

「ステファンの五つ子を探る

～ 銀河間相互作用から超新星バーストまで～

大山 陽一，西浦 慎悟，村山 卓，谷口 義明

〈東北大学理学部天文学教室 〒980-8578 宮城県仙台市青葉台荒巻字青葉〉

e-mail: ohyama@astr.tohoku.ac.jp (大山) nishiura@astr.tohoku.ac.jp (西浦)

: murayama@astr.tohoku.ac.jp (村山) tani@astr.tohoku.ac.jp (谷口)

我々は銀河群“ステファンの五つ子”に属する渦状銀河 NGC7318B の腕付近に、速度幅が 1000 km s^{-1} にも達するような電離水素ガス輝線 ($\text{H}\alpha$) 領域を発見した。様々な考察の結果、この領域には 50 から 100 万個もの超新星残骸の集団が存在しているらしいことがわかってきた。ステファンの五つ子の中で一体何が起こっているのだろうか？

1. 最初の 1 フレーム

当時の観測ログによると、全ての発端となった最初の 1 フレームの観測を始めたのは、1996 年 8 月 16 日 2 時 35 分である。この時の観測は 1 フレームの露光時間を 30 分で行っていたので、最初の異変に気付いたのは露光終了直後の同日 3 時 5 分頃ということになる。場所は国立天文台岡山天体物理観測所の 188 cm 反射望遠鏡の制御室。この時の観測目的はコンパクト銀河群に属する渦状銀河の異常回転を、分光観測による回転曲線から研究することにあつた。観測天体は“ステファンの五つ子”と呼ばれる銀河群に属する NGC7318A と呼ばれる渦状銀河である。NGC7318A は同じ銀河群に属する渦状銀河 NGC7318B と銀河衝突している真っ最中であると考えられており、その回転曲線の特異性が非常に期待されていた。

一つの観測データから、本来の目的以外の副産物的な研究が行えることは決して珍しくは無い。しかしながら、今回の発見は副産物というにはあまりにも大きなものであつた¹⁾。我々の観測フレームに何が見えたのか？それは明らかに銀河中心からは大きくはずれた所に存在する、異常に線幅の広い電離水素ガス $\text{H}\alpha$ 輝線成分だつたのだ。具体的な

話に入る前に今回の発見のきっかけとなった銀河群“ステファンの五つ子”について少々説明しておこう。

2. “ステファンの五つ子” 発見から 120 年

銀河群研究の起源は意外と古く、1877 年に M. E. Stephan によって五つの銀河からなる小さな銀河集団が天文学の世界に紹介されたことに始まる²⁾。ちょうど今から 120 年前のことである。そしてこの小さな銀河集団こそが、今や銀河群の代名詞と言えるほど有名になった“ステファンの五つ子”に他ならない(図 1a)。銀河集団の研究は、数百数千の銀河からなる銀河団に対するものがしばしば行われてきた。これには Dressler の「形態-密度関係」³⁾によって、銀河の形成や進化が銀河環境と深く関わっている可能性が示されたことも大きく影響している。銀河密度に注目することによって、孤立銀河から銀河団銀河までがきれいに一つの系列を成すように見えたからだ。そして次に多くの天文学者が考えたことは、では銀河団よりもっと規模が小さい銀河群は本当に孤立銀河と銀河団の間を埋めるような銀河集団なのだろうか？という問題であ

