

# 銀河進化モデルに基づくダスト量の定量評価 — 遠赤外観測から解明する宇宙の星形成史

平下博之

〈アルチエトリ天体物理観測所 (イタリア) Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi, 5, 50125 Firenze, Italy〉  
e-mail: irasita@arcetri.astro.it

今世紀初頭は、遠赤外観測から銀河進化及び宇宙の星形成史を解明できる好機である。そのような背景に鑑みると銀河からの遠赤外放射を担うダストについてその量の進化を定量的に見積もることが不可欠となる。私は銀河の化学進化モデルに立脚し、星間空間でのダストの形成・破壊過程を取り込むことで銀河に含まれるダスト量の進化モデルを構築した。更に近傍銀河で観測されるダスト・ガス比を広い重元素率のレンジで検証することで、ダストの形成過程として「星からの供給」「星間雲中での成長」の両者を考えねば広い重元素率に渡る有効なモデルができないことが分かった。これは宇宙論的時間スケールでの銀河進化史を明らかにするためには、本研究で構築したような進化モデルが必要となることを意味する。更に、2004年打ち上げのASTRO-Fを視野に入れ、最近の我々の研究をレビューしながら星形成史を明らかにする戦略について考えたい。

## 1. なぜダストが重要か～銀河の星形成史、遠赤外天文学との関連で

1996年にMadauら<sup>1)</sup>の論文を契機に天文業界で注目されるようになったのは、宇宙の星形成史である。宇宙の星形成史とは、宇宙全体でいつでもだけの星が作られてきたかということであり、20年以上<sup>2)</sup>の研究の歴史がある。最近観測機器の発達で過去の宇宙が直接見えるため、宇宙の星形成史の研究は一流をなしている。

そもそも「宇宙の星形成史」はどうして重要なのだろうか。その答えの一つは「化学進化史」(重元素\*の形成史のこと)を反映するからである。我々を構成する重元素は星の中で生成されてきたものである。従って、我々を作る物質の形成史である化学進化史は宇宙の星形成史と裏表であると言える。また、銀河が星の集団であり同時に宇宙

の大規模構造の単位であると考えると、宇宙の星形成史は構造形成史をも反映する。

ところで、宇宙の星形成史は各銀河の星形成史の足し合わせであるから銀河の星形成活動の強さ、定量的には「星形成率」(単位時間当たり形成する星の質量)を観測量から知る手段が必要となる。観測される銀河が活動的に星を作っているか否かは、最近できた星の質量を指標とするのが最良である。従って、銀河の星形成率はしばしば大質量星からの放射に起因する量から見積もられる<sup>3)</sup>。具体的には、紫外連続光度やガスの電離輝線光度等が用いられる。経験的には、銀河の遠赤外光度もその星形成率の良い指標となることが知られている<sup>3)</sup>。

ところが、星形成率の評価には大きな問題がある。各銀河の星間空間に遍く存在するダストである。ダストは星間ガス中に存在する重元素の塊(数十Åから1μm程度の大きさのものを考える)である。紫外連続光や電離輝線を星形成率の指標

