

ダスト進化を考慮した宇宙論的銀河形成モデル

吉原 健太郎 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室)

Abstract

最新機器での観測データから、将来的に赤外サブミリ領域におけるダストの continuum など重要なデータが得られることが期待されているが、銀河のダスト SED に関する詳細なモデルはまだない。

一方、最近の観測から、メタリシティの小さい銀河ではメタル量に対してダストがあまり検出されないという結果が出ている。

この原因としては、星間物質中におけるダスト粒子成長効率が低金属の銀河では小さいことが有力であり、実際に近傍の観測結果から粒子成長効果とダスト量には相関が見出せる。これを取り入れたダスト進化モデルを宇宙論的銀河形成モデルに取り入れることで、

銀河のダスト特性を予言する新たなモデルを考案し、今後出てくる観測結果へ示唆を与えることを目指す。

1 Introduction

1980 年代初頭に提唱された CDM モデル (Peebles 1982 など) に宇宙定数 Λ を加えた Λ CDM モデルは、観測とよく一致し現在の標準モデルとなっている。 Λ CDM モデルは、ダークマターの初期密度ゆらぎが重力的に成長することによりダークハローが形成され、衝撃波加熱により形成される高温ガスが冷却・収縮して星間ガスとなり、星形成が起こることにより銀河が形成し、銀河同士が合体を繰り返して成長するという階層的銀河形成を導く。

この構造形成の解法として、代表的なものの一つが準解析的モデル (Semi-Analytic Model, SAM; e.g. White and Frenk 1991; Kauffmann et al. 1993; ?) である。ダークハローの形成を解析的に解き、星形成などの物理過程を数値積分に解いていく方法であり、シンプルな物理原理で解け構造を視覚的に把握しやすい反面、コンピュータの性能限界により分解能と体積がトレードオフになってしまう解析的数値シミュレーションに比べ、物理過程を多く扱うため設定すべきパラメータが多くなる欠点はあるが、比較的短時間で計算でき、統計量が算出されるために観測との比較がしやすいという特徴を持つ。

炭素質、珪素質などからなる星間物質中のダスト粒子は、短波長の電磁波を吸収し、赤外～ミリ波の再放射を起こすため、銀河の SED に影響する。ダスト粒子の生成・消滅・進化過程には、超新星・AGB 星

などによる放出、超新星衝撃波による破壊、ダスト粒子にガス状態のメタル原子・分子が衝突し、降着することにより起こるダスト粒子の成長 (Dwek 1998; Liffman & Clayton 1989; Draine 2009 など)、ダスト粒子同士の衝突による破砕または合体、などがある。最近の近傍銀河の観測により、金属量 Z が小さい銀河では、期待されるよりもダスト/メタル比が低い結果が得られている (Fisher et al. 2014, Rémi-Ruyer et al. 2014)。これが遠方の、典型的 (SFR が高く低メタル) な銀河にも成り立つなら、 Z が小さい銀河ではダストがほとんど生成されないといえる。

その原因として有力なのが、ダスト粒子の成長効果が低メタルの星間物質中では低く、ほかのダスト生成・消滅過程に比べ弱いことである。Asano et al. (2013a,b) では、銀河の化学進化に応じて、ダスト生成・消滅プロセスそれぞれの効果がどのように時間進化するかを計算し、銀河のメタリシティがある閾値 (critical metallicity) を超えると、それまで主要だった星からのプロセスに代わり、粒子成長によるダスト量増加効果の寄与が最大となってダスト質量増加が急加速するという結果を導いている。このモデルの結果は、近傍銀河でのダストの検出データともよく一致する (Rémi-Ruyer et al. 2014, Fig. 8)。

この結果を受けて、新しい SAM を作ることを考える。SAM でダストの光学効果を計算したモデルは存在するが (Granato et al. 2000)、ダスト量の時間

進化を取り入れたモデルはまだない。Asano et al. (2013a) では、星形成とダストへのメタル降着、2つのタイムスケールを比較することでダスト増加が加速する”critical metallicity”を算出しているが、Asano et al. (2013a,b) でも用いられているダスト進化の方程式をそのまま SAM に組み込むのがもっとも直接的だが、今回は簡単のために「銀河のダスト進化が進んでいるかどうか」を判定し、結果に反映させる方法をとりたい。つまり、ダスト進化のタイムスケールと、星間物質中のダストに特徴的なタイムスケール (characteristic age) を比較し、前者のほうが長ければダスト進化が十分に進んでいるとして、ダスト吸収・再放射の効果を大きく見積もって計算する方法である。

