

スタック解析による銀河遠赤外放射量測定が与えるダスト分布への示唆

柏木 俊哉 (東京大学大学院理学系研究科 宇宙理論研究室)

Abstract

Ménard et al. (2010, 以下 MSFR) は SDSS 測光銀河の分布と遠方クエーサーの色との角度相関を用いて、銀河周辺での平均的なダスト赤化量を測定し、銀河の中心から数 Mpc のスケールにまでクエーサーの赤化が見られることを示した。この赤化が中心の銀河に付随するダストのみによるものとするれば、ダストの分布が普遍的に、銀河ディスク ($\sim 10\text{kpc}$) をはるかに超えた銀河団スケールまで広がっていることを意味する。一方で我々はこれまでに、SDSS 銀河を IRAS の全天遠赤外放射マップ上でスタックすることで、銀河の平均的な遠赤外放射を検出・測定することに成功している (Kashiwagi et al. 2013, 以下 KYS)。遠赤外放射の主な寄与はダストによるものと考えられるため、MSFR と KYS はそれぞれダストの吸収量と放射量という独立な物理量を通して、本質的には同等の観測結果を示したものと期待される。ただし、MSFR の解釈はダストは個々の銀河というよりも、むしろそれらを包むより大きなスケールの親ハローに広がって分布しているという描像であるのに対して、KYS ではクラスタリングした銀河内のダストが統計的に重なり合うことによる見かけ上の広がりであるとしており、両者の物理的解釈は全く異なっている。本研究では、MSFR によるダスト赤化と、我々のスタック解析により得られたダスト放射のプロファイルを定量的に比較する。まず、2 つの観測結果から得られるダストモデルを、銀河系やマゼラン雲の減光曲線と比較することで、両者の整合性を検証する。さらに、KYS で提案した銀河内ダストの統計的重ね合わせという解釈のもとで、MSFR の観測結果がどの程度説明可能かについても議論する。

1 Introduction

ダストは超新星や AGB 星によって作られた重元素が凝集することによってできると考えられており、星形成率と密接に関わる重要な成分である。このダストが銀河空間からどれだけ離れたところにまで分布しているかは、Zaritsky (1994) が銀河ハローに拡散したダスト成分の存在を示唆して以来、長く議論されてきた興味深い問題である。決定的な結論は得られていないものの、いくつかの先行研究では主に銀河団ハローに付随するダスト減光が報告されており (e.g. Chelouche et al. 2007)、これは銀河団のメンバー銀河内のダストが銀河風や銀河団ガスハローとの相互作用により剥ぎ取られたものだと考えられる。

一方 Ménard et al. (2010, 以下 MSFR) では、SDSS (Sloan Digital Sky Survey) の測光クエーサー ($1 < z < 2.2$) の可視色と測光銀河カタログ ($z \sim 0.35$) の角度相関を測定することにより、銀河の中心から数 Mpc のスケールにまでダストによる赤化が生じていることを指摘した (図 1)。SDSS 測光銀河の典

型的な宿主ハロー質量は $10^{12} M_{\odot}$ 程度であり、衛星銀河を持たないものが主だと考えられる。したがって、MSFR によって検出されたダスト赤化が個々の SDSS 銀河そのものに付随するものだとすれば、銀河空間内で生成されたダストが銀河ディスクのスケール ($\sim 10\text{kpc}$) をはるかに超えた銀河団スケールにまで拡散されていることを意味する。

本研究では、MSFR の観測結果の異なる解釈として、個々の銀河の宿主ハロースケールに分布したダストではなく、クラスタリングした複数の銀河に付随するダストの重ね合わせであるという可能性を検証する。実際に、MSFR によって得られたダスト面密度プロファイルと、SDSS 銀河の角度相関関数の比はほぼ一定となっている。銀河角度相関関数は各 SDSS 銀河の周辺に分布する他の SDSS 銀河の平均個数密度プロファイルと等価であるから、図?? の結果はダスト柱密度と銀河の個数密度が比例していることを示しており、銀河ダストの重ね合わせであるという我々の解釈と整合している。

