

世界一高い天文台から見えた 銀河の形の起源—チリで塵を見通す



館内 謙

〈東京大学大学院理学系研究科 天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: tateuchi@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

世界最高標高の miniTAO 望遠鏡に搭載された近赤外線カメラ ANIR では、これまで地上からでは困難であった赤外線水素 Pa α 輝線 (1.8751 μm) を観測することができるため、系外銀河内の塵に隠された活発な星形成活動を見通すことができるようになった。われわれは、2009年のファーストライトから現在までに活発に星形成を行っている爆発的星形成銀河 38 天体の Pa α 輝線観測に成功した。これらの銀河の星形成領域の分布を定量評価したところ、銀河が星を生み出す分布の特徴として、「中心集中したタイプ」と「広がったタイプ」の2種類に分類できることを発見した。これは銀河の形がどう形成されてきたかを解明する手がかりとなる結果である。

1. 塵に埋もれた爆発的星形成銀河

今から約 80-100 億年前の宇宙は、その長い歴史においてまさに「激動」の時代を迎えていた。現在の宇宙に存在する全星質量の約 50% が、この時代に一気に作られ¹⁾、宇宙の星形成活動がピークを迎え、その活発さは現在の 30 倍以上にもものぼるほどであったと考えられている²⁾。そんな時代の、こうした活発な星形成活動の大部分を担っていたと考えられている種族が「爆発的星形成銀河」である。1 年間に数十-数百個分の太陽に相当する大量の星を生み出すこれらの銀河は、この時代の全星形成活動の約 80% を担っていたと考えられている³⁾。

爆発的星形成銀河内では、大量の星が生まれるとともに数多くの超新星爆発が起っており、その際に大量の塵（ちり）が放出される。この塵が、星形成活動に伴って放射される紫外・可視光を吸収して温められ、赤外線で明るく輝くと考えられている。なかでも、赤外線での明るさが太陽光度の 1,000 億倍-1 兆倍にも達する特に明るい銀河は

「高光度赤外線銀河 (Luminous Infrared Galaxies; LIRG)」、それ以上のものは「超高光度赤外線銀河 (Ultra Luminous Infrared Galaxies; ULIRG)」などと呼ばれている。

しかしながら、爆発的星形成銀河がどのようにして活発な星形成活動をするようになったかについては、まだよくわかっていない。有力な可能性として、大規模な銀河衝突/相互作用などによる星形成活動の誘発が現在考えられている⁴⁾。特に、われわれの住んでいる天の川銀河近傍の ULIRG はすべて衝突/相互作用銀河であることから示唆される。さらに、衝突/相互作用により獲得した膨大な質量と失われていく星形成活動の果てに、巨大楕円銀河へと進化していくことも示唆されており⁵⁾、小さな銀河が衝突・合体を繰り返して成長してきたとする「宇宙の階層的構造形成論」においても、重要な種族であると考えられている。

銀河進化を「ガスから恒星への変化」ととらえると、星形成が活発な爆発的星形成銀河の個々を詳細に分解し、星形成の空間分布や速度構造を詳

しく調べることで、銀河進化に迫ることができ
る。そこでわれわれは、内部構造を空間分解しや
すい近傍爆発的星形成銀河（赤方偏移0.1以下）
の詳細観測を進めている。

ところが、爆発的星形成銀河は上述のように大
量の塵をまどっているため、星形成の指標となる
紫外・可視光が覆い隠されている。このような事
情からこれまで、紫外・可視光を使った研究では
その詳細をとらえることが困難であった。

2. 塵に負けない赤外線星形成指標

2.1 赤外線水素パッシェン・アルファ (Pa α) 輝線

宇宙には水素ガスが多く存在する。星形成が活
発な領域では、この水素ガスは若くて重い（太陽
の10倍以上の）星が発する紫外線により電子と
陽子に分離される（プラズマ化）。そして、いつ
たん分離した電子と陽子は再び結合し、水素原子
に戻る際に特有の波長の光（水素輝線）を放射す
る。そしてこの輝線を観測することにより、星形
成が行われている現場を探し出すことができる。
実はこうした観測は昔から盛んに行われてきてお
り、中でも最も有名なのは、可視光の0.6563 μm
にある H α 輝線である。可視域放射でかつ放射強
度も強いので、観測が容易であることからアマ
チュア天体写真などでもよく見かける。

ところが、紫外・可視光放射などの短い波長は
塵により光が遮られてしまう“減光”の影響を受
けやすい。つまり、H α 輝線では、爆発的星形成
銀河のような大量の塵に覆われている銀河の星形
成領域を見通すことが困難なのである。そこでわ
れわれは、塵による減光に対して強い透過力をも
つ、赤外波長域の水素輝線による観測に注目し
た。なかでも Pa α 輝線（波長1.8751 μm ）は、近
赤外線波長域にある水素輝線中で最も放射強度が
強い。図1は、星形成領域から放射される水素輝
線が塵による減光を受けたときの見かけの放射強
度を、減光を受けていない H α 輝線で割った値
が、減光量によってどう変わるかをプロットした

