

衝突銀河の超高分解能シミュレーション：スターバーストと星団形成

斎藤貴之、小久保英一郎、和田桂一、牧野淳一郎、富阪幸治、岡本崇、台坂博、吉田直紀

天の川創成プロジェクト

所属名、国立天文台天文シミュレーションプロジェクト

メールアドレス、 saitoh.takayuki@nao.ac.jp

概要: 我々は、従来より二桁程度高い質量分解能を用いた超高分解能の銀河衝突シミュレーションをおこなった。アンテナ銀河のような衝突初期の相互作用銀河は広がったスターバースト領域と星団形成領域を持つことが知られている。しかしながら、従来の相互作用銀河の数値シミュレーションでは、スターバーストは合体の最終段階でしかおきていなかった。今回我々は、これら観測的特徴が超高分解能の銀河衝突シミュレーションのもとで自然に生じることを確認したので報告する。

1. はじめに

銀河同士の相互作用は、重要な銀河進化過程の一つである。そのため、数値シミュレーションによる研究が数多くおこなわれてきた(Mihos & Hernquist 1996 など)。これらの研究により、銀河衝突の最終段階でスターバーストが生じることが明らかになったが、一方で観測的に知られている衝突初期におけるスターバーストや、星団の形成については再現できておらず、メカニズムは明らかになっていない。

従来の銀河衝突のシミュレーションでは、星間ガスを 10^6 太陽質量程度の粒子の集合体として表している。このような近似の元では、現実の星形成領域である巨大分子雲(10^6 太陽質量程度)は分解出来ていない。より高い分解能を用いて、現実の星形成領域を分解し、現実的な銀河衝突の様子を明らかにすることが必要である。我々は、従来のシミュレーションと比較して二桁程度高い質量分解能(10^4 太陽質量程度)を持つ銀河衝突シミュレーションを行い、銀河衝突の際の星間ガスの振る舞いについて詳細に調べた。

2. セットアップと計算手法

二つの等質量銀河の衝突シミュレーションをおこなった。衝突に用いた銀河は暗黒物質も含めた全質量が 10^{11} 太陽質量程度の円盤銀河である。銀河円盤の質量は全質量の 5% であり、そのうち 8 割を星、残りの 2 割をガスとした。二つの銀河を近点距離 7.5kpc の放物軌道で衝突させた。

ガスは 10 K までの放射冷却を解いた。また、ガスは典型的な分子雲密度に対応する水素原子個数密度 100 cm^{-3} 以上の高密度領域で星に変わるとした。II型超新星爆発による星間ガスへのエネルギー

一注入も考慮した(星間ガスのモデルは、Saitoh et al.2008a、衝突シミュレーションはSaitoh et al.2008b)。

シミュレーションに用いた粒子数は最大で 1500 万粒子で、Cray XT4 128 コアを用いておこなった。約 10 億年の進化をカバーしている。時間刻み空間分解能ともにアダプティブであり、時間刻みは最小で 200 年、空間分解能は 20pc で、銀河のダークマターハローの広がり $1/10000$ 程度に相当する。

衝突シミュレーションには、我々が独自に開発した、MPIによる分散並列N体/SPHシミュレーションコード“ASURA”を用いた。ASURAではツリー法と重力多体系専用計算機GRAPEを組み合わせ自己重力の高速な演算を達成している。今回の計算では、重力計算に単精度 SSE2 で高速化するライブラリを用い、通常の倍精度計算の 5 倍以上の高速化を実現している。これらの高速化とアルゴリズムの工夫により、初めて今回のような超高分解能シミュレーションが可能になった。



図 1: 国立天文台天文シミュレーションプロジェクトのスーパーコンピュータ“Cray XT4”

3. 衝突シミュレーション結果

初期遭遇時に衝突面に全長 $\sim 10\text{kpc}$ に達する巨大なフィラメントが形成される(図 2a)。このフィラメントは、低温($T < 10\text{K}$)かつ高密度(水素原子個数密度 $> 100\text{ cm}^{-3}$)のガスからなり、形成直後に空間的に広がったスターバーストを起こす(図 2b)。フィラメントのなかで形成された星はほぼ速度ゼロでフィラメント状に分布するためすぐに重力的に凝集し自己重力で拘束された星団を形成する(図 2c)。これらの星団は超新星爆発の効果による星形成の抑制と母銀河からの潮汐相互作用によって成長を止める(図 2d)。こうして出来た星団は最終的に銀河に重力的に取り込まれる。

最終的にフィラメント中に自己重力で拘束された 11 個の星団が形成された。星団の典型的質量はおおよそ 10^7 太陽質量であり、暗黒物質をもたないという特徴を持つ。こうして形成された星団は、現在の銀河に付随する球状星団に対応する可能性がある。

