

衝突する銀河

斎藤貴之 (神戸大学)

2023年11月30日

概要

我々の宇宙では銀河同士が衝突している衝突銀河が見つかった。衝突銀河では、星形成が活性化して爆発的な星形成を生じさせ、星団を形成し、そして銀河の形態を大きく変える。このような現象は今よりずっと過去の宇宙でより活発であったと考えられており、銀河形成-もちろん星・惑星・生命の起源もふくめて-を考える上で極めて重要な現象だと考えられる。ここでは主に銀河衝突の数値シミュレーションの発展と理解の変遷について簡単にまとめる。

我々の住む宇宙は、宇宙項があり、物質としては冷たい暗黒物質が支配的な宇宙である。この宇宙の中で天体の形成は、銀河スケールよりも小さい天体が最初に形成され、それらが合体成長しながら銀河や銀河群、銀河団などの天体を形成していく。このような形成過程にある宇宙を階層的構造形成宇宙という (図 1 参照)。

これまでの宇宙の歴史を振り返ると、現在は比較的星形成が落ち着いた時代であり、過去に遡るほど宇宙全体の星形成が活発になる。特にその頂点となる Comic noon と呼ばれる $z \sim 2$ の時代は現在よりも平均的に桁程度高い星形成率を誇る [1]。この時代、星形成に主要な貢献をしたのは Ultra luminous infrared galaxies (ULIRGs) と呼ばれる、赤外線で非常に明るい銀河である [2]。これらの近傍カウンターパートは銀河同士が接近して相互作用・衝突合体をしている銀河であり [3]、遠方においても多くが相互作用・衝突合体により高い星形成率を実現していると考えられている [4]。また、高赤方偏移で爆発的な星形成を起こしている低質量銀河でも相互作用の兆候が見つかった [5]。したがって、このような相互作用・衝突合体銀河の進化の詳細を調べることは銀河の進化過程の一側面の研究だけにとどまらず、宇宙全体の形成・進化の歴史を理解するためにも極めて重要な課題である。

銀河の相互作用・衝突合体による進化は、強非線形現象であり、その研究には数値シミュレーションが適している。知られている限り最古の銀河相互作用のシミュレーションはコンピュータが発明される以前の 1941 年に Holmberg が行った、74 個の電球とフォトセルを使った手動数値シミュレーションである [6]。光量の変化が重力の変化と同じ $1/r^2$ 則に従うので光量の変化とそれが最大になる方向を測ることで重力の向きと大きさを評価することができる。この最古のシミュレーションにおいて、銀河円盤の回転方向により近接遭遇後の円盤の構造が大きく異なることが指摘された。

以降、少し時期をおいて 1970 年代にコンピュータシミュレーションを用いた Toomre らによる先駆的な研究が行われ、円盤銀河の合体により楕円銀河に進化するという合体仮説が提唱された [7, 8]。その後、自己重力を考慮したシミュレーション、暗黒物質ハロー、銀河円盤、バルジを考慮したシミュレーション、ガス成分を考慮したシミュレーションへと発展してきた [9, 10, 11, 12]。特にガス入りのシミュレーションでは、シュミット則 ($\propto \rho^{1.5}$) にしたがって星形成すると考えると、相互作用によって励起された非軸対称ポテンシャルによる角運動量輸送で銀河中心に落ちたガスが爆発的な星形成を起こすと考えられ、銀河中心活動核の活動性を引き起こす可能性も指摘された。

衝突銀河のシミュレーションでは、例えばアンテナ銀河 (NGC4038/4039) でみられるような広がった星形成領域が再現できないという問題が指摘された。これはシュミット則に従うという仮定からの自然な結果であった。Barnes は、密度ではなくショックによるという星形成則を用いた数値実験から広がった星形成領域を再現できることを示した [13]。しかし、このようなモデル化は星形成という本質的な過程にさらにパラメータが増えるという困難がある。

私たちは、分子雲に相当する低温・高密度領域を分解できる高い分解能を用いて、衝突銀河のシミュレーションを行い、初期遭遇時に広がったフィラメント状の星形成領域による爆発的な星形成が生じること、またそこで星団が形成されることを初めて示した [14, 15] (図 2)。このシミュレーションは、星形成領域を直接分解することで、後付けのモデルを持ちなくても自然と星形成の極限的な状態を再現できることを最初に示したものである。同様のモデルで、ULIRGs の多核構造の起源の解釈や、星団の形成進化についての研究も行った [16, 17]。このような広がったフィラメント上の構造が観測的に存在するということが、ALMA を用いた観測によって示され

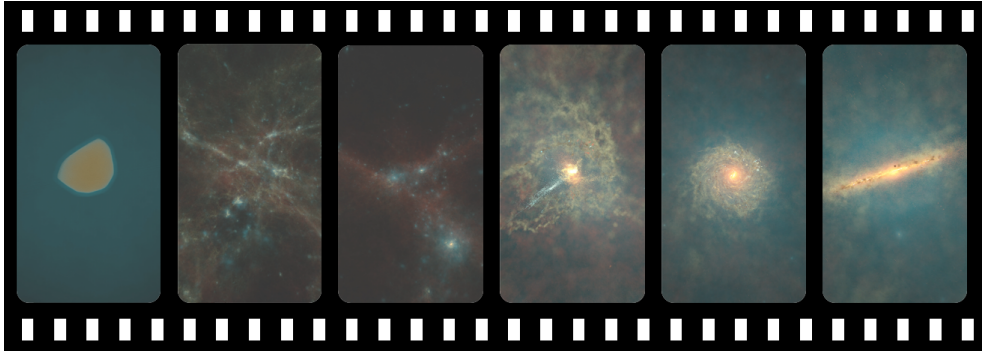


図1 銀河形成シミュレーションの例。左から右に向けて時間が経過し、円盤銀河が形成されていく。(c) 斎藤貴之・武田隆顕 <https://www.youtube.com/watch?v=Rdd9KAUcvgQ>