実際にモデルの書き換え・計算に入る前に、近傍銀河の大規模サーベイ観測結果を用いてこの2つを比較し、銀河のダスト/メタル比との相関を見てみる。

2 Methods

ダスト進化のタイムスケールとして、今回は比較的簡単な原理で計算している Asano et al. (2013a) で用いられたダスト降着タイムスケール τ_{acc} を用いる。この論文ではダスト質量密度一定を仮定し、ダスト粒子同士の衝突については考慮していない (Asano et al. (2013b) において、ダスト組成、すべてのダスト過程を考慮に入れた計算が行われている)。ダスト降着タイムスケールの表式は以下のように衝突タイムスケールの形をとっている。

$$\tau_{\text{acc}} = \frac{4\pi\langle a^3 \rangle \sigma}{3\langle a^2 \rangle \alpha \rho_{\text{acc}}^{\text{eff}} Z \langle v \rangle}$$

ここで $\langle a^3 \rangle$, $\langle a^2 \rangle$ はダスト粒子サイズの三乗 (二乗) 平均、 σ はダスト質量密度、 α は気体状態のメタル分子/原子がダスト粒子に衝突した時の付着効率、 $\rho_{\text{acc}}^{\text{eff}} = \mu m_{\text{H}} n_{\text{H}}$ は冷えた ISM の平均質量密度、 μ は平均分子量、 m_{H} は水素原子質量、 n_{H} は星間物質中の水素原子数密度、 $\langle v \rangle$ は気体メタルの平均速度である。

これを変形して

$$\tau_{\text{acc}} \approx 2.0 \times 10^7 \left(\frac{n_{\text{H}}}{100 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{Z}{0.02} \right)^{-1} \left(\frac{\mu}{1.40} \right)^{-1} \text{yr}$$

ここでは Asano らに倣って $\alpha = 1.0$, $\langle v \rangle = 0.14 \text{kms}^{-1}$ (ISM ガス温度 $T = 50 \text{K}$ と対応) と仮定している。

比較のための観測データとして、Rémi-Ruyer et al. (2014) の解析で用いられたうち、2つのサーベイ観測結果を用いる。ひとつは近傍 (< 30Mpc) の 61 銀河を観測した KINGFISH Survey (Kennicutt et al. 2011; Skibba et al. 2014)、もうひとつは低メタルな 50 銀河 (< 200Mpc) を観測した Dwarf Galaxy Survey (DGS) である。マッピングに関してはどちらも *Herschel* 70, 100 and 160 μm (PACS), 250, 350 and 500 μm (SPIRE) で行っている。この2つのサーベイでは n_{H} は測定されていないため、粗い近似としてディスク上に分布した ISM を仮定し、ガス質量 M_{gas} を半径の二乗で割ったものの比を取り、Fisher et al. (2014) 論文で扱われた I Zw 18 銀河において $n_{\text{H}} = 100 \text{cm}^{-3}$ として規格化した。ダスト粒子の”characteristic age” t_{dust} については、銀河の星形成史を考慮して $\text{SFR}/M_{\text{gas}}$ と SFR/M_* を求め、それぞれについてグラフを作成した。

3 Results & Discussion

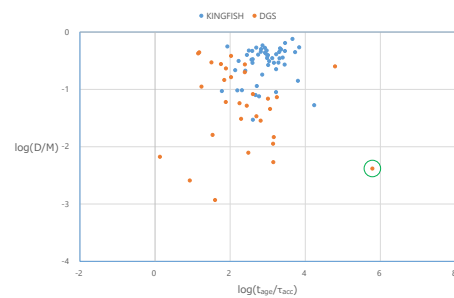


図 1: $t_{\text{dust}} = \text{SFR}/M_{\text{gas}}$ とした図

図 1、図 2 が、銀河のダスト/メタル比 (D/M) と、ダストに関する 2つのタイムスケールの比とをプロットしたグラフである。このうち、○で囲った銀河 (SBSS1533+574) は”blended with another source”で、分解困難であるためにダスト量の上限が非常に低くなっている (Rémi-Ruyer et al. 2013)。これを

