

見えてきた楕円銀河の幼年期

高木 俊 暢

〈宇宙科学研究所 赤外線天体物理学部門 〒229-8501 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉
e-mail: takagi@ir.isas.ac.jp

近年、サブミリ波帯で発見された遠方の星生成銀河では、近傍では類例がないような勢いで星がつくられている（1年で千太陽質量程度）。このような激しい星生成活動は、楕円銀河の形成期に予測されていたものに匹敵する。果たして、これらサブミリ波銀河はそのまま楕円銀河へと進化するのだろうか？

1. いま、サブミリ波が熱い！

楕円銀河は現在、星間ガスがほとんどなく、古い星だけの集団である。これらの星はすべて、たった一度だけの爆発的な星生成で作られたのだろうか？もしそうなら、形成期の楕円銀河は宇宙でもっともド派手な銀河に違いない・・・

1998年7月16日号のNatureに、非常に印象的な論文が2編掲載された^{1), 2)}。どちらの論文にも、サブミリ波という聴き慣れない波長帯でサーベイ観測をした結果が報告されていた。サーベイした領域こそ違おうが、どちらもSCUBA (Submillimeter Common-User Bolometer Array) というサブミリ波アレイ検出器を用いて直径3'ほどの領域を観測し、850 μ m帯で見事に天体の検出に成功したのである(このサブミリ波天体発見までの詳しい物語は、谷口氏が当事者の一人として天文月報で紹介されている³⁾)。

SCUBAが検出したサブミリ波は、赤方偏移した星生成銀河からの遠赤外線放射だと考えられている。ダストは、生まれたばかりの大質量星が放つ紫外線を主に吸収し、吸収したエネルギーを赤外線として再放射する。爆発的な星生成が起きている銀河の中には、遠赤外線以最も明るく輝いているものもある。サブミリ波帯では、銀河の赤方偏移が大きいほど、遠赤外線にあるダスト放射のピ

ークに近い波長帯の光を観測することになるので(負のK補正効果)、サブミリ波で観測した場合、他の波長で観測するよりも、遠方の星生成銀河が検出されやすいという特徴がある。

このサブミリ波天体の正体については、当初意見が割れた。というのも、このサブミリ波天体付近をハッブル宇宙望遠鏡のような高角分解能で観測すると、SCUBAの位置決定精度の範囲内に、複数個の銀河が見つかり、どれが強いサブミリ波を出しているのか、なかなか特定できなかったからである。それらの銀河は、もちろん比較的近傍のものから高赤方偏移の銀河まで様々なものがある。

SCUBAによるサーベイ観測の結果が発表された当時、自信を持ってサブミリ波銀河を同定できる人は誰もいなかった。中には、これらのサブミリ波銀河は比較的近傍(赤方偏移 $z \sim 0.5$ 付近)にあり、渦巻銀河に毛が生えたような活動性をもつ銀河にすぎないという人もいれば、これこそ長年探し求められてきた高赤方偏移にある原始銀河だと主張する人もいた。Nature論文の著者たちは、よりセンセーショナルな後者の立場だったことは言うまでもない。

現在、信頼されているサブミリ波銀河の同定方法は、電波観測に頼るものである。爆発的な星生成が起きている銀河(starburst galaxy; 以下、星生成銀河)では、大量の超新残骸が生じるため、赤外線同様、電波でも明るくなる。サブミリ波望遠

鏡よりも空間分解能が高いイメージを電波で撮り、検出された電波源である銀河をサブミリ波源と同定する⁴⁾。また、その銀河が力学的擾乱を示すような形態をしているかどうかといった情報も考慮することによって、銀河同定の信頼性向上が図られている。

電波観測は、銀河の同定だけでなく、赤方偏移の推定にも使われている。星生成銀河は、遠赤外線から電波にかけて、どれも似たようなスペクトルを持つので⁴⁾、観測されたサブミリ波と電波のフラックス比と、近傍の星生成銀河のスペクトルから予測される比を比較し、赤方偏移を制限する。これまでのサブミリ波サーベイ観測で発見された天体の赤方偏移は、多くの場合この方法で求められている。その結果、サブミリ波源の85-90%が、 $z > 2$ の星生成銀河であることが示されている⁵⁾。もちろんこれらのサブミリ波銀河の中には、可視光での分光観測によって、高赤方偏移にある銀河であることが確かめられているものもある。