ている [18]。現在、高分解能を鍵とした衝突する銀河の物理状態の詳細を論じる研究は多数存在する。

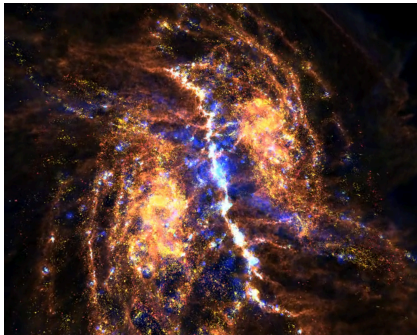


図2 銀河衝突シミュレーションの例。2つの銀河の初期遭遇時に冷たいガスに寄る巨大なフィラメント構造が発達し、そこで星形成が続き、星団を形成する。(c) 斎藤貴之・武田隆顕 <https://www.youtube.com/watch?v=7Mj5Su5kXE0>

銀河形成・進化の研究は従来、個別の恒星を直接扱わず、同じ年齢・金属量を持つ恒星集団として扱う Simple stellar population 近似が用いられてきた。近年、より高い分解能を実現し、個別の恒星を扱うシミュレーション研究に着手されつつある。私たちの SIRIUS Project では、個別の恒星の形成を扱うモデルや恒星の高精度積分、フィードバックモデルを構築し、オリオン星雲や、球状星団の形成進化の研究を行っている [19, 20, 21]。個別の恒星の形成を扱うモデルはいくつかあり [22]、その中には銀河衝突シミュレーションに応用しているものもある [23, 24, 25]。これらのモデル化による銀河形成シミュレーション・銀河相互作用・衝突合体シミュレーションは従来とは質的に異なる、遥かに詳細精密に銀河における物理状態の変遷を描き出すと期待される。

参考文献

- [1] Madau, P., & Dickinson, M. 2014, *ARA&A*, 52, 415
- [2] Magnelli, B., Popesso, P., Berta, S., et al. 2013, *A&A*, 553, A132
- [3] García-Marín, M., Colina, L., Arribas, S., & Monreal-Ibero, A. 2009, *A&A*, 505, 1319
- [4] Huang, J. S., Li, Z.-J., Cheng, C., et al. 2023, *ApJ*, 949, 83
- [5] Asada, Y., Sawicki, M., Abraham, R., et al. 2023, arXiv e-prints, arXiv:2310.02314
- [6] Holmberg, E. 1941, *ApJ*, 94, 385
- [7] Toomre, A., & Toomre, J. 1972, *ApJ*, 178, 623
- [8] Toomre, A. 1977, in *Evolution of Galaxies and Stellar Populations*, ed. B. M. Tinsley & D. C. Larson, Richard B. Gehret, 401
- [9] White, S. D. M. 1978, *MNRAS*, 184, 185
- [10] Barnes, J. E. 1988, *ApJ*, 331, 699
- [11] Barnes, J. E. & Hernquist, L. 1991, *ApJL*370, L65
- [12] Mihos, J. C. & Hernquist, L. 1996 *ApJ*, 464, 641
- [13] Barnes, J. E. 2004, *MNRAS*, 350, 798
- [14] Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., et al. 2009, *PASJ*, 61, 481
- [15] Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., et al. 2011, in *Computational Star Formation*, ed. J. Alves, B. G. Elmegreen, J. M. Girart, & V. Trimble, Vol. 270, 483–486
- [16] Matsui, H., Saitoh, T. R., Makino, J., et al. 2012, *ApJ*, 746, 26
- [17] Matsui, H., Tanikawa, A., & Saitoh, T. R. 2019, *PASJ*, 71, 19
- [18] Kaneko, H., Kuno, N., & Saitoh, T. R. 2018, *ApJL*, 860, L14
- [19] Hirai, Y., Fujii, M. S., & Saitoh, T. R. 2021, *PASJ*, 73, 1036
- [20] Fujii, M. S., Saitoh, T. R., Wang, L., & Hirai, Y. 2021a, *PASJ*, 73, 1057
- [21] Fujii, M. S., Saitoh, T. R., Hirai, Y., & Wang, L. 2021b, *PASJ*, 73, 1074
- [22] Grudić, M. Y., Guszejnov, D., Hopkins, P. F., Offner, S. S. R., & Faucher-Giguère, C.-A. 2021, *MNRAS*, 506, 2199
- [23] Lahén, N., Naab, T., Johansson, P. H., et al. 2020a, *ApJ*, 891, 2
- [24] —. 2020b, *ApJ*, 904, 71
- [25] Li, H., Vogelsberger, M., Bryan, G. L., et al. 2022, *MNRAS*, 514, 265