

論文題目：

Cold Dust and its Heating Sources in the Spiral Galaxy M 33

(渦巻銀河M 33における低温ダストとその加熱源)

氏名：小麥 真也

銀河に存在する星間塵(ダスト)は星間空間の輻射を吸収し、赤外からサブミリ波域に渡って再放射を行う事でエネルギースペクトルの波長変換を行う。ダストからの放射は一般的に銀河からの輻射エネルギーの数10%、多い場合には90%以上を担うため、そのエネルギー源を知ることは極めて基本的かつ重要である。特に、高赤方偏移にある普通の星形成銀河が将来ALMAなどの装置で観測されるようになったときには、そのサブミリ輻射の解釈を大きく左右する事となる。

ダストには、温かいダスト(50 K程度)と冷たいダスト(低温ダスト:15 K程度)の二種類が存在している事が知られている。温かいダストは波長 $20\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ 以下程度で放射を行い、低温ダストは $100\ \mu\text{m}$ 以上で温かいダストのスペクトルから輻射が超過する、という経緯で発見された。温かいダストは赤外線衛星による詳細な観測がこれまで行われており、その輻射のほとんどが星形成領域に付随し、かつその温度が50K程度と、大質量星(O、B型星)からの紫外輻射によって加熱されたダストに関して理論的に予想される温度と一致を見せる。従って、温かいダストの加熱源は大質量星である事がわかっている。

一方で、低温ダストは温かいダストよりも広がった構造を持つ事が知られている。例として近傍銀河M 33の場合を考えると、赤外線衛星Spitzerによる波長 $160\ \mu\text{m}$ 程度での観測では、その輻射は銀河全体に広がった輻射がおよそ半分、星形成領域近傍に局在化した輻射が半分程度である。広がった構造は星形成領域のみに存在するO、B型星を加熱源とする事はありえないため、他の機構が必要となる。理論的側面から宇宙線を加熱源とする場合($\sim 10\text{K}$)や、中小質量星からの輻射を加熱源とした場合($\sim 15\text{K}$)に予想されるダスト温度が計算されており、系内で観測される広がった赤外輻射の温度は、15K程度と中小質量星からの輻射を熱源とした場合と一致を見せている。

本論文の目的は、星形成領域に局在化した遠赤外輻射の加熱源を明らかにする事である。加熱源が大質量星の場合、低温ダストの温度は系統的に広がった領域よりも高く、またOB型星からの紫外光強度と良い相関を示すはずである。一方、加熱源が中小質量星の場合、低温ダストの温度はやはり15K程度となるはずであり、Kバンド($2.1\ \mu\text{m}$: 中小質量星からの輻射が主と考えられる)の輝度と良い相関を示すはずである。さらに、中小質量星の分布には銀河中心部から外縁部に向かって動径勾配が存在するため、温度にも動径勾配が期待される。

この問題に答える事は、これまでの観測からは困難であった。ダストの温度はそのスペクトル形状から決定されるが、温度が15K程度の低温ダストはその輻射のピークを波長 $200\ \mu\text{m}$ で迎える。赤外線衛星の最も長い波長は $160\ \mu\text{m}$ であるため、赤外域のみからの低温ダストの温度決定は誤差が大きい。温かいダストからの輻射に汚染されずに