つまり、これらのサブミリ波源は、高赤方偏移にある爆発的な活動性を持つ星生成銀河であることが、次第に確実になってきた。その星生成率は、1年あたり千太陽質量に達しているものもある。これは、近傍で最も激しく星生成が起きている銀河である超光度赤外線銀河（赤外線光度が 10^{12} 太陽光度以上の銀河）の星生成率に比べても有意に高く、1億年もすれば立派な銀河をつくることのできるほどである。

楕円銀河が一度だけの爆発的星生成で形成したとすると、その星生成率は1年あたり千太陽質量程度であった計算になる。つまり、サブミリ波銀河は、まさに楕円銀河が、たった一度の爆発的星生成で形成している最中の姿であるかもしれないのだ！

果たして、サブミリ波銀河はそのまま楕円銀河へと進化するのだろうか？ 標準的な宇宙の構造形成モデルである低温暗黒物質モデル（CDM; Cold Dark Matter Model）によると、立派な銀河は現在までに衝突・合体を繰り返して進化するのがもっともらしい。つまり、高赤方偏移のサブミリ波銀河も、現在の銀河の一部分にしかすぎないという可能性もある。

この問題を解く鍵となるのが、明るい楕円銀河ほど色が赤いという、色・等級関係である。明るい楕円銀河の色が赤い原因には、1) 星に含まれている重元素量が多い、または、2) より古い星が多い、の2つが挙げられ、両者とも色・等級関係の原因となりうる。近傍と遠方の銀河団内の楕円銀河の色・等級関係を比較した結果、この関係の主要因は、重元素量の違いであることが明らかになった^{6), 6)}。

サブミリ波銀河が、楕円銀河にそのまま進化するならば、進行中の星生成期間中に、楕円銀河の色・等級関係に見合うだけの量の、星と重元素がつくられるはずである。この解析をするためには、楕円銀河の星生成期から、星が死んでいくだけの静的進化期までを扱うことのできる銀河モデルが必要である。私たちは、星生成銀河のスペクトル・エネルギー分布（SED）モデルを構築したので、このモデルを第2章で紹介したい。さらに、第3章でこのモデルをサブミリ波銀河に適用した結果を報告する。まとめと今後の課題を第4章で述べる。

2. 星生成銀河モデル

サブミリ波銀河の素性を調べる上で、星生成銀河のSEDモデルは、基本的かつ強力な道具となる。私たちは、星生成銀河内のある星・ダストの分布

a) 遠赤外線は大質量星からの紫外線が再放射されたもので、一方、電波は大質量星が超新星爆発した結果放射される。両者の光度は、ともに大質量星の生成率に依存するので、星生成銀河のこの波長域のスペクトルはよく似たものとなる。

b) 楕円銀河では、若い星の割合が高いほど色の変化率が大きくなる。そのため、色・等級関係の原因が銀河の年齢である場合、青く暗い銀河ほど大きく色が変わるはずである。遠方銀河団の観測結果によって、この可能性は否定された。

について、輻射輸送方程式を解き、近傍の星生成銀河の紫外-サブミリ波の SED を再現することに成功した。

星生成銀河の SED を再現するアプローチは、輻射方程式を解くか否かで大きく2つに分かれる。輻射方程式を解かない場合、近傍銀河の観測結果から得られた経験則を用いて、SED を決定する。具体的には、赤外線光度とダスト放射の SED の経験則を使う。紫外-近赤外線の SED は、星とダストを一様分布、または星の前にダストの壁をつくるようなスラブ近似といった簡単な星・ダスト分布で求める場合が多い。この種の SED モデルでは、ダストに吸収された結果である紫外-近赤外の SED と、ダスト放射の SED の整合性は保証されないという欠点がある。また、高赤方偏移の星生成銀河が、近傍銀河と同じ経験則に従っているとは限らない。

一方、輻射輸送方程式を解くモデルの場合、与えられた星・ダストの分布に従って、吸収された紫外-近赤外線の SED と同時に、各場所で吸収された光のエネルギー量に対応してダストの温度分布も決まるので、求められた SED は全波長域にわたって整合性が保たれている。私たちは、爆発的な星生成が起きている領域（スターバースト領域）が球対称であると仮定し、輻射輸送方程式を解いた。星の分布には、楕円銀河や球状星団の星の分布を再現するキング分布モデルを採用し、ダストはスターバースト領域に一様に分布しているとした⁶⁾。スターバースト領域の大きさは、星の全質量に応じて別にパラメータとして与える。