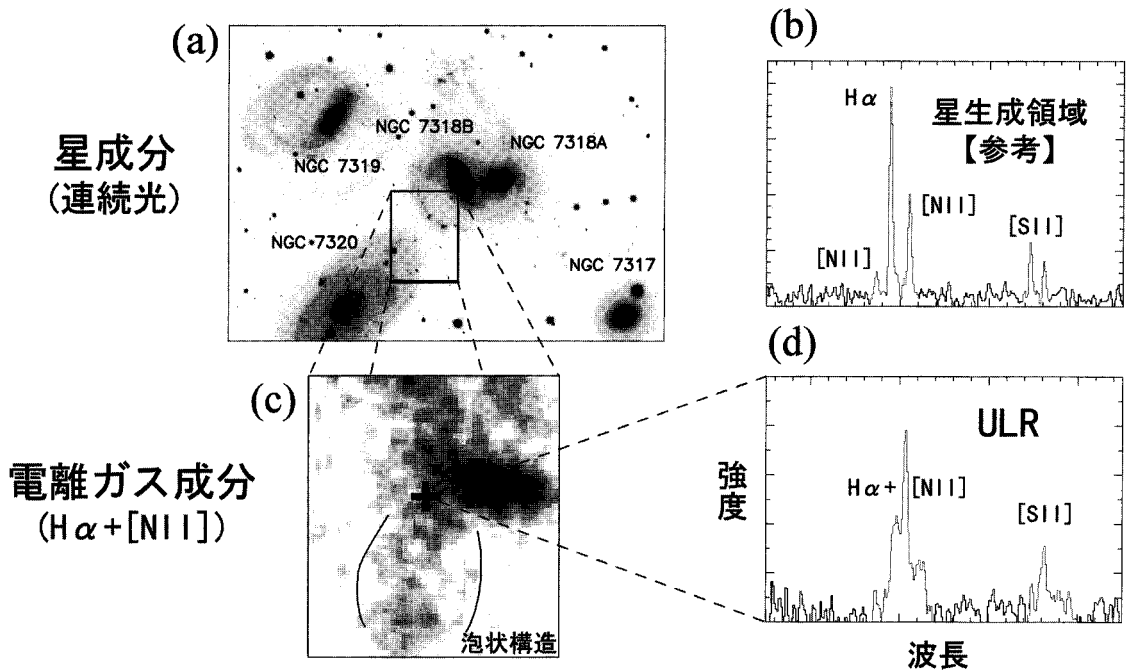


図1 : (a) ステファンの五つ子可視光 (V バンド) イメージ. CFHT のデータ・アーカイブより. (b) 通常の星生成領域のスペクトル. 我々が岡山観測所にてステファンの五つ子に属する銀河 NGC7318B 中に検出したもの. (c) 図1 (a) 中の枠内に相当する領域の電離ガス・イメージ. 通常の可視光イメージとは全く異なる様相を見せ, 幾つかの「泡状」の構造が見える. このような構造は爆発現象に伴って形成されると考えられる. (d) ULR のスペクトル. 泡状構造の一部 (図1(c) の + マークの位置) を我々が岡山観測所で観測したもの. 図1 (b) の通常の星生成領域に比べて, H α 輝線の幅が明らかに広く, [SII] 輝線も強い.

る. こうして銀河群にも, 多くの目が向けられるようになってきたのである. 特に P. Hickson などによってコンパクト銀河群がカタログされた⁴⁾ ことをきっかけに, 銀河群研究に拍車がかかった. コンパクト銀河群とは4, 5 個の銀河から構成される小さな銀河集団であるにも関わらず, その局所的な銀河密度は銀河団中心にも匹敵するという銀河集団である. つまりコンパクト銀河群では銀河衝突が頻繁に起こることが期待されるため, 銀河の形成や進化に対する環境の影響を調べる格好の研究対象となり得る. そして問題のステファンの五つ子も, Hickson によってコンパクト銀河群として分類されているのだ.

ステファンの五つ子を天文学という意味で特に

有名にしたのは, 独特の宇宙論を展開する H. Arp であろう. 実際のところステファンの五つ子は, 本当の意味での「五つ子」では無い. 最も南東に位置する銀河 NGC7320 だけは, 他の四つの銀河の後退速度がおおよそ 6000 km s^{-1} であるのに対して, 約 780 km s^{-1} の後退速度しか持たない. ほとんどの天文学者は NGC7320 を, ステファンの五つ子よりもずっと手前に存在する物理的に無関係な銀河であると考えている (本稿では我々も今後その立場で議論を続ける). Arp はこれに対して, NGC7320 はステファンの五つ子の真のメンバーであり⁵⁾, 銀河の後退速度は実際の距離とは無関係である, と主張している.

