



銀河の一生

富田晃彦（和歌山大学教育学部）

1. 星の一生、銀河の一生

みなさんは図鑑によく親しんでいることでしょう。図鑑と言えば、小学館や学研のシリーズが有名です。こういったシリーズでは必ず「宇宙」の巻が含まれています。さて、「宇宙」の図鑑の中で最も印象深いページの一つは、星の一生のページではないでしょうか。小学館の「宇宙」（古畑正秋 監修、1996年改訂）なら108-109ページ、学研の「宇宙」（宮本正太郎・的川泰宣 監修、1995年改訂）なら124-125ページに星の一生が紹介されています。星の一生の紹介ページでは、ページの右端か左端で星間ガス中の星形成が起こり、長い弧を描きながら主系列を過ぎ、遂には惑星状星雲になるか、あるいは超新星爆発を起こし、最後に星間ガスのところまで戻って大きな弧が閉じています。この美しい絵は、みなさんよくご存じでしょう。

銀河を説明したページは、星の一生の後ろの方にあります。きれいな銀河の写真が多く載っています。しかし星の一生に対応する「銀河の一生」のページはどこにも見当たりません。なぜ見当たらないのでしょうか。それは、我々がまだ銀河の一生についてよく知らないからなのです。現在の銀河研究の最大の目的は、この銀河の一生のページを書こうとしていると言っても過言ではありません。実際、最先端の銀河研究の多くは銀河の一生の謎解きに関連しています。ここでは、銀河の一生の謎解きに焦点を絞って少し詳しく解説していきましょう。

まとめ

銀河研究の当面の大目的：「銀河の一生」のページを書き上げたい。

2. 銀河の一生の調べ方

星の一生と違ってなぜ銀河の場合、一生を調べるのが難しいのでしょうか。星の場合をまず考えてみましょう。星形成の現場はよく調べられています。代表的な場所はオリオン座大星雲の中です。どうやって星の質量やその頻度分布が決まっていくのか、大事な問題が山積みですが、とにかく星形成の事例を一つずつ詳しく追うことができています。そして銀河系の色々な場所を観測する中で、あらゆる年齢の星の状態を調べることができています。これに対して銀河の場合を考えてみましょう。銀河形成の現場はどうなっているのでしょうか。実はこれが分からないのです。まだ十分には捉えられていないのです。では、色々な年齢の銀河を取り上げることができているのでしょうか。これも十分にはできていません。それどころか、星の場合と違って銀河の年齢を決めることは非常に難しいことなのです。以上のことから、若いころのものから時間経過の経ったものまで並べて一生を議論するということが、銀河の場合ではできていないのです。

銀河の形成現場は、どうしてよく捉えられていないのでしょうか。詳しいことはまだ分かっていないのですが、どうやら銀河は全て、宇宙年齢に匹敵する年齢を持っているらしいのです。現在の宇宙で新しい銀河がどんどん生まれている、ということはなさそうです。そうすると宇宙年齢に匹敵して過去に遡らないと、銀河の形成現場は見えてこないのです。つまり100億光年以上といった距離を見通して過去の銀河の姿を見ないといけないのです。近傍の宇宙の観測ではだめなのです。もっとも細かなことを言えば、これには

例外があります。例えば大きな銀河同士の衝突で、それらの銀河の星やガスの一部が潮汐力ではぎ取られて独立すれば、それは新しくできた銀河と言えなくもありません。実際大きな銀河の周りの矮小銀河のうちのいくつかは、このような過程でできたようです。また矮小不規則銀河の一部では、最近になって最初の星形成を始めているのではと疑われる例もあります（例えばおおぐま座の前足付け根辺りにある、14.3 Mpc の距離にある I Zwicky 18 という名の銀河）。しかし多くの銀河は、宇宙の歴史の比較的初期に形成されたものと考えられています。色々な年齢の銀河を取り上げることが難しいのも、多くの銀河が宇宙年齢的な年齢を持つことに困っています。

銀河の一生と書いてきましたが、色々な観点があります。銀河の大きさや形態あるいは内部の運動状態がどのように変ってきたかという観点がありますし、銀河の集合を考えて、銀河の存在個数密度や銀河団などの成長がどうであったかという観点もあります。色々ある観点のうち、銀河での星形成の歴史という観点を考えてみます。銀河は、星が生まれて物質が輪廻転生する舞台と考えられます。銀河の光度、色、星とガスの割合、化学組成は、全て星形成史が支配します。銀河進化の最重要観点と言ってよいでしょう。以下では、銀河での星形成史という観点に絞って話を進めたいと思います。

