

乱流によるかき混ぜの効果が 原始惑星系円盤の進化に与える影響

名古屋大学 理論宇宙物理学研究室

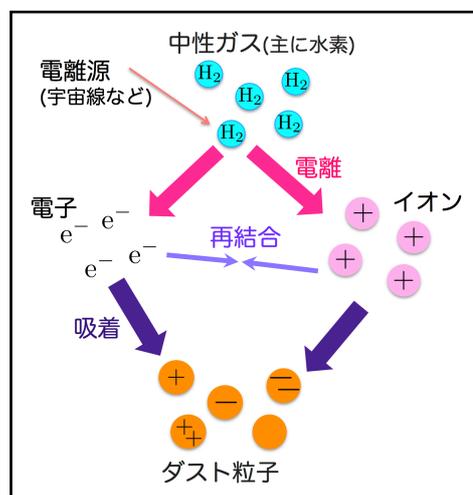
博士課程1年 藤井悠里

1. 導入

原始惑星系円盤では円盤降着の主な起源は磁気回転不安定性(MRI)によって駆動される乱流であると考えられている。MRIは差動回転する電離円盤に磁場が刺さっていると必ず起こる不安定性である。原始惑星系円盤は銀河宇宙線や中心星からのX線、放射性核種の崩壊などによって弱く電離されているが、ガス密度が大きく、中心星近傍以外では温度も低いため、円盤全体がMRIの駆動に必要な電離度に達している訳ではない。円盤の赤道面付近に見られる電離度が低く、MRIが起こらない領域はデッドゾーンと呼ばれている。原始惑星系円盤中でMRIが起こるかどうかは円盤の降着進化だけではなく、コア集積モデルによる微惑星形成にも重要であり、これまでも多くの研究がなされてきた (Sano et al. 2002; Ilgner & Nelson 2006; Okuzumi 2009)。MRIによって乱流が駆動されると円盤内のガスがかき混ぜられ、上層部のよく電離されたガスが円盤内部まで運ばれて、円盤内部の電離度が上昇する。これによって、デッドゾーンが小さくなる可能性があり、実際、小さなダスト粒子がない場合には、この乱流によるかき混ぜの効果が重要であることが示されている (Inutsuka & Sano 2005)。本研究では、ダスト粒子がある場合にこの効果が重要になる可能性があるかどうかについて調べた。

2. 研究内容

円盤中の電離度は図1のような複雑な反応のつり合いで決まる。乱流によるかき混ぜの時間スケールが、これらの反応が定常になる時間スケールよりも小さいと、円盤の力学的な進化と同時に電離度の進化も解かなければならない。MRIが駆動されるかどうかの判定には磁気レイノルズ数 $Re_M = v_{Az} / \eta \Omega$ を使用した。 $Re_M > 1$ の領域でMRIが起きる。ここで、 v_{Az} はアルフベン速度のz成分、 η は磁気拡散係数、 Ω はケプラー角速度である。この磁気拡散係数を決めるために電離度を調べる。



本研究では、簡単なモデルを用いて鉛直方向のかき混ぜの効果を見積もった。ある流体素片に着目し、その流体素片の鉛直方向の座標を

$$z=2H\sin(\Omega t/2) + 2H$$

として、この流体素片の電離度の時間発展を計算した。用いた計算法は Fujii et al. (2011) で開発した計算法である。

3. 結果

電離源として、宇宙線のみを考えた場合は、上層から内部にガスが流れるときと、赤道面付近から運ばれてくるときによって、同じ場所でもMRIが起こったり起こらなかったりするパラメータ領域もみられたが、宇宙線の他に中心星からのX線や放射性核種の崩壊も考慮すると、そのようなパラメータ領域はみられなくなった。次に、デッドゾーンの大きさが変わるかについて調べた結果が図2である。横軸に円盤半径、縦軸に円盤鉛直方向をスケールハイトで規格化したものを取り、円盤のどの辺りにデッドゾーンとMRIが起こる領域との境界線がくるかをプロットしたものである。実線がかき混ぜがない場合、破線がかき混ぜがある場合の結果を示し、線より下がデッドゾーンである。ダスト-ガス質量比は0.01に固定し、ダスト半径は上から $0.1\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ である。かき混ぜの効果を考慮した場合は、デッドゾーンが小さくなっていることが分かる。

