

磁気乱流により駆動される原始惑星系円盤風中でのダストの動力学

三宅 智也 (名古屋大学大学院 理論宇宙物理学研究室)

Abstract

本研究では、磁気乱流駆動型の円盤風を考慮した、原始惑星系円盤のダスト密度の鉛直方向分布の時間進化を単純化した 1 次元数値シミュレーションの手法で調べ、さまざまなサイズのダストの動力学について研究を行なった。その結果、摩擦力によりガスと強結合した小さなサイズのダストは円盤風により円盤上空へと流れ出し、大きいダストは円盤内部に留まることがわかった。さらに面白い事に、中間サイズのダストは重力と円盤風によるダストを持ち上げる力が釣り合い、ダストは赤道面から数スケールハイトの位置に浮いて滞留するという結果を得た。また、中心星からの距離に対する依存性を考慮すると、比較的小さいダストは円盤外側の領域にのみ残り、大きいダストは円盤赤道面付近に留まるという結果を得た。これらの結果は、円盤内のダストが円盤内側領域から、そして小さいサイズから消失していくことを示唆している。また、ダストが原始惑星系円盤上空に持ち上げられていると思われる赤外線観測の結果を、本機構の観点から議論する。

1 Introduction

星が新たに誕生すると同時に、その若い星の周りにガスとダストから成る原始惑星系円盤が形成され、その中で惑星が形成されていくと考えられている (e.g., Hayashi et al. 1976)。原始惑星系円盤は理論と観測の両方の面から幅広く研究されており (e.g., Armitage 2011)、その原始惑星系円盤進化の上で未だに理論的に解明されていないことの一つに円盤の散逸機構がある。近赤外線観測から、原始惑星系円盤の典型的な散逸時間は $10^6 - 10^7$ 年であると推察されている (e.g., Haisch et al. 2001)。円盤の散逸機構の候補として、中心星からの UV や X 線放射による光蒸発円盤風が広く研究されている (e.g., Alexander et al. 2006)。一方で、磁気回転不安定性 (MRI; e.g., Balbus & Hawley 1991) 起源の磁気乱流により駆動される円盤風もまた、光蒸発と同等以上の効果があるとの指摘が、Suzuki & Inutsuka (2009) によりなされている。

原始惑星系円盤中で質量降着を促進させるには、ガスやダストが角運動量輸送を引き起こす必要がある (Lynden-Bell & Pringle 1974)。円盤中の分子粘性は角運動量輸送を起こすほど効力がないため、原始惑星系円盤内の少なくとも一部では、実効的な乱流粘性を持続する状態でなければならない。さまざま

な乱流機構の中でも、MRI はそのような乱流を引き起こす有力な候補として考えられており、例えば Suzuki & Inutsuka (2009) はその MRI 起源の乱流がさらに円盤風を駆動させるということが報告されている。そのような円盤風はまた、原始惑星系円盤中のガス散逸に寄与する (Suzuki et al. 2010) という報告がある一方、この過程が拡張され (e.g., Bai & Stone 2013)、円盤風によって輸送される定量的な質量流束は未だに議論されている (Formang et al. 2013)。

ガスの散逸はダストの運動に影響を与えるため、この円盤風を考慮したダストの動力学を研究することは惑星形成分野において非常に興味深い問題ではあるが、未だに研究されていない。そこで、本研究では単純化した 1 次元シミュレーションをすることにより、原始惑星系円盤中のさまざまなダストサイズに対して、円盤鉛直方向の密度分布の時間進化について研究を行なった。

2 Model

本研究では、円盤鉛直方向に対して $z = -10H_0$ から $z = 10H_0$ の計算領域をとり、固定したガス密度分布の下でダスト密度分布の進化を計算していく。ここで $H_0 = \sqrt{2}c_s/\Omega_k$ は、音速 c_s とケプラー回転角振

動数 Ω_k から導かれる圧力スケールハイトである。加えて、境界の非物理的な効果为了避免のために、上下の境界に対して外側に $\pm 5H_0$ 余分に付け加える。初期条件として、計算領域内のすべてのダストは赤道面 $z = 0$ に沈殿させ、ダストの全質量はガス全質量の $1/100$ にする。そして、本研究では $\Omega_k = 1$ と $H_0 = 1$ の規格化を用い、その場合音速は $c_s^2 = 1/2$ である。