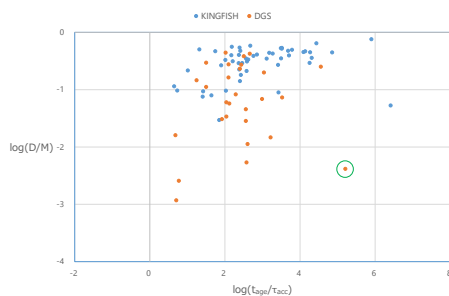


図 2: $t_{\text{dust}} = \text{SFR}/M_*$ とした図

除けば、これを除けば、これらのグラフを見る限り、 $\tau_{\text{acc}}/t_{\text{dust}}$ と D/M との間にはある程度の相関があるように見える。注意すべきは、ここで考えた 2 つの t_{dust} は銀河の星形成史によって大きく値が変わり、たとえば星形成を過去に大量に起こし現在ほぼ終わった銀河では後者 ($\text{SFR}/M_{\text{star}}$) が非常に長くなってしまふようなことが起こることである。SAM は SFH を時系列で追って計算するモデルであり、他のパラメータも扱えるので、 $\tau_{\text{acc}}, t_{\text{dust}}$ はより正確に算出することが可能と期待できる。

4 Conclusion

メタリシティの小さい銀河ではダスト/メタル比が非常に小さい可能性があるという観測結果を説明するにはダスト粒子成長の効果が低メタリシティでは小さいことが有力であり、この粒子成長効果が十分に高くなるとダスト量増加が加速すると期待される。今回はダスト進化モデルを銀河進化の準解析的モデルにそのまま組み合わせるのではなく、ダストに関する 2 つのタイムスケールのを比較してダスト進化が十分に進んでいるかどうかを判定することを考えた。その第一段階として、2 つのサーベイ観測データを用いてタイムスケールの比を取り、ダスト/メタル比と比較してみると、この 2 つの比の間にはある程度の相関が見られた。準解析的モデルにより、より良い精度で $\tau_{\text{acc}}, t_{\text{dust}}$ を算出することで、ダスト進化を考慮した多様な銀河 SED を予言し、今後の観測データへ示唆を与えられることを目指している。

Reference

- Fisher, D. B., Bolatto, A. D., Herrera-Camus, R. et al. 2014, *Nature*, 505, 186
- Rémi-Ruyer, A., Madden, S. C., Galliano, F., et al. 2014, *A&A*, 563, A31
- Rémi-Ruyer, A., Madden, S. C., Galliano, F., et al. 2013, *A&A*, 557, A95
- Madden, S. C., Remy-Ruyer, A., Galametz, M., et al. 2013, *PASP*, 125, 600
- Kennicutt, R. C., Calzetti, D., Aniano, G., et al. 2011, *PASP*, 123, 1347
- Skibba, R. A., Engelbracht, C. W., Dale, D., et al. 2011, *ApJ*, 738, 89
- Asano, R. S., Takeuchi, T. T., Hirashita, H., & Inoue, A. K. 2013a, *Earth Planets Space*, 65, 213
- Asano, R. S., Takeuchi, T. T., Hirashita, H., & Nozawa, T. 2013b, *MNRAS*, 432, 637
- Peebles P. J. E. 1982, *ApJ*, 263, L1
- Dwek, E. 1998, *ApJ*, 501, 643
- Granato, G. L., Lacey, C. G., Silva, L., Bressan, A. et al. 2000, *ApJ*, 542, 710
- Liffman K., Clayton D. D. 1989, *ApJ*, 340, 853
- Draine B. T. 2009, in Henning Th., Grün E., Steinacker J., eds, *ASP Conf. Ser. 414, Cosmic Dust ? Near and Far*. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p. 453
- White, S.D.M. and Frenk, C. S. 1991, *ApJ*, 379, 52
- Kauffmann G., White S. D. M. and Guiderdoni B. 1993, *MNRAS*, 264, 201
- Cole S., Aragon-Salamanca A., Frenk C. S. et al. 1994, *MNRAS*, 271, 781