

数値シミュレーションで探る銀河群環境が 銀河の星形成に与える影響



河田 大介

〈The Observatories of the Carnegie Institution of Washington,
813 Santa Barbara Street, Pasadena, CA 91101, U.S.A.〉
e-mail: dkawata@ociw.edu

近年の計算機の進歩により、宇宙の大規模構造の進化を考慮した、銀河群形成の化学力学進化数値シミュレーションが可能になってきました。これらの数値シミュレーションの解像度は、その構成銀河の内部構造も分解できるほどに達しています。この研究では、そのような高解像度数値シミュレーションを用いて、銀河群という環境が構成銀河の星形成に与える影響を調べました。その結果、“銀河の窒息”と呼ばれる機構によって、銀河群に取り込まれた銀河の星形成が抑制される過程を、詳しく追うことができました。これにより、銀河群という小さな系でも、この窒息の機構が構成銀河の星形成に影響を与えることができることがわかってきました。

1. はじめに

銀河はいろんな環境に存在しています。ある銀河は、銀河団のような何百、何千といった銀河が密集した環境に存在します。また、ある銀河は他の銀河からは孤立した、フィールドと呼ばれる環境に存在します。そして、銀河も（人間と同じように？）環境によって、その性質が異なることが知られています。それらの性質が環境によって育てられたものなのか、それともその環境に由来する生まれつきの“血筋”によるものなのかは、いまだ多くの議論が交わされています。このような銀河の性質と環境の関係を調べることは、銀河形成と進化を理解するうえで非常に重要な鍵となる研究です。そのため、長い年月をかけて、観測と理論の両面から多くの研究がなされてきました。観測的には、例えば、1931年のカーネギー天文台の Hubble と Humason による論文¹⁾ですでに、お

とめ座銀河団で、早期型銀河が支配的に存在することが言及されています。そして、これもまたカーネギー天文台の Dressler²⁾によって、銀河の密集した領域ほど早期型の銀河が支配的であるということが定量的に示されました¹⁾。その後、銀河の星形成率なども評価され、銀河団のような銀河密度の高いところでは、星形成銀河が少ないということがはっきりしてきました³⁾。これは、銀河の密集する環境では、星形成を抑制する何らかの機構が働いていることを示唆しています。

一方、最近の観測により、数個から数十個の銀河で構成されるような銀河群でも、その構成銀河の星形成が抑制されていることがわかってきました⁴⁾。宇宙の星のほとんど半分は、このような銀河群の中の銀河に、存在すると考えられているため⁵⁾、銀河群環境が構成銀河に与える影響は、宇宙全体の星形成史を考えるうえでも、非常に重要となってきます。そして、銀河群は銀河団に比べ

*1 彼らの観測で得られた写真乾板は、現在の私の職場であるカーネギー天文台に保存されています。そのような過去の遺産の近くで仕事ができるのは、感慨深いです。

て小さな系なので、そのような環境で働く星形成を抑制する機構は、銀河団環境とは異なる可能性があるため、個別の研究が必要です。

ここでは、環境が銀河を育てたという観点から立って、銀河が銀河群に取り込まれることによって星形成が抑制されたかとする、どのような物理過程が星形成を抑制したのかを考えます。そのような星形成を抑制する機構として現在考えられている理論は、次の三つに大きく分けられます。一つめは、銀河同士の合体や、銀河同士⁶⁾、⁷⁾、^{*2}または銀河群と銀河⁸⁾の重力的相互作用によるものです。ここでは、このような力学的要因により爆発的星形成が起因され、それによりガスが消費尽くされる、あるいは、超新星爆発による加熱によって、星間ガスが吹き飛ばされ、ガスを失うことにより星形成が打ち切られるというシナリオが考えられています。実際、銀河群のような少数の銀河からなる系では、銀河の合体が起こりやすいと考えられており、このシナリオは銀河群での星形成抑制の有力なシナリオの一つです。

二つめは、“低温ガス成分のはぎ取り”です。銀河が銀河団などに取り込まれ、その中を運動すると、銀河団の高温ガスからラム圧（動圧）を受けます。その圧力が十分大きいと、星形成領域である銀河の低温ガス円盤が銀河から一気にはぎ取られるため、銀河の星形成が抑制されます⁹⁾。しかし、このためには、非常に大きな動圧が要求されるため、銀河群のような小さな系では有効ではないと考えられています。

