

タイプと相関があり、晩期型の銀河程現在の星形成は活発であること、またどのタイプにおいても星形成率は銀河形成以来時間と共に単調減少してきたらしいこと（最も晩期型の銀河ではむしろ増加している可能性もある）、などが、可視域における観測からわかってきた。このような規則性は、銀河を2色図上でプロットすると1本の曲線上に集中することに反映される(図2 a)。1978年、イェール大学のラーソンとティンズレーはアープのカタログにある銀河を同じようにプロットしてみた²⁾。驚くべきことにアープの銀河は2色図上で大きな散らばりを示す(図2 b)。これは星形成率が時間的に不規則な変動をしてきたことを示している。ラーソンとティンズレーは色進化のモデル計算を行い、これらの銀河では、数千万年という銀河進化から見るとごく短い期間に、全体の質量の数パーセントにあたる星が形成されたと結論した。これは普通の銀河における星形成率より一桁大きく、彼らはこのような突発的な星形成をバーストと表現した。このスターバースト現象はその後電波からX線にわたるまでの幅広い波長域の観測によって確認されている。

H α などによる星形成領域のマッピングによって、1つ不思議なことが浮び上がってきた。それ

は、ほとんどの相互作用銀河においてスターバーストが中心核付近の1~2キロパーセク以内で発生していることである。接近した銀河同士の潮汐力は銀河円盤の外側に行く程強く作用する。逆に銀河中心ではゼロとなる。銀河の外縁部ではなく中心核付近が活性化されていることはどのように考えたら良いのだろうか。更に、星形成だけでなく、セイファート銀河やクェーサーといった真正正銘の中心核活動(AGN と呼ぶ)も銀河相互作用に誘起されていると主張する人もでてきた(キール, ダハリ, ハッチングスとキャンベルなど)。以下に述べるように、この問題の解明は数値シミュレーションの精密化と密接に関連している。AGNについてはのちほど触れることにして、ひとまずスターバーストについて考えてみよう。

3. 現実的銀河相互作用モデル

一口に銀河相互作用のシミュレーションといってもそれには多くのレベルがある。最も簡単なのは、トゥームレ達が行ったように、固定中心力場中にテスト粒子から成る回転円盤を作り、それを銀河円盤とするものである。この場合、2銀河の重力場中における制限3体問題を考えることになる。現実の銀河円盤と比べてみると、ここには欠けて

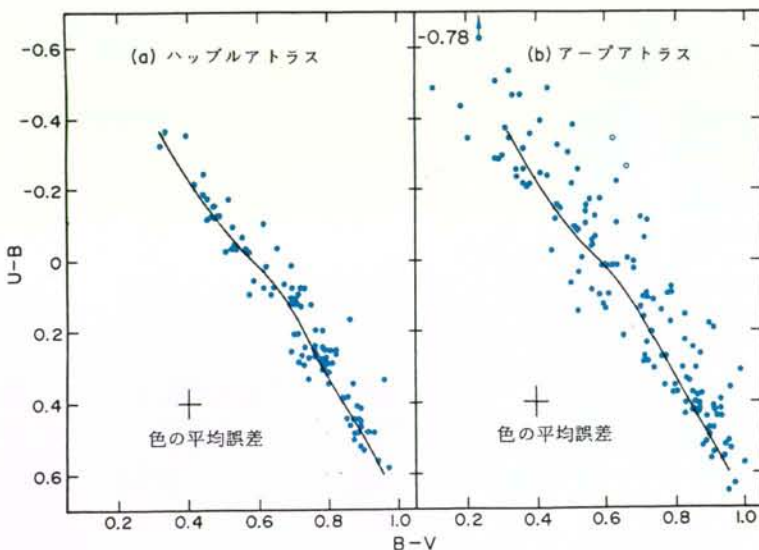


図2 銀河の2色図上の分布。(a)は正常銀河、(b)はアープアトラスの相互用銀河の分布である。

いるものが（少なくとも）2つある。それは円盤自身の重力（自己重力）と、星間ガスである。自己重力を考えないモデルは、潮汐力に対する銀河のレスポンスを過小評価するであろう。またガスのレスポンスはエネルギー散逸効果のため、一般に星のレスポンスとは異なるであろう。ガスは星形成や AGN におけるエネルギー発生に不可欠である。こうした考えから、筆者は恒星円盤の自己重力と星間ガスを考慮したシミュレーション・コードを作成し実行してみた⁹⁾。自己重力の計算にはパーティクル・メッシュ法を使用した。星間ガスは有限半径の星間雲（クラウド）の集合としてモデル化し（クラウド粒子法）、クラウド間の衝突によって運動エネルギーの散逸と星形成が起こると仮定した。