ダストの質量が一定のままダストサイズを大きくすると、ダストの総表面積が小さくなるので、電離度が上がりデッドゾーンの大きさが小さくなる。同じ場所(ガス密度)でダストが大きくなると化学反応の時間スケールが小さくなるので、よりかき混ぜの効果が重要になるが、各時間スケールは半径や高さ、ダストの量や大きさによって異なり、また、MRIが起こるために必要な電離度も半径に依存する。

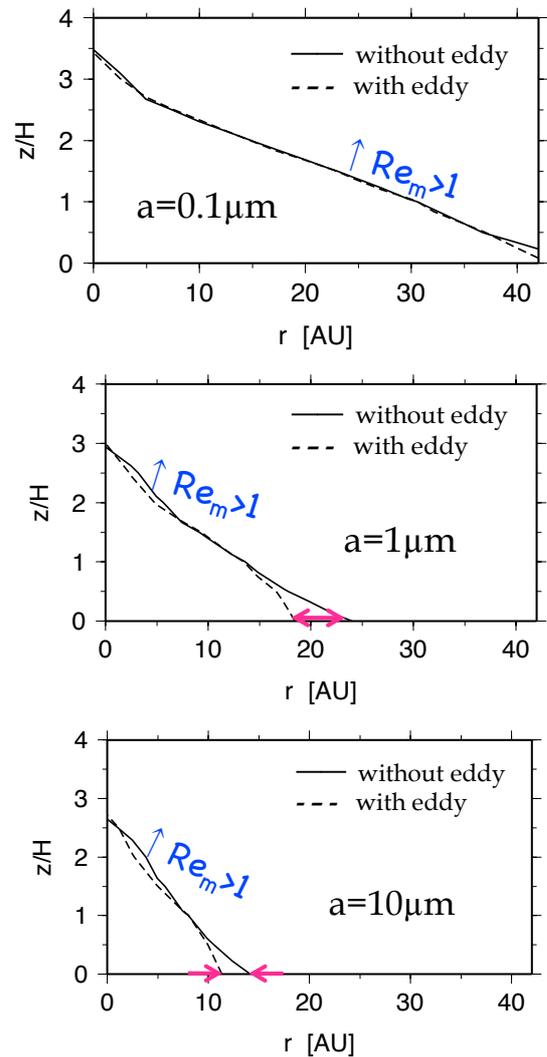


図2

4. 結論と今後の課題

乱流によるかき混ぜの効果が重要になるパラメータ領域があることが分かった。化学反応の時間スケールは非常に複雑なので、乱流によるかき混ぜの時間スケールと比べることは簡単ではないので、どのような場合にかき混ぜの効果が重要になるかを調べるのは困難である。しかし、この効果を考慮しないと電離度が低く見積もられることがあるので、MHDシミュレーションをする際には、電離度の時間発展も同時に解く方が、より正確な結果を得ることができると考えられる。今回考えた渦は実際に生じるであろうと想定される渦よりも大きいですが、化学反応の時間スケールは短いので、必ずしも非常に離れた上空の電離ガスが赤道面付近までそのまま運ばれる訳ではない。運ばれていく途中にも反応が進むので、実際には少し前の場所と同じくらいの電離度である可能性が高いので、もう少し小さな渦を考えても結果は大きくは変わらないと考えられる。

今度の課題として、パラメータ領域の制限が考えられるが、現実的な渦をモデル化することは困難なので、MRI乱流が拡散近似出来ることを用いるのが現実的であると思われる。また、周惑星円盤は原始惑星系円盤に比べて大きさのスケールが小さいため、力学的な時間スケールと化学反応の時間スケールが近くなり、よりかき混ぜの影響を受けやすいので、周惑星円盤についても調べたい。