

紫外線と赤外線で探る銀河の星形成と進化

竹内 努

〈名古屋大学高等研究院 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: takeuchi@iar.nagoya-u.ac.jp

銀河の星形成率は大質量星起源の紫外線を測定して求めるが、同時に活発な星形成はダスト（宇宙塵）形成を伴うため、紫外線と赤外線を同時に扱うことで、偏りのない星形成評価が初めて可能になる。紫外線全天探査衛星 *GALEX* の登場で、紫外線での銀河の観測が飛躍的に前進し、赤外線全天探査衛星 *IRAS* や *Spitzer* 宇宙望遠鏡との組み合わせによってこのような星形成の正しい推定が実現しつつある。本稿では、*GALEX* と *IRAS*, *Spitzer* による宇宙の星形成、ダスト減光の研究について紹介する。

1. はじめに：銀河進化と宇宙の星形成史

もしも宇宙をととも大きなスケールで見たとすると、その基本構成要素は星とガス（および暗黒物質）の集合体である銀河といえるであろう。宇宙で最初の世代の星ができた時期から現在に至るまでの130億年^{*1}以上にわたり、個々の銀河はその質量や形態、おそらくは環境にも依存して個性的な履歴で星を作ってきたことが知られている¹⁾。単位時間あたり（1年あたりが慣習）に銀河が作る星の質量のことを銀河の星形成率（star formation rate; SFR）という。そして銀河の星形成率の履歴のことを銀河の星形成進化、あるいは簡単に銀河進化と呼ぶ。ここでも簡単のためこの名称を用いることにしよう。

さて、銀河が個性的な進化をしてきたとはいえ、宇宙開闢から現在までそれぞれの時代で、銀河の星形成が全体的に活発だった時代、不活発に

なった時代はあるのだろうか？ このように、宇宙論的なスケールから銀河進化を観測的に追及するためには、宇宙の単位体積あたりの星形成率を考えればよい。この概念は Tinsley と Danly によって1980年に用いられたのが最初である²⁾。具体的には、宇宙の単位体積あたり（通常は共動座標^{*2}で1立方メガパーセクあたり）に存在する銀河の星形成率の合計を宇宙の星形成率とする。ずいぶん大雑把な気がするかもしれないが、実際にこの量を求めてみると大まかには共通の傾向を示すように見える³⁾。つまり、「宇宙の平均的星形成史」は現実的な意味をもっている。Lilly ら⁴⁾や Madau ら⁵⁾の画期的な研究以降、ここ10年来宇宙の星形成率の進化、いわゆる宇宙の星形成史は銀河進化の研究において中心的な役割を果たし、さまざまな角度から活発な研究の対象となっている⁶⁾。

^{*1} 宇宙論パラメータは $(h, \Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.7, 0.3, 0.7)$ としている。ここで h は 100 km s^{-1} で規格化したハッブル定数、 Ω_M は物質の密度パラメーター、 Ω_Λ は真空のエネルギーの密度パラメーター。

^{*2} 宇宙は膨張しているため、空間のスケールは時代によって異なる。このスケールで空間座標を割ることで、天体密度などを考えるのに都合のよい、膨張によらない新たな座標が得られる。これを共動座標と呼ぶ。

2. 銀河の星形成率と紫外線, 赤外線

2.1 銀河の星形成率の観測的推定

では具体的に、宇宙の星形成率を求める方法について見ていこう。原理的には、銀河の星形成率は寿命の短い大質量星（OB型星）に関連する観測量を測定し、それを大質量星の数に換算したうえで、初期質量関数（initial mass function; IMF）を仮定して全星形成率を求めるという手順で得られる。寿命の短い大質量星は“一瞬”の間（数百万年程度）に生まれて死滅するので「単位時間あたり」の星形成率を求めるのに適している。

さて、大質量星は高温であることから、最も直接的な観測量は紫外線であろう。伝統的には、電離紫外線によって形成された電離水素領域（HII領域）起源の水素再結合線である $H\alpha$ 線強度を測り、電離領域の物理を媒介して電離紫外線強度に換算する方法が用いられている。これに対し、最近の高赤方偏移銀河の観測では、銀河の放射する紫外線連続光が赤方偏移して観測者側の可視光にずれ込んでくることから、直接紫外線強度を観測する方法もよく用いられる。また最近、紫外線全天探査衛星 *GALEX*（後述）によって、近傍の銀河でも直接紫外線データが得られるようになった。これらの観測から星形成率を求める方法の総合的なまとめとして、例えば Kennicutt の総説論文が便利である⁷⁾。

2.2 星形成とダスト（宇宙塵）

星は中心部での核融合反応によりエネルギーを発生させて輝いている。またこの核融合反応によって、われわれの体を形作っている酸素や炭素などの重元素が合成される。星はやがて一生の終末に質量の大半を放出し、それに伴って重元素も星間空間に放出され、星間物質と混合していく。星間空間に存在する重元素の多くは、ダスト（宇宙塵）と呼ばれる非常に微細な（直径数 \AA から数 μm ）固体微粒子の形で存在している。このことは、星が形成されると寿命の短い星から順に一生

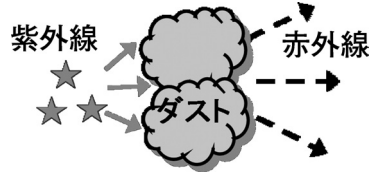


図1 大質量星からの紫外線放射とダストによる吸収、赤外線での再放射。

を終え、質量放出を通じてダスト供給につながることを意味する⁸⁾。例えば激しい質量放出現象の代表である超新星爆発はダストの主要な供給源と考えられている⁹⁾。すなわち、活発な星形成は常に活発なダスト形成を伴う。