4. まとめ

衝突銀河の超高分解能シミュレーションをおこない、次の結果を得た。

- 初期遭遇時に銀河の衝突面に巨大なフィラメントが形成される。このフィラメントは十分に低温かつ高密度で、形成後速やかに空間的

に広がったスターバーストを起こす。

- スターバーストにより星団が形成される。この星団はガスの散逸により形成が促されており、暗黒物質を持たない。星団は十分高密度なため、銀河内に長く存在し続ける。

初期遭遇時のスターバーストや、そこでの星団形成を具体的に示したのは我々の超高分解能シミュレーションが初めてである。

参考文献

- [1] Miros, & Hernquist, 「Gasdynamics and Starbursts in Major Mergers」 *Astrophysical Journal* 464, 641, 1996
- [2] Saitoh, Daisaka, Kokubo, Makino, Okamoto, Tomisaka, Wada, Yoshida, 「Toward first-principle simulations of galaxy formation: I. How should we choose star formation criteria in high-resolution simulations of disk galaxies?」、PASJ, in press.
- [3] Saitoh, Daisaka, Kokubo, Makino, Okamoto, Tomisaka, Wada, Yoshida, 「Toward First-Principle Simulations of Galaxy Formation: II. Shock-Induced Starburst at a Collision Interface During the First Encounter of Interacting Galaxies」、PASJ submitted, arXiv:0805.0167

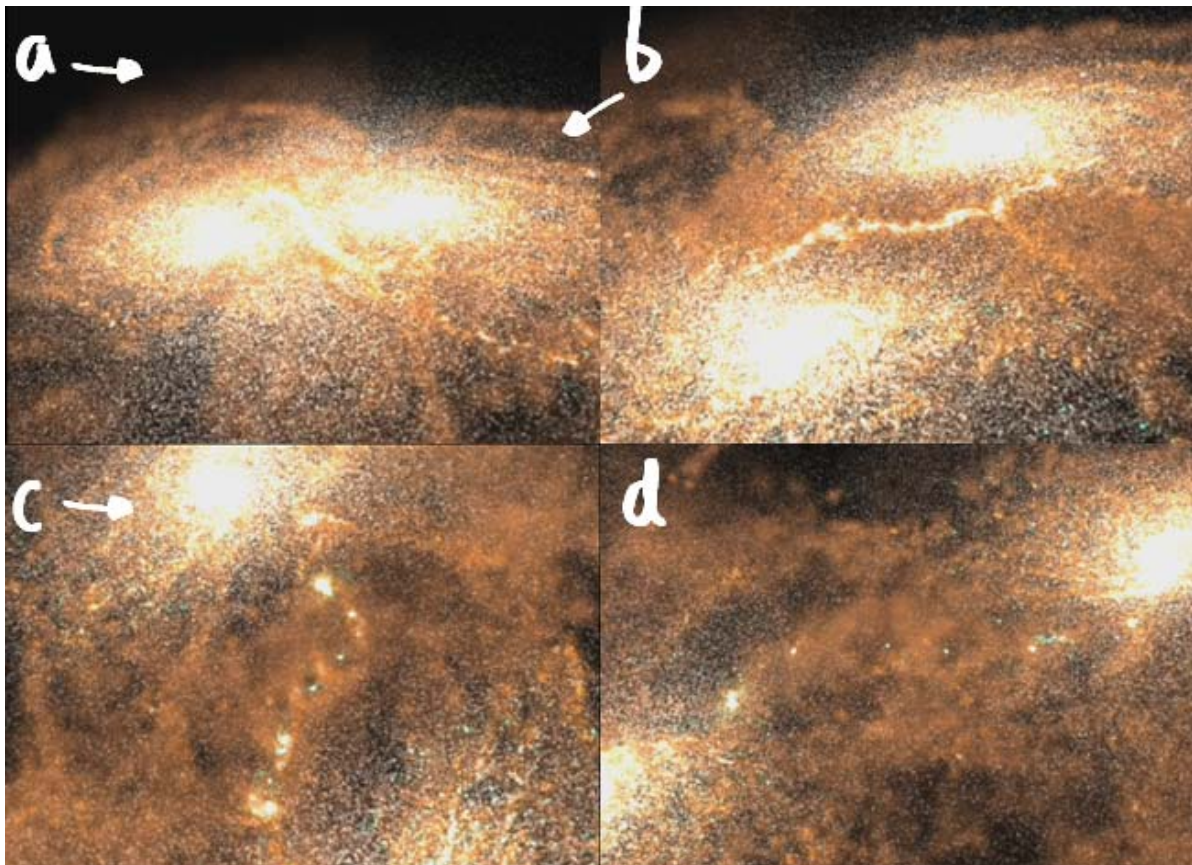


図 2：銀河衝突の様子。ガスは茶色の広がった分布として表されている。星は白い点として表されている。