\*リチウムより重い元素を指すことにする。

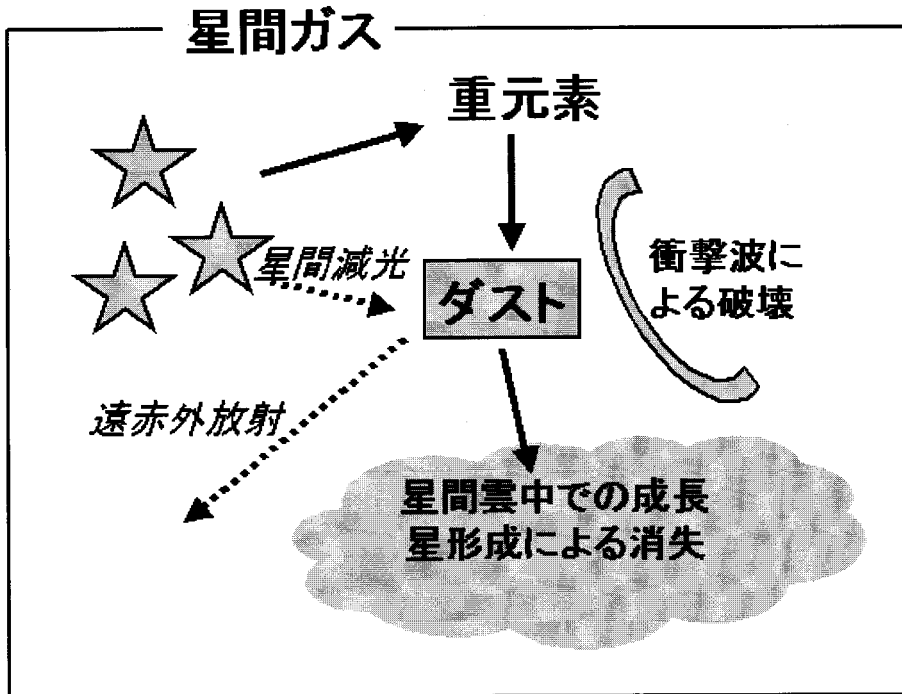


図1：星間空間でのダストに関する諸過程。ダストは星から放出される重元素が凝縮することにより形成され、星間雲中で成長する。また、衝撃波による破壊や星に取り込まれることで消失する。点線の矢印は輻射過程である。星からの輻射はダストにより吸収され（星間減光）、遠赤外域で再放射される。これらの輻射過程を通して、ダストは星形成率評価に影響を与える。

として用いる場合、ダストがそれらの光を吸収・散乱してしまうことで、光量が減少する。これを星間減光と呼ぶ。一方、エネルギーを吸収して暖められたダストは遠赤外線を熱放射する（図1の点線矢印）。以上から、紫外光・輝線光度、遠赤外光度のどれから星形成率を導く場合でも、ダストの量の評価が重要であることが分かる。

つまり、星形成史を正しく見積もるためにはダスト量の進化を考慮しなければならないことになる。更にダストはガス中に存在する重元素から作られるから、「ガス」「重元素」「ダスト」の三者に関する進化モデルが必要になる。本記事では、三者の量の時間発展をモデル化することで、ダスト量が銀河の進化と共にどのように時間発展するかに迫って行きたい。

観測的なポイントとしてはこれから飛躍的に進

歩する遠赤外観測が挙げられる。遠赤外観測は大気吸収等のために可視域に比べて観測が進んでいない。ようやく最近 ISO 衛星（欧州）<sup>4), 5)</sup>の結果に基づき  $z < 1$  での進化が議論され始めた\*\*。これは  $z > 3$  の光度関数<sup>6)</sup>が議論されている可視域から大きく出遅れている。しかし、2004年打ち上げの遠赤外観測衛星「ASTRO-F」<sup>7)</sup>により遠赤外域から銀河進化史、特に星形成史を明らかにする好機が訪れる。このような時代背景に鑑みると遠赤外輻射源であるダスト量の進化を再検討する重要性は自ずと明らかである。

2節では、本研究<sup>8), 9)</sup>で構築したダスト量の

\*\*勿論  $z > 1$  の銀河で遠赤外域で検出されている銀河はあるが、統計的な議論ができるほど数がない。ちなみに IRAS の赤方偏移の中央道は 0.1 のオーダーである。なお、遠赤外観測に関するレビューは例えば<sup>4), 5)</sup>等。

進化モデルを解説する。モデル計算の結果と観測との比較については3節に述べる。最後に4節で、今後のASTRO-Fでの戦略を我々の最近の研究成果を踏まえて述べたい。

## 2. ダスト量の進化をどのようにモデル化するか

銀河に含まれるダストの総質量（ダスト量と呼ぶ）の進化モデルの必要性は1節で述べたとおりである。これに答えるためには銀河中の「ガス」「重元素」「ダスト」の量の進化を同時にモデル化する必要があることも述べた。重元素はダストを形成する材料として、ガスは重元素を生み出す星の材料として重要である。そこで、ダスト量の進化は重元素の量の進化（即ち化学進化）モデルに加え、ダストの形成・破壊率を考慮することで見積もることとする。

まず重元素の進化史のモデル、即ち化学進化モデルが必要である。化学進化モデルで「ガス」と「重元素」各々の銀河に含まれる量の時間発展を計算する。これはTinsley<sup>10)</sup>などにより体系化された（最近の発展は11等）ものが存在する。考慮する過程は

- [1]「ガスから星ができる過程（ガス質量の減少）」
- [2]「星が死んでガスと重元素を放出する過程（ガス・重元素質量の増加）」

である。式で書き下すと

$$dM_g/dt = -\psi + E \tag{1}$$

$$dM_Z/dt = -Z\psi + E_Z \tag{2}$$

となる。ただし、 $M_g$ 、 $M_Z$ はそれぞれ銀河に含まれるガス、重元素の総質量である。 $\psi$ は星形成率で、星形成によるガスの減少率を表す。 $E$ 、 $E_Z$ は星からのガス及び重元素の放出率である。最後に $Z$ は「重元素率」（いわゆるメタリシティ）であり、 $Z \equiv M_Z / M_g$ と定義される。以上の方程式により、重元