ダストのような微粒子は、粒子サイズ程度の波長の光子を吸収・散乱する。光子の吸収と散乱を総称して減光という。星形成が活発な銀河は、本来は大質量星からの紫外線が非常に強い「青い」スペクトルをもつはずだが、星形成とほぼ同じタイムスケールで生じるダスト形成によって、その紫外線は強く減光されて観測されることになる。では、ダストに減光された光子のエネルギーはどのようなのか？ 実は、ダストが吸収した分のエネルギーは赤外線で再放射される（図1）。星からの紫外線（および可視光）のスペクトルは減光を受けて「赤く」なり、赤外線、特に遠赤外線放射によるもう一つのエネルギーのピークが出現するのである。このようなスペクトルエネルギー分布は爆発的星形成銀河などに見られる。極端な例として、赤外線天文衛星 *IRAS* で発見された大光度赤外線銀河のように、全エネルギーの99%を赤外線で放射している銀河も存在している¹⁰⁾。

このように、直接見えている星形成は紫外線が、ダストで隠された星形成は赤外線が反映しているので、観測から信頼できる星形成率を求めるには、紫外線と赤外線それぞれから直接求めた星形成率を足し合わせる必要がある。ここで紫外線光度から星形成率への具体的な換算式を挙げよう。星形成率が1億年間定常値だったとし、Sal-

peter IMF¹¹⁾ (質量範囲は 0.1 から 100 太陽質量) を仮定すると, *GALEX* FUV バンド (1,500 Å) での光度 L_{FUV} ($=\nu L_\nu$ at 1,500 Å) と星形成率との関係は次のようになる¹²⁾.

$$\log L_{FUV} = 9.51 + \log \text{SFR} \quad (1)$$

ここで光度は太陽光度, 星形成率は太陽質量年⁻¹ で測っている. 赤外線の方も基本的には同じ手続きを通じて換算するが, いくつか注意すべき点がある. まず, 赤外線での換算公式はある波長における光度ではなく, ダスト放射を波長について積分した全ダスト光度 L_{TIR} について成立する (TIR は全赤外光度の意). 同じく星形成のタイムスケールが 1 億年, Salpeter IMF とすると, 銀河のダストすべてが星形成による紫外線放射で温められている場合には $\log L_{TIR} = 9.75 + \log \text{SFR}$ となる (単位は式 (1) と同じ). しかし, 実際の銀河ではダストのかなりの割合は現在の星形成と関係ない古い星によって温められているので, その分を補正する必要がある¹³⁾. この割合 η は 20% から 40% と見積もられており, 以下 30% を採用する. これを考慮すると, 最終的な換算式として

$$\begin{aligned} \log L_{TIR} &= 9.75 + \log(1 - \eta) + \log \text{SFR} \\ &= 9.60 + \log \text{SFR} \end{aligned} \quad (2)$$

が得られる.

2.3 紫外線・赤外線による銀河探査と天文衛星

本研究の主役である紫外線・赤外線とともに地球の大気を通過しないため, 大気圏外からの観測が必要である. 気球, ロケット観測なども精力的に行われているが, 系統的探査となると人工衛星による観測が有効である. *GALEX*^{*3)} は 2003 年に打ち上げられた天文衛星で, FUV (1,530 Å) および NUV (2,310 Å) の 2 バンドをもち¹⁴⁾, 近傍宇宙の全天探査と特定の領域の深探査, および紫外

線分光観測を目的としている. 現在は全天のかなりの部分の探査が終了し, データも公開されている. 一方, 赤外線では 1980 年代に *IRAS* が全天の 96% を探査し, 天文学に計り知れないインパクトを与えた. 赤外銀河の発見もその一つである. *IRAS* は 12, 25, 60, 100 μm で全天を探査し, 特に 60 μm が銀河や観測的宇宙論の研究で用いられている. 一方 2003 年打ち上げの *Spitzer* 宇宙望遠鏡^{*4)} は天文台タイプではあるが, かなり広い面積を探査する計画も行っている¹⁵⁾. そして現在はわが国の赤外線全天探査衛星 *AKARI*^{*5)} が稼働中であり, 結果に期待がかかっている. ここまで準備したところで, いよいよ次節から宇宙の星形成について見ていくことにしよう.

3. 宇宙年齢後半の星形成史

赤方偏移 1 から 0 は宇宙年齢でいうと約 70 億年前から現在に対応する. 前節で触れた高赤方偏移銀河とは違い, この時代の銀河の紫外線は赤方偏移が小さく, 観測者側でも紫外線で観測しなければならない. このため, 宇宙年齢の後半, 特に近傍宇宙における銀河の系統的な紫外線観測は, 現在 *GALEX* によって質・量ともに飛躍的に進展しつつある. 一方赤外線は *IRAS* による近傍銀河の系統的な理解の土台のうえに, *Spitzer* による高赤方偏移の新しい結果が続々と加えられている.

GALEX, *Spitzer* 以前から, 主に銀河計数を用いた研究によって紫外線 (可視光) に比べ赤外銀河の進化が非常に強いことが示唆されていた¹⁶⁾. すなわち, 宇宙の星形成は時代をさかのぼるにつれて急速にダストで隠されていくということになる¹⁷⁾. これは銀河の赤方偏移 (距離) を用いない間接的方法であるとはいえ, それでも興味深い結論といえた.

そこでわれわれはこの問題を直接検証するた

*3) 詳細は <http://www.galex.caltech.edu/> を参照.

*4) 詳細は <http://www.spitzer.caltech.edu/> を参照.

*5) 詳細は <http://www.ir.isas.ac.jp/ASTRO-F/index-j.html/> を参照.