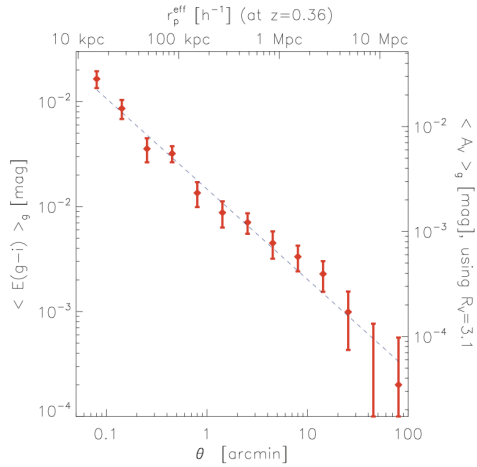


図 1: SDSS 測光銀河 ($17 < m_i < 21$) を中心とした、SDSS クエーサーの赤化量の角度プロファイル (Ménard et al. 2010 より引用)。横軸上のスケールは、SDSS 測光銀河の赤方偏移の中間値 ($z \sim 0.36$) を用いて、見込み角を共同距離に変換したものの。

上で述べた 2 つの異なる描像を区別するため、本研究では SDSS 銀河の平均的赤外放射の測定を行う。銀河の赤外放射は主にダストによる寄与と考えられるため、ダスト赤外放射量と赤化量を比較することにより、ダスト温度の情報を得ることが可能となる。星間空間とホストハロー内ではダストのおかれる輻射場が異なるため、MSFR の検出したダスト成分がホストハロー (あるいは銀河間空間) に付随したものであるならば、その温度は典型的な星間ダストとは異なる温度を持っている可能性がある。

赤外領域における検出性能は可視域に比べて低いため、ほとんどの SDSS 銀河ではその赤外放射を個々に測定することは不可能である。しかし、SDSS 銀河を中心として赤外領域の全天拡散放射光マップをスタックすることで、それらの平均的赤外放射量を測定することが可能である (Kashiwagi, Yahata, & Suto, 2013)。本研究では、IRAS (Infrared Astronomical Satellite) による全天 $100\mu\text{m}$ マップをスタックすることで SDSS 銀河の平均的赤外放射量を測定し、MSFR の赤化量測定結果と比較することでダスト温度の制限を行う。

2 SDSS galaxy sample

MSFR と同様に $17 < m_i < 21$ の SDSS DR7 の測光銀河を用いる。ただし本研究ではさらに、銀河ではない天体の混入をさけるため、photometry flag を用いて、天球上での有意な移動が見られる天体や、測光観測データの質が悪いものを除外した。この結果残った銀河サンプルの個数は $\sim 2.8 \times 10^7$ 個である。

3 Results

3.1 radial profile

SDSS 測光銀河を中心に IRAS の $100\mu\text{m}$ マップをスタックした結果 (図 2) より、SDSS 銀河に付随するダスト放射のシグナルが明確に検出されていることがわかる。スタック解析結果の円平均プロファイ

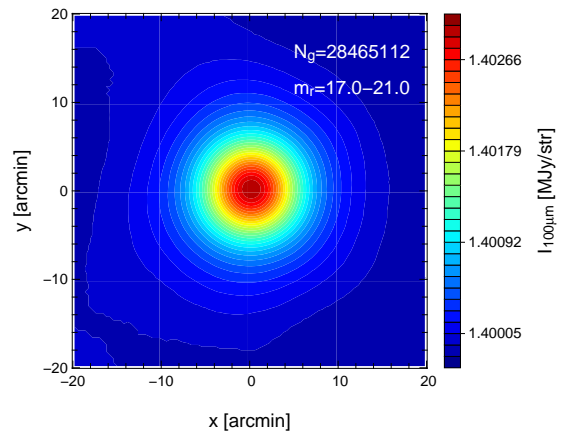


図 2: SDSS 測光銀河 ($17 < m_i < 21$) を中心に IRAS $100\mu\text{m}$ マップをスタックした結果。SDSS 銀河位置を中心、 $40' \times 40'$ の領域を示した。

ル (図 3) は、MSFR の結果と同様に、IRAS の角度分解能 $\sigma = 3'.1$ に対してはるかに大きなスケールまでダスト放射のシグナルが広がっていることを示している。検出されたシグナルは SDSS 銀河内ダストの重ね合わせであるという解釈の下、我々は円平均プロファイルを以下のようにモデル化する (Kashiwagi, Yahata, & Suto, 2013)。