ダストによる減光曲線は、われわれの銀河系 (MW) と大・小マゼラン雲 (LMC, SMC) 中で異なっていることはよく知られている。減光曲線は、ダストの構成物質やダスト粒子のサイズ分布に依

存する。私たちは、1) ダストがグラファイト、シリケート、多環式芳香族炭化水素 (PAH) の3種類の物質で構成されている、2) ダストのサイズ分布はべき関数で与えられる、と仮定するダストモデルを採用し、このモデルが、MW, LMC, 及び SMC の減光曲線を再現することを確認した。また、MW についてのダストモデルが、MW の自身のダスト放射であるシラス放射のスペクトルも再現することを確認した。

このダストモデルを用いれば、ある輻射場中でダストがどのようなスペクトルで赤外線を放射するのか決定することができる。ダストの吸収特性は、構成物質とサイズによって決まるので、それぞれの構成物質・それぞれのサイズのダストが輻射場と平衡状態にあるとして、ダストの温度を求める。ただし、100 Å 以下の非常に小さいダストは、吸収断面積が小さく、また比熱も小さいために輻射場と平衡状態にならない。そこで、輻射場とダストのサイズに応じてダストの温度揺らぎを考慮する必要がある。最後に、個々のダスト放射をサイズ分布に対して積分すれば、単位体積中のダストからの赤外線放射スペクトルとなる。

輻射輸送方程式を解くことによって、各半径での輻射場の強さとスペクトルが決定されるので、その輻射場を用いて、各半径ごとにダスト放射スペクトルを計算する。また、中心付近からのダスト放射は、より外側のダストによって吸収されるといった自己吸収の効果も考慮した上で、スターバースト領域全体からのダスト放射スペクトルを求める。ダストに吸収されずにスターバースト領域から逃れ出る光（星からの直接光とダストに散乱された光）のスペクトルと、ダスト放射スペクトルを合わせて、最終的に、紫外からサブミリ波までの SED が完成する。

c) この分布を採用した SED モデルは、ダストによる吸収があまり強くない小規模な星生成銀河から超光度赤外線銀河まで、幅広いクラスの星生成銀河の SED を再現することができる。一方、星とダストが一様分布であったり、ダストが星をシェル上に囲んでいたりと、ダストが星と同じキング分布に従っている場合などでは、観測されている星生成銀河の SED は再現できない。詳細は、Takagi (2001)⁷⁾を参照のこと。

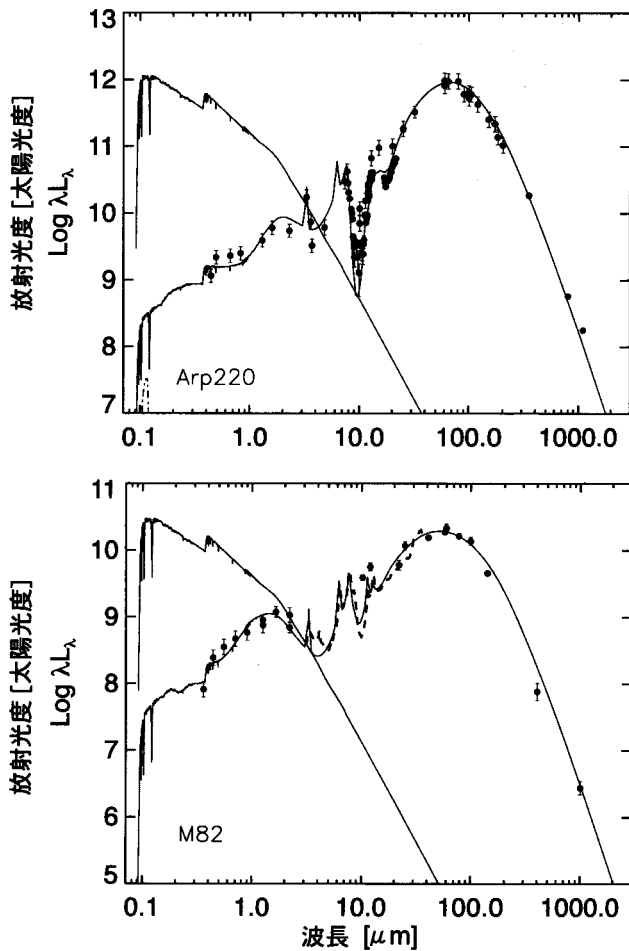


図1：近傍の代表的な星生成銀河である Arp220 と M82 の SED. 紫外域で明るい実線は吸収される前の「生」のスペクトル. M82 にプロットしてある波線は ISO による観測データである.