ステファンの五つ子は, 今までに多くの天文学者

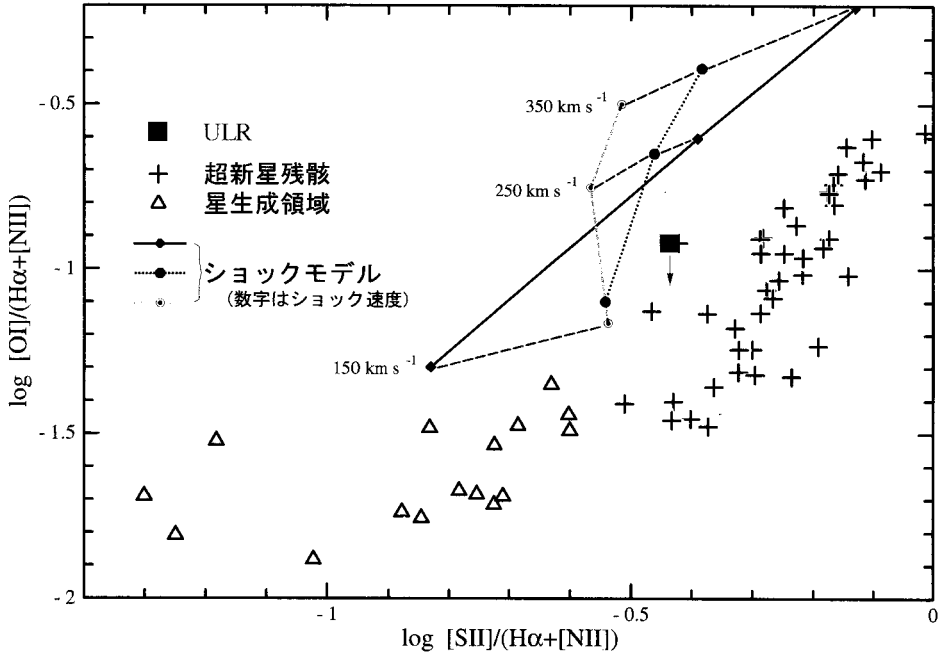


図2：ULR，星生成領域，超新星残骸，そして太陽元素組成のショックモデルに対する [OI]対 $H\alpha + [NII]$ 輝線強度比（縦軸）と [SII]対 $H\alpha + [NII]$ 輝線強度比（横軸）による「輝線比-輝線比」ダイアグラム。明らかにULRは超新星残骸的なスペクトルを示していることが分かる。

を魅了してきた最も有名な銀河群の一つである。しかし「有名であること」＝「理解されている」ことでは無い。我々はステファンの五つ子の研究を通して、そのことを思い知らされることになったのだ。

3. 輝線成分，速度幅約 1000 km s^{-1} !?

前置きがずいぶん長くなってしまったが，ここで最初に紹介した最初の1フレームに捉えられた異常な $H\alpha$ 輝線成分に話を戻そう。この時分光観測した渦状銀河 NGC7318A のスペクトルそれ自体は特に変わったものでは無かった。しかし，我々のメンバーの一人が，NGC7318A の銀河中心から大きく離れた場所に，異常に広い線幅の $H\alpha$ 輝線成分が存在していることに気付いたのだ（図1d）。これは一体何なのか？

ここからは，この線幅が広い特異な $H\alpha$ 輝線を放射する領域を Unusual emission-Line Region (特異

電離輝線領域)と呼び，ULR と略することにする。最初にまずULRの基本的な性質をチェックしよう。図1dを見ると実際のスペクトルには $H\alpha$ 輝線だけでなく，中性酸素 [OI] 輝線や電離硫黄 [SII] 輝線，電離窒素 [NII] 輝線も確認できる。そしてULRの $H\alpha$ 輝線の後退速度はステファンの五つ子に属する他の銀河の後退速度とほぼ一致しており，ULRがステファンの五つ子に属する天体であることがわかる。また，ULRはNGC7318Bの南東の腕の先端付近にあるが，詳しく見ると可視光イメージ（図1a）での南東の腕よりも多少東側にずれたところに存在する。すなわち，ULRの場所には星団のような対応天体は見当たらず，ULRはほとんど輝線しか放射していない天体であることがわかる。