素率の進化が計算できる。

なお、ここでは銀河の中での空間分布は考えずに、総質量の時間発展のみを考えた（いわゆるワンゾーン近似）。また、銀河への質量の出入りは無視した。これらの単純化は星形成と星からのガス放出という必要最小限の効果だけ調べるために行うためのものである。また歴史的には初めはこの簡単なモデルを基に様々な量が検証されてきたから、それらとの相互比較にも初めは単純な方が便利である（複雑なモデルは12）。

さて、ダスト量の時間発展モデルはこれまでに確立されていないので新たに構築する必要がある（素過程は13、モデルの詳細は8）。ダストができる過程には、

- [1]「星からのダスト核の供給」
- [2]「星間雲中の重元素降着によるダストの成長」

がある（図1）。前者は星の質量放出現象に伴い、過飽和状態の重元素が凝縮する過程である（たとえば14）。後者では既存のダストに重元素が降着しダストの質量が増加する。一方、ダストが破壊される過程は

- [1]「星形成（星に取り込まれる）」
- [2]「超新星起源の衝撃波による破壊」

がある。後者は衝撃波中でダスト同士もしくはダストとガス粒子が激しく衝突することによる<sup>15)</sup>。

以上の過程を基に、銀河全体でのダスト量 $M_d$ の時間変化を書き下すと以下ようになる。

$$dM_d/dt = f_{in} E_Z + M_d(1-f_Z)/\tau_{acc} - D\psi - M_d/\tau_{SN} \tag{3}$$

以上に挙げたダストの生成、消滅過程が右辺に評価されている。まず、 $f_{in} E_Z$ は星からは重元素の $f_{in}$ の割合がダストに凝縮して放出されることを表す（星からのダスト供給）。次に $M_d(1-f_Z)/\tau_{acc}$ はダストが重元素と星間雲中で衝突することにより $\tau_{acc}$ の時間スケールで成長していく過程を表す（星間雲中での成長）。ここで、 $f_Z$ は重元素のうちダストになっている割合と定義した。即ち、 $(1-f_Z)$

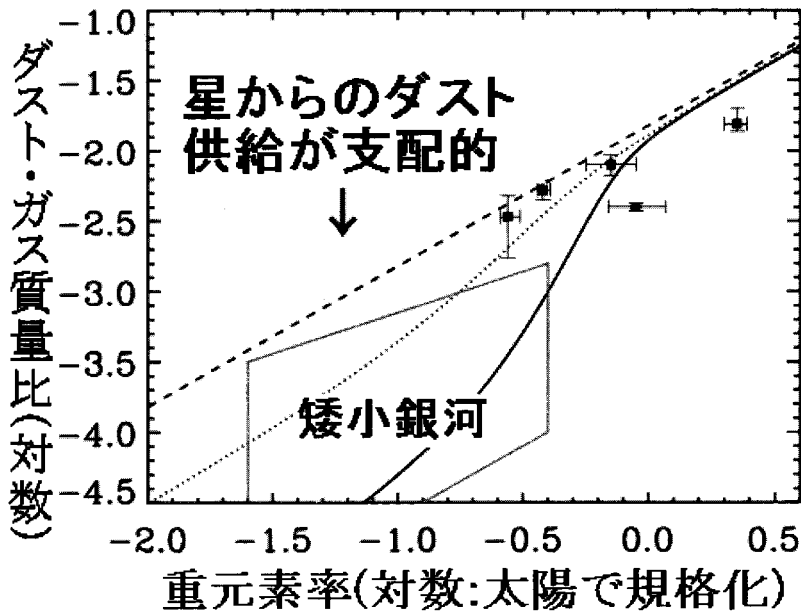


図2：ダスト・ガス比と重元素率（太陽の値で規格化）の関係<sup>8), 9)</sup>。3種の線は $f_{in}$ （星から放出される重元素のうちダストに凝縮している割合）を変化させたときのモデル計算の結果である（実線、点線、鎖線はそれぞれ $f_{in}=0.01, 0.1, 0.5$ ）。 $f_{in}$ の違いは低い重元素率の領域で顕著である。なお、「誤差棒」付きの点は各近傍渦巻銀河<sup>18)</sup>のデータ、「矮小銀河」と印がついた領域は近傍矮小銀河のデータの存在する領域<sup>19)</sup>を示す。右側にある銀河ほど重元素が多い点で進化した銀河であると見なせる。