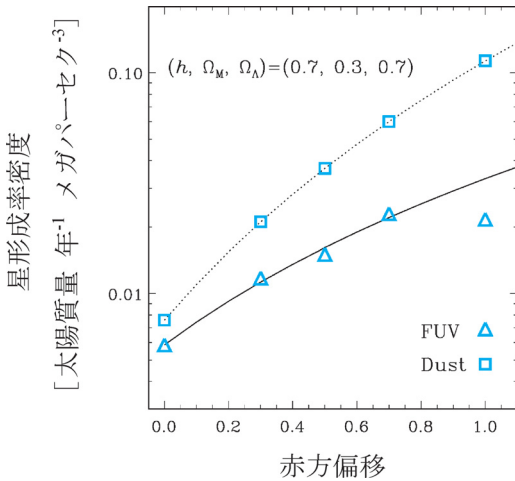


図2 紫外線・赤外線から求めた宇宙の星形成率の進化。三角が直接見えている星形成で、四角がダストで隠された星形成である。時代をさかのぼるにつれてダストで隠された星形成が圧倒的に大きくなるのがわかる。

め、*GALEX* による紫外線光度関数、*IRAS*、*Spitzer* による赤外線光度関数を用いて赤方偏移 0 から 1 までの星形成率の進化を直接求めた。つまり観測される紫外線・赤外線を用いて「直接見える星形成率、隠された星形成率」それぞれを算出したわけである¹⁸⁾。まず紫外線、赤外線それぞれの光度関数を求め、積分して紫外線、赤外線での光度密度を赤方偏移の関数として求めた。これに前節で述べた紫外線、赤外線光度と星形成率の関係を用いれば、紫外線で見えている星形成率、ダストで隠された星形成率に換算することができる。得られた結果は銀河計数による予想に違わないものであった。紫外線、赤外線どちらから求めた星形成率も赤方偏移 0 から 1 に向けて増大しているものの、隠された星形成率は直接見える星形成率に比べてはるかに急激に進化していたのである。近傍ではダストに隠れた星形成は半分程度だが、赤方偏移 1 では 80% 以上がダストで隠れている。また星形成の合計は、近傍から赤方偏移 1 までで 10 倍以上増大している。この紫外線・赤外線の比の急激な進化はどのようにして生じたのだろうか？

平均としては宇宙のダスト減光量は赤方偏移 0 から 1 に向けて増大しているが、それぞれの銀河ではいったい何が起きているのだろうか？ またこのような進化を担う銀河の種族は一体何であろうか？ これらの疑問を検証するためには、個々の銀河について 2 波長を同時に扱った解析を行わなくてはならない。次節からはこの多波長解析を見ていこう。

4. 近傍銀河の多波長解析

4.1 多波長銀河データベースの構築

最近は多くの大規模探査が行われるようになり、「多波長」という言葉も流行語の一つになった感がある。銀河（に限らずほぼすべての天文学的に興味深い対象）をいろいろな波長で観測することで、きわめて有機的な物理的描像が得られることも多い。しかし、銀河探査などで多波長データを扱う場合、事情はそう単純ではない。各波長によって解像度（ビームサイズ）も違えば検出限界も違い、これによって対象天体の平均距離（赤方偏移）、すなわちカバーしている宇宙の体積も大きく違ってくる¹⁹⁾。この複雑な選択効果を適切に考慮しないことには、物理量の分布や平均値すら正しく求められない。これまでに行われた研究でも、残念ながら天体選択の基準が研究目的に合致しているかどうか吟味しないまま議論を進めようとしているものが多く、かえって混乱を生じていたことは否めない。われわれはまずこの点を明らかにすることから始め、紫外・赤外でどのような銀河を見ているのか、それぞれがどの深さまで見えているのかをていねいに扱い、近傍銀河での星形成・ダスト減光の性質を統計的に探ってみよう²⁰⁾。

まず *GALEX* と *IRAS* の全天探査データから出発し、紫外線・赤外線セレクトの銀河データベースを構成した。紫外セレクトサンプルには赤外線フラックスを、赤外セレクトサンプルには紫外線フラックスをそれぞれ測定して対応づけ、近赤外

線や電波のデータも加えている。銀河の総数は紫外、赤外それぞれ約 600 個強となった。この紫外・赤外銀河サンプルは、個数としては大体同じであるものの、赤方偏移分布は紫外と赤外でだいぶ異なっている。これは、紫外線、赤外線での光度関数の形が大きく違うからである。紫外線の光度関数は、可視光のそれと同じ Schechter 関数と呼ばれる、大光度では指数的に数が減っていく形をしている²¹⁾。一方、赤外線は大光度の銀河が多く、べき乗に近い形になっている²²⁾。その結果、ある検出限界フラックス（ないし等級）よりも明るい銀河を選択するフラックスリミットサンプルでは、一般に赤外セレクトの銀河のほうが平均赤方偏移も高く、高赤方偏移に非常に長いテールを引く分布になっている。この効果はフラックス分布に直接反映され、平均値の推定などに強く影響するため、物理量の比較のためには適切な統計的重みづけをしなければならない。

4.2 紫外銀河と赤外銀河：同じ種族を見ているか？

さて、2 節では紫外線と赤外線は星形成活動の二つの異なった側面、いわば光と影を見ていることをみた。では、このようにして構成した紫外、赤外銀河サンプルはそれぞれの波長で同じ銀河を見ているのだろうか、それとも紫外線か赤外線のどちらかでしか見えない銀河が多数存在しているのだろうか？ このことを検証する一つの手段として、大質量星に起因する光度、すなわち現在の星形成率を反映した光度（全星形成光度）に着目し、全星形成光度による銀河の光度関数を見ることが考えられる。

全紫外線光度は 1,200 Å から 3,600 Å までの銀河の紫外スペクトルの積分であるが、これは 2 節で用いた GALEX の FUV での光度 L_{FUV} でほぼ代表できる。全赤外線光度 L_{TIR} については、IRAS の 60 μm および 100 μm フラックスを用いて求めた²³⁾。全星形成光度を L_{SF} とすると、再び星形成と関係ない古い星の寄与 $\eta=0.3$ を補正して