次に，ULRのスペクトルをよく素性の分かった電離ガス輝線を放射する様々な天体と比較してみよう。ULRのスペクトルを同じ観測期間中に同

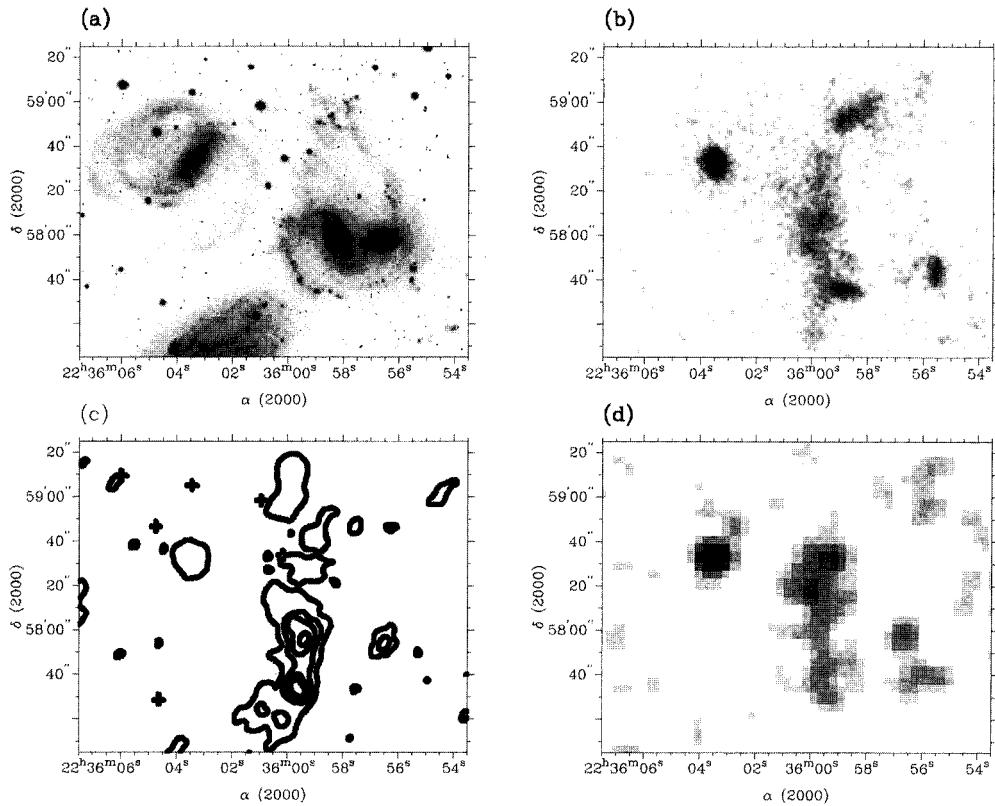


図3：ステファンの五つ子の多波長イメージ。(a) 可視光 (B バンド) イメージ。CFHT のデータ・アーカイブ (PI: Mendes) より。(b) 電離水素ガス ($H\alpha$) イメージ。我々が東京大学木曾観測所で観測したもの。(c) 電波連続波イメージ。van der Hulst and Rots (1981)⁶⁾より。(d) 軟X線イメージ。ROSAT データ・アーカイブ (PI: Pietsch) より。この4つのイメージは全く同じ領域である。(b) では NGC7318B の東側の腕に沿った弓状の電離水素ガス領域が特徴的であり、この「弓状」領域が電波連続波と軟X線でも明るいことは見逃せない。なお、NGC7319 は活動銀河核 (AGN) であり、(b), (c), (d) で明るく見えている。

じ観測条件で観測した星生成領域のスペクトル (図 1b, d) と見比べて欲しい。まず気が付くことは、ULR の輝線速度の幅が非常に広いことである。半値幅を速度に換算すると 900 km s^{-1} にも達している。これは ULR の電離ガスが激しい運動をしていることを物語っている。さらに $H\alpha$ 、[OI] や [SII] などの輝線強度に注目してみよう。ULR のスペクトルを星生成領域のスペクトルと比べてみると、ULR では $H\alpha$ 輝線に対する [SII] 輝線強度がより強くなっていることがわかる。さらに詳細な輝線強度比の比較を行うために「輝線比-輝線比ダイアグラム」を使ってみよう。ここでは [OI] 対 $H\alpha$ + [NII]

