

ダスト存在下での輻射性フィードバックにおける輻射圧と光電離の役割

一色 翔平 (北海道大学 宇宙物理研究室)

Abstract

恒星の周囲に存在するガスに対する輻射によるアウトフローの駆動過程としては二通り存在する。一つ目は、光電離によって引き起こされる圧力差による駆動、二つ目は輻射圧による駆動である。この二つのうち、近年の研究では光電離由来の圧力差は輻射圧よりもずっと優勢であり、輻射圧はほとんど寄与しないとされる結果が報告された (Sales L. V. et al. 2014)。しかし、この研究では輻射圧を優勢にさせ得るダストの影響が考慮されていない。ダストが存在する場合、光電離を生じさせる紫外線がダストに吸収され、光電離を起こせない赤外線として再放射するために光電離の影響を減少させる。加えて、ダストによる散乱過程は輻射のエネルギーを効率良くガスの運動量に変換する。

こうしたことから、本研究ではダストの影響を考慮した次元数値シミュレーションコードを開発し、ダストが存在する場合、輻射圧の優劣は変化するかどうかを調べた。この数値シミュレーションでは、中心に光源を置き、球対称にガスを分布させた。ガスの成分は H, He, そしてダストとしてグラファイトを使用した。また、光源のスペクトルとしては 10^5 K の黒体放射、または PEGASE.2 (Fioc M., & Rocca-Volmerange B. 1997, 1999) から得た星団のものを使用した。これらの条件を元に、散乱入りの次元輻射流体シミュレーションを行った。

以上のシミュレーションからダストが含まれる時、光電離のみの影響を考えた場合と光電離と輻射圧の両方の影響を受ける場合で、両者の結果が大きく変わる場合がある、つまり先行研究と異なり輻射圧も重要となることが判明した。

1 Introduction

銀河中に存在するガスの量を決めるのに重要な要因として、恒星の輻射によるガスのアウトフローがある。このアウトフローの駆動過程としては 2 通り存在する。一つ目は、光電離によって周囲のガスを暖めることで、外部に存在するガスよりも内部のガスの温度が上昇し、内部のガスが外部に向けて膨張する過程である。二つ目は、ガスが光を吸収した際運動量も受け取るので、この受け取った運動量、つまり輻射圧によってガスが外部に向けて膨張する過程である。この 2 つのうち、近年の研究で前者の光電離による駆動過程の方が輻射圧による駆動過程よりもずっと大きいとされる研究結果が発表された。

しかし、この研究ではダストの影響が考慮されていなかった。ダストが存在する場合、光電離を起こす紫外線をダストも吸収してしまうので、光電離の影響を落とす。また、吸収した光をダストは赤外線でも再放射し、そしてその赤外線をダストは再び吸収、その後再

放射を以降何度も繰り返すことになる。これにより、光の運動量が効率良くガスの運動量に変換されることになるために、輻射圧の影響が増す。こうしたことから、以前の研究ではダストの影響を考慮していないために、輻射圧の影響を過小評価してしまっているため、ダストが存在する場合で光電離、輻射圧の影響を考える必要があるとわかる。

であるから、本研究ではダストの影響を考慮した次元シミュレーションを開発し、ダスト存在下での光電離、輻射圧の影響を調べた。

2 Methods

本研究を通して考えたモデルとしては、中心に光源を置き、周りに球対称にガスを分布させた。中心にある光源のスペクトル分布は 10^5 K の黒体放射、もしくは PEGASE.2 から得たものを使用した。ガスの成分については、H, He, ダストとして $0.1\mu\text{m}$ のグラファイ

トが存在するものと考え、その比として solar metallicity を使った。ガスの密度の分布の仕方は、密度一定の場合と、星形成領域に似せた、途中まで密度一定で、その後 $r^{-2.3}$ で落ちていく場合を考えた。また、後者の条件を使った場合は重力の影響も計算の中に組み込んだ。この条件の中輻射輸送方程式と流体方程式を解いた。

輻射輸送方程式は、ガスの温度や光から受け取る運動量を知るために必要な輻射強度を求める方程式である。今回は球対称な場合を考えるので、impact parameter method (Mihalas D. & Mihalas B. W. 1984) を使う事で、一次元輻射輸送方程式

$$\frac{dI_\nu}{dx} = -\alpha_\nu I_\nu + j_\nu$$

を解くだけで良いようにした。 I_ν は輻射強度、 α_ν は吸収係数、 j_ν は放射係数、 x は距離である。これにより H, He, ダストからの再放射の取り扱いが非常に簡単にできるようになり、今回はこの散乱の影響も考慮したシミュレーションを行った。つまり、本研究はダストの赤外線吸収、再放射による影響も含めたガス全体の駆動が正確に扱う事が出来ている。