銀河の星形成史を精度高く調べるためには、新しい技術や方法を開発しなければなりません。ここでは2つの方向にまとめてみましょう。1つは宇宙を深く見通して、つまり宇宙論的過去まで見通して多くの銀河を数え上げ、その数や光度などを統計的に解析する（ナンバー・カウント）ことで銀河の全般的な生い立ちを調べようというものです。言わば銀河の世論調査です。大規模な世論調査です。もう1つは、個々の銀河に絞って丁寧に観測し、それぞれの銀河での生い立ちをでき

るだけ推測していくというものです。遠方に見える銀河は過去の時代のものですが、近傍で見ている銀河自体の過去の姿ではありません。この方法は効率が悪いですが、大規模世論調査を補完するものと言えます。戸別訪問と言えるでしょう。

まとめ

銀河の一生の中で、銀河での星形成の歴史という観点が重要である。
星形成史を調べる方法に、「世論調査」と「戸別訪問」がある。

3. 銀河の世論調査

銀河のデータを多数集めて全体としての星形成史を論じた研究のうち、現在出発点として用いられるものが、マダウらの研究です (Madau et al. 1996; Madau et al. 1998)。Madau et al. (1998) はハッブル・ディープ・フィールド (HDF) などのデータを用い、近赤外線、可視光Bバンド、紫外線の領域で、銀河を数え上げていき、一つ一つの銀河の赤方偏移と明るさを測りました。そして赤方偏移ごとに銀河の明るさの合計を計算し、グラフにプロットしました (図1)。星形成があれば近赤外線、可視光Bバンド、紫外線に行くにしたがって光度上昇が見られるので、これら全ての波長域でのプロットを満足するよう考えていくと、宇宙論的星形成史 (cosmic star formation history) を導き出すことができます。現在から赤方偏移1に遡るまで星形成率 (SFR) が急激に増加し、赤方偏移1から2で SFR がピークになって、それ以前は SFR が下がっているという結論を得ています。これはフィールド銀河 (銀河団を特に狙わずに拾い上げていった銀河という意味) を可視光Bバンドから紫外線でナンバー・カウントをした時、暗い等級で数の超過が見られていたこと、銀河団中の銀河に、赤方偏移1より手前において早い色進化があったことが示唆されていたこと (ブッチャー・エムラー効果; Butcher-

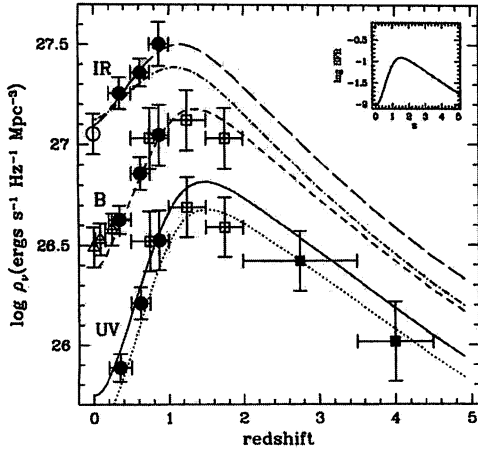


図1. Madau et al. (1998) figure 3 で示された、宇宙論的星形成史。右上の小さな箱の中に結果がまとめられている。横軸は赤方偏移、縦軸は対数尺度での星形成空間密度。

Oemler effect)、銀河中心核での激しい活動性の現れと考えられているキューサーが、赤方偏移2で出現頻度のピークを持っていることと合致する結果と考えられました。一方スタイデルら (Steidel et al. 1999) は、赤方偏移2よりも向こうでも SFR はあまり下がっていないと主張してきました (図2)。

星は核融合によって重元素 (水素・ヘリウムより原子番号の大きい元素) を合成し、星の死とともに重元素が宇宙空間 (星間ガス中) に放出されます。この重元素はダスト (固体微粒子) の形態で、ガス中に存在していきます。星からの光 (紫外線から可視光) のかなりの部分は、銀河内のダストに吸収されます。ダストは暖まり、そして赤外線 (特に遠赤外線) やそれより波長の長いサブミリ波帯の電磁波となって再放射されます。このようにして、星形成に由来する放射の多くは赤外線などの長い波長で放射されていることが多いのです。遠方天体ほど赤方偏移が大きく、赤外線やサブミリ波での観測が重要になってくることを考え合わせると、これらの波長でのナンバー・カウントは非常に重要です。これまでの赤外線やサブミリ波の観測研究から、最