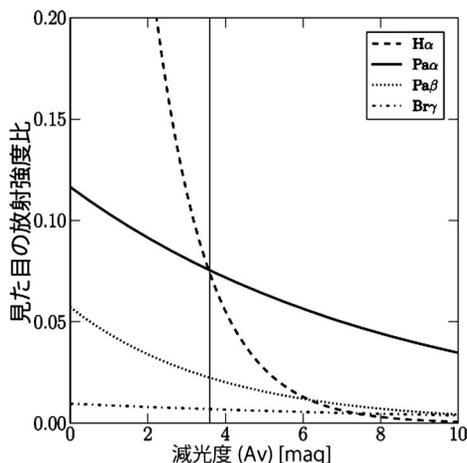


図1 星形成領域が減光を受けたときの各水素輝線の強度変化。縦軸は減光を受けていない H α 輝線強度で、それぞれの水素輝線が減光を受けたときの見かけの放射強度を割った値である。可視光の減光が3.5等以上になると、Pa α の見かけの放射強度が H α より強くなる。

ものである。この図から、可視光での減光量が
3.5等より大きい（より濃い塵に埋もれている）
と、H α 輝線より Pa α 輝線のほうが見かけの放射
強度が強くなるということがわかる。典型的な爆発的
星形成銀河のダスト減光量は、可視光で3等⁶⁾以上
であり、このことから Pa α 輝線が爆発的星形成銀
河の星形成活動を見通すのに優れた輝線である
と言えるだろう。

しかしながら、Pa α 輝線による研究はこれまで
ほとんど行われてこなかった。その主な理由とし
て、Pa α 輝線の波長域は地球大気中の水蒸気によ
って強く吸収される領域であるため、これまで
地上望遠鏡による観測がほとんど不可能であつた
ためである。

2.2 TAOサイトでPa α 輝線観測を

東京大学アタカマ天文台 (TAO) サイトの最大
の特徴は、チリ・アタカマ砂漠にそびえ立つ、標
高5,640 mのチャナントール山山頂にあるとい
うことである。この高い標高と砂漠という乾燥した
気候のおかげで空気中の水蒸気量が極端に少な
く、Pa α 輝線が地上に透過してくるようになる。

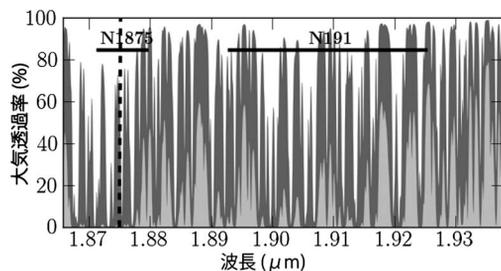


図2 地球大気の大赤外線波長での透過率。濃い灰色線はminiTAOがあるチャナントール山頂，薄い灰色は他の南米の天体観測所の典型的な値で，点線が水素Pa α 輝線の波長。今回の観測では，このPa α が宇宙膨張によりドップラーシフトしてより長い波長にずれた爆発的星形成銀河を，狭帯域フィルター（N191フィルター）を用いて観測した。



図3 標高5,640 mの東京大学アタカマ天文台と筆者（左）。miniTAO望遠鏡に搭載された近赤外線カメラANIRとそこで作業する筆者（右）。

図2はTAOサイト（灰色線）と，同じチリにあるVLTサイト（黒線；標高2,600 m）の典型的なモデル大気透過率を比較した図である。通常サイトでの地上観測では，Pa α 輝線の波長域で大きく大気吸収を受けてしまうが，TAOサイトでは吸収されず大気の窓が開くことがよくわかる。

このTAOサイトに建設された現在口径1 mの望遠鏡（通称miniTAO：ミニタオ）と，そこに搭載された近赤外線カメラANIR（アニール：図3）を用いて2009年から本格的な科学観測が始まっており，これまで地上からでは不可能だと思われていたPa α 輝線観測が可能となってきた。

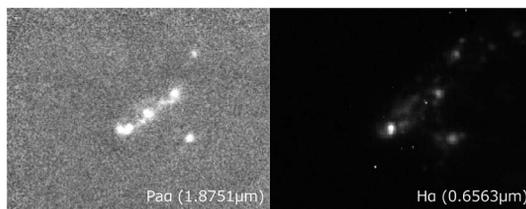


図4 星形成銀河VV254の水素Pa α 輝線画像（左）と，同じ領域を水素H α で撮影したもの（右：Howard Bushouse（米国宇宙望遠鏡科学研究所）提供）。塵がなければ同じに見えるはずだが，Pa α 画像にはH α 画像で見えていない銀河中心で明るく輝く星形成領域があることから，大量の塵があってこの星形成領域が隠されていることがわかる。