ガスの温度や輻射の吸収量を知る上で重要となる H, He の電離度は、光電離、衝突電離 (Abel T. et al. 1997; Janev R. K. et al. 1987), 再結合率 (Aldrovandi S. M. V. & Pequignot D. 1973; Hummer D.G. 1994; Hummer D.G. & Storey P. J. 1998) の影響を含めた計算によって決定した。

ガスの圧力 (gas pressure, GP) による駆動を決める上で重要になる H, He の温度は、heating としては光電離の影響、cooling としては衝突励起 (Cen R. 1992), 衝突電離 (Cen R. 1992), 再結合 (Cen R. 1992; Hummer D.G. 1994; Hummer D.G. & Storey P. J. 1998), 制動放射 (Hummer D.G. 1994), そしてコンプトン効果 (Ikeuchi S. & Ostriker J. P. 1986) の影響を含めた計算により決定する。metal による cooling は考慮していない。

輻射圧 (radiation pressure, RP) による駆動を決める上で重要なダストの温度は、吸収したエネルギーと放射したエネルギーが等しくなる時の温度とした。

H, He の吸収断面積は Osterbrock D. E. & Ferland G. J. (2006) を参照し、ダストの吸収断面積は Draine B.T. & Lee H. K. (1984) と Laor A. & Draine B.T.

(1993) を参照した。

流体方程式は、スキームとしては ASUM+ (Liou M.-S. 1996) を MUSCL 法で空間 2 次精度、また時間 2 次精度で解いた。上記の輻射輸送方程式を解いた事で得られた温度等の情報は、流体を時間に対して半ステップ進める毎に更新した。

以上の条件の元で、ダストが存在する場合、しない場合、輻射圧が存在する場合、しない場合でそれぞれ計算し、輻射圧の影響を調べた。

3 Results

表 1 に、今回用いた初期条件とその初期条件をもとに計算した結果の図の番号が示されている。また、表 2 には一部の条件の時の光のダストに対する平均自由行程と光源によって電離される領域の大きさの目安である Strömgren 半径との比較を行っている。

4 Discussion

密度一定の初期条件からはじめた場合、Strömgren 半径と光のダストに対する平均自由行程が同じオーダーである図 1 の場合は、輻射圧の影響が出ている事がわかる。平均自由行程より Strömgren 半径がずっと大きい場合である図 3 は、輻射圧を考慮するしないで結果が大きく変わってしまうことがわかった。また、ダストの影響が出てこない場合、つまり Strömgren 半径より平均自由行程がずっと大きい場合である図 4 やダストがない場合である図 2 は、輻射圧の影響が出てこないことがわかる。この結果は先行研究 (Sales L. V. et al. 2014) と一致する。

密度が中心ほど高い、実際の星形成が起きるような条件下では、ダストがある場合は図 5 のように輻射圧の影響が非常に大きく出ることがわかる。ダストがない場合である図 6 は輻射圧の影響が出ていないこともわかる。

ただ今回使ったダストは $0.1\mu\text{m}$ のグラファイトだけであり、実際のダストは様々な成分、大きさを持っており、光のダストに対する平均自由行程が変わってくるので、輻射圧の影響が出てくるスケールが今回のシミュレーションと比べて変化する可能性がある。

表 1: 初期条件

図	サイズ (pc)	core (pc)	密度 分布	n_H (cm^{-3})	n_{He} (cm^{-3})	n_{Dust} (10^{-12}cm^{-3})	T (K)	スペクトル 分布	L ($L_\odot$)	M_{star} ($10^4 M_\odot$)	N
図 1	1940	-	一定	1.0	0.0833	3.506	100	黒体放射	5.0×10^9	-	128
図 2	3240	-	一定	1.0	0.0833	0.0	100	黒体放射	5.0×10^9	-	128
図 3	1000	-	一定	1.0	0.0833	3.506	100	黒体放射	1.0×10^6	-	128
図 4	324	-	一定	10.0	0.833	35.06	100	黒体放射	2.5×10^{11}	-	128
図 5	100	5.6	$r^{-2.3}$	955.0	79.58	3349	1500	PEGASE	-	7.75	128
図 6	100	5.6	$r^{-2.3}$	955.0	79.58	0.0	1500	PEGASE	-	7.75	128

左から、図はこの初期条件を使った計算結果を表した図の番号を表す。サイズは、シミュレーションでとった大きさ。core は密度分布が一定でない条件を使用した場合に、中心からどの距離まで密度が一定であるかを表している。数密度はそれぞれの成分の数密度を表しており、密度が一定でない場合は中心部の数密度を表す。温度は H, He の温度を表す。ダストは 10K で一定。スペクトル分布は使用した光源が黒体放射か PEGASE のどちらであるかを表す。黒体放射の場合は、いずれも 10^5K の黒体放射である。光度は中心が黒体放射の場合の光度を表す。光度の右にある質量は PEGASE.2 のスペクトル分布を使った時の中心の光源の重さを表し、中心光源の光度を決める量となっている。最後の N はセルの数を表す。