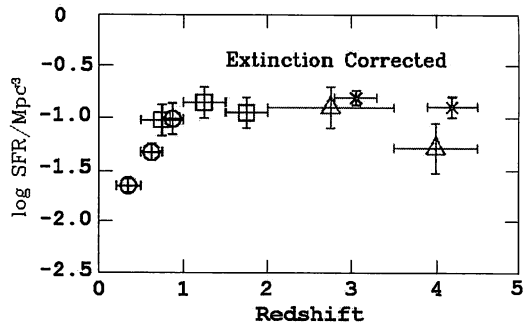


図2. Steidel et al. (1999) figure 9 で示された、宇宙論的星形成史。縦軸は赤方偏移、横軸は対数尺度での星形成空間密度 (図を一部編集)。

近の時代になっての急激な SFR 上昇が予想されたりしていましたが、百家争鳴の状態でした。そこでダスト量の進化や赤外線・サブミリ波での銀河の放射のモデルを構築し、宇宙論的星形成史とナンバー・カウントがどう対応するか、国立天文台の竹内努さん他の方々が研究を進めています (Takeuchi et al. 2001a; Takeuchi et al. 2001b)。ナンバー・カウントの解析は簡単ではありません。ダストの量はガスの重元素量と関係しており、重元素量は星形成史と関係しているというややこしいものです。竹内さん他は解析をやり直し、赤外線データからはスタイデルの結果に近いものが得られると結論付けました。しかしまだ予備的成果です。銀河はいつごろ自身の骨格を固めたのでしょうか。赤方偏移2辺りで集中的に行っていたのでしょうか。あるいはもっと以前から定常的に行っていたのでしょうか。徹底的に赤外線・サブミリ波帯でのナンバー・カウントを進めて結論を固める必要があります。

この観測を実現しようとする計画が実際にあります。まずは、遠赤外線これまでになく大規模サンプルを対象に「世論調査」に挑戦する大計画です。日本が2004年3月に打ち上げる予定の赤外線天文衛星 ASTRO-F (IRIS) による銀河探査がそれです (図3)。

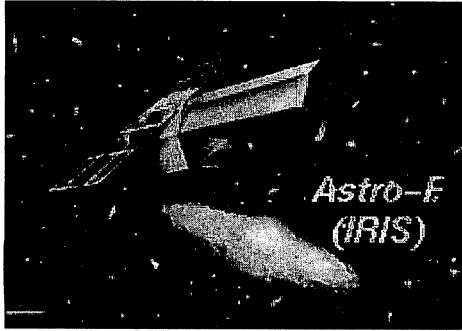


図3. 文部科学省宇宙科学研究所が推進している ASTRO-F 計画。ホーム・ページは <http://www.ir.isas.ac.jp/ASTRO-F/index-j.html> 最初に紹介されている写真から。

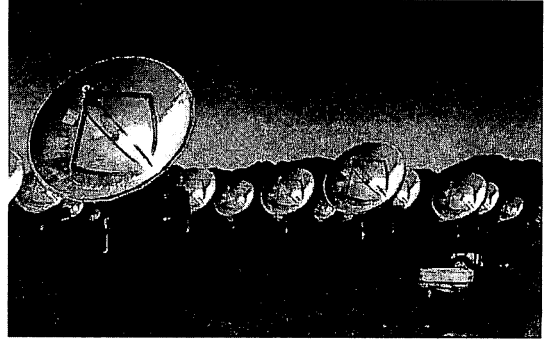


図4. 文部科学省国立天文台が推進している ALMA 計画。ホーム・ページは <http://www.nro.nao.ac.jp/~lmsa/> 最初に紹介されている写真から (写真の一部)。

ASTRO-Fは赤外線ですべてをこれまでにない深さでサーベイします。1980年代に大成功を取った IRAS 衛星よりも1.5桁深いサーベイができます。ASTRO-Fは赤方偏移1程度までの情報を効果的に提供すると考えられています。より遠方の銀河に対しては ALMA (アルマ) 計画に期待できます(図4)。南米アンデス山脈の高地に日米欧共同で建設予定の地上最強の電波干渉計です。2002年度中の建設開始を目指しています。より遠方の天体はより赤方偏移しており、サブミリ波帯を得意とするこの超高感度望遠鏡にとって最適の対象です。ASTRO-Fの打ち上げ成功、そして ALMA 計画の順調な開始を祈りましょう。