輝線強度比と [SII] 対 $H\alpha$ + [NII] 輝線強度比を用いた。図 2 は ULR, 星生成領域, 超新星残骸, それに太陽元素組成のショックモデル計算値に対して作成したものである。超新星残骸の輝線放射も基本的にはショックによるものである。しかし、超新星爆発で放出された重元素のため、電離ガスの元素組成が太陽組成と異なり、結果として輝線比が太陽組成のショックモデルから期待される値とは異なるものになる。そして図 2 から、ULR の輝線比は太陽組成のショックモデルよりも [SII] が強く、超新星残骸的であることが分かる。

以上のように ULR の電離ガスは、激しい運動を

しており、超新星残骸的な電離ガス状態にある、という特異な性質を示すものである。そしてこれらの特徴は「超新星爆発」という一つのキーワードで結び付けることができそうである。しかし一般に超新星残骸のスペクトルはULRほど幅の広い輝線幅を示さない。つまり、ULRが一種の超新星残骸であることは確かであるが、超新星残骸の中でも極端に「激しく大規模」なものようである。それでは一体ULRはどの程度「激しく大規模」なのだろうか？ また何故「激しく大規模」なのだろうか？

この答えを出す前に、輝線成分だけを取り出すような「電離ガス・イメージ観測」の結果について述べよう。この結果も、事前の予想を裏切るような非常に驚くべきものであったのだ。

4. 100万個の超新星残骸

ULRの性質を理解するにはULRが空間的にどのように分布しているかを知ることが重要である。そこで我々は分光観測に続いて、「電離ガス・イメージ観測」を行うことにした。この観測では特定の輝線成分だけを取り出し、その空間分布を調べることができる。つまり輝線を放射する電離ガスの存在領域を特定できる訳である。機器は東京大学理学部天文学教育研究センター木曾観測所の105 cm シュミット望遠鏡を使用し、H α と[NII]輝線しか通さないようなフィルターを用いた。

この観測によって得られた電離ガス・イメージは、これまた全く驚くべきものであった。図3bを見て頂きたい。このイメージを見ただけでこれがステファンの五つ子であることを言い当てられる人はまずいないだろう。これは図3aと全く同じ領域なのである！ 殆どの電離ガスがNGC7318Bの東側で弓状に分布しており、しかもその「弓状」領域は銀河サイズを超えるほど巨大なものなのである。この電離ガス・イメージ(図3b)を普通の可視光イメージ(図3a)と比較すると、この輝線で輝く「弓状」領域はNGC7318Bの南東と北東の腕に沿って

分布していることが判明した。ULRの謎を解明するための電離ガス・イメージは、新たな謎を我々の前に突き出してきた。この「弓状」の電離ガス領域は一体何なのか？

ステファンの五つ子に関する他の研究を調べてみると、さらに興味深い情報が得られた。まず1981年のvan der HulstとRotsによる電波連続波観測⁶⁾では、すでにこの「弓状」構造が確認されていた(図3c)。彼らの電波連続波マップを我々の電離ガス・イメージと比較してみると、両者は驚くほど一致している。この可視域輝線だけでなく、電波連続波でも明るいという性質は、我々がこの「弓状」構造の正体を考える上で強い制限を与えてくれる。通常の星生成領域ではこのような強い電波強度を説明することは困難である。また電波スペクトルの傾きは通常の星生成領域のものと全く異なるものであり、この領域における電波放射がショック領域や超新星残骸からの「非熱的な」放射によることを示している。また電波だけでなく、Pietschらによる最近の研究から、この「弓状」の領域は軟X線でも明るく輝いていることが明らかにされた⁷⁾(図3d)。以上のように、我々が発見した「弓状」の電離ガス領域は可視域輝線、電波連続波、軟X線の各波長で明るく輝いている。van der HulstとRotsはこの「弓状」構造の起源として二つの可能性を掲げている。一つ目は銀河衝突による衝撃波、二つ目は超新星残骸の集団、である⁶⁾。銀河衝突に伴う衝撃波では、確かに銀河の衝突面にそって「弓状」の衝撃波(いわゆる「バウショック」)が生じ、衝撃波面の直後にはショックのエネルギーで電離されたガスからの可視域輝線、直前には圧縮された銀河間ガスからの非熱的電波連続波が観測されるだろう。しかしこの衝撃波起源説には「弓の厚み」という致命的な問題点がある。van der HulstとRots自身が指摘しているように、衝撃波面は非常に薄くなるため、それに伴って電離ガス領域や電波連続波領域も薄くなるはずなのである。ところが、実際の「弓状」構造はかなり厚