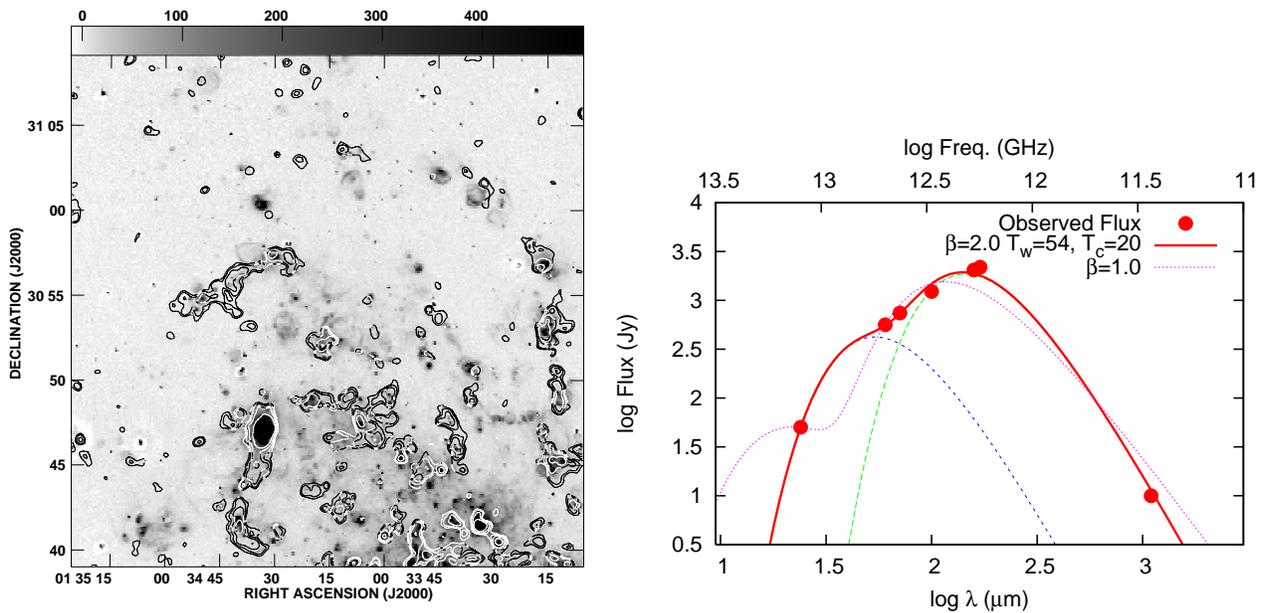


図 1: 左: 1.1 mm での低温ダスト分布コントア。背景の濃淡は、星形成 ($H\alpha$) をあらわす。星形成領域に付随する低温ダストが見て取れる。右: M 33 の各波長 (μm) における輻射強度 (Jy)。観測点を赤で示してある。異なる温度を持つ modified 黒体の和として表せる。青い点線は温度 54 K の温かいダスト、緑の点線は温度 20 K の低温ダスト、太い赤線はそれら 2 成分の和。ピンクの線はダストの性質を変化させた場合のスペクトル。1.1 mm の観測点 ($\log \lambda \sim 3$) によりダストの性質及びスペクトルが強く制限されている。

温度を決定するためには $160 \mu\text{m}$ よりも長波長の、サブミリ波での電波観測を行う必要がある。しかし、サブミリ波での系外銀河の観測は次の問題点を抱える；

1. 角度分解能が悪く、通常の距離にある銀河では個々の星形成領域を区別できない
2. サブミリ波においては地球大気が観測される輻射のほとんどを占める。このため、天球上で大きな範囲を占める領域の観測は高感度の観測が難しい

というものである。1. の条件を克服するためには我々の銀河系に近い銀河の観測を行えば良いが、その場合、銀河そのものが大きな視角を占めることになり 2. の条件に抵触する。

我々は、1. および 2. の問題点を解決する事で、星形成領域での低温ダストの温度を正確に導出する研究を行った。我々の銀河系から 840 キロパーセク (kpc) の距離にある渦巻銀河 M 33 は、明確な渦状構造を持ち、且つ銀河円盤が観測者を向いている銀河としては最近傍にある。我々は 2007 年、この銀河の北側半分を波長 1.1mm ($1100 \mu\text{m}$) で観測した。用いた装置は、南米チリ共和国のアタカマ高地 (標高 4800 m) に設置された口径 10 m のサブミリ波望遠鏡 ASTE (アタカマサブミリ波望遠鏡実験) 及びそれに搭載されたボロメータ検出器 AzTEC である。ASTE は標高の高さゆえ、現存するサブミリ波望遠鏡の中で最も地球大気の影響が少ない望遠鏡の一つである。同時に、搭載された AzTEC は現在最も感度の高い検出器の一つであり、これらの装置で超近傍の銀河を観測する事で、1. および 2. の問題点を克服した。