$$I_{\text{total}}(\theta) = I_s(\theta) + I_c(\theta) + C. \quad (1)$$

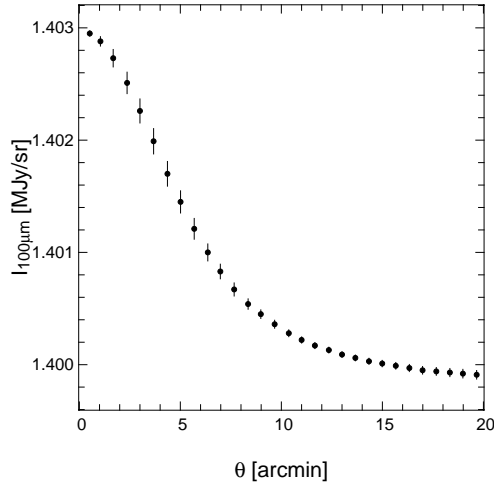


図 3: 図 2 の円平均プロファイル。エラーバーには各ビン内での標準偏差を用いた。

ここで、

$$I_s(\theta) = I_{s0} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$I_c(\theta) = I_{c0} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right) {}_1F_1\left(1 - \frac{\gamma}{2}; 1; \frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right)$$

はそれぞれ、スタック中心の銀河自身の寄与と、クラスタリングした周辺銀河による寄与である。また、 C は SDSS 銀河とは無相関である銀河系ダストの寄与であり、 θ によらず一定であることを仮定している。ここで、銀河角度相関関数は

$$w(\theta) = A \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^\gamma \quad (3)$$

の single power-law で表されることを仮定した。

3.2 constraints on dust temperature

図 3 に得られたプロファイルを I_s, I_c, C をパラメータをしてフィットすることで、銀河系ダストの寄与 C を分離し、SDSS 銀河に起因する成分を取り出すことができる。これを $I(\theta) = I_s(\theta) + I_c(\theta)$ と書くと、ダスト温度 T_d とダスト柱密度プロファイル $\Sigma_d(\theta)$ を用いて、

$$I(\lambda_{100\mu\text{m}}, \theta) = \frac{1}{(1+z)^4} B_\nu(\lambda_{100\mu\text{m}}, T_d) \kappa_{\text{abs}}(\lambda_{100\mu\text{m}}) \Sigma_d(\theta) \quad (4)$$

と表される。ここで、 B_ν は黒体放射スペクトル、 z は SDSS 銀河の実効的赤方偏移、 κ_{abs} はダストの組成によって決まる吸収係数である。一方、ダストの赤化プロファイルは

$$E(g-i)(\theta) = \frac{2.5}{\ln 10} [\kappa_{\text{ext}}(\lambda_g) - \kappa_{\text{ext}}(\lambda_i)] \Sigma_d(\theta) \quad (5)$$

と表される (κ_{ext} はダストの減光係数)。したがって、ダスト組成による $\kappa_{\text{abs}}, \kappa_{\text{ext}}$ が与えられれば、これらの比

$$\frac{I(\lambda_{100\mu\text{m}}, \theta)}{E(g-i)(\theta)} = \frac{\ln 10}{2.5(1+z)^4} B_\nu(\lambda_{100\mu\text{m}}, T_d) \frac{\kappa_{\text{abs}}(\lambda_{100\mu\text{m}})}{\kappa_{\text{ext}}(\lambda_g) - \kappa_{\text{ext}}(\lambda_i)} \quad (6)$$

からダスト温度 T_d が得られる。ここでは典型的なダスト組成モデルとして、Weingartner & Draine (2001) による銀河系および小マゼラン雲ダストモデルの $\kappa_{\text{abs}}, \kappa_{\text{ext}}$ の値を用いてダスト温度の制限を行った。その結果、ダストモデルにはほとんど依存せず、 $T_d = 19 \pm 1\text{K}$ という結果が得られた (図 4)。これは銀河系や近傍銀河の観測から得られた典型的星間ダストの温度と整合している。

4 Discussion

以上の解析から得られたダスト温度が典型的星間ダストのそれと整合していることから、MSFR およびスタック解析により検出されたダスト成分が銀河内ダストの重ね合わせであるという解釈は、少なくとも観測結果と矛盾しないことが分かる。しかし、さらにこの議論を進めて、このダスト成分が銀河団・銀河間空間に付随するものではあり得ないかどうかを論ずるためには、これらのダスト温度を観測的あるいは理論的に別途推定できる必要がある。