の項はダストの成長にはガス相にある重元素のみが効くという事を示す。また、後半2項がダストの消滅項（破壊を表す）である。それぞれ「星形成の際に星に取り込まれる過程」と「超新星爆発起源の衝撃波によって破壊される過程」を表す。前者のレートは、「ダスト・ガス比」を $D(\equiv M_d/M_g)$ と定義すると $D\dot{\phi}$ となる。後者は超新星爆発によって銀河全体のガスが $100 \text{ km s}^{-1}$ 程度にまで加速される時間スケールとして見積もられ、 $\tau_{SN}$ は $10^8$ 年程度となる（詳しくは8）。

更に解析的な都合から、瞬間リサイクル近似を採用する。これはある時間スケール（ここでは銀河年齢 $\sim 10^{10}$ 年とした）より寿命の短い星は生まれた瞬間にその寿命を終えると近似するものである。これにより、過去の星形成史の履歴を追う必要がなくなる。結果、星形成率と時間が消去でき（乱暴な言い方をすればそれらの情報は重元素量に吸

取される。つまり重元素率はこれまでに星をどれだけ作ったか、即ち銀河の進化段階で決まる）、「ダスト・ガス比と重元素率の関係」を得る。ダスト・ガス比と重元素率はそれぞれ、ダストおよび重元素のガスに対する質量比である。ダストや重元素の「濃度」だとも言える。

次節でモデルから得られるダスト・ガス比と重元素量との関係を観測と比較する。なお、化学進化に際しては星の初期質量関数やイールド<sup>10)</sup>等の決定すべきパラメータが出てくるが、ここではダスト形成過程に集中するためにそれらの詳細<sup>8)</sup>は割愛させて頂く。数値だけ述べると、星になるガスのうち32%が星間空間に再放出され、そのガスには太陽組成の7割の重元素が含まれているとする。これらの値は銀河の重元素量などを説明する際に使われる標準的パラメータに近い。

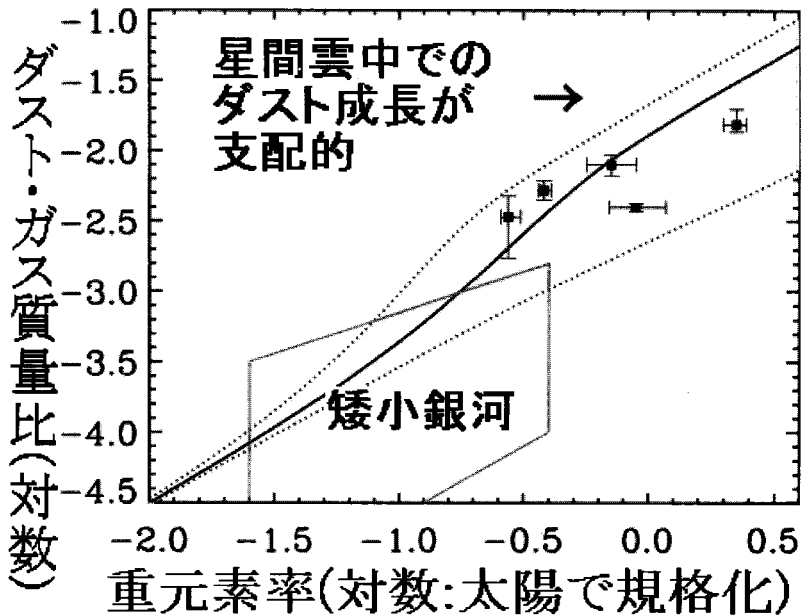


図3：図1と同じ関係を星間雲中でダストが成長する時間スケール ( $\tau_{\text{acc}}$ ) を変えてプロットした<sup>8)</sup>。実線はほぼ  $\tau_{\text{acc}} = 10^8$  年に相当し、青色の範囲は  $\tau_{\text{acc}}$  を上下に2倍変えた場合の変化である。図1とは逆に  $\tau_{\text{acc}}$  の違いは重元素率の大きな側で顕著であることが分かる。