2.1 Dust Component

ダストは 2.2 章でモデル化されるガスの密度分布の中を運動するテスト粒子であると考え。つまり、ダストはガスからの影響を考えるが、その逆、ガスはダストからの影響を考えない。そして本研究では、ガスの平均自由行程よりも小さいダスト粒子に焦点を当てて考える。

ダストの密度分布は以下の連続の式を解くことにより得られる (Takeushi & Lin 2002)。

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_d v_d + J) = 0 \quad (1)$$

ここで、 ρ_d はダスト密度である。そして、ダストの速度は運動方程式から終端速度近似することにより得られ、その速度を、円盤風から受ける速度と赤道面に沈殿しようとする速度を考えたダストの平均流 $v_d = v_g - \Omega_k \tau_s z$ と、ガス乱流によりダスト拡散される質量流束 J との二つに分割して表した。ここで τ_s は無次元 stopping time と言い、本研究ではダストサイズを表す指標となる。以下の 3 章で、この (1) 式を解いた円盤鉛直方向のダスト密度時間進化を示す。

2.2 Gas Component

ダスト密度の時間進化を解く前に、背景となるガスの密度分布と円盤風の速度分布が必要になる。そこで、Suzuki & Inutsuka (2009) で求められた局所 shearing-box 中での 3 次元磁気流体シミュレーションで行なった計算結果を時間平均、空間平均した円盤風の速度分布 v_g とガス密度分布 ρ_g の値を採用する。本研究での計算領域が $|z| = 10$ に対し、3 次元計算では $|z| = 4$ の計算領域しかないため、3 次元計算の値

に対して $|z| \geq 4$ で v_g と ρ_g を外挿する必要がある。そこで、 v_g に関して 3 次元計算結果を最小自乗フィッティングした関数を用いて円盤風の速度分布を表す。そしてガスの密度分布 ρ_g に関しては、 $|z| \leq 2$ では円盤風が駆動していない領域であるから静水圧平衡を取り、 $|z| \leq 2$ では質量流束 $\rho_g v_g = 4 \times 10^{-5} \rho_{g,\text{mid}} c_s$ が z で一定であることから決定する。図 1 でガスの密度分布と速度分布が示されている。

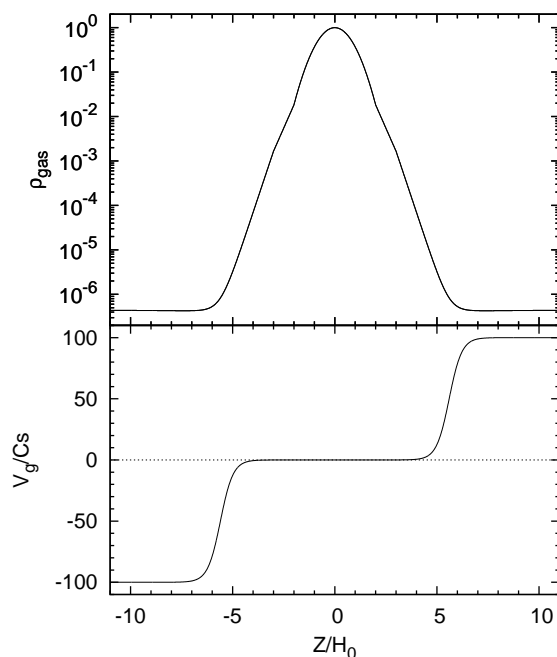


図 1: ガスの円盤鉛直方向の密度分布 (上; ρ_g) と音速で規格化した円盤風の速度分布 (下; v_g/c_s) である。

3 Results

本研究では、(1) 式を解く事により原始惑星系円盤内の様々なダストサイズの時間進化密度分布を求めた。どのダストサイズについても初期に赤道面に沈殿させていたダストは、約 50 回転ほどするとダストの質量流束が準定常状態な密度分布に落ち着く。そして、最終的に 200 回転するまで計算を行なった。以下では、準定常状態となった 100 回転から 200 回転の間で時間平均した密度分布を用いて、得られた結果について議論を展開していく。