く、ここに非常に薄い衝撃波面があるとは考え難い。また銀河衝突による衝撃波であれば、銀河の腕に沿って様々な放射成分が分布する必要性が無い。という訳で、がぜん可能性が高くなってきたのは二つ目の「超新星残骸の集団」起源説である。超新星残骸であれば銀河の腕に沿ってある程度広がって分布することも極めて自然である。

「弓状」領域の物理状態が見えてきたところで、改めてULRを考えてみよう。ULRが存在する領域は、「弓状」の電離ガス領域の南端付近から南東の方向に舌状にとび出した部分に相当する。電離ガス・イメージのこの部分を拡大して見る(図1c)と、この領域は幾つかの「泡状」構造からなっているように見える。そしてそのサイズは数kpcにも達する。このような電離ガスの「泡状」構造は、何らかの爆発現象によって生じたと考えられる。さらに先に述べた「弓状」領域の電波連続波イメージには二つのピークが存在するが、南側のピークはこの「泡状」構造の位置に対応している。軟X線での強度も「泡状」構造の位置で非常に強いものになっている。やはりこの領域では過去に大量の超新星爆発が起こっていたのだ。では大量の超新星残骸といっても実際にはどのくらいの超新星残骸が存在するのだろうか？ 大雑把ではあるが典型的な超新星残骸を基準にして、「泡状」領域の電波連続波や軟X線の強度から必要とされる超新星残骸の数を見積もってみると、なんとその数は50万個から100万個にもなる!! 実際の超新星残骸の電波強度や軟X線強度は、その超新星残骸の年齢やガス密度などによって様々に変化することが考えられるが、少なくともこの「泡状」領域には、文字通り大量の超新星残骸が存在していることは間違いない。

しかしこの「泡状」領域には普通の可視光イメージでは何も天体が見えないということを思い出して欲しい。一般の星生成現象では大質量星のみならず小質量星までもが生成される。小質量星は大質量星に比べて何桁にもわたって寿命が長いため、

大質量星が超新星爆発を起こして消えてしまっても小質量星はまだ残っているはずである。従って、この「泡状」領域には超新星残骸のみしか存在していないということ自体が、極めて奇妙な現象なのだ。そして大質量星の寿命が1000万年程度であることを考慮すると、この「泡状」領域でこれら超新星残骸の元になった大質量星はほぼ同時に、生成される必要がある。単なる偶然という理由以外で、「同じ領域で大質量星のみがほぼ同時に生まれる」ことなど有り得るのだろうか？

5. ステファンの五つ子で、いったい何が起こったか？ ——まとめ

数々の非常に特異な性質を持つNGC7318B、ここでその形態をもう一度詳しく見て頂きたい。NGC7318Bはすぐ西隣のNGC7318Aと非常に近接しており、この両者は今まさに相互作用していると考えられる。このような銀河間相互作用の履歴は銀河の形に残ることが多い。本文中ではこれまでただ漠然とNGC7318Bの「北東の腕」とか「南東の腕」とか述べてきたが、これらの「腕」はいずれもNGC7318Bの本体の東側にあり、それぞれ北側と南側に反対向きに曲がりながら伸びている。このような「腕」は通常の渦状銀河では見られない特徴である。最も自然な解釈は「NGC7318B自身が合体銀河である」ということである。