### 3. 広い重元素率レンジに渡る検討

今回、ダスト量の増加過程として2つ(星からの供給と星間雲中での成長)を取り入れた点が以下に述べるように重要である。増加過程に注目するのは、銀河の遠赤外光度増加に寄与するため銀河進化で興味ある現象だからである。破壊の時間スケール  $\tau_{\text{SN}}$  は  $10^8 \text{ yr}$  程度に固定する(11で  $\beta_{\text{SN}} = 5$  とする)。

まず、星からの供給率  $f_{\text{in}} E_Z$  について注目しよう。 $f_{\text{in}}$  は星から放出される重元素のうちダストに凝縮する割合を意味する。 $f_{\text{in}}$  に対しては、超新星が効いているのか、AGB星が効いているのか、まだ明らかになっていないなど、理論的にはまだ  $f_{\text{in}}$  を確定させるのは時期尚早であると判断した( $f_{\text{in}}$  の決定には16や17等が参考になるが今回我々の調べる値は却下されない)。そのため、 $f_{\text{in}}$  はパラメータ

として扱い、むしろ観測量の方から制限が付けられないかという方向で考察を進めることにする。

図2にモデルから予想されるダスト・ガス比-重元素率関係を示す。 $f_{\text{in}}$  に注目するため、 $\tau_{\text{acc}}$  を  $10^8 \text{ yr}$  程度に固定し(8で  $\beta_{\text{acc}} = 10$  とする)、 $f_{\text{in}}$  を 0.01, 0.1, 0.5 の3種類に変えてみた(それぞれ実線、点線、鎖線)。それぞれ、星からの重元素の内、1%, 10%, 50% がダストになって放出されるという意味である。また、図のエラーバー付きの点は近傍渦巻銀河<sup>18)</sup> のサンプル(各点が各銀河に対応する。ガスはHIとCOの観測から、ダストは減光の観測から決定されている)、「dwarfs」と印の付いた領域は矮小銀河サンプル<sup>19)</sup> の存在範囲を示す(ガスはHIの観測から、ダストはIRASの遠赤外観測から評価されている。なお、重元素量は両サンプルともHII領域の重元素輝線強度から見積もられている)。3本の線を比較すると、 $f_{\text{in}}$  の違

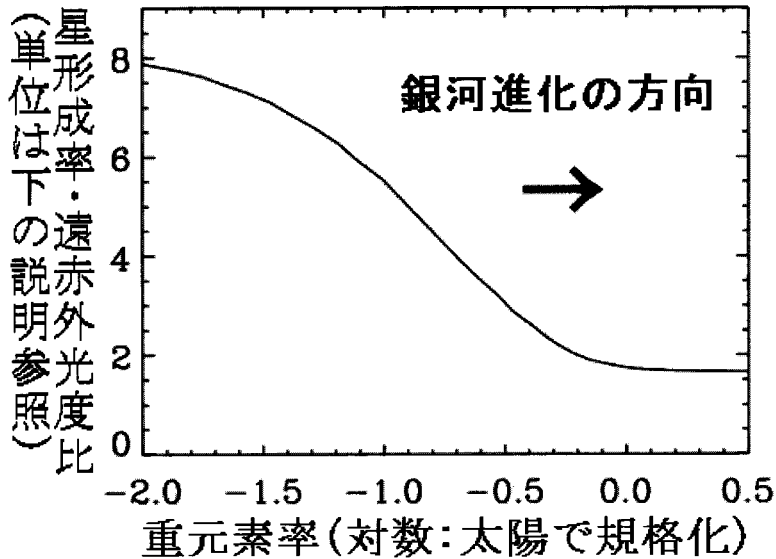


図4：「[星形成率] =  $C_{\text{IR}} \times [\text{遠赤外光度}]$  で定義される  $C_{\text{IR}}$  (星形成率・遠赤外光度比) を重元素率の関数として表したものの<sup>23)</sup>。  $C_{\text{IR}}$  の単位は  $10^{-10}$  太陽質量/年/太陽光度である。」銀河進化は重元素率が増加する過程であるから、銀河進化に従って遠赤外光度からの星形成換算式を変えないといけないことを意味する。

いは矮小銀河くらの低重元素率の銀河で際立つことが分かる。これは重元素量が少ない状況下では星間雲中でダスト成長が有効にできないので、星からのダスト供給がダスト・ガス比の決定に重要であることによる。