図 1 (左) は、M 33 北半分の領域の観測結果である。星形成領域を表す水素の電離輝線 $H\alpha$ を濃淡で示し、波長 $1100 \mu\text{m}$ における電波強度をコントアとして表している。角度分解能 $30''$ は 120 パーセクに対応し、視野の広さ (900 平方分)、感度 (600 太陽質量のダスト) は、近傍銀河の観測として過去に例を見ない極めて大規模・高品位な

Radial Temperature Gradient

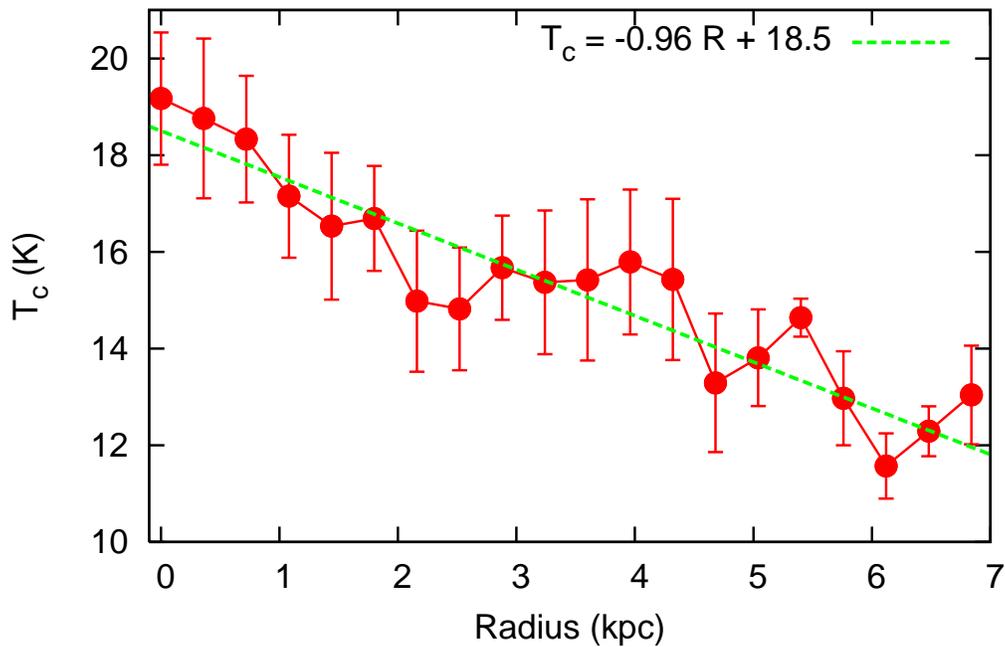


図 2: M 33 で星形成領域に付随した低温ダストの温度分布。横軸は銀河中心からの半径、縦軸は温度。中心付近で 19 K 程度、外縁部では 12 K 程度と滑らかな温度勾配が観測された。

ものである。

図 1 (右) は、銀河全体からの輻射をこれまでの赤外波長域での観測結果 (波長 $24 \mu\text{m}$ から $160 \mu\text{m}$) と合わせ、波長毎に表したダストのスペクトルである。明確に二つの温度成分に切り分けることが可能であり、温かいダストが 50 K 程度、低温ダストが 20 K 程度であることがわかる。また、 $160 \mu\text{m}$ と 1.1 mm で観測されるダストは、低温ダストのみの寄与がある事がわかる。