最後に挙げるのが、“銀河の窒息”と呼ばれるものです。密度の濃い低温ガス円盤に比べて、銀河のハロー領域に存在するような比較的温かいガスは、その密度が薄いため、小さな動圧でもはぎ取られます。しかし、このような温かいガスは、低温ガスの供給源でもあります。そのため、これらのはぎ取られると、銀河は低温ガスの供給源を失

い星形成によりそれまでに存在した低温ガスを消費尽くしたとき、星形成を終了せざるをえなくなります¹⁰⁾。

このような機構は、理論的にも多くの研究がなされてきましたが、実際の宇宙の階層的構造形成に基づく複雑な銀河群形成の中で、実際にどのような機構が有効に働くかは、詳しく調べられていませんでした。われわれは整合的な高解像度宇宙論的シミュレーションの中で形成した銀河群で、“銀河の窒息”の機構が働いていることを発見しました¹¹⁾。本稿ではそのシミュレーション結果を紹介します。

2. GCD+ と数値銀河群カタログ

この研究では、現在、私の指導教官であるカーネギー天文台の **Mulchaey** と進めている“数値銀河群カタログ”計画の銀河群形成数値シミュレーションの一例を利用しました。この計画は、私が独自に開発した銀河化学力学進化シミュレーションコード (**GCD+** という名前です)¹²⁾を用いて、約 30 個の質量も形成史も異なる銀河群形成の宇宙論的数値シミュレーションを行おうというものです。最終的には、これらのシミュレーション結果を最新の観測と比較することにより、(銀河団に比べて、系として未熟であるためか?) 多種多様で、つかみどころのない銀河群という系を、系統的に理解することを目標としています。

GCD+ は、私が大学院生のころから開発を始め、現在まで長い年月をかけて少しずつ改良され、今も進化し続けている数値シミュレーションコードです。このコードは、粒子法を採用しており、ダークマター、星、ガスの重力相互作用、ガスの流体力学、ガスの輻射冷却、星形成、超新星爆発による加熱、そして星形成や超新星爆発などに伴う重元素生成循環過程(化学進化)といった、銀河形成におけるほとんどすべての重要な物理過

*2 Toomre らによる研究が有名ですが、シミュレーションを志すものとして、1941 年の Holmberg による電球を用いた N 体シミュレーションによる論文も、敬意とともに、引用させていただきました。