本研究と同様のスタック解析によって銀河団中のダスト赤外放射の検出はされているものの (Montier & Giard, 2005)、そもそもそれらが銀河団ハローに広がったものであるのか、メンバー銀河の寄与であるかの検証が必要となるため (Giard et al. 2008)、銀河団ダストの温度は未だ観測的に決められていないのが現状である。また、ダスト温度の理論的予言を得るためには、ダストの組成やサイズ分布、銀河ディスク外への供給率などを与える必要があり (Yamada

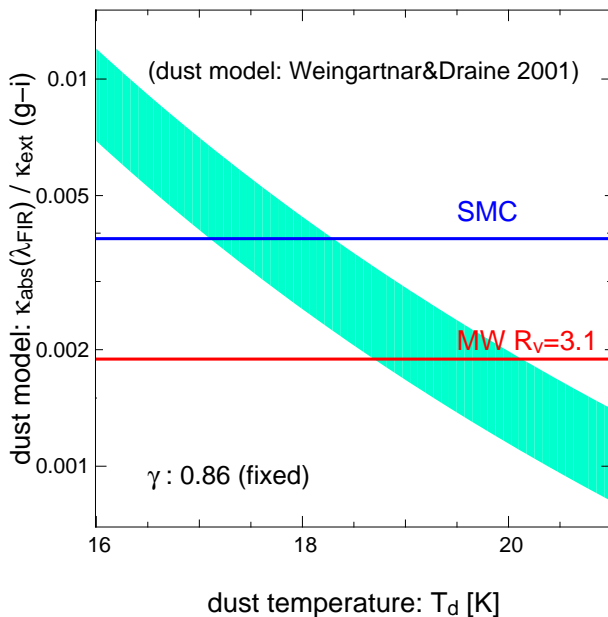


図 4: ダスト赤外放射 / 赤化量比から得られたダスト温度への制限。緑色の領域が今回の解析から得られた 1σ の制限を表す。赤と青の実線はそれぞれ、Weingartner & Draine (2001) による銀河系 ($R_V = 3.1$) と小マゼラン雲のダストモデルを表す。

& Kitayama, 2005)、これらの条件も理論・観測的によく知られているとは言いがたい。

これらの銀河団・銀河間ダストの性質は、AKARI (Murakami et al. 2007) による高分解能全天赤外観測データを用いることで、より詳細に調べることができるかと期待される。また、本研究のスタック解析で用いた IRAS $100\mu\text{m}$ マップの分解能は約 3 分であり、これは共同距離で $\sim 1\text{Mpc}$ に対応しており、スタック中心銀河のホストハロー内のスケールは分解できていない。角分解能が格段に向上した AKARI のデータを用いて同様のスタック解析を行い、さらに多波長のデータを組み合わせることによって、SDSS 銀河に付随するダストの温度プロファイルを測定することにより、銀河団・銀河間ダストの存在の検証をより直接的に行うことができると考えられる。

5 Summary & Conclusion

本研究では、SDSS 銀河を中心に IRAS の $100\mu\text{m}$ マップをスタックすることにより、SDSS 銀河の平均的赤外放射プロファイルを測定した。この結果と Ménard et al. (2010) によるダスト赤化プロファイルと比較することにより、ダスト温度を推定し、検出されたダスト成分が個々の銀河内に付随したものであるのか、銀河スケールを超えて広域に拡散した成分であるのかの検証を試みた。今回の解析により推定されたダスト温度 ($T_d \sim 20\text{K}$) は典型的な星間ダスト温度と整合しており、少なくとも、空間的にクラスタリングした銀河内のダストの重ね合わせであるという描像は観測結果と矛盾しないことが分かった。AKARI の高分解能データを用いることで、銀河ホストハロースケール内のダスト温度プロファイルを測定し、銀河団・銀河間ダストの存在により詳細に迫ることができると期待される。

Reference

- Chelouche, D., Koester, B., & Bowen, D. 2007, ApJ, 671, 97
- Giard, M., Montier, L., Poitecoteau, E., & Simmat, E. A&A, 490, 547
- Kashiwagi, T., Yahata, K., & Suto, Y. 2013, PASJ, 65, 43 (KYS)
- Ménard, B., Scranton, R., Fukugita, M., & Richards, G. 2010a, MNRAS, 405, 1025 (MSFR)
- Murakami, H. et al., PASJ, 59, 369 Montier, L. A., & Giard, M. 2005, A&A, 439, 35
- Weingartner, J. C., & Draine, B. T. 2001, ApJ, 548, 296
- Yamada, K., & Kitayama, T. PASJ, 57, 611
- Zaritsky, D. 1994, AJ, 108, 1619