図3は、質点としての等質量相手銀河が放物軌道で銀河半径の2倍の所を通り過ぎたときの形態変化である。近銀点通過($T=0$)直後は、星、ガス共に2本の渦状腕（テイルとブリッジのでき始め）を形成するが、数億年後($T=6.28$)に恒星円盤の中心部に棒状構造（バー）が形成される。トゥームレ達のテスト粒子モデルでは当然のことながら円盤の外部のみが乱され、中心部はほとんど影響を受けていない。つまり、銀河円盤の自己重力が、中心部における擾乱の成長を助け、顕著なバーを発生させたと考えられる。バーの長さや回転角速度は円盤モデルによって異なるが、重要なことは、バーがガスの角運動量を非常に効率良くうばうことである。これとエネルギー散逸効果（クラウド同士の衝突による）のためにガスは銀河中心部に落下する。ガスの落下が顕著なのは、相手銀河の接近後数億年～10億年経った時点で、1年あたり1太陽質量程度のガスが中心部に流入する。この時期、中心付近では流入した大量のガスを原料として活発な星形成が起こると考えられる。また仮に銀河中心に大質量ブラックホールが存在し、流入したガスが最終的にそこに降着することを考えると、 10^{46} エルグ/毎秒程度のエネル

ギーが発生し得る。これは典型的なセイファート銀河のエネルギーをまかなうのに充分である。いずれにせよ、このモデルでは相手銀河の接近後数億年で中心核近傍の活動現象が活発化し始めることになる。

セイファート銀河 NGC 1068 の分子ガスの分布にはリング構造と中心核のピークがみられ⁴⁾、図3の $T=13.8$ に良く似ている。近赤外観測⁵⁾ではリングに内接する形でバーが見つかっており、この点でもモデルと良く一致する。NGC 1068 は通常、孤立銀河とされるが、銀河半径の20倍程度離れたところに NGC 1055 と NGC 1072 という銀河が存在するのは興味深い。モデルによれば近接遭遇から中心核の活性化まではかなりの時間差があると考えられるので、NGC 1068 がこれらの銀河と過去に遭遇し、それがセイファート活動の引き金になった可能性は高い。

ここで見たように、銀河円盤の自己重力が潮汐相互作用と中心核活動を結びつけるリンクであった。モデル計算の結果によれば、中心核活動とは別に、相互作用銀河では孤立銀河よりも棒状銀河の割合が大きいはずである。実際にアープ・アトラスの銀河では約50%が棒状銀河であり、孤立銀河における約30%に比べて高そうである。エルメグリーン達の統計的研究⁶⁾も、ペア銀河の方が孤立銀河より多くの棒状銀河を含むことを示している。もちろん孤立した棒状銀河もごくありふれた存在であり、これらは自然発生的なバー不安定⁷⁾によりできたものと考えられる。

さて、このように激しい相互作用を経験した銀河は最終的にどのような天体に進化していくのだろうか。シミュレーションの結果によれば、相互作用で誘起されたバーは一時的なもので、やがては消えていく。それに伴って銀河円盤中の星のランダム運動が大きくなり見かけが滑らかになる。また、バーが消失する過程で銀河全体の重力場が不規則に変動するため、それまで銀河円盤の周辺部に部分的に残っていたガスも、最終的にほとん

どが中心部に落下してしまう。つまり相互作用から数十億年後には、渦状腕のようなはっきりした構造を欠いた滑らかな恒星円盤の中心部で活発な星形成現象が起こっているような銀河になってしまうと考えられるのである。これはハッブル分類の枠組みにあてはまらない奇妙な銀河であるが、アモルファス銀河と呼ばれるものや、S0銀河の

いくつかは、まさにこのような構造をもっている⁸⁾。この時点では、相手銀河はるか彼方に遠ざかってしまっていて、相互作用銀河と認定できない可能性もある。宇宙には、遠い昔相互作用によって明るく輝いた銀河の「化石」が数多く眠っているのかもしれない。