表 2: 光のダストにに対する平均自由行程と Strömgren 半径の比較

図	光のダストに対する平均自由行程 (10^2pc)	Strömgren 半径 (10^2pc)
図 1	18	22
図 3	1.8	18
図 4	18	1.3

光のダストに対する平均自由行程は 13.6eV のエネルギーを持つ光子の与えられた数密度でのダスト中の平均自由行程を表す。

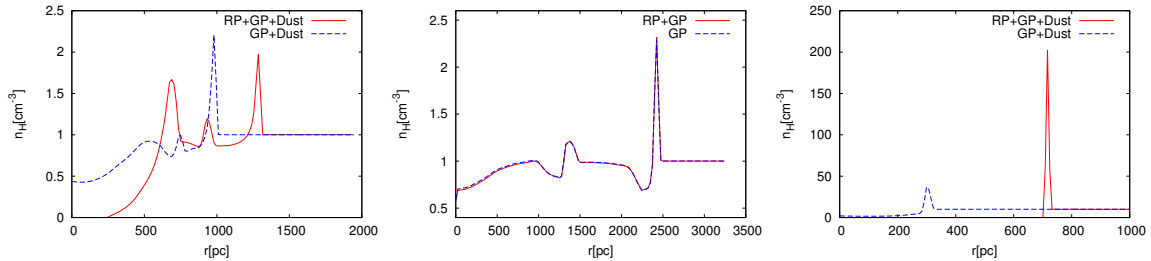


図 1: ダストあり 10Myr 経過

図 2: ダストなし 10Myr 経過

図 3: ダストあり 10Myr 経過

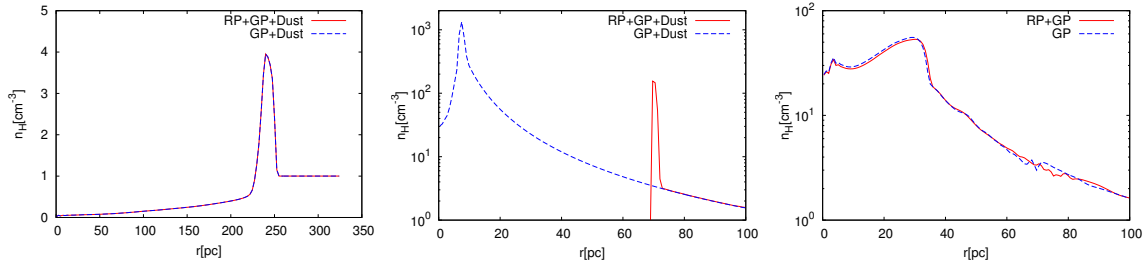


図 4: ダストあり 10Myr 経過

図 5: ダストあり 0.50Myr 経過

図 6: ダストなし 0.50Myr 経過

5 Conclusion

ダスト存在下では, 光のダストに対する平均自由行程が考えるスケールよりもずっと大きくない限りは, 光電離の影響だけでは十分な物理描像を描いていなく, 輻射圧の影響も考慮したシミュレーションをする必要があることがわかった.

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

- Abel T., Anninos P., Zhang Y., & Norman M. L. 1997, *New Astron.*, 2, 181
- Aldrovandi S. M. V., & Pequignot D. 1973, *A&A*, 25, 137
- Cen R. 1992, *ApJS*, 78, 341
- Draine B.T., & Lee H. K. 1984, *Astrophys.J.*, 598, 1026
- Fioc M., & Rocca-Volmerange B. 1997, *A&A*, 326, 950
- Fioc M., & Rocca-Volmerange B. 1999, *astro-ph*, 9912179
- Hummer D. G. 1994, *MNRAS*, 268, 109
- Hummer D. G., & Storey P. J. 1998, *MNRAS*, 297, 1073
- Ikeuchi S., & Ostriker J. P. 1986, *ApJ*, 301, 522
- Janev R. K., Langer W. D., & Evans K. 1987, in Janev R. K., Langer W. D., Evans K., eds, *Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasmas - Cross-sections and Reaction Rate Coefficients*. Springer-Verlag, Berlin
- Mihalas D. & Mihalas B. W. 1984, in Mihalas D. & Mihalas B. W., eds, *Foundations of Radiation Hydrodynamics*. Oxford University Press, NewYork
- Laor A., & Draine B.T. 1993, *Astrophys.J.*, 402, 441
- Liou M. -S. 1996, *J. Comput. Phys.*, 129, 364
- Osterbrock D. E., & Ferland G. J. 2006, in Osterbrock D. E., Ferland G. J., eds, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*, 2nd edn. University Science Books, Mill Valley, CA
- Sales L. V., Marinacci F., Springel V., & Petkova M. 2014, *MNRAS*, 439, 2290