次に、星間雲中での重元素降着によるダスト成長を調べよう。図3にダスト・ガス比-重元素率関係を示す。  $f_{\text{in}}$  は 0.1 に固定した。  $\tau_{\text{acc}}$  を  $10^8$  yr を中心に2倍程度 (11で  $\beta_{\text{acc}}$  を 5 ~ 20 の範囲で) 上下に動かすと青色の領域を掃く。これから、重元素降着によるダスト成長率の違いが顕著に現れるのは渦巻銀河程度の高い重元素率を持つ銀河であることが分かる。これは重元素とダストとの衝突が重元素率が高いことで頻繁になることによる。実際、星間雲中での重元素の熱速度とダストの大きさ (断面積) から評価できて、  $10^7$  -  $10^8$  年程度でダストは  $0.1 \mu\text{m}$  (減光曲線などから存在が確認

されるダストの大きさ) 程度にまで成長できることが示せる。これは渦巻銀河の進化の時間スケールより遥かに短い。

各サンプルについて見ると、まず渦巻銀河サンプル (データ点) は、同じパラメータを持つ線ですべてのデータが説明できないような感じを受ける。これは諸量を観測量から導く際の不定性のせいかもしれないが、誤差棒の大きさを信じれば物理的意味のある分散であり、その可能性は否定できない<sup>20)</sup>。実際私<sup>21)</sup> は、星間ガスの相変化によってダストの形成率が銀河進化の時間スケールに比べて十分短時間 ( $10^8$  年程度) で変動するために、観測されるダスト・ガス比の分散が現れるというアイデアを示した。

次に矮小銀河に関しては、今回用いた IRAS サンプルは、低温ダスト (< 25 K) をトレースしていないため、まだ不定性が大きい。ASTRO-F 観測後

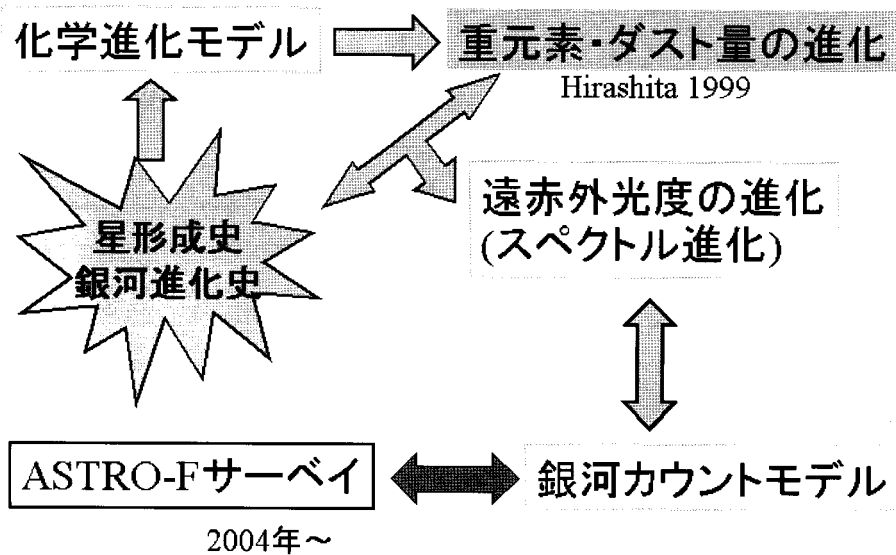


図5：将来 ASTRO-F のサーベイデータから如何に本研究（ダスト量の進化モデル）を通して宇宙の星形成史を明らかにするか、その戦略のための概略図。ASTRO-F のサーベイ結果による銀河カウント（銀河数をフラックスの関数として表したものは遠赤外光度の進化モデルと結びつく。これを化学進化モデルを基に星形成史と結びつける。結果、宇宙の星形成史が得られるであろう。

は、IRAS よりは長波長にまである感度を生かしてこの低温ダストによる不定性のある程度評価できる。また、ASTRO-F でより重要なのはその感度の良さ（IRAS の 10 倍から 100 倍<sup>7)</sup>）であり、そのためにダストが多く温度の高い矮小銀河にバイアスしないサンプルが 10 Mpc の範囲内くらいで得られる。これにより初めて矮小銀河の一般的な特性が議論でき、 $f_{in}$  への制限が厳しく付けられるようになる。

#### 4. まとめと発展性

以上で私は広い重元素率の範囲で有効であるダスト量の進化モデルを構築した。これは、化学進化モデルに加え、星間空間でのダスト形成・破壊過程を取り入れることによって初めて可能になった。実際、矮小銀河から渦巻銀河までの観測される全ての重元素率に渡って有効なモデル化ができた（図2、3）。