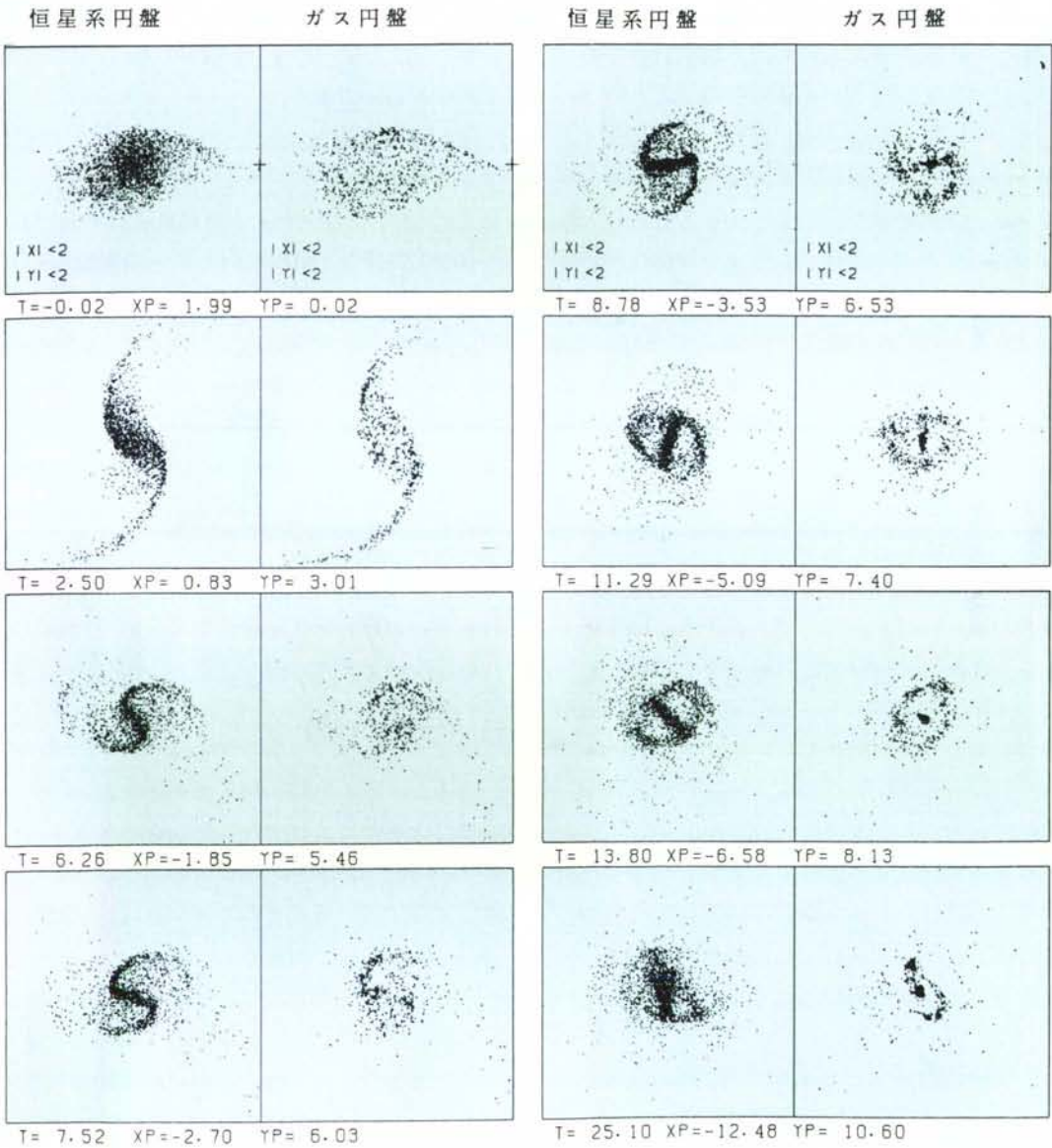


図3 相互作用モデルの一例。わかりやすくするために左に恒星系円盤を、右にガス円盤を別々に示した。相手の銀河は示されていない。時間(T)は一億年単位。

4. マージャー

前節ではいわゆる接近遭遇について述べたが、ここでは、より強い相互作用モードとして銀河の合体（マージャー）について触れたい。マージャーの理論的可能性そのものはアラディンが1965年に解析的な議論によって示した⁹⁾。それによると、2つの銀河が近距離を比較的低速度ですれ違った場合、軌道運動のエネルギーが部分的に内部エネルギーに転化されるため、それらは再び離れることができず、1つの天体を形成するというのである。マージャーは一時、楕円銀河の形成メカニズムの一つとして提案され、数多くの数値シミュレーションによって、マージャーした後の天体（レムナント）が楕円銀河と同じような構造や運動学的性質をもつかどうか調べられた。最近では多くのマージャーが赤外線天文衛星（IRAS）のサーベイにおいて明るい天体として同定されたことによって、活動現象の面から再び注目されている。IRASの観測によれば最も明るいマージャーは太陽の 10^{12} 倍程度の遠赤外線を出している。これがOB型星に熱せられたダストからの熱輻射であるとすると、星形成率にして1年あたり200太陽質量程度の激しいスターバーストが起きていることになる。また、干渉計による分子ガスのマッピングでは、中心部のキロパーセク程度の領域に 10^9 太陽質量ものガスが集中していることがわかっている。

バーンズとハーンキストは、ツリーコードと呼ばれる重力計算法を用いて、ガスも考慮したマージャーの詳しいシミュレーションを行った¹⁰⁾。それによると、まずそれぞれの銀河内に星のバーが発生し、ガスが銀河中心に集められてコアをつくる。マージャーの進行と共にガスコア同士も合体し、系の中心に1つのガスコアが形成される。筆者もツリーコードを用いて同様な計算を行った¹¹⁾。星形成率の変化に興味があったため、ガスはクラウド粒子法によって扱い、クラウド間の衝突