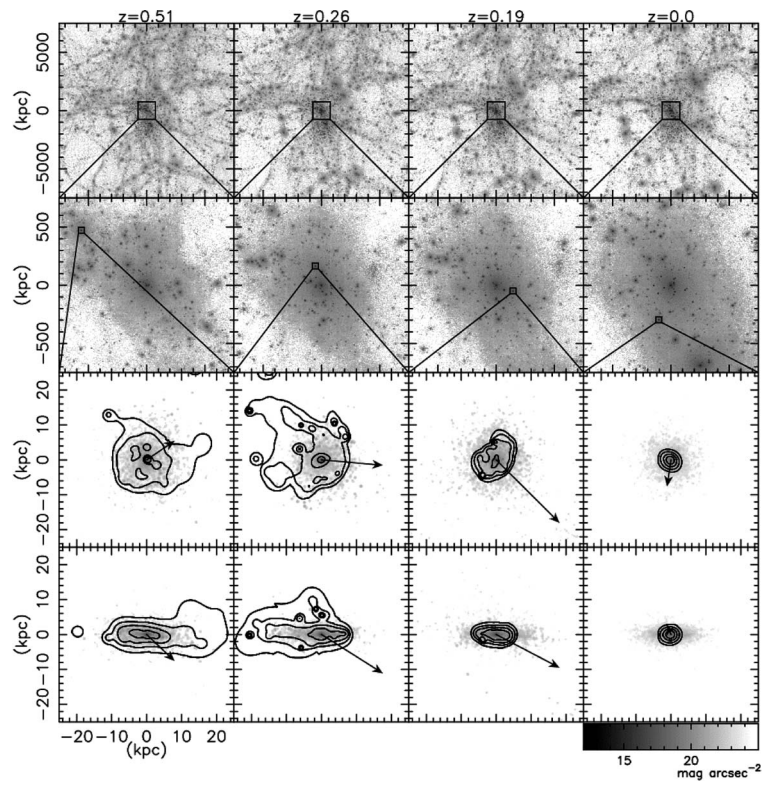


図1 数値シミュレーションで得られた銀河群の異なる赤方偏移 (z) での形成過程の様子. 一段目は広域 (一辺 15 Mpc) でのダークマターの密度分布. 二段目は, 銀河群領域でのダークマターの密度分布. 三段目と四段目は, 今回注目する銀河 (“銀河 A”) を中心とした二段目で四角に囲まれた領域の拡大図で, それぞれ, 銀河 A の円盤面を正面から見たとき (三段目) と横から見たとき (四段目) の R バンドでの表面輝度分布を示しています. 等高線は低温ガスの表面密度分布を, 矢印は銀河 A の銀河群に対する速度を表示しています. 矢印の長さは速度の大きさに対応しています.

程を整合的に計算できるコードとなっています. そのため GCD+ による数値シミュレーション結果は, 密度や温度といった物理情報に加え, 重元素分布や星の年齢といった情報も提供します. これらの情報と高温ガスのプラズマモデルや星の進化モデルとを組み合わせると, 観測量である高温ガスからの X 線や, 星からの光赤外線のスเปクトラムを解析することができます. これにより, 数値シミュレーション結果と多波長にわたる実際の観測結果とを直接, かつ定量的に比較することが可能になっています¹³⁾.

図1に本稿の研究で用いた銀河群形成数値シミュレーションにおける, その進化の様子を示し

ます. 一段目は, シミュレーション領域のほとんどの部分を占める広域 (一辺 15 Mpc) でのダークマターの密度分布です. 二段目は, この銀河群の領域の拡大図 (一辺 1.5 Mpc) です. この銀河群は, 質量約 $8 \times 10^{12} M_{\odot}$ という比較的小さな銀河群です. この研究で注目するのは, 二段目の図において, 四角で囲まれた領域にある銀河です (以下, “銀河 A” と呼びます). 銀河 A は銀河群に取り込まれる前は, 回転速度約 150 km s^{-1} をもつ円盤銀河でした. 三段目と四段目の図は, この銀河を中心にした拡大図 (一辺 50 kpc) で, それぞれ銀河円盤の正面から見た図と横から見た図です. これらの図は, R バンドでの表面輝度分布を示し

ています。これは、この銀河を構成する星粒子の、それぞれの年齢と金属量に応じた光赤外線のスベクトラムを合成することにより作られています。等高線は、低温ガス（ここでは、任意の選択で、温度が $10^{4.3}$ K 以下のガスを低温ガスとしました）の表面密度分布を示しています。この銀河 A には、銀河群に落ちてくる前の赤方偏移 $z=0.51$ では、低温ガス円盤が存在していることがわかります。この図からも、この数値シミュレーションでは、宇宙の大規模構造から銀河群、そしてその構成銀河内の構造まで同時に追えていることがわかります*3。次の章では、この銀河 A が、銀河群からどのような影響を受けたのかを詳しく紹介します。

3. 銀河の窒息の過程

まず、図 2 の上図に、銀河 A の銀河群の中心からの距離（実線）と、この銀河群のビリアル半径（銀河群のサイズの指標：点線）の時間進化を赤方偏移を横軸にして示しました。銀河 A は、赤方偏移 $z=0.31$ で、この銀河群に取り込まれたことがわかります。そして、赤方偏移約 $z=0.2$ で最も銀河群の中心に近づき、現在（赤方偏移 $z=0$ ）では、銀河群の外に戻ってきています。図 2 の下図では、その過程での銀河 A の星形成率を実線で示しています。注目して欲しいのは、銀河 A が銀河群中心に最も近づいたときあたりから星形成率が急激に減少し、赤方偏移約 $z=0.1$ で星形成が止まっていることです。このような星形成史の大きな変化は、今回注目している比較的小さな銀河群でも、銀河 A のような大きさの円盤銀河の星形成を止めるだけの影響を及ぼすことができることを意味しています。