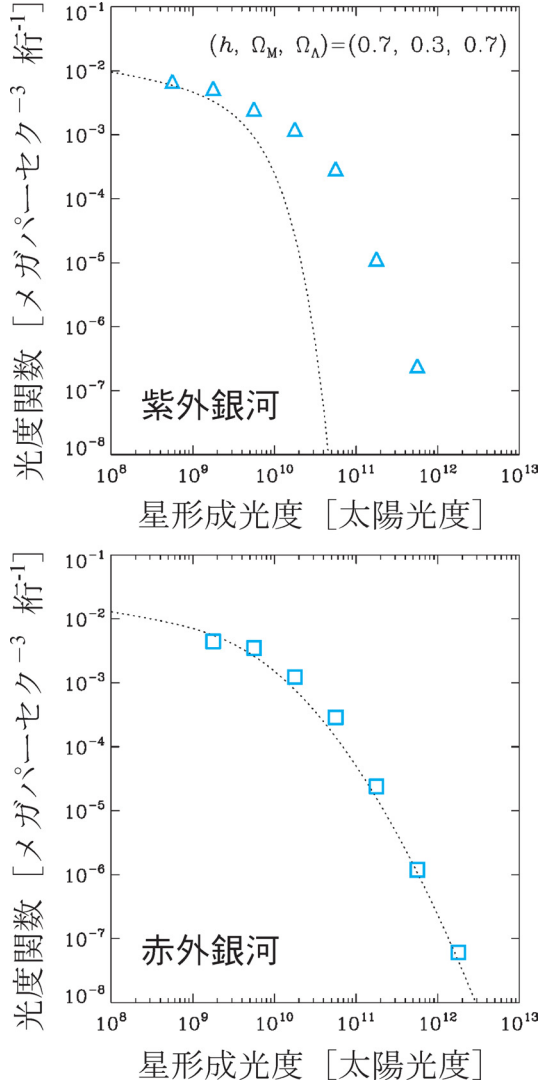


図 3 紫外・赤外線銀河の星形成光度関数。上：紫外銀河の星形成光度関数（三角）。点線は紫外銀河の紫外単波長光度関数で、大光度ほど星形成光度関数との差が大きくなっている。下：赤外銀河の星形成光度関数（四角）。点線は上と同様、赤外銀河の赤外単波長光度関数である。紫外銀河と対照的に、広い光度にわたって両者はよく似ている。また、紫外銀河と赤外銀河の星形成光度関数はお互いによく一致している。

$$L_{SF} = L_{FUV} + (1 - \eta)L_{TIR} \quad (3)$$

と表される。これを用いて、紫外、赤外サンプルそれぞれについて星形成光度関数を求めた (図 3)。その結果、紫外線サンプルの星形成光度関数は紫外線光度関数と大きく異なっており、特に大光度の銀河では星形成は紫外線にほとんど反映されないことがわかった。紫外線が星形成のよい指標となるのは星形成光度が 3×10^9 太陽光度より小さい銀河に対してのみである。これに対し、赤外サンプルのほうは赤外線光度関数とよく似ており、全光度にわたって赤外線が星形成のよい指標であることを示している。またこれら二つの星形成光度関数はほぼ一致している。このことは、近傍宇宙では紫外線と赤外線で見えた銀河が基本的には同一種族であることを示唆している。

4.3 ダスト減光

繰り返しになるが、星形成活動はダスト形成を伴う。このことから、ダスト減光量は星形成活動性の関数となっていることが期待される。紫外線と赤外線の比 L_{TIR}/L_{FUV} は、観測的なダスト減光量の指標となることが知られている²⁴⁾。そもそも物理的には単にエネルギー保存の一つの表現であるため、 L_{TIR}/L_{FUV} はダストの幾何学的分布にも減光曲線にもあまり依存しないロバストな指標である^{25), 26)}。あとはわれわれのデータから L_{TIR}/L_{FUV} と星形成光度の関係を検証すればよい。ところが、ここでサンプルの選択効果が重要になってくる。赤外サンプルには紫外サンプルよりもずっと遠い (すなわち大光度の) 銀河が含まれており、うかつに単純平均を取ると到達している宇宙の体積がはるかに大きい大光度の銀河に平均値が強く引っ張られ、意味のある結果にならない。本来数が少ないはずの大光度銀河が、検出限界のせいで偏って抽出されているのである。そこで、銀河の光度関数で用いられる最大到達体積 V_{max} を導入する。これは、検出限界と銀河の光度が与えられたとき、その銀河が検出できる最大の距離を半径

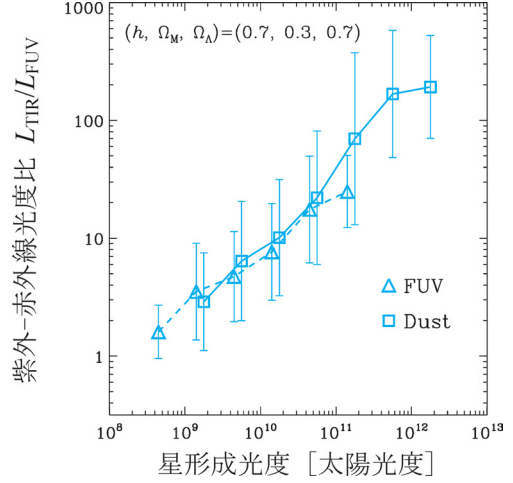


図 4 星形成活動とダスト減光量の関係。縦軸は紫外線と赤外線光度の比で、銀河のダスト減光量を表す指標である。三角が紫外線セレクト銀河、四角が赤外線セレクトの銀河から求めた関係で、互いによく一致している。誤差棒はサンプルの分散を示している。

とする体積のことである²⁷⁾。すると、考えている量に V_{max} の逆数で重みをつけて平均すれば、上で述べた体積の効果を打ち消すことができる。ここで $R = \log(L_{TIR}/L_{FUV})$ とおくと、求める平均値と分散はそれぞれ

$$\langle R(L_{SF}) \rangle = \frac{\sum_i w_i R_i}{\sum_i w_i} \quad (5)$$

$$\sigma^2(L_{SF}) = \frac{\sum_i w_i (R_i - \langle R(L_{SF}) \rangle)^2}{\sum_i w_i} \quad (6)$$

で与えられる。ここで重み w_i は $w_i = 1/V_{max,i}$ である。ラベル i は i 番目の銀河を現している。このようにして得られた星形成光度と減光の関係が図 4 である。近似的には

$$\log(L_{TIR}/L_{FUV}) = 0.64 \log L_{SF} - 5.5 \quad (7)$$

と表される。この結果は、銀河の星形成が活発であるほどダスト減光が強くなることを意味しており、2 節での議論を定量的に示したものになっている。紫外および赤外サンプルから求めた関係がほぼ同じ線に乗っていることは興味深い。つま

り、もしも仮に星形成とダスト減光の間の関係が常に不変であったとしても、星形成が活発になればダスト減光が増大し、赤外線での放射の割合が急激に増加することを意味している。この性質についてはまた後でもう一度触れる。