特に重要な点は、星間空間で重要な2つのダスト形成過程（星からの供給と星間雲中での成長）を両方考慮した点である。モデル計算の結果、両形成過程は「縮退せずに」適当な重元素領域から独立に検証できることが明らかになった。これは裏返すと、広い重元素領域を考える際は2つのダストの形成過程を取り込むことが必要不可欠であることを意味する。一般に銀河進化モデルでは重元素率の進化を広いレンジで扱わなければならないから、今回考えたモデルが有効である。

さて、これまで重元素率（銀河の進化段階を反映）の広い範囲に渡ってダスト量の進化が検証された例はなかった。従って、今回の仕事を踏まえて銀河進化史を再考察する必要があることになる。特に、宇宙の星形成史を観測的に決定する際に、ダスト量の進化による不定性があることは1節に述べた。以下では、この10年の天文学の一つの山となる「遠赤外観測」に焦点を絞り、如何に宇宙

の星形成史を明らかにしていくか、その戦略を構想して締めとしたい。

まず、銀河の遠赤外光度から星形成率を導く手法を再確立しなければならない。これまで、銀河の遠赤外光度は星形成率の良い指標であることが知られている<sup>5)</sup>。従来の遠赤外光度から星形成率への換算式は観測量の相関に基づく経験則であるか、極端な状況（遠赤外光度がほぼ全光度を担う場合など）にしか適応できないかのどちらかであった。更に遠赤外線源がダストであることを考えると、星形成率への変換式はダスト量の進化（即ち化学進化）の段階によるはずである。つまり、様々な進化段階や星形成活動を示す銀河に適用できる理論的な換算式を導いておかないと、低重元素率の進化の進んでいない銀河の多い高赤方偏移で星形成率を系統的に過小評価してしまう危険性が高い。これはASTRO-Fまでに解決すべきである。

この問題に対しては、井上昭雄ら<sup>22)</sup>が星形成領域であるH II領域の吸収放射過程を考慮することで、解決への大きな一歩を踏み出した。まず、紫外・可視光のダストへの吸収率から遠赤外光度を評価し、星の光度と遠赤外光度との関係を得た。次に、星の光度を質量に変換し、質量を典型的時間（大質量星の寿命程度）で割ることで星形成率を導いた。結果、遠赤外光度と星形成率とが理論的に結び付いた。更に我々<sup>23)</sup>は、ダストの光学的厚さをダスト・ガス比の関数として評価し、2節で定式化したモデルを介し星形成率評価式の重元素率依存性を明らかにした。結果のみを図4に示す。重元素率の進化（銀河進化とも見なせる）に伴い、遠赤外線輻射効率が上がるので、遠赤外光度から星形成率への換算係数は4倍程度小さくなる。「4倍」はオーダーを気にする天文学では大したことがなさそうだが、最近の星形成史研究は数倍を平気で議論する傾向にあるから、4倍の進化でも警鐘となる。

さて、星形成率への評価式を確立した後は、いよいよ宇宙の星形成史を解明する段階となる。概

略は図5に示す。まず観測される銀河カウント（銀河数をフラックスの関数として表したもの）を竹内ら<sup>24)</sup>のモデル（他にも25）を参照）で遠赤外光度進化に焼きなおし、それを井上ら<sup>22)</sup>のアルゴリズムに基づく我々の換算式（ここで本稿の主題であったダスト量の進化効果が入る<sup>23)</sup>）で星形成史に変換することを考えている。その際、スペクトル進化のモデル（高木ら<sup>26)</sup>）を銀河カウントモデルに取り入れることでも宇宙の星形成史の検証ができるであろう。結果、宇宙の星形成史が重元素量（ダスト量）進化と共にASTRO-Fサーベイデータから明らかにできると期待する。

これから遠赤外域での銀河進化研究はASTRO-Fを初めとする遠赤外ミッションの活躍で飛躍的進歩が約束されている。現状はといえば、ISOの観測結果が出てようやく $z \sim 1$ が議論され始めたところである。是非とも宇宙の歴史を代表する星形成史、重元素進化史、ダスト進化史を遠赤外線観測から明らかにしたいものである。そして、可視付近の観測をも統一的に説明してしまう銀河進化史の描像がなんらかのカタチ<sup>20)</sup>で固まってくると期待する。ありえないとも言いきれない<sup>20)</sup>が、恐らくは10年後も言っているであろう：「宇宙ってのはてごわいよねえ。」<sup>20)</sup>

なお、遠赤外での銀河進化モデルについては竹内 努氏、高木俊暢氏も天文月報に記事を書かれる。この稿は化学進化モデルに偏った感もあるので、他の2記事も併せて読まれることをお勧めしたい。