ここでまた、図 1 の銀河 A の拡大図（三段目と四段目）の低温ガスの密度分布に注目してください。これらの図の矢印は、銀河 A の銀河群に対す

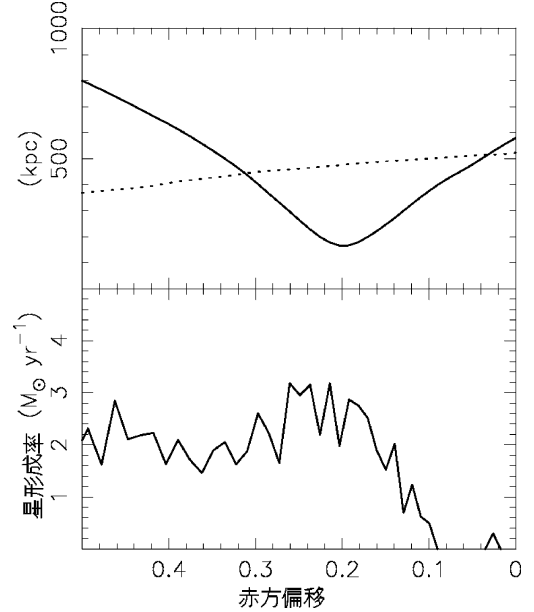


図 2 上図：銀河 A の銀河群中心からの距離（実線）と銀河群のサイズ（点線）の赤方偏移による進化。下図：銀河 A の星形成率の赤方偏移による変化。

る速度を示しています。銀河 A が銀河群に取り込まれた後、赤方偏移 $z=0.26$ で銀河 A の進行方向の反対側に低温ガスが引き延ばされている様子が見えます。これを見ると、上で挙げた“低温ガスのはぎ取り”が起きているように見えます。実際に、このような低温ガスの引き延ばされたような構造は、銀河団や銀河群の周りの銀河で観測されており、しばしば、低温ガスのはぎ取りの過程の証拠と言われます。数値シミュレーションでは、三次元の物理情報、そして、実際の時間進化を解析することができるので、本当にこれらの低温ガスが銀河からはぎ取られたのかを調べることができます。以下でその解析の結果を詳しく議論します。

図 3 は、赤方偏移 $z=0.26$ で、銀河 A の半径 30 kpc 内にあるガス粒子のそれぞれの位置での復元

*3 実際の数値シミュレーションでは、高解像度領域は、銀河群とその周辺領域だけに設定しています。それより外の領域は、低解像度で計算し、重力のみの寄与を考慮ることにより、計算の負荷を軽減しています。