4.4 紫外・赤外で見た星形成のダウンサイジング

いよいよ銀河の星形成史について見てみよう。さて、今われわれは近傍銀河のサンプルを扱っているにもかかわらず、どうして星形成「史」を語ることができるのかを疑問に思う方もいらっしゃるであろう。いかにして近傍銀河の観測量から星形成史の情報を引き出すのか？ われわれの多波長解析でこの問題に迫ってみよう。

銀河の総星質量 M_{\star} で規格化した星形成率、つまり単位星質量あたりの星形成率のことを特性星形成率 (specific star formation rate; SSFR) と呼ぶ。

$$\text{SSFR} = \frac{\text{SFR}}{M_{\star}} \quad (8)$$

特性星形成率は、銀河が生まれてからこれまでに作ってきた星質量に対する、現在作っている星質量の比となっている (単位は年⁻¹)。つまり特性星形成率とは、過去の星形成と現在の星形成のどちらが活発であったかを示しており、銀河の星形成史を反映する重要な物理量である。

さて最近 10 年ほど、宇宙年齢後半の銀河進化においてダウンサイジングという現象が注目されている。ダウンサイジングとは、全星質量の大きな銀河ほど早い時期に星形成を停止していき、星質量の小さな銀河は現在でも星形成が継続しているという現象である²⁸⁾。これは、遠方 (赤方偏移 1 くらいまで) では星質量の大きな巨大銀河も大きな特性星形成率をもっているが、現在に近づくにつれて大きなものから順に特性星形成率が落ちて

いくことに対応する。そして近傍 (赤方偏移 0) では、銀河の特性星形成率は星質量の大きな銀河ほど小さくなっている²⁹⁾。

最近の可視深宇宙探査のめざましい進展により、ダウンサイジングについて多くの研究結果が発表されるようになってきている。これらの結果を比較してみると、定性的な傾向は上のようにまとめられるものの、定量的にはお互いにあまり一致しておらず、特性星形成率で 1 桁以上の範囲にわたるさまざまな値が報告されている。この原因の一つとして、星形成の指標に適切でないものを用いている可能性がある。そこで、われわれの多波長銀河サンプルでダウンサイジングがどのように現れるかを検証した。これまで見てきたように、銀河の全星形成率の偏りのない評価は

$$\text{SFR}_{\text{tot}} = \text{SFR}(\text{FUV}) + \text{SFR}(\text{TIR}) \quad (10)$$

とすることで得られる。ここで SFR_{tot} は全星形成率、 $\text{SFR}(\text{FUV})$ は観測された FUV から求めた星形成率を表し、 $\text{SFR}(\text{TIR})$ は全ダスト光度から求めた星形成率で、現在の星形成率と関係ない古い星からの寄与 η の分を補正した量である。

では、星の総質量はどのように求めればよいだろうか？ 現在の銀河では IMF は小質量星側が高くなったべき乗に近い形をしている。これは、小質量星のほうが大質量星より数のうえではるかに多く形成されることを意味しており、実際に質量への寄与は小質量星が支配的である。つまり、小質量星を観測すれば質量を測ることができる。小質量星は寿命が長く、大雑把には形成時から現在まで生き延びていると考えてよい⁶⁾。こういった星は低温で、スペクトルのピークが近赤外線にくるので、近赤外光度を観測すればこれまでに形成した小質量星の積算質量を求めることができる。われわれの研究では 2MASS^{*7)} の H バンドデータ

*6 厳密には光度の上で支配的になるのは赤色巨星なので、現在寿命の終わりを迎えている星の種族を見ているのだが、ここでは基本的な考え方を説明するにとどめた。

*7 The Two Micron All Sky Survey. 詳細は <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/> を参照。

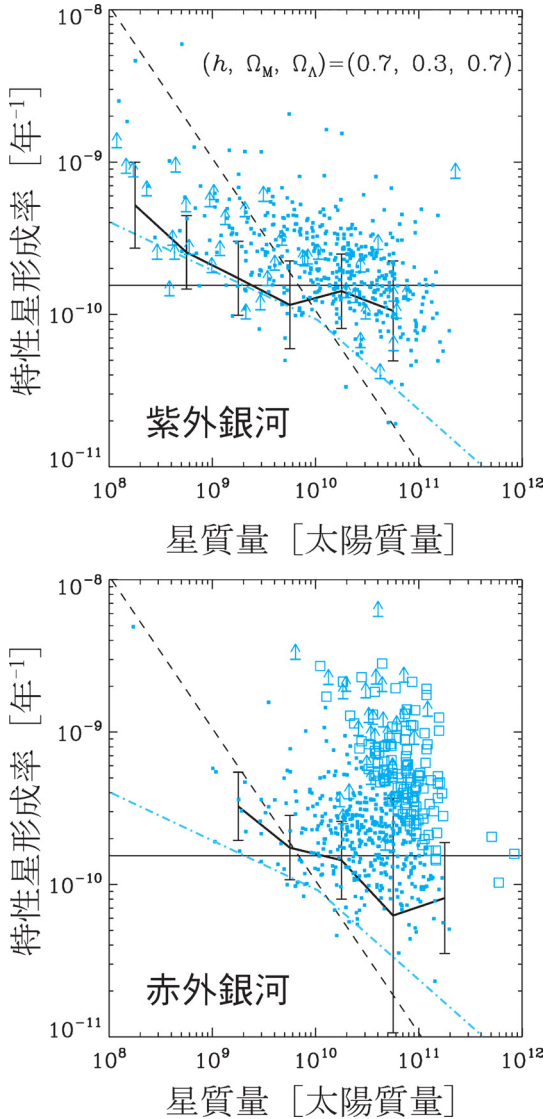


図5 紫外・赤外銀河の特性星形成率（上：紫外銀河，下：赤外銀河）。折れ線は重みづけ平均である。水平の線は星形成率が時間的に一定の場合を表し、斜めの破線は星形成率が年間1太陽質量である場合を示している。一点破線はSDSSによる可視光セレクト銀河の特性星形成率である。赤外銀河のパネルで白抜き四角は大光度赤外銀河を表している。