3.1 Dependence on Grain Size

本研究では、最小質量円盤 (MMSN; Hayashi 1981) と考えた時の中心星から 1AU でダストサイズが $0.1\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ の様々なサイズに対して密度分布の時間進化を調べた。すると、 $0.1\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ の比較的小さいダストは、計算領域内でガスの影響をより受けやすいため円盤風により円盤上空へと流れ出す。逆に、 $\sim 100\mu\text{m}$ のダストは円盤風の影響を受けずに円盤内に留まるという性質を見せた。そして、興味深いことに $\sim 20\mu\text{m}$ から $\sim 40\mu\text{m}$ の中間サイズのダストは本研究計算領域内の $10H_0$ から $4H_0$ で局所的なダストの浮き溜まりが見られる。この時のダスト密度分布と、(1) 式で表した v_d のダスト速度分布を示したのが図 2 である。図 2 を見るとこのダスト密度分布の局所的ピークの位置は、 $v_d = 0$ となった位置と同じであることがわかる。したがって、円盤の赤道面に沈殿しようとする重力と、逆に円盤風によりダストを円盤上空に向かって持ちあげようとする力が釣り合った位置で、ダストの局所的なピークが表れるということである。しかしここで注意すべきなのは、図 2 で鋭くダスト-ガス比が 1 よりも十分大きくなっていることである。より現実的に考えると、円盤風は断続的に円盤上空へと吹き出すことと、そこでの拡散を考慮しなければならないため、鋭いピークになるはずはなくよりなだらかでピーク値のダスト-ガス比は 1 に近づいていくだろう。

3.2 Radial Dependence

ダストサイズは無次元 stopping time τ_s により決定され、 τ_s は中心星からのどの距離にいても同じ値をとるので、鉛直方向のシミュレーションで得られた様々なサイズについての結果を動径方向に適用することが可能である。そこで、局所的に浮いているダストに対して r - z 平面上でどのように分布するかを描くことができる。図 3 は MMSN で考えた、 r - z 平面での局所的に浮くダストについて描いたダストサイズ分布図である。この図から、中心星から遠くに離れるほど比較的小さいダストでさえも円盤内に留まるようになってくるのがわかる。例えば、ダストの典型的なサイズである $0.1\mu\text{m}$ に注目してみると、

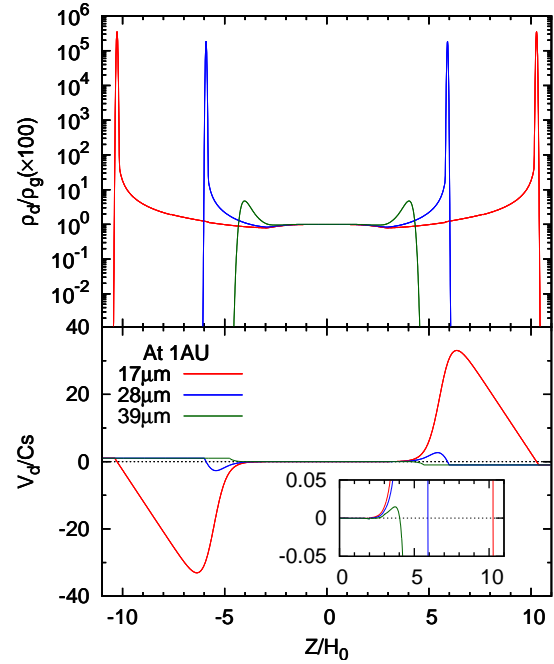


図 2: 局所的なピークを持つダストサイズの密度分布と速度分布

中心星から約 50AU くらいから円盤内に留まるようになる。しかし、 $100\mu\text{m}$ くらいのダストは 0.5AU くらいで円盤内に留まるようになる。従ってもし原始惑星系円盤の進化を考慮するならば、円盤内のダストの散逸は比較的小さいダストから始まるということが示唆される。また、円盤の内側からダストは散逸していくということも示唆される。