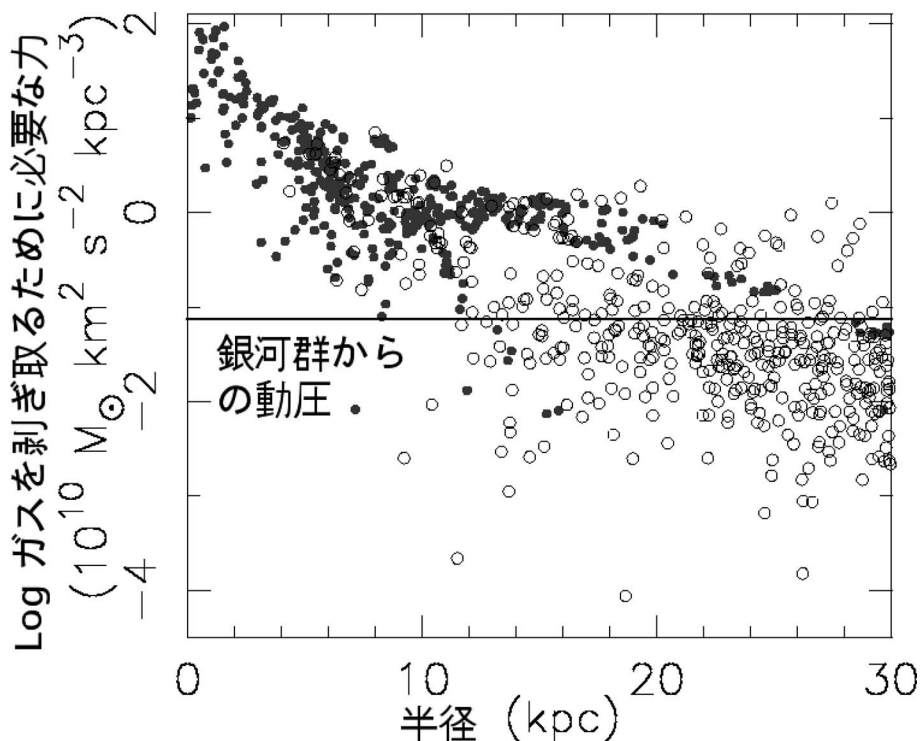


図3 赤方偏移 $z=0.26$ での、銀河 A 内の高温ガス粒子（灰色の丸）と低温ガス粒子（白丸）のそれぞれの位置での、ガスをはぎ取るために必要となる力（縦軸）と、それぞれの粒子の位置に対応する半径（横軸）。横線は、このとき銀河 A が受けている銀河群高温ガスからの動圧を示しています。

力（逆にいうと、その場所のガスを銀河の重力からはぎ取るために必要な力：縦軸）と半径（横軸）を示しています。ここでは、低温ガスを灰色の丸、高温ガス（ $10^{4.3}$ K より温度の高いガス）を白丸でそれぞれ表示しています。一方、横線で示したのが、銀河 A が銀河群高温ガスから受ける動圧（銀河 A の速度とその位置での銀河群高温ガスの密度から評価した）です。したがって、この図は、銀河群からの動圧は、この線より下のガスを銀河 A からはぎ取ることは可能だが、この線より上のガスをはぎ取るには十分ではないことを示しています。実際には、それぞれのガスにかかる動圧は、場所や時間に複雑に依存しているはずですが、この議論は、定性的な議論であることに注意してください。結果としてこの図から、この銀河群からの動圧は、銀河 A の円盤に存在した

低温ガスをはぎ取るには十分ではないということがわかります。一方、この動圧は、銀河の比較的外側の領域に存在する高温ガスをはぎ取るには、十分な大きさだということもわかります。

図4は、これらの低温ガスや高温ガスが、進化の過程で、実際に銀河からはぎ取られたのかどうかを、ガス粒子の位置と状態をそれぞれの時間で追跡することで調べた結果です。ここでは再び赤方偏移 $z=0.26$ で、銀河 A の半径 30 kpc 内にあったガスに注目しました。上図は、高温ガスについて、その進化を示したものです。点線はそのまま高温ガスとして存在し続けたガスの割合。破線は、高温ガスから輻射冷却により低温ガスへと変化したガスの割合。実線は、さらに星へと進化したものの割合です。そして、一点鎖線は系からはぎ取られた高温ガスの割合です。下図は、低温ガ