まとめ

ASTRO-FやALMAによる銀河探査などで、銀河の集合全体としての星形成史が明らかになっていくだろう。

4. 銀河の戸別訪問

個々の銀河そのものの星形成史を論じる方法は、本格的にはティンズレーが手がけました (Tinsley 1972)。銀河の光度と色は、構成している色々なスペクトル型の星の光の積分量です。ここから過去の星形成史を推測することができます。ただしその推測を一意に決

めることが難しく、大雑把な推測にとどまっています。スペクトルから過去の星形成史を探る対象として、楕円銀河がよく取り上げられています。楕円銀河は宇宙の(かなり)早い時期に銀河内で一斉に星形成が起こり、現在まで消極的に老化しているだけの系と考えられています。ではその星形成の時期はいつだったのか、楕円銀河同士でその時期に違いがあったのか(楕円銀河は色々な観点で均質性が高いが、形成時期という観点ではどうか)が具体的な研究観点になっています。スペクトルの吸収線の細かな特徴にも注目し、銀河の重元素量による影響を取り除いて銀河の星形成年齢を求める努力が続けられています。

ハッブル宇宙望遠鏡の登場で、銀河を個々の星に分解することが可能になってきました。まだ局所銀河群の外の銀河の例は少ないですが、10 Mpc 程度の距離ならば銀河の星の色一等級図を描き、ここから星形成史を推定することが可能になってきました(例えば、トシヤグレッジオらの研究; Tosi et al. 1991 [Sextans B を対象]; Greggio et al. 1993 [DDO 210 及び NGC 3109 を対象]、図5)。

この色一等級図の方式は星形成史を精度よく決められる利点がありますが、銀河が星に分解されないと進められません。遠方(と言っても NGC 番号が付く程度の距離)の銀

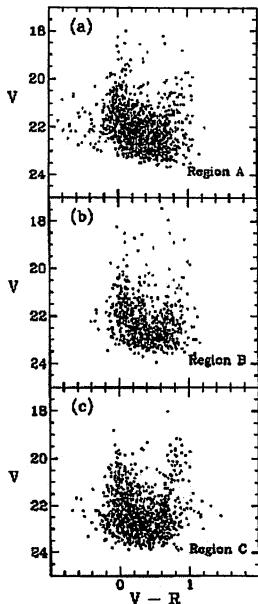


図5. Greggio et al. (1993) figure 13 で示された、NGC 3109 の3つの領域における色-等級図。横軸に V-R カラー、縦軸に V 等級を取っている。主系列左上部分と巨星枝上部が、これらの図の中に見える。

河を対象にしたり、色々な環境下（近くに別の銀河がある、あるいは銀河団の中にあるという観点）の銀河を多数対象にしたりするのは困難になります。星に分解できないままでも銀河のスペクトルを丁寧に解析することで、できるだけ星形成史を抽出することができないか、我々の研究グループは調査を始めています。この研究は国立天文台の竹内努さん、イタリア・アルチェトリ天文台の平下博之さん、京都大学の吉川耕司さん他の方々と共に共同で行っています。

我々は対象銀河として特に矮小不規則銀河（ハッブルの銀河形態分類の右端）を狙っています。これまで冷遇（？）されてきた種の銀河ですが、存在数が多い点や、星形成進化が進んでいない（すなわちガスが多く、また重元素量がまだ少ない状態）ことから、他の銀河の進化初期段階を模倣しているという点で実は重要な天体です。まず銀河のスペクト

ルを用意します。銀河全体の星形成史を議論するためには、銀河全領域の情報を集めたスペクトルを用意しなくてはなりません。一般にスペクトルを取る際、分光器のスリットを銀河中心を通るように置いて取ります。ところがこれでは銀河のほんの一部しかサンプルできていません。スリットを多くの個所に当ててデータを足し合わせる必要があり、このような作業は一般にはこれまでほとんど行われていません。現在注意深く銀河の全領域スペクトルを観測し続けています。将来、全領域スペクトルの大カタログとして発表する予定です。そしてこのスペクトルから過去の星形成史を効果的に抽出する方法を吉川さんが中心になって開発しています。過去を4つの時代区分に分割します。それぞれの時代区分で、星形成によるスペクトル・テンプレート（シミュレーションから合成した標準のモデルスペクトル）を星団の光度・色の進化モデルを利用して作成します。時代区分が変わると、このスペクトル・テンプレートは激変します。そして、そのスペクトル・テンプレートで銀河のスペクトルを要素分解します。矮小不規則銀河は渦巻銀河のようにバルジとディスクという星形成史の違う構造を内部に持たないので、この要素分解が有効に活用できる対象でもあります。現在、この方法の精度の検査やプログラムの開発の真っ最中です。これが完成すると、精度よいスペクトルさえ得られれば、時間分解精度は4区分程度ですが、その銀河の星形成史を導き出すことができます。孤立した銀河、銀河群の銀河、銀河団の銀河での星形成史の違い、また銀河質量の違いによる星形成史の違いなどを議論していくことができます。1年程度以内に初期成果をみなさまに示すことができる予定です。