SED モデルのパラメータをまとめると、1) スターバースト領域のサイズ、2) ダストの影響がない「生」の銀河スペクトル、3) ダストによる光学的厚み、4) ダストの減光曲線の4つである。

近傍の代表的な星生成銀河である M82 と Arp220 に対してモデルを適用した結果を、図1に示す。両銀河の SED を非常によく再現することができた。

ここでは、銀河の「生」のスペクトルは、星生成の持続時間が星の寿命に比べて無視できるほど短い場合について求められたものである（いわゆる単一種族モデル: Single Stellar Population Model）。ここでは、銀河の「生」のスペクトルは、児玉らによる種族合成進化モデル⁶⁾によって計算した。両星生成銀河の SED はだいぶ異なっているが、同じ「生」の銀河スペクトルで再現できた。SED の違いは、主にダストによる光学的厚みの違いに原因がある。

次に、星生成銀河の SED 進化を考察する。銀河のスペクトルと星間ガスの量は一般的に独立でない。例えば、星の材料である星間ガスは、星が作られるごとに減少していく（一部、超新星爆発等で還元されるが）。銀河の星の量や「生」のスペクトル、星間ガスの量などは、星生成史に従って時間発展する⁴⁾。ここでは、標準的な化学進化モデル⁶⁾を採用し、銀河の「生」のスペクトル、星間ガスの量、星間ガス中の重元素量を、銀河年齢の関数として扱う。またダスト量の進化は、星間ガス中の重元素のある一定の割合がダストになっているとして求めた（ダスト進化モデルの詳しい解説は、平下氏による先月号の天文月報の記事を参照⁸⁾）。図2に、星生成銀河の SED 進化の一例を示した。この例は、重元素量を

含まない星間ガスがわずか1億年たらずで、そのほとんどが星になるという星生成史に相当している。大質量星の寿命は短いので、1億年の間にも重元素量が増加し、星間ガス中のダスト量も増える。その結果、紫外線に限らず可視光線もダストによって強く吸収され、星生成銀河は遠赤外線でも明るくなる。比較的吸収されにくい近赤外線では、

d) 星生成史は、原理的には星間ガスの熱力学的進化によって決定されるものだが、現在、星生成が起きる条件や、超新星爆発による星間ガスへのフィードバックの強さなど、まだまだ不確定な要素が多いため、星生成史は簡単な関数で近似する場合が多い。

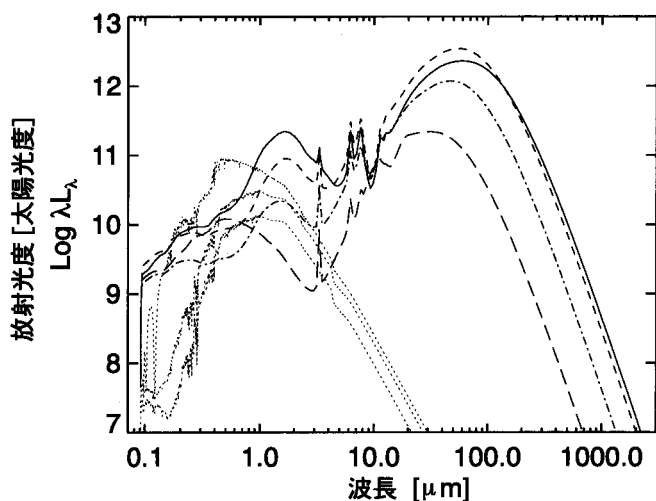


図2：星生成銀河の進化の一例。銀河は、長い波線、一点波線、波線、実線の順に進化し、年齢はそれぞれ 10 Myr, 30 Myr, 100 Myr, 300 Myr. 点線で示したのは、星生成が止んで静的に進化している楕円銀河。明るい方から、1 Gyr, 5 Gyr, 12 Gyr のモデルである。

銀河中の星が増えるに従って単調に明るくなるが、紫外線ではダスト量の進化効果が効いていて、あまり明るさは変化していない。

3. サブミリ波銀河から楕円銀河へ

SCUBA で検出されたサブミリ波銀河は、その発見方法によっていくつかのグループに分けることができる。ここでは、1) 極赤銀河 (Extremely Red Galaxies), 2) サブミリ波銀河 (Submm-selected Galaxies), 3) 電波銀河 (Radio Galaxies), 4) 電波で選択されたサブミリ波銀河 (Radio-selected Submm Galaxies), 5) ライマン銀河 (Lyman-break Galaxies) の5つの銀河サンプルについて議論する。