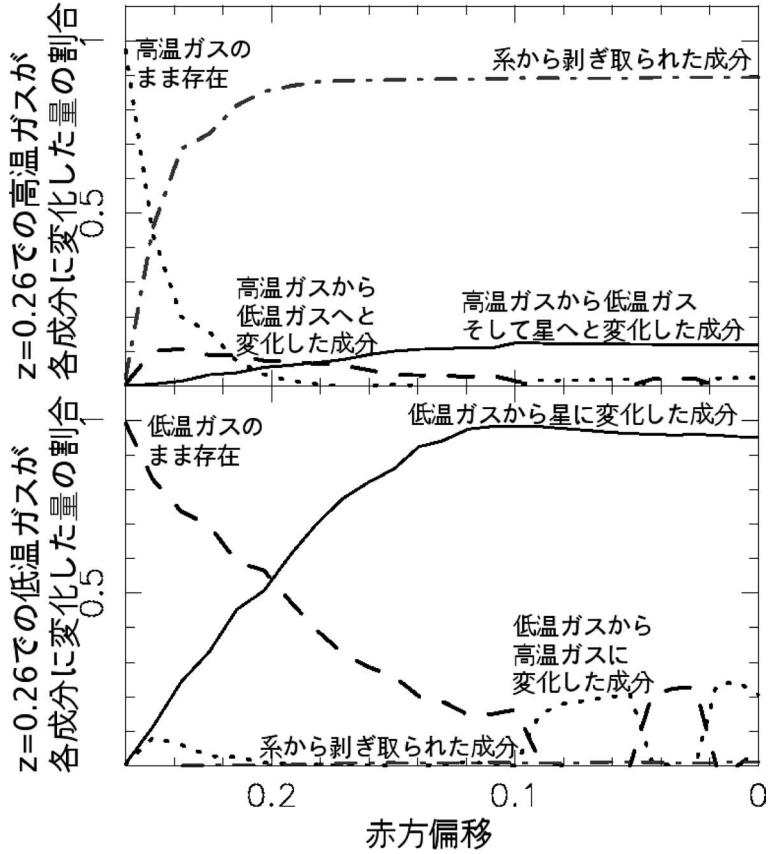


図4 上図: 赤方偏移 $z=0.26$ での銀河 A 内の高温ガスが、その後の異なる赤方偏移で、それぞれ、そのまま高温ガスで存在した割合 (点線), 低温ガスに変化した割合 (破線), さらに星へと変化した割合 (実線), 系からはぎ取られた割合 (一点鎖線). 下図: 赤方偏移 $z=0.26$ での銀河 A 内の低温ガスが、その後の異なる赤方偏移で、それぞれ、そのまま低温ガスで存在した割合 (破線), 高温ガスに変化した割合 (点線), 星へと変化した割合 (実線), 系からはぎ取られた割合 (一点鎖線).

スに対して、同じような進化の過程を、同様の線種を用いて示しました。この結果から、低温ガスはほとんどはぎ取られず、銀河内に存在し続けていることがわかります。したがって、図1で見えていた、後方に引き延ばされた低温ガスも、最終的には銀河内にとどまったということです。

一方、高温ガスは大部分 (約 90%) が銀河 A の系外へとはぎ取られています。これは、図3での定性的な評価からもわかるように、銀河群ガスからの動圧によるものです。さらに、ここで重要なのは、銀河内に残った高温ガスの大部分は低温ガ

スになり、さらに星へと変化していることです。したがって高温ガスは、実際に、低温ガス、そしてそこから生まれる星のための、重要なガスの供給源になっていることがわかります。しかし、この銀河 A の場合、銀河群に取り込まれたことにより、高温ガスが銀河群ガスからの動圧によってはぎ取られたため、低温ガスへの供給源を失っています。その結果、それまでに存在した低温ガスを、星形成によって使い尽くしたとき (この銀河の場合、赤方偏移 $z \sim 0.1$)、星形成が止まっています。したがってこの銀河 A では、上に

挙げた“銀河の窒息”が起きているということが確認できました。

4. まとめと今後の課題

今回の研究により初めて、整合的な宇宙論的数値シミュレーションにより、“銀河の窒息”の機構が、今回注目したような比較的小さな銀河群でも働くことが示されました。ここで、一つ興味深いのは、図2の上図にあるように、この窒息した銀河は、現在 ($z=0$) には銀河群の外に戻っていますが、依然として星形成が抑制されたままであるということです。これは、星形成が抑制されている銀河が観測されたとき、もし、その銀河が銀河群からある程度離れたところに存在したとしても、その銀河は過去に銀河群に取り込まれ、銀河群の影響を受けて、星形成が抑制された可能性もあるということです。

また、図1で見られるように、この円盤銀河は、ガスを使い果たして星形成を止めた後も、星で構成される円盤成分を依然として保持しています。このため定性的には、この銀河はS0銀河に分類されると言えます。実際に、最初にこの機構を提案したLarsonらは、銀河の窒息が近傍で観測されるS0銀河を作る機構なのではないかと推測しています。われわれの結果は、その猫像と一致します。今後、銀河群やその外縁に存在する銀河の性質が観測的に調べられ、それらとさらに多くの数値シミュレーションのサンプルとをより定量的に比較することができれば、この銀河の窒息とS0銀河の生成との関連を明らかにできると考えています。

また、このような銀河群による銀河の高温ガスのはぎ取りの過程は、実際に最近のX線での観測でも見つかってきています^{14), 15)}。Rasmussenらは、NGC2300銀河群内の円盤銀河NGC2276において、高温ガスが引き延ばされている様子をChandra衛星により詳細に観測しました。彼らは、観測量からの概算により、この銀河群の動圧

