に達する。
- (2) 電子の電場加熱が起き、 J_{OH} に達する。
- (3) 初めから $R_{e,M} < 1$ のため MRI は起きない。

の 3 つに場合分けできる。

2.3 円盤モデル

最小質量円盤モデルを仮定し、初期磁場の強度はパラメータとする。ダストガス質量比 f_{dg} の基準値は 0.01 で与える。またダスト粒子の半径は $0.1\mu\text{m}$ とする。

3 結果

まず、平衡状態についての場合分けを実際の円盤モデルで領域を描くと、図 3 のようになる。電子の電場加熱が起きる領域がデッドゾーン外側に広く存

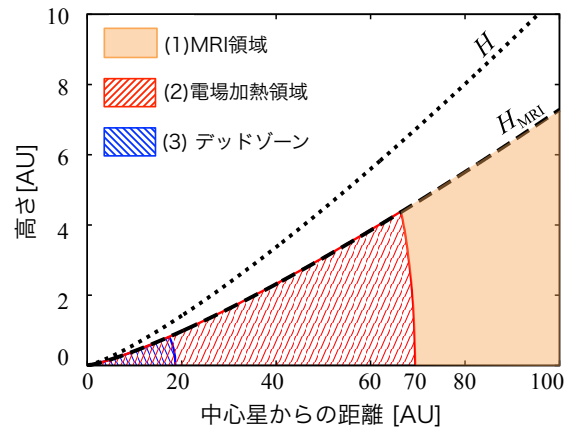


図 3: 原始惑星系円盤におけるデッドゾーンおよび各領域の図。

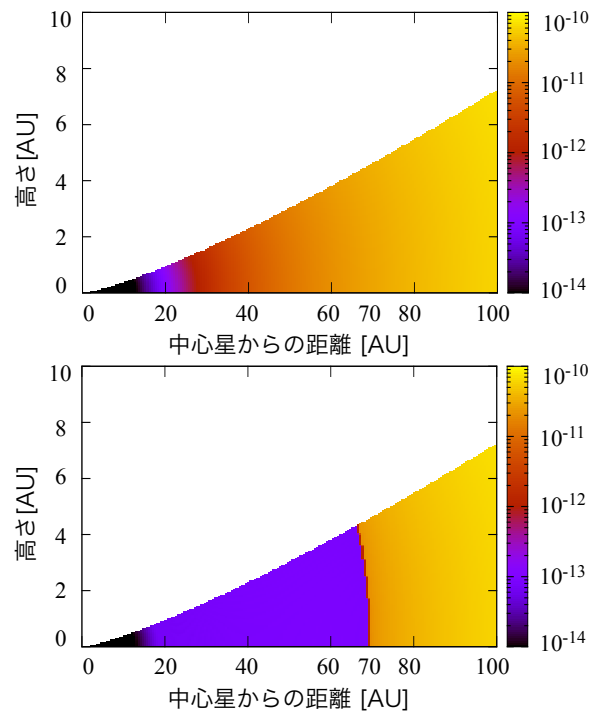


図 4:
上: 電場加熱を考慮しない電離度のコンター図。
下: 電場加熱を考慮した電離度のコンター図。
カラーバーは電離度を表す。

在していることが分る。この領域はデッドゾーンの 3-4 倍もの大きさになる。

次に、円盤の電離度をカラーコンター図を用いて示した図が図 4 である。電場加熱が起きている領域

では従来の理解よりも 1～2 桁程度電離度が低いことが分る。

4 議論および結論

原始惑星系円盤内の磁気乱流領域で、磁気乱流が作る強電場によって電子の電場加熱がおきる領域を調べた。また、そのときの磁気乱流の平衡状態を仮定することで円盤内における電離度分布も求めた。その結果、現在デッドゾーン外側には磁気乱流領域が広がっていると考えられているが、その領域では磁気乱流由来の強電場による電場加熱が起き、電離度が減少していることがわかった。電離度が低いと電流は流れにくくなるため、この領域では従来の理解ほど激しい磁気乱流は起きず、弱い磁気乱流領域になっていると予想できる。

謝辞

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
- Muranushi, T., Okuzumi, S., & Inutsuka, S. 2012, ApJ, 760, 56
- Sano, T., Miyama, S. M., Umebayashi, T., & Nakano, T. 2000, ApJ, 543, 486