頻度（これは星形成率に比例する）の時間変化を調べてみた。その結果、マージャーにおいては星形成率が1億年程度の間隔で周期的に10倍から30倍も上昇することがわかった。まずマージャーの初期にそれぞれの銀河の中心部にガスが集中しコアができる。両コアはマージャーの進行に伴って互いに接近していくが、軌道が長円形であるため、近づいたり離れたりしながら徐々に合体していく。コア同士が一時的に近づくと、クラウドの運動が乱されクラウド間の衝突つまり星形成が盛んになるわけである。

遠赤外線非常に明るいマージャー、Arp 220には、電離ガスのバブルが2対、半径5キロパーセクと12キロパーセクの所に見られる。これは、Arp 220で過去2回にわたって大規模な中心核スターバーストが起こり、その時発生したウィンドが周囲のガスと衝突してできたものと考えられる。半径と膨張速度から推定される両スターバーストの時間差は5千万年であり、モデルと矛盾しない。ヘックマン達¹²⁾によれば多くのマージャー銀河で数キロパーセク程度に広がった電離ガス領域が観測されている。マージャーにおけるスターバーストとそれに駆動されるウィンドという現象は銀河におけるガスの進化を考える上で避けて通れない現象であろう。

5. 今後の課題

このように、銀河の相互作用とそれに伴う活動現象のメカニズムはかなり解明されてきたといえる。残された問題の一つは、もしもAGNが相互作用によって誘起されているとすれば、空間的スケールの大きく違う両者をいかに結びつけたら良いかということである。つまり、10キロパーセク程度の領域に分布している星間ガスをどのようにして中心核から1パーセク以内（最終的には太陽系サイズの降着円盤まで）に落とし込むかという問題である。これについて最近シュロスマン達は興味あるアイデアを提唱している¹³⁾。彼らは、バー不

安定が次々と小さいスケールにカスケードしていくと考えた。何らかの原因で銀河円盤サイズのバーが発生したとしよう。バーによりガスは中心部に掃き集められるが、ガスの角運動量が正確にゼロとはならないであろうから、ガスは中心部に小さい(バーの長さの10%程度の)円盤を形成するであろう。そのままガスの蓄積が続くとすると、やがて、ガス円盤の質量が中心部に最初から存在していた恒星系の質量と同程度になる時期がやってくる。するとこのガス円盤はバー不安定を起こし、それによりガスが更に内側に流入していくであろう。この過程は適切な条件下では自己伝播していく可能性がある。このシナリオを検証するために、現在筆者達は、自己重力ガスを含んだ円盤のバー不安定を数値シミュレーションによって調べている。

これと共に、スターバーストとAGNの因果関係というもう1つの問題が浮かび上がってくる(天文月報1991年12月号、谷口義明氏の記事参照)。スターバーストはAGNの原因なのか結果なのか、それとも両者は基本的には独立な現象なのであろうか。これは単に相互作用銀河にとどまらず、銀河の形成と進化全般に関わる重要な問題である。従来、銀河形成の問題は宇宙の初期密度ゆらぎの成長というグローバルな観点からとり扱われることが多かった。90年代の銀河天文学の1つのあり方として、中心核という「マイクロ」な領域から銀河の形成と進化を捉えるという視点がでてくるかもしれない。

参 考 文 献

- 1) Toomre, A., Toomre, J. 1972, *Astrophys. J.*, **178**, 623.
- 2) Larson, R. B., Tinsley, B. M. 1978, *Astrophys. J.*, **219**, 46.
- 3) Noguchi, M., *Astron. Astrophys.* 1988, **203**, 259.
- 4) Planesas, P., et al. 1991, *Astrophys. J.*, **369**, 364.
- 5) Telesco, C. M., Decher, R. 1988, *Astrophys. J.*, **334**, 573.
- 6) Elmegreen, D. M., et al. 1990, *Astrophys. J.*, **364**, 415.
- 7) Ostriker, J. P., Peebles, P. J. E. 1973, *Astrophys. J.*, **186**, 467.
- 8) Gallagher, J. S., Hunter, D. A. 1987, *Astron. J.*, **94**, 43.
- 9) Alladin, S. M., 1965 *Astrophys. J.*, **141**, 768.
- 10) Barnes, J. E., Hernquist, L. E. 1991, *Astrophys. J.*, **370**, L65.
- 11) Noguchi, M. 1991, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **251**, 360.
- 12) Heckman, T. M., et al. 1990, *Astrophys. J. Suppl.*, **74**, 833.
- 13) Shlosman, I., et al. 1989, *Nature*, **338**, 45.



(神奈川県 杵鞭充千男)