は、NGC2276の低温ガスをはぎ取るには十分ではないが、高温ガスをはぎ取ることは可能であると結論づけています。また、NGC2276では、 $5 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ の星形成率が観測されており、もし低温ガスの供給がなければ、10から20億年で低温ガスが使い果たされてしまいます。したがって彼らは、NGC2276は数十億年後に星形成を止め、S0銀河のようになる可能性があるとは指摘しています。NGC2300銀河群は、筆者らの数値シミュレーションの銀河群より大きな銀河群です。筆者らの数値シミュレーション結果は、同じような機構が、より小さな銀河群でも起きている可能性があることを指摘しています。

銀河群は、銀河団に比べて、銀河のより一般的な環境です。したがって、このような環境が銀河の進化に与える影響は、宇宙全体における銀河の形成と進化の猫像を解き明かすための、重要な鍵となると言えます。今後、現在進行中の数値銀河群カタログ計画により、さらに多くの数値銀河群のサンプルを生成する予定です。それらのサンプルの詳細な解析から、この銀河の窒息による星形成の抑制の過程が、銀河群と銀河の質量比や、銀河の銀河群内での軌道などにどのように依存するかも調べていきたいです。また、最初に挙げた銀河合体や低温ガスのはぎ取り取りの機構も、進化の過程の違いや銀河群の大きさによっては、重要になってくる可能性があります。これらも、さらに多くのサンプルを解析することにより、明らかにできるでしょう。数値銀河群カタログ計画によって、最終的に生成される多くの数値銀河群のサンプルは、銀河群という複雑な系を総合的に理解するための、非常に有益な情報を提供できるはずです。今後、できる限りの情報を抽出するために、注意深く解析と議論を進め、少しでもわれわれの銀河の形成と進化に関する見識が深まるよう努力していきたいです。

謝 辞

数値銀河群カタログの数値シミュレーションは、国立天文台、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部、Australian Partnership for Advanced Computing National Facility, Swinburne University の大型計算機を利用しています。関係者の方々に感謝します。また、今回執筆を薦めてくださった今西昌俊さんに感謝します。

参考文献

- 1) Hubble E., Humason M. L., 1931, ApJ 74, 43
- 2) Dressler A., 1980, ApJ 236, 351
- 3) Balogh M. L., Morris S. L., Yee H. K. C., Carlberg R. G., Ellingson E., 1997, ApJL 488, L75
- 4) Zabludoff A. I., Mulchaey J. S., 1998, ApJ 496, 39
- 5) Eke V. R., Baugh C. M., Cole S., Frenk C. S., King H. M., Peacock J. A., 2005, MNRAS 362, 1233
- 6) Holmberg E., 1941, ApJ 94, 385
- 7) Toomre A., Toomre J., 1972, ApJ 178, 623
- 8) Bekki K., 1999, ApJL 510, L15
- 9) Gunn J. E., Gott J. R. III, 1972, ApJ 176, 1
- 10) Larson R. B., Tinsley B. M., Caldwell C. N., 1980, ApJ 237, 692
- 11) Kawata D., Mulchaey J. S., 2008, ApJL 672, L103
- 12) Kawata D., Gibson B. K., 2003, MNRAS 340, 908
- 13) Kawata D., Gibson B. K., 2003, MNRAS 346, 135

- 14) Rasmussen J., Ponman T. J., Mulchaey J. S., 2006, MNRAS 370, 453
- 15) Jeltama T. E., Binder B., Mulchaey J. S., ApJ, in press

A Numerical Simulation Study of Environmental Effects on Star Formation of Group Galaxies

Daisuke KAWATA

The Observatories of the Carnegie Institution of Washington, 813 Santa Barbara Street, Pasadena, CA 91101, U.S.A.

Abstract: The advent of the recent powerful super-computers makes it possible for us to carry out chemo-dynamical simulations which follow the formation and evolution of both groups and their member galaxies, taking into account the evolution of the large-scale structure in the Universe. Using a state-of-the art high-resolution simulation, we study how the group environment impacts the star formation properties of member galaxies. We found that so-called “strangulation” works even in low-mass groups, and leads to a quenching of star formation of member galaxies.