以上の研究は主に筆者の京都大学の博士課程に在学中のものである。大学院で指導教官をして下さった嶺重 慎（京大基研教授）氏には学術的なことから心構えに至るまで、貴重なアドバイスを常に頂いた。共同研究者である、井上昭雄（京大宇宙物理D2）氏、竹内 努（東大天文センター研究員）氏、釜谷秀幸（京大宇宙物理助手）氏、芝井 広（名大U研教授）氏には遠赤外観測やダストに関して頻繁に有益なコメントを下さった（井上、竹内両氏、更に石井貴子（京大花山天文台研究員）



氏と田尻愉香（京大宇宙物理 D1）氏には査読及びコメントを頂き感謝している。コンピュータ環境は吉川耕司（京大宇宙物理 D 3）氏に整備して頂いた。現在 Andrea Ferrara 氏に本研究の発展性などの議論を頂いている。博士課程及び現在の財政的援助は日本学術振興会による。以上の皆様にこの場をお借りしてお礼申し上げたい。最後に、絶えず雑談・相談・お願いにのって頂き、元気・勇氣・励ましを下さった京都大学宇宙物理学教室及び花山天文台の方々に感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) Madau P., Ferguson H. C., Dickinson M. E., Giavalisco M., Steidel C. C., Fruchter A., 1996, MNRAS 283, 1388
- 2) Tinsley B. M., Danly L. 1980, ApJ 242, 435
- 3) Kennicutt R. C. Jr., 1998, ARA&A 36, 189
- 4) 奥田治之, 1999, 天文月報 92, 8
- 5) 谷口義明, 1998, 天文月報 91, 11
- 6) Takeuchi T. T., Yoshikawa K., Ishii T. T., 2000, ApJS 129, 1
- 7) <http://www.ir.isas.ac.jp/ASTRO-F/index-j.html>
- 8) Hirashita H., 1999, ApJ 510, L99
- 9) Hirashita H., 1999, ApJ 522, 220
- 10) Tinsley B. M., 1980, Fundam. Cosmic Phys. 5, 287
- 11) Kodama T., Arimoto N., 1997, A&A 320, 41
- 12) Chiappini C., Matteucci F., Gratton R., 1997, ApJ 477, 765
- 13) Dwek E., 1998, ApJ 501, 643
- 14) Yamamoto T., Hasegawa H., 1977, Prog. Theor. Phys 58, 816
- 15) Jones A. P., Tielens A. G. G. M., Hollenbach D. J., 1996, ApJ 469, 740
- 16) Gehr, R. D., 1989, IAU Symp. 135, 445
- 17) Dwek E., Scalo J. M., 1980, ApJ 239, 193
- 18) Issa, M. R., MacLaren, I., Wolfendale, A. W., 1990, A&A 236, 237
- 19) Lisenfeld, U., Ferrara, A., 1998, ApJ 496, 145
- 20) <http://www.suntory-dakara.com/>
- 21) Hirashita H., 2000, ApJ, 531, 693
- 22) Inoue A. K., Hirashita H., Kamaya H., 2000, PASJ, 52, 539
- 23) Hirashita H., Inoue A. K., Kamaya H., Shibai H., 2001, A&A 366, 83
- 24) Takeuchi T. T., Ishii T. T., Hirashita H., Yoshikawa K., Matsuhara H., Kawara K., Okuda H., 2001, PASJ 53, 37
- 25) Pearson C., Rowan-Robinson M., 1996, MNRAS 283, 174
- 26) Takagi T., Arimoto N., Vansevicius V., 1999, ApJ 523, 107

### Evolution Model of Dust Content in Galaxies — Prospect of revealing the Star Formation History of the Universe

Hiroyuki HIRASHITA

*Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi,  
5 50125 Firenze, Italy*

Abstract: This century will begin with progresses in far-infrared observations, which will contribute to revealing the star formation history of the Universe. We must make clear the evolution of the amount of dust, the source of the far-infrared emission. We construct an evolution model of dust content in a galaxy by extending a standard chemical evolution model. As a result, we find that two processes should be taken into account for dust increase; supply from stars, and growth in interstellar clouds. These two are indispensable to explain the observed relation between dust-to-gas ratio and metallicity of nearby galaxies. Our model is useful in estimating the evolution of dust content on a cosmological timescale, and is important for revealing the star formation histories of the Universe from the ASTRO-F all-sky survey.