図 1 (左) から明らかなように、 1.1 mm で観測された低温ダストは、これまでの研究と同じく、星形成領域に局在化している。従来の研究ではこのため、星形成領域に付随した低温ダストの熱源はやはり大質量星であると結論付けることがほとんどであった。これらの星形成領域に付随したダストの温度を実際に求める事が本研究の目的である。そこで、星形成領域に付随した 1.1 mm の輻射に対応した領域での $160 \mu\text{m}$ での輻射強度を抽出し、それら二つの波長から低温ダストの温度を導出した。従来の研究と異なり、この二つの波長を用いた場合は低温ダストのみの寄与があることが図 1 (右) から保証される。図 2 は、この二つの波長から導出された、星形成領域の低温ダスト温度の動径分布である。銀河中心から外縁部にかけて滑らかな温度勾配が存在する。これは低温ダストの加熱源が、同じように動径方向に滑らかな分布をしていることを示す。これは、低温ダストの加熱源が中小質量星の場合に要請される。また、温度自体も中小質量星の輻射をエネルギー源とした場合の理論的予測と一致する。

図 3 は、いくつかの明るい星形成領域を選定し、その領域での低温ダスト温度、温かいダスト温度、K バンド輝度、そして星形成率を比較したものである。温かいダストの温度は Spitzer 衛星の赤外線バンドから導出した。星形成率は $\text{H}\alpha$ 輝線光度と $24\mu\text{m}$ の光度を足し合わせたものであり、OB 星からの輻射を減光補正したものと同等である。

明らかに、低温ダストは K バンドと相関する一方、星形成率とは相関しない。また、温かいダストの温度は星形成

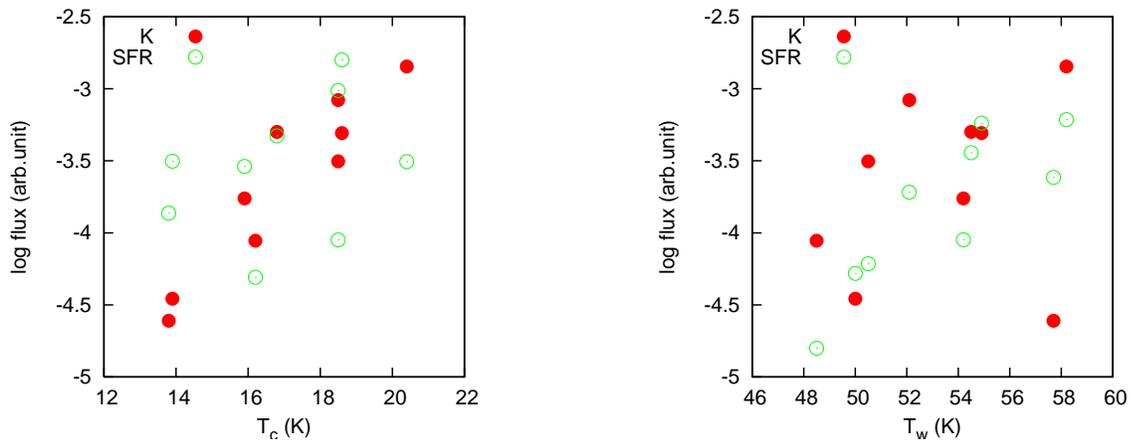


図 3: いくつかの星形成領域での低温ダスト温度 (横軸: T_c) と K バンド輝度 (赤)、星形成率 (緑) の比較 (左)。右は、温かいダスト T_w の場合。

率と相関するが K バンド輝度とは相関しない。これらから、温かいダストの加熱源が OB 星であることが追確認されたほか、低温ダストの加熱源は K バンドに寄与する中小質量の星であり、また OB 星からの寄与は少ないことが発見された。

本文では、これらの領域について金属量とダストに関する諸量の比較も行った。一般に重元素量の多い領域ではダストの存在量も多く、紫外光はすぐに吸収されるためその平均自由行程が短い。このため、紫外光を主な成分とする輻射場によって温められたダストでは重元素量が多い場合、紫外光が輻射場に寄与しにくいいため、ダスト温度が下がることが期待される。我々は個別の星形成領域で重元素量と低温ダスト温度を比較したところ、むしろ重元素量と低温ダスト温度は正の相関を示すことを発見した。つまり、紫外光は低温ダストの加熱源として寄与するという考えと矛盾し、低温ダストの加熱源が中小質量星であることと合致する。