を用い、観測から求めた平均星質量- H バンド光度比 $M_{\star}/L_H=0.57$ を用いて星質量を求めた³⁰⁾。

あとは特性星形成率をデータベースから構築するだけ、となれば簡単なのだが、ここで再び紫外線、赤外線サンプル間での体積の違いが問題となる。特性星形成率についてもダスト減光のときに用いたのと同じ処方

$$\langle \text{SSFR} \rangle \equiv \frac{\sum_i w_i \text{SSFR}_i}{\sum w_i} \quad (11)$$

で平均的傾向を計算しなくてはならない。重み w_i は前節のものと同じである。分散も減光のときと同様に見積もることができる。

この結果を図5に示す。全体として、紫外でも赤外でも平均の特性星形成率は一般的なダウンサイジング傾向、例えば Brinchmann ら²⁹⁾のスローンデジタルスカイサーベイ (SDSS^{*8)}を基にした可視光セレクトサンプルの結果（図中の一点破線）と分散の範囲で一致している。紫外サンプルに比べ、赤外サンプルは特性星形成率が少し高く出ており、また大質量での分散が非常に大きい。そして、 V_{\max} による重みづけのため平均には効いてこないものの、ダウンサイジングの平均的傾向よりも1桁以上活発な星形成活動を示す銀河が少なからず存在している。これらは L_{TIR} が 10^{11} 太陽光度を超える、大光度赤外銀河と呼ばれる種族である。その意味するところはまだ明らかではないが、これらの銀河は $z=0.7$ の紫外セレクトの平均的銀河と同じくらい活発である³¹⁾ことから、例えば銀河が進化の過程で大光度赤外銀河の段階を経験して現在に至った、その名残であるという仮説も立てられよう。大光度赤外銀河でいられる時間は銀河進化の時間スケールに比べ非常に短いので、このように一気に星形成活動を高めた銀河は、その後急速に星形成を停止するはずである。どのくらいの割合の銀河がこのような現象を経験するのかは興味深い問題であり、われわれはこれ

*8 詳しくは <http://www.sdss.org/> を参照。

を検証すべく、今より遠方の銀河で同様の解析を行っている。次節ではその初期成果の一部を紹介する。

5. より遠くへ：赤方偏移 0.7 での多波長解析

近傍サンプルの赤外銀河で見られた奇妙に活発な銀河が銀河進化の文脈でどのような位置づけにあるのかを検証するには、同様の解析をより遠方で行うのが最も直接的である。このためわれわれは、Chandra Deep Field South (CDFGS) の多波長観測データを用いてこの問題に取り組んでいる。CDFGS は GALEX および Spitzer MIPS 24 μm で観測されており、われわれは近傍銀河と同様にして紫外・赤外を基本とする多波長データを構築した。赤方偏移は主に COMBO-17 プロジェクト²²⁾の測光的赤方偏移を用いた。本稿ではすでに論文として公表されている赤外サンプルの減光についての結果³³⁾を中心に初期成果を紹介する。

われわれはまず、MIPS データから赤外銀河をセレクトした。CDFGS-GOODS では、24 μm での検出限界は 83 μJy である³⁴⁾。それぞれについて GALEX の深探査 (DIS: 積分時間 76 キロ秒) データから紫外のフラックスを測定した。紫外の検出限界は NUV で 26.2 等である。このデータから、特にコンプリートネスの高い大光度赤外銀河について近傍銀河のときと同様にして全星形成光度 L_{SF} と $L_{\text{TIR}}/L_{\text{FUV}}$ との関係性を求めた。その結果、われわれはこれら赤方偏移 0.7 の赤外銀河のダスト減光-星形成光度関係が、近傍銀河のそれとほぼ同じであることを発見した。この時代の赤外銀河は、星形成光度を固定したときの減光が近傍銀河に比べ平均値でわずかに小さいものの、目立った変化はしていない。これは Xu らによる赤方偏移 0.6 での研究³⁵⁾や、Choi らによる赤方偏移 0.8 の近赤外、中間赤外セレクトの銀河を用いた類似の研究³⁶⁾とも整合的である。つまり、宇宙年齢が現在の半分程度の時期から、星形成活動とダスト減

光の関係は変わっていないといえる。

ところで、3 節において、宇宙の体積あたりの光度密度は紫外線よりも赤外線のほうがはるかに速く進化していることを見た。全体として宇宙のダスト減光は急激に増大しており、赤方偏移 0 から 0.7 でこの比は 2 倍強になる。しかし $L_{\text{SF}}-L_{\text{TIR}}/L_{\text{FUV}}$ 関係で見ると、減光はほんのわずかながら小さくなっている。果たしてこれらの結果は整合的なのだろうか？ これを理解するため、やや大雑把な解析を試みよう。われわれはいま大光度赤外銀河を考えているので、全星形成光度 L_{SF} はほぼ全ダスト光度 L_{TIR} と等しいと考えてよい。このことと式 (7) とから、近似式

$$L_{\text{TIR}}/L_{\text{FUV}} \propto L_{\text{TIR}}^{0.6} \quad (12)$$

が得られる。Le Flocc'h ら²⁵⁾は、全ダスト光度関数の進化がほぼ光度のみの進化 (pure luminosity evolution) とみなせ、 $(1+z)^{3.2}$ に比例して進化することを発見した。すると、式 (12) から、ダスト減光の進化は

$$L_{\text{TIR}}/L_{\text{FUV}} \propto (1+z)^{1.9} \quad (13)$$

と書き表せる。すると、近傍での $L_{\text{SF}}-L_{\text{TIR}}/L_{\text{FUV}}$ 関係がそのまま赤方偏移 1 まで正しいとするなら、典型的な赤外銀河の紫外赤外光度比は約 3 倍増大するはずである。これと、宇宙の体積で平均した比の増加が 2 倍強だったことを考え合わせると、個々の銀河の減光は近傍での関係に比べて少し減少していることになり、実はすべて整合的であることがわかる。つまり、宇宙の平均的減光の増大は、赤方偏移をさかのぼると銀河の星形成活動が高くなるという、宇宙年齢後半の星形成史の帰結である。