上に挙げた5つのタイプの銀河は、どれも高赤方偏移にあり、激しい星生成が起きている銀河である。1) の極赤銀河は、近赤外線での明るさが可視光に比べて非常に明るい (つまり赤い) 銀河

で、 $R-K > 5$ の色を持つ銀河の総称である。極赤銀河の中には、静的進化期にある楕円銀河も含まれるが、サブミリ波で検出されたものは、間違いなく星生成銀河と考えて良い。2) で単にサブミリ波銀河とした銀河は、第1章で紹介したようなサブミリ波サーベイ観測で発見された銀河である。3) の電波銀河は、サブミリ波サーベイ観測以前から、高赤方偏移にある星生成銀河と考えられていた活動性の高い銀河である。強い電波は、活動銀河核起源だと考えられている。高赤方偏移の銀河は、銀河間空間に広がった中性水素ガスの吸収を受けた、特徴的なスペクトルを持つ。この特長を利用して発見された一群の銀河が5) のライマン銀河である。ライマン銀河は、もともと紫外線で明るい星生成銀河と考えられている。

サンプル銀河の SED を、第2章で紹介した星生成銀河の SED 進化モデルでフィッティングする。この時のフィッティング・パラメータは、銀河年齢、スターバースト領域のサイズ、減光曲線のタイプ、及び、銀河の質量である。進化モデルの場合、ダストによる光学的厚みは、銀河年齢とスターバースト領域のサイズで決まる。サンプル銀河の中には赤方偏移が確定していないものもあるので、この場合、赤方偏移もフィッティング・パラメータとした。

図3に、それぞれの銀河タイプの代表的な銀河に対する SED フィッティングの結果を示した。ライマン銀河は、紫外域のスペクトルの特徴をもとに発見されているので、他のサブミリ波銀河に比べて、あまりダストによる吸収が効いていない銀河であるようだ。それ以外のサブミリ波銀河は、ダストによる吸収が非常に強く、近傍の超光度赤外線銀河の SED とよく似ている。中でも極赤銀河は、他のサブミリ波銀河に比べても、その名の通り色が赤い、つまり、紫外-可視光域に比べて近赤外域で特に

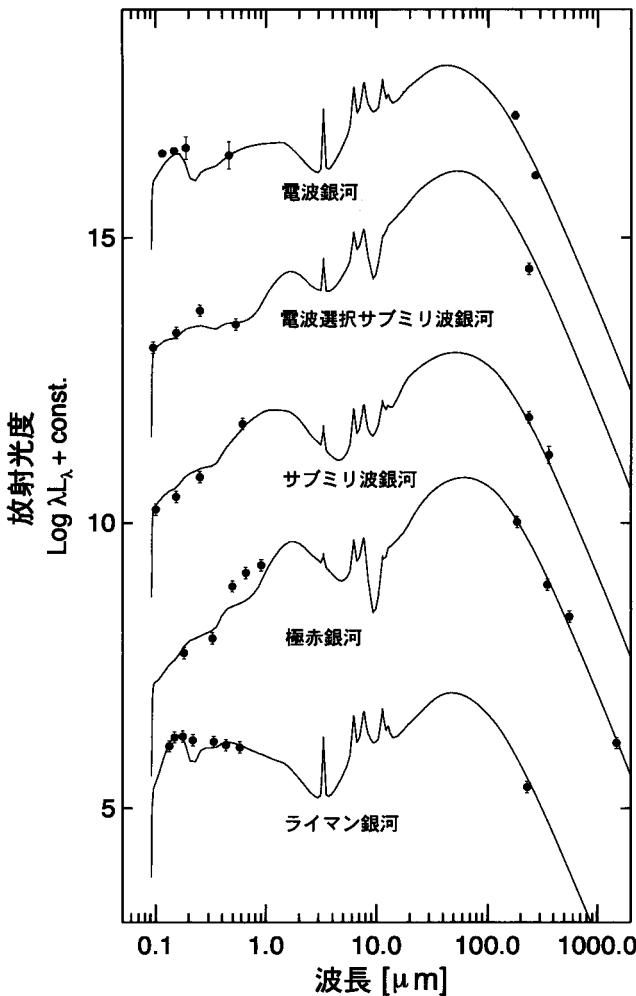


図3：各タイプのサブミリ波銀河のSED。縦軸は任意にずらしてある。

明るい。これは、比較的進化の進んだ星生成銀河の特徴である（図2を参照のこと）。

図4に、銀河の赤方偏移と星生成率を示した。サブミリ波銀河と一緒に、同じ方法で求めた近傍の星生成銀河の星生成率もプロットしてある。サブミリ波銀河の方が、近傍の星生成銀河よりも有意に高い星生成率を持つことがわかる。星生成率