4 Discussion & Summary

本研究では、MRI 起源の磁気乱流によって駆動される原始惑星系円盤風中のダストの動力学について研究した。そして、本研究での 1 次元数値シミュレーションの結果から、円盤赤道面に沈殿しようとする重力と円盤上空へとダストを運ぼうとする円盤風による抵抗力が釣り合うことにより、MMSN を考えた時の 1AU で $20\text{--}40\mu\text{m}$ のサイズのダストが赤道面から数スケールハイト上空で浮き上がるということが示された。また、浮き上がるダストよりも小さいサイズのダストはシミュレーション領域の外側へと流れ出し、より大きなダストは円盤内に留まるという

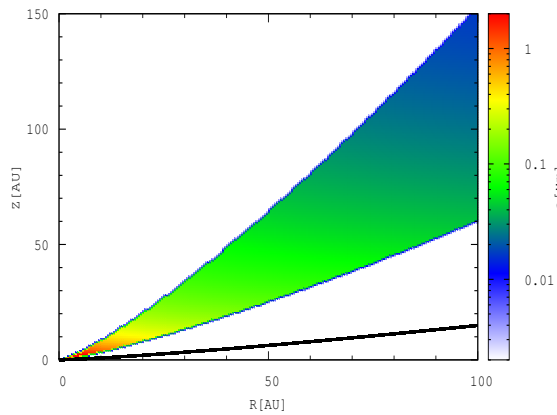


図 3: r - z 図における局所的に浮いているダストサイズ

ことも示した。加えて、浮き上がるダストサイズは動径方向にも依存し、中心星から離れるほど小さいダストでさえも円盤内に留まるとことが示された。

以上の結果を踏まえて、本研究結果から推測できる観測結果について可能な範囲で議論する。まず、Natta et al. (2014) では T-Tauri 星まわりの原始惑星系円盤上空から、数 km s^{-1} の比較的遅いガスの流出が観測されたという報告があり、これが MRI 起源とする磁気乱流による円盤風の間接的な証拠となるかもしれない。そして、Ellerbroek et al. (2014) では中心星からの光が赤外超過を引き起こしているとの観測結果があり、本研究結果からこの比較的遅い円盤風により赤道面から持ち上げられたダストの再放射が原因であるということが推測できる。また、McJunkin et al. (2014) では原始惑星系円盤をもつ様々な若い星からの $\text{Ly}\alpha$ 線の星間吸収から中性水素原子の柱密度を見積もり、そこから星間減光を見積もると以前の赤外線観測した結果よりも星間減光が小さいという観測結果があり、これも本研究で得られた結果から、円盤上空で浮いているダストがそのようなより大きい減光を引き起こしていると説明することができる。しかし、これら 2 つの観測結果をより詳しく説明するには、定量的に減光値などを見積もらなければならない。

Acknowledgement

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。

Reference

- Alexander, R. D., Clarke, C.J., & Pringle, J. E. 2006, MNRAS, 369, 229
- Armitage, P. J. 2011, ARA&A, 49, 195
- Bai, X.-N., & Stone, J. J. M. 2013, ApJ, 376,214
- Balbus, S. A., & Hawley, J. F. 1991, ApJ, 376, 214
- Ellerbroek, L. E., Podio, L., Dougados, C., et al. 2014, A&A, 563, A87
- Formang, S., Latter, H., Lesur, G., & Ogilvie, G. I. 2013, A&A, 552, A71
- Haisch, Jr., K. E., Lada, E. A., & Lada, C. J. 2001, ApJ, 553, L153
- Hayashi, C. 1981, Progress of Theoretical Physics, 70, 35
- Hayashi, C., Adachi, I., & Nakazawa, K. 1976, Progress of Theoretical Physics, 55, 945
- Lynden-Bell, D., & Pringle, J. E. 1974, MNRAS, 168, 603
- McJunkin, M., France, K., Schneider, P. C., et al. 2014, ApJ, 780, 150
- Natta, A., Testi, L., Alcalá, J. M., et al. 2014, A&A, 569, A5
- Suzuki T. K., & Inutsuka, S.-i. 2009, ApJ, 691,L49
- Suzuki, T. K., Muto, T., & Inutsuka, S.-i. 2010, ApJ, 718, 1289
- Takeuchi, T., & Lin, D. N. C. 2002, ApJ, 581, 1344
- Youdin, A. N., & Lithwich, Y. 2007, Icarus, 192, 588