では、さらに高赤方偏移までさかのぼるとどうなっていくのだろうか。赤方偏移 1 以上では、今のところ先行研究が紫外セレクトのみであるため、われわれの赤外銀河の結果と直接比較することはできないが、ここで紹介する意味はあるであ

ろう。Burgarella ら³⁷⁾は、GALEX の FUV, NUV バンドを用いれば、赤方偏移 1 の星形成銀河のライマンブレイクを捕らえることができることを発見した。これは、高赤方偏移銀河を効率よく検出するためのライマンブレイクの方法³⁸⁾と軌を一にするアイデアである。この方法でセレクトした紫外銀河サンプルは、赤方偏移 0 および 0.7 のサンプルよりもかなり低い減光を示した。光度が 10^{11} から 10^{12} 太陽光度の間で特に不一致が著しい。さらに、Reddy ら³⁹⁾は赤方偏移 2 の紫外セレクト銀河サンプルを用いて同様の研究を行い、ダスト減光が Burgarella らと同じか、さらに低くなっていることを発見した。興味深いことに、 10^{12} 太陽光度より明るい超大光度銀河では、Burgarella らや Reddy らの銀河サンプルもすべて赤方偏移 0 や 0.7 の傾向に収斂していくように見える。つまり、彼らのサンプルの示す $L_{\text{SF}}-L_{\text{TIR}}/L_{\text{FUV}}$ 関係はより近傍の銀河のもの比べて非常に急な傾きをもっているわけである。これは物理的な現象なのか、それともサンプルの取り方の違いのためなのか結論するためには、さらなる追及が必要である。

この高赤方偏移サンプルでの紫外・赤外 2 波長光度関数の解析はまだ開始したばかりであるが、興味深い傾向が見えてきつつあるのでここで述べておきたい。前節でみたように、近傍銀河の星形成光度関数は紫外・赤外ともにほぼ同一であり、同じ銀河を 2 波長で観測していると考えたのもっともらしい。ところが、赤方偏移 0.7 で紫外セレクト銀河の赤外線光度密度への寄与を見積もると、赤外セレクト銀河のそれに遠く及ばない⁴⁰⁾。つまり、この時代には赤外線で見えない銀河で、現在に至るまでに性質を急激に変え、近傍では他のタイプの銀河となっている種族が存在するはずなのである。おそらくこの種族が宇宙の隠れた星形成の急激な進化の担い手であり、赤方偏移 1 の時代の星形成の主役であると想像される。さらに解析を進めていきたい。

6. まとめと展望、残された謎

本稿では紫外線・赤外線データを中心にした多波長解析によって、宇宙の星形成史の主役を明らかにする研究を紹介した。最後に現状をまとめておこう。

宇宙年齢後半、赤方偏移 1 から 0 の星形成史はその急激な減衰が特徴である。赤方偏移 1 では星形成率は近傍宇宙の 10 倍以上に達している。まず紫外線、赤外線それぞれの光度関数進化から、どちらの波長でも強い進化が見られるものの、特に赤外線での銀河の進化は非常に急激であることを見た。紫外線、赤外線はそれぞれ直接観測できる星形成とダストで隠された星形成を反映しているので、これは赤方偏移をさかのぼると隠れた星形成の割合が増大していくことを示している。実際に赤方偏移 1 の宇宙では 80% 以上の星形成がダストで隠されていた。この全体的傾向に対し、個々の銀河がどう寄与するかを明らかにするには、多波長による同時解析が必要となる。紫外・赤外 2 波長光度関数を用いることによって、近傍宇宙では同じ銀河の星形成をそれぞれの波長で観測していることが示唆された。これに対し、赤方偏移 0.7 では赤外線で見えない種族が主役であり、おそらくこれらが隠れた星形成の割合の急激な進化を担っている。星形成活動とダスト減光量の関係は赤方偏移が 0 から 1 までの間では大きく変化することはなく、星形成が活発になることがダスト減光の増大を生じさせる原因である。

ところが、赤方偏移 1 を境にこの描像は急変するかに見える。大光度銀河 (10^{11} – 10^{12} 太陽光度) の銀河は急激に減光が小さくなり、“晴れ上がった” いくのに対し、 10^{12} 太陽光度以上の光度の銀河には大きな変化はない。これは $L_{\text{SF}}-L_{\text{TIR}}/L_{\text{FUV}}$ 関係の傾きの急激な変化を示唆しており、現在の解析では見えていない 10^{11} 太陽光度以下の銀河の減光も減少していると予想される。その意味するところは、赤方偏移 1 以上の宇宙では、銀河は

減光がきわめて小さいものときわめて大きいもの
 とに二極化していくということである。もしもこ
 れが本当だとすると、この時代に多く観測される
 サブミリ銀河⁴¹⁾との関係が非常に興味深い。ま
 た、二極化を生じさせるクリティカルな物理は何
 なのかも解明せねばならない。これには星だけ
 でなく、分子ガス質量で規格化した星形成率、い
 わゆる星形成能率 (star formation efficiency) につ
 いて追求するのも面白いであろう。

汎赤方偏移的な宇宙の星形成史像を構築するた
 めには、近傍から遠方までの整合的な観測デー
 タがそろふ必要がある。赤方偏移 0 から 1 つまり宇
 宙年齢の後半には *Spitzer* や *AKARI*, および
GALEX 深探査のデータが重要な役割を果たす。
 さらに遠方、宇宙年齢の前半の探求は *ASTE*,
ALMA と地上大望遠鏡、あるいは *JWST* のデー
 タによって飛躍的に進むと期待できる。次の時代
 はもうすぐそこまできている。