が、千太陽質量を越えるのは、高赤方偏移銀河だけである。ただし電波銀河の星生成率は異常に高く、この星生成率では近傍にある最も大きい楕円銀河であるcD銀河の10倍もの銀河ができてしまう。電波銀河の場合、実際には活動銀河核からの放射成分が、かなりサブミリ波帯に効いてきていると思われる。しかし、モデルでは活動銀河核の成分を取り入れておらず、この成分を星生成活動の結果として星生成率を求めたので、星生成率を過大評価してしまったのだろう。以下の解析には、電波銀河は含めないことにする。

サブミリ波銀河は、そのまま色・等級関係を満たす楕円銀河へと進化するのだろうか？最終的な星の質量と重元素量は、この星生成活動がいつまで続いたかに依存する。しかし、星生成の終了時期は現在の観測からは制限できない。そこで、現時点までにつくられた星と重元素量のまま、現在まで静的に進化した場合の色と等級を予測し、楕円銀河の色・等級関係を比較することにする。この場合、以後の進化でつくられる星と重元素量の分を考慮していないので、予測した色と等級は、それぞれ下限値となる。図5に、この方法で予測したサブミリ波銀河の色と等級の値と、楕円銀河の色・等級関係を結果を示した^{e)}。星の量はすでに典型的な楕円銀河（光度関数で言う L_* 銀河）に比べて2～3倍

あり、立派な銀河が形成していることが分かる。

注目すべきは、多くのサブミリ波銀河について、色下限値が、色・等級関係にくらべて青いことである。星生成活動が続くほど、重元素量は増加していくので、予測される現在の色は赤くなっていく。サブミリ波銀河が色・等級関係を満たすまで星生成活動を続けさえすれば、そのまま現在の楕

e) 図5に示した色と等級に対する誤差は、SEDフィッティングの際の不定性に起因している。SEDのデータ点が少なく、モデルに対する制限が弱い場合、誤差は非常に大きくなる。