ここで、アンテナ銀河NGC4038/4039⁸⁾を思い出して欲しい。アンテナ銀河は2つの銀河が今まさに衝突している真っ最中の姿である。その美しく左右対称にのびた巨大なテイル(尾)があたかもアンテナを広げたように見えることから、その名前が付けられている。これらのテイルは、2つの銀河の相互作用とそれに伴う潮汐力によって形成されたものであることが知られている⁹⁾。ここでアンテナ銀河のテイルの曲り方がそれぞれ逆向きになっていることに注目して欲しい。この曲り方は、NGC7318Bの場合と同じである。つまり、NGC7318B自身が

アンテナ銀河のような合体に伴う銀河間相互作用の結果形成された銀河であり、「北東の腕」と「南東の腕」はそれぞれ通常の渦状銀河の腕ではなく、銀河の合体によるテイルであると考えられないだろうか？

Barnes と Hernquist などの数値計算¹⁰⁾から、アンテナ銀河のようなテイルは銀河衝突開始後 1000 万年程度の比較的短い時間で形成されることがわかっている。この時、巨大な星生成領域がテイルに沿って形成され、生まれる大質量星の寿命も 1000 万年程度であるので、テイルに沿ってほぼ一斉に星生成領域ができることになる。テイル全体での星生成が非常に短期間に起きれば、やがて大質量星が一斉に超新星爆発を起こし、その後にはテイル全体が超新星残骸で埋め尽くされる時期が来る。これこそが今、NGC7318B の「北東の腕」と「南東の腕」で起こっていることではないだろうか？つまり電離ガス・イメージで見える巨大な「弓状」構造の正体は、銀河衝突の結果生じた二つのテイルが一見一つに見えているものと考えられるのだ。勿論、こう考えても今までの観測結果とは何ら矛盾しない。テイルにおける星形成の基本的性質はよく分かっていないが、銀河衝突によって形成されたテイルの南端に、100 万個もの大質量星の集団が生まれ、ULR の母体となったのではないかと。それから 1000 万年の後、その大質量星が一斉に寿命を全うして超新星爆発を起こす。そしてその後には 100 万個の超新星残骸、すなわち ULR だけが残されるのである。

いずれにせよステファンの五つ子で現在見られるような現象はせいぜい 1000 万年程度のタイムスケ

ールのもので、宇宙や銀河の進化にかかる年月に比べればほとんど一瞬の出来事である。故に宇宙広しといえどもこれほど激しい活動性を示す相互作用銀河は非常に希であろう。我々は幸運にも、ステファンの五つ子の中にその一瞬を見いだすことに成功した。今後の研究の展開を、興味深く見守っていききたい。

参考文献

- 1) Ohya, Y., Nishiura, S., Murayama T., & Taniguchi, Y. 1998, ApJ, 492, L25
- 2) Stephan, M. E. 1877, MNRAS, 37, 334
- 3) Dressler, A. 1980, ApJ, 236, 351
- 4) Hickson, P. 1982, ApJ, 255, 382
- 5) Arp, H. 1987, in QUASARS, REDSHIFTS, AND CONTROVERSIES (Interstellar Media: Berkeley)
- 6) van der Hulst, J. M., & Rots, A. H. 1981, AJ, 86, 1775
- 7) Pietsch, W., Trinchieri, G., Arp, H., & Sulentic, J. W. 1997, A&A, 322, 89
- 8) 例えば, Whitmore, B. C., & Schweizer, F. 1996, AJ, 109, 960
- 9) Toomre, A., & Toomre, J. 1972, ApJ, 178, 623
- 10) Barnes, J. E., & Hernquist, L. 1992, Nature, 360, 715

Stephan's Quintet

Youichi OHYAMA, Shingo NISHIURA, Takashi MURAYAMA, Yoshiaki TANIGUCHI

Astronomical Institute, Tohoku University

Abstract: We report the optical spectroscopic discovery of unusual emission-line region in the tidal tail arm of a galaxy NGC 7318B, that belongs to Stephan's Quintet. All observational results suggest that there are $\sim 10^5 - 10^6$ supernova remnants in this region.