まとめ

近傍の個々の銀河に対して生き立ちを明らかにすることで、様々な環境下での星形成史の違いが明らかになっていくだろう。

5. 巨大なパズル再現の作業

我々は自分たちの存在の起源を本能的に知りたがっています。地球の起源についての研究も盛んです。惑星や惑星系の起源の研究は1990年代に大きく飛躍しました。太陽を含め、星の起源は天文学の中でも比較的早くに確立されてきた分野です。そして次は銀河系を含めて、銀河の起源をもっと明らかにする時代です。銀河の一生のページはすぐには完成しないでしょう。しかし地道な研究が組み合わさって近い将来、図鑑にそのページが必ず登場するでしょう。

「科学研究はジグソー・パズルのピースをお互いに埋めていくようなものだ」、とよく言われます。科学研究の性質をよく表現している文章です。みなさんも銀河に関する研究発表を新聞や学会でご覧になられたら、銀河の一生との関連はどこにあるのか、宇宙の謎という大きなパズルの中のどのピースに当たるのか、といったことを考えながら聞いていくと楽しさ倍増になるでしょう。

まとめ

個々の銀河研究が、一つ一つのピースとして互いに埋まっていく過程を楽しみましょう。

本原稿の執筆に当たり、国立天文台の竹内努さんに目を通して頂きました。この場をお借りしまして感謝の意を表します。

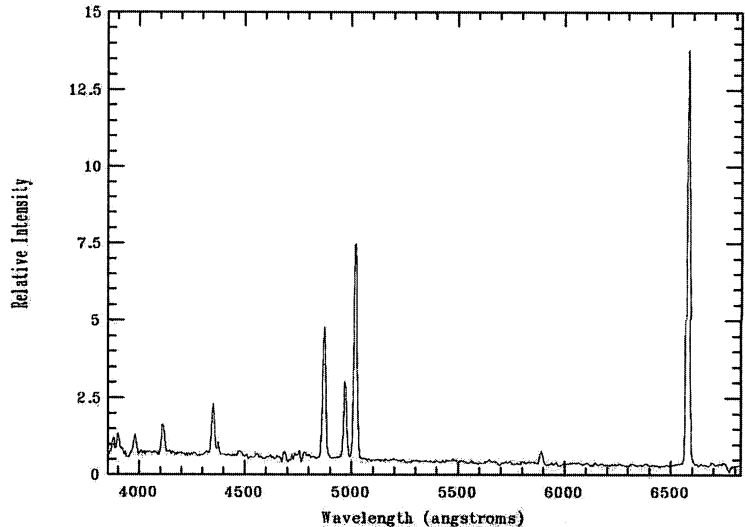


図6. 我々のグループが取得した I Zwicky 18 という矮小不規則銀河の、銀河全領域をサンプルしたスペクトル。岡山天体物理観測所で半夜かけて取得。横軸はオングストローム単位の波長、縦軸は大気吸収補正済の強度。バルマー系列がよく見えている。連続スペクトルから、過去の星形成史の情報を抜き出す。なおこの銀河は、現在にあって星形成年齢が最も若い銀河と言われている。

参考文献

- Greggio, L. et al. 1993, AJ 105, 894
- Madau, P. et al. 1996, MNRAS 283, 1388
- Madau, P. et al. 1998, ApJ 498, 106
- Steidel, C.C. et al. 1999, ApJ 519, 1
- Takeuchi, T.T. et al. 2001a, PASJ 53, 37
- Takeuchi, T.T. et al. 2001b, PASP 113, 586
- Tinsley, B.M. 1972, A&A 20, 383
- Tosi, M. et al. 1991, AJ 102, 951