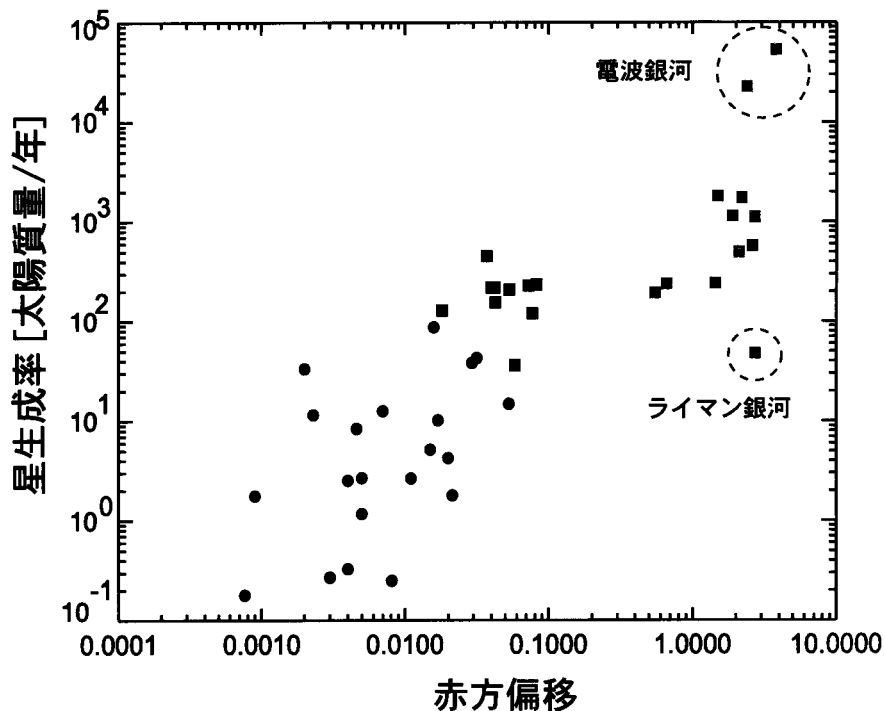


図4：赤方偏移に対する星生成銀河の星生成率。黒四角は、超光度赤外線銀河で、黒丸は比較的紫外線で明るい星生成銀河。青い四角は、サブミリ波銀河である。

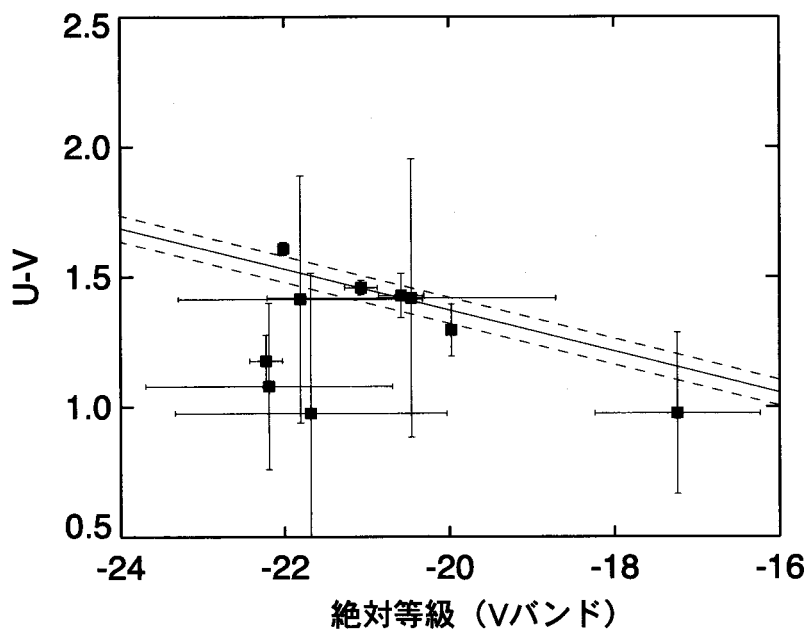


図5：サブミリ波銀河が、現在まで進化した時の色と等級を、楢岡銀河の色・等級関係と比較した。現時点でサブミリ波銀河が星生成活動を止めたとして求めた。実線は、髪の毛座銀河団での色等級関係である。波線は、観測された色・等級関係の分散。色・等級関係よりも赤い領域を塗りつぶしてある。

円銀河に進化するだろう。

明るい楕円銀河ほど、重元素量が多いということは、それだけ長く星生成活動を続けられたことを意味する。爆発的な星生成活動では、続けざまにおこる超新星爆発が星間ガス全体を加熱する。星間ガスの熱エネルギーが重力エネルギーに勝ったとき、星間ガスは銀河の外へと流れだして行き、星生成活動が止むと考えられている⁹⁾。この描像では、明るい、つまり、質量が大きく重力ポテンシャルの深い銀河ほど星生成活動が長く続くことになる。これは色・等級関係の成立メカニズムの有力候補であり、銀河風モデルと呼ばれている。もしこの描像が正しければ、図5にプロットしたサブミリ波銀河の色の下限値は、常に色・等級関係よりも青いはずである。まだ確かな結論を出すにはサンプル数が少ないが、いまのところ色の下限値はすべて色・等級関係よりも青い。この事実は、間接的にはあるが、銀河風モデルを指示している。逆に、ほとんどのサブミリ波銀河の色の下限値が、色・等級関係にくらべて赤かったならば、色・等級関係を成立させるメカニズムとして、色はそのままでも明るくなる銀河同士の合体が重要であることを意味する。

このように、SED 進化モデルで予測した、サブミリ波銀河の現在の色の下限値は、楕円銀河の色の等級関係が成立するためのメカニズムを解明する上で非常に重要な量である。

4. まとめと今後の課題

サブミリ波帯での新しい観測は、爆発的な星生成で始まる楕円銀河の幼少期を、直接探るための新たな扉を開いた。サブミリ波銀河から楕円銀河までの進化を明らかにすることで、銀河の形成・進化に対するより明確な描像を得ることができるだろう。

楕円銀河の星生成期から、静的進化期にある現在までの進化を調べる上で、基本的かつ強力な道具となるのは、銀河の SED 進化モデルである。サブミリ波銀河の基本的な性質、つまり、生成した星の質量や銀河年齢は、星生成銀河の SED 進化モ

デルによって求めることができる。

私たちは星生成銀河の SED 進化モデルを構築した。私たちの銀河や、大・小マゼラン雲で観測されている減光曲線と、シラス放射のスペクトルを再現するダストモデルを用いて、球対称近似で輻射輸送方程式を解いた。この SED モデルを近傍の星生成銀河に適用した結果、その SED をよく再現できることを確認した。