謝 辞

本稿で紹介した結果は、筆者のマルセイユ天体
 物理学研究所滞在中から現在に至る、同研究所の
 Veronique Buat 氏, Denis Burgarella 氏, Alessan
 dro Boselli 氏, アンダルシア天文学研究所の
 Jorge Iglesias-Páramo 氏らとの共同研究によっ
 て得られたものである。平下博之氏, 野沢貴也氏,
 石井貴子氏, 井上昭雄氏, Agnieszka Pollo 氏,
 Marcin Sawicki 氏との議論は常に筆者の研究の
 原動力となっている。この場を借りて各氏に深く
 感謝する。村上紀子氏, 松本有加氏, 平下博之氏
 にはきわめて多忙な中原稿を査読していただき、
 丁寧なコメントをいただいた。心よりお礼申し上
 げる。本研究は日本学術振興会(海外特別研究員)
 (2004, 2005 年度), 東北大学 21 世紀 COE プログ
 ラム「物質階層融合科学の構築」(2005, 2006 年
 度), および文部科学省科学技術振興調整費若手

研究者の自立的な研究環境整備促進名古屋大学高等
 研究院研究者育成特別プログラム(2006 年度から
 現在)の援助を受けて進めている。本稿の執筆を
 お勧めいただいた国立天文台の今西昌俊氏にはた
 いへん感謝するとともに、入稿が予定よりも大幅
 に遅れてしまったことについて心よりお詫びする
 次第である。

参 考 文 献

- 1) 例えば Panter B., et al., 2003, MNRAS 343, 1145
- 2) Tinsley B., Danly L., 1980, ApJ 242, 435
- 3) 例えば Bouwens R., et al., 2006, ApJ 653, 53; Hop
 kins A. M., Beacom J. F., 2006, —, 142, 651
- 4) Lilly S., et al., 1996, ApJ 460, L1
- 5) Madau P., et al., 1996, MNRAS 183, 1388; Madau
 P., et al., 1998, ApJ 498, 106
- 6) 例えば Bell E., et al., 2005, ApJ 625, 23
- 7) Kennicutt R. C., Jr., 1998, ARA&A 36, 189
- 8) 例えば Dwek E., Scalo J. M., 1980, ApJ 239, 193;
 Dwek E., 1998, ApJ 501, 643
- 9) 例えば Kozasa T., et al., 1989, ApJ 344, 325; Nozawa
 T., et al., 2003, ApJ 598, 785
- 10) 例えば Sanders D. B., Mirabel I. F., 1996, ARA&A
 34, 749
- 11) Salpeter E. E., 1955, ApJ 121, 161
- 12) Leitherer C., et al., 1999, ApJS 123, 3
- 13) Buat V., Xu C., 1996, A&A 306, 61; Hirashita H., et
 al., 2003, A&A 410, 83; Iglesias-Páramo J., et al.,
 2006, ApJS 164, 38
- 14) Morrissey P., et al., 2005, ApJ 619, L7
- 15) 例えば SWIRE: Lonsdale C., et al., 2003, PASP 115,
 897; S-COSMOS: Sanders D., et al., 2007, ApJS, in
 press (astro-ph/0701318)
- 16) Takeuchi T. T., et al., 2001, PASJ 53, 37; Chary R.
 R., Elbaz, D., 2001, ApJ 556, 562; 日本語での解説は
 例えば、竹内 努, 2001, 天文月報 94, 487
- 17) Takeuchi T. T., et al., 2001, in *Birth and Evolution of
 the Universe*, eds. K. Sato & M. Kawasaki, 421
- 18) Takeuchi T. T., et al., 2005, A&A 440, L17
- 19) Iglesias-Páramo J., et al., 2006, ApJS 164, 38 の
 Appendix A において詳しく説明した*9。
- 20) Buat V., Takeuchi, T. T., et al., 2006, ApJS, in press
 (astro-ph/0609738)

*9 最初の式 A1 に重大な誤植があるが、以降の式には影響していない。

- 21) Wyder T. K., 2005, ApJ 619, L15
 22) Saunders W., et al., 2000, MNRAS 317, 55
 23) Dale D. A., et al., 2001, ApJ 549, 215
 24) Buat V., Xu C., 1996, A&A 306, 61; Buat V., et al., 2005, ApJ 619, L51
 25) Gordon K. D., et al., 2000, ApJ 533, 236
 26) Inoue A. K., et al., 2006, MNRAS 370, 380
 27) Takeuchi T. T., Yoshikawa K., Ishii T. T., 2000, ApJS 129, 1
 28) Cowie L. L., et al., 1996, AJ 112, 839; Boselli A., et al., 2001, AJ 121, 753; Feulner G., et al., 2005, ApJ 633, L9; Bundy K., et al., 2006, ApJ 651, 120 など。特に Bundy の論文は詳しく、よくまとまっている。
 29) Brinchmann J., et al., 2004, MNRAS 351, 1151
 30) Bell E. F., De Jong R. S. 2001, ApJ 550, 212
 31) Bell E. F., et al., 2005, ApJ 625, 23
 32) Wolf C., et al., 2004, A&A 421, 913
 33) Buat V., et al., 2007, A&A 469, 19
 34) Le Flocc'h E., et al., 2005, ApJ 632, 169
 35) Xu C. K., et al., 2006, ApJS in press (astro-ph/0701737)
 36) Choi P. I., et al., 2006, ApJ 637, 242
 37) Burgarella D., et al., 2006, A&A 450, 69
 38) 例えば Giavalisco M., 2002, ARA&A 40, 579
 39) Reddy N., et al., 2005, ApJ 633, 748
 40) Takeuchi T. T., Buat V., Burgarella D., 2006, in *At the Edge of the Universe: Latest results from the deepest astronomical surveys*, in press (astro-ph/0611796)
 41) Chapman S. C., et al., 2005, ApJ 622, 772

Exploration of Star Formation and Evolution of Galaxies with Ultraviolet and Infrared

Tsutomu T. TAKEUCHI

Institute for Advanced Research, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Abstract: Since an active star formation is always accompanied by a production of dust, we can estimate a star formation rate unbiasedly only by making use of UV and IR radiation from galaxies at the same time. The advent of a UV all-sky surveyor *GALEX* dramatically advanced a systematic observation of galaxies in UV, and now the combination of *GALEX* data with *IRAS* and *Spitzer* enables us to estimate the correct star formation rates of galaxies. Here we show our research on the star formation and dust extinction of galaxies in the Universe from *GALEX*, *IRAS*, and *Spitzer*.