3. 近傍高光度赤外線銀河Pa α サーベイプロジェクト

われわれ研究グループは，このminiTAO望遠鏡に搭載されたANIRを用いて，爆発的星形成銀河のPa α 輝線による狭帯域撮像観測を2009年ファーストライト時から行ってきた。近傍の爆発的星形成銀河を塵による減光の影響が少ないPa α 輝線で詳細に観測し，その星形成のメカニズムを明らかにすることが目的である。同様の研究はハッブル望遠鏡の赤外線カメラNICMOSでも可能だったが，ANIRに比べてNICMOSの視野は10倍以上狭いため効率的な観測ができず，さらにその狭さゆえ銀河全体を撮像することが困難であるという弱点があった。また，NICMOSは2010年に取り外されてしまっているため現在ではもはや観測できず，Pa α 観測はminiTAO/ANIRの独壇場となっている。

図4はこのサーベイで観測をしたVV254という衝突銀河であり（この銀河に関する詳細は，後の小麦氏の記事を参照してほしい），左がPa α 輝線画像で，右がH α 輝線画像である。miniTAO/ANIRでは，Pa α 輝線を0.7秒角の分解能でとらえることができるため，銀河内部の詳細な観測が可能となっている。また，この銀河の中心部に注目する

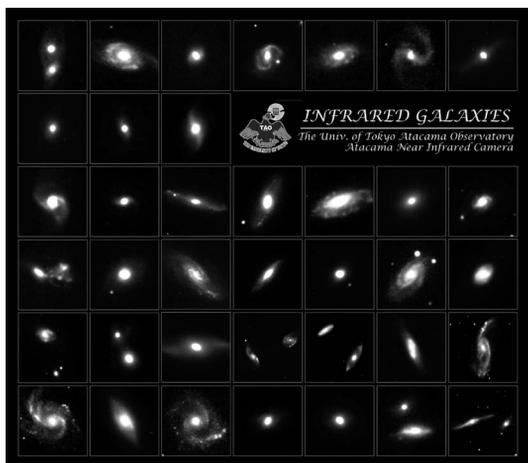


図5 取得した全銀河の白黒画像。

と、H α 輝線では暗く Pa α 輝線で明るく輝いている領域がある。この領域は、可視域放射のH α 輝線が透過できないほど塵が濃い部分であると考えられ、こうした塵に深く埋もれた星形成領域をPa α 輝線で見通すことができることがわかる。

4. Pa α サーベイの初期成果

2009年にプロジェクトを開始して以降、現在までに合わせて38天体の爆発的星形成銀河のPa α 輝線観測に成功している(図5)。これは、銀河のPa α 撮像サーベイとして最大規模のサンプルである。また、高い分解能による観測を得意としていたハッブル宇宙望遠鏡に対し、miniTAO/ANIRはワンショットで銀河全体を覆うことができる視野の広さを有しているということも、これまでにない新しい点である。

4.1 生まれたばかりの星はどこに？

われわれは、これらの爆発的星形成銀河の星形成活動がどこで起こっているのかに注目した。そこで星形成領域の広がりを定量評価するため、各銀河について中心集中度(Concentration Index; C-Index⁷⁾)を測定した。中心集中度とは、銀河全体の光度の20%が含まれる半径を r_{20} 、80%が含まれる半径を r_{80} と置いて、以下の式で定義さ

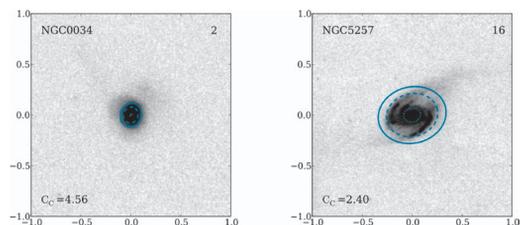


図6 銀河の星の分布を楕円フィットし、C-Indexを測定している例。外側の楕円から、全光度の80%、50%、20%になる領域を表している。この場合、左の銀河はC-Index=4.56と大きな値で楕円銀河に近い中心集中した星分布をしているのに対し、右銀河は、C-Index=2.40と腕構造をもつ渦巻銀河に近い星分布をもっている。