サブミリ波銀河から楕円銀河へ進化する過程を調べるため、サブミリ波銀河の現在の色と等級を予測し、楕円銀河の色・等級関係と比較した。この予測値は、現時点でサブミリ波銀河の星生成活動が止んだ場合に対応しており、実際には求めた色と等級は下限値と見なされる。予測したサブミリ波銀河の現在の色は、色・等級関係と一致しているか、もしくは色・等級関係よりも青い。実際には星生成活動はまだ続くであろうから、サブミリ波銀河はそのまま楕円銀河へと進化する可能性は高い。ただし、ちょうど色・等級関係に見合うだけの重元素ができたところで星生成活動が終わるようなメカニズムが必要である。このメカニズムの最も有力な候補は銀河風であるが、現在、銀河風モデルを指示する直接の観測的証拠はない。星生成活動がいつに終わるかを理論的、又は観測的に突き止めるのは、今後の課題である。

高赤方偏移の星生成銀河を対象に、楕円銀河の形成・進化を論じる研究はまだ始まったばかりである。観測データも非常に限られており、確かな結論を導くのは難しいのが現状であるが、それだからこそ魅力的な研究だとも言える。しかし、今後10年で、観測データはそれこそ爆発的に増えるだろう。2004年には、日本のASTRO-F衛星が遠赤外線で全天サーベイを行うし、NASAも赤外線衛星SIRTFを2002年7月に打ち上げる。ESAは遠赤外線からサブミリ波までカバーするHERSCHEL衛星を2007年に打ち上げ予定だ。また、サブミリ波望遠鏡もSCUBAの後継であるSCUBA2が検討されているし、また、アタカマ砂漠に大型サブミリ波干

渉計の ALMA 計画が日米欧の国際協力の下で進んでいる。

これらの観測計画が実現して行くにつれて、現段階よりも、1) サンプル数の増加、2) 高角分解能のサブミリ波観測による銀河同定の信頼性の向上、3) 現在ほとんどのサブミリ波銀河でデータが欠いている中間赤外域での観測、などが特に期待される。図5に示した誤差は、観測データの不足によってモデルに対する制限が弱いことが原因であるが、この点は改善されていくだろう。

星生成銀河銀河の SED モデルもまだ、完全とは言えない。例えば、今のモデルでも SED の大まかな特徴はよく再現するものの、2次的な効果、例えば若い星ほど強く吸収を受けるような場合や、ダスト分布の非一様性に起因する光の漏れだしなどによる影響で、実際の SED と系統的に食い違っている可能性もある。この点は、近傍の星生成銀河の研究成果をもとに改善するべき点だ。

今後の目白押しの観測計画によって、私たちはどれだけ銀河の形成・進化を理解できるだろう？多くの新しい発見は、私たちをさらなる探求へと誘うに違いない。

謝辞

本稿で紹介した内容は、著者の博士論文が基礎になっている。博士論文を執筆する際には、指導教官であった柴崎徳明氏をはじめ、現国立天文台教授の有本信雄氏、またリトアニア物理学研究所の V. Vasevicius 氏、岩手大学の花見仁史氏には大変お世話になった。心から感謝申し上げる。

参考文献

- 1) Hughes D.H., et al., 1998, *Nature* 394, 241
- 2) Barger A.J., et al., 1998, *Nature* 394, 248
- 3) 谷口義明, 1998, 天文月報 11 月号, 528 頁
- 4) Downes D., et al., 1999, *A&A* 347, 809
- 5) Dunlop J.S., et al., 2001, astro-ph/0101297
- 6) Kodama T., Arimoto N., 1997, *A&A* 320, 41
- 7) Takagi T., 2001, PhD thesis, Rikkyo University
- 8) 平下博之, 2001, 天文月報, 8 月号, 344 頁
- 9) Arimoto N., Yoshii Y., 1987, *A&A*, 173, 23

Evolution from Submillimeter Galaxies to Elliptical Galaxies

Toshinobu TAKAGI

Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan

Abstract: Recent surveys in submillimeter wavelength have revealed that population of starburst galaxies at high redshift has extremely high star formation rate over 10^3 solar mass per year. Such a high star formation rate is expected as the formation phase of elliptical galaxies. We have examined whether such submillimeter luminous galaxies evolve into massive elliptical galaxies in nearby field, which show tight color-magnitude relation, using a model of spectral energy distribution for star-forming galaxies.