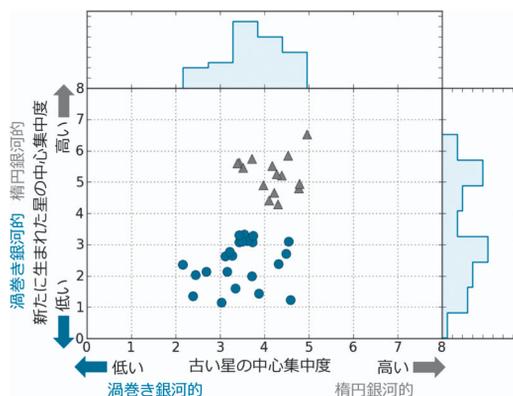


図7 今回観測した銀河の形状の中心集中度を測定した結果。横軸が古い星の分布の中心集中度、縦軸が新たに生まれた星(星形成領域)の分布の中心集中度を表す。一般に、中心集中度が高いほど銀河の形状は楕円銀河的になる。

れる量である。

$$C = 5 \log \left(\frac{r_{80}}{r_{20}} \right) \quad (1)$$

これは、銀河中心からの面輝度の成長曲線を見ても、値が大きいと1/4乗則に従う楕円銀河的、小さいとそれより広がった渦巻銀河や不規則銀河的なプロファイルとなる。今回、古い星の分布(連続光画像; C_C)と、生まれたばかりの星の分布(Pa α 輝線画像; C_L)の両方についてそれぞれ中心集中度を測定した。

図7は古い星の分布と生まれたばかりの星の分布をプロットした結果である。この図から、古い星の分布は正規分布に近い頻度分布をしているのに対し、星形成領域の中心集中度の頻度分布はダブルピークをもっていることがわかる。このことから、爆発的星形成銀河の星形成領域分布は、銀河の中心部分に集中しているものと、銀河全体に広がって分布しているものの2種類に明確に分類できることが明らかとなってきた⁸⁾。

地上からの安定した観測により観測総天体数を増やすことができたことと、視野が限られているハッブル望遠鏡ではとらえることができなかった銀河全体の姿を、より視野の広いANIRで観測できたからこそ見えてきた結果と言えるだろう。

4.2 2つの星形成モードの起源

銀河はさまざまな姿・形をしている。そして、そのほとんどはハッブル系列と呼ばれる形態分類法で大きく楕円銀河と渦巻銀河の二つに分類することができる。しかしながら、この形態がいつ、どのようにしてできたのかはまだよくわかっていない。本研究結果は、銀河の形成段階で星形成を行っている領域自体が二つに明確に分離することを示しており、銀河の形がまさに形成段階から分かれていた可能性を示唆している。

5. 今後の展開

今回分かってきた2つのモードの起源を探っていくことが、爆発的星形成銀河の形成進化史を明らかにさせる糸口になると考えられる。今後は、個々の銀河に注目し、その詳細を調べていくことが必要であり、さらに星のもととなるガスの量や分布に注目してゆくなど、さまざまな方面から起源に迫ってゆくことも重要である。

このように、これまであまり注目されてこなかったPa α 輝線を地上から安定して観測できるようになり、新たな理解が深まりつつある一方、それに付随する謎も多くでてきている。こうした問題を地道にひも解いてゆくことが、銀河の形成と

進化という大きな問題の理解に、少しでも貢献できると考えている。

謝 辞

本研究は、本原顕太郎氏、小西真広氏、高橋英則氏、加藤夏子氏、北川祐太郎氏からなるANIR開発チームをはじめ、TAOプロジェクトの吉井 譲代表、TAOチームの方々と、ANIRの観測に参加していただいた多くの共同研究者に支えられて進められている。

参考文献

- 1) Kajisawa M., et al., 2009, ApJ 702, 1393
- 2) Rujopakarn W., et al., 2010, ApJ 718, 1171
- 3) Caputi K. I., et al., 2007, ApJ 660, 97
- 4) Whitmore B. C., et al., 1999, AJ 118, 1551
- 5) Toomre A., Toomre J., 1972, ApJ 178, 623
- 6) Alonso-Herrero A., et al., 2006, ApJ 650, 835
- 7) Conselice C. J., 2003, ApJS 147, 1
- 8) Tateuchi K., et al., 2012, PKAS The Second AKARI Conference Proc., in press

Looking into Form of Galaxies in the Infrared from the Top of the Earth

Ken TATEUCHI

*Institute of Astronomy, The University of Tokyo,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

Abstract: ANIR is a near infrared camera for the University of Tokyo Atacama 1 m telescope, installed at the summit of Co. Chajnantor (5,640 m altitude) in northern Chile. The high altitude and extremely low water vapor (PWV=0.5 mm) of the site enable us to observe hydrogen Pa α emission line at 1.8751 μ m. LIRGs are affected by a large amount of dust extinction ($A_V \sim 3$ mag), produced by their active star formation activities. Because Pa α is the strongest hydrogen recombination line in infrared wavelength ranges, it is a good and direct tracer of dust-enshrouded star forming region, and enables us to probe the star formation activities in LIRGs. We find that LIRGs have two star forming modes (C-mode and E-mode). The origin of the two star forming modes probably comes from the differences between the merging stage and/or the star forming process.