

初期質量関数を用いた銀河内星形成振動シミュレーション
Oscillation simulation in galaxy star formation using initial mass function

○金澤宏真¹, 藤井紫麻見²

*Hiromasa Kanazawa¹, Shiomi Fujii²

Abstract: Star formation and evolution of galaxies are the important problems in astronomy. We make oscillation simulations of galaxy evolution using the galaxy model with atomic gas, molecular gas and young stars, calculating the transition of mass of these phases. The results assuming the young stars of solar mass show that the mass ratio of atomic gas, molecular gas and young stars mostly converges to the steady state. The simulation including the distribution of young stars suggests that the mass of young stars decreases and the atomic gas and molecular gas increase.

1. はじめに

銀河の形成と進化に関する問題は現代天文学の最も重要な問題の一つである。近年、遠方銀河の観測が進み形成初期の銀河の様子から星形成の状態などが明らかになっている。こうした銀河の進化を再現するモデルを作成するために、星生成率や恒星の初期質量関数などを与え銀河のシミュレーションを行った。星形成率は単位時間あたりどれだけ星が誕生するかを与える。また初期質量関数を仮定すれば、どれだけの質量の星がいくつ生まれるか計算を行うことが出来る。それらを用いることで生まれる星の質量分布が分かり、零歳主系列星だとすると、その後の銀河内で任意の時刻にどのような星がどれだけ存在するかわかる。これにより銀河の質量光度関係を理論的に求めることが出来る。

2. 銀河内星形成による恒星の質量変化

Bodifee(1983)は、銀河内の物質は原子気体(ガスのうち原子やイオンとして存在するもの)、分子気体(ガスのうち分子として存在するもの)、活動星(星のうち、寿命がつかるとガスに戻り星形成に寄与するもの)、非活動星(褐色矮星、白色矮星、中性子星など今後星形成に寄与しないもの)の4つの状態からなるとし、それぞれの状態間での質量移動を計算した[1]。

4つの状態にある物質の質量を A, M, S, R とし、星形成に寄与する質量 \mathcal{M} を

$$\mathcal{M} = A + M + S \tag{1}$$

とするこれらの状態間の物質の遷移を Figure1 に示した。

銀河形成初期には銀河外から原子気体が供給される。また原子気体は重力で集まって分子気体に変化する。この割合は主に原子気体の量に依存するが、星の光に

よって分子が壊されて原子に戻るために活動星の量にも依存する。

一方、分子気体からは星が作られる。多くは活動星になるが、一部は非活動星になる。その割合は分子気体の量に依存するが、活動星の形成には既にある活動星の放射圧等も影響するのでその量にも依存する。また活動星の多くは寿命がつかると原子気体に戻るが、一部は非活動星になる。この割合は活動星の量に依存する。

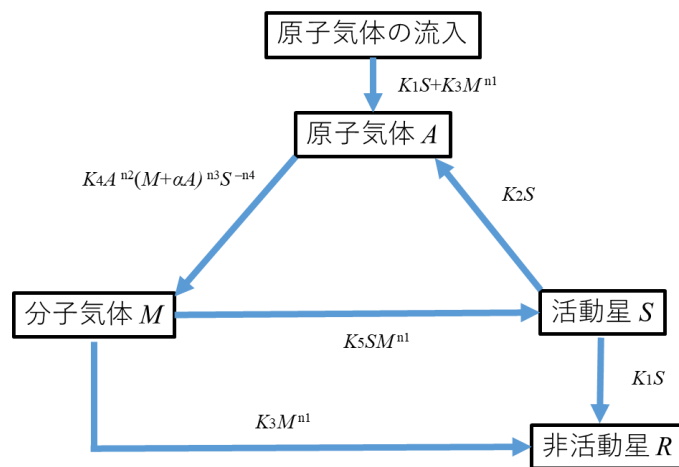


Figure1. The star formation model

これら A, M, S の時間変化は以下の方程式で与えられる。

$$\frac{dA}{dt} = K_1 S + K_2 S + K_3 M^{n_1} - K_4 A^{n_2} (M + \alpha A)^{n_3} S^{-n_4} \tag{2}$$

$$\frac{dM}{dt} = K_4 A^{n_2} (M + \alpha A)^{n_3} S^{-n_4} - K_5 S M^{n_1} - K_3 M^{n_1} \tag{3}$$

$$\frac{dS}{dt} = K_5 S M^{n_1} - K_1 S - K_2 S \tag{4}$$

$$\frac{dR}{dt} = K_1 S + K_3 M^{n_1} \tag{5}$$

各構成要素間の物質の遷移量は、係数 K_i, α および指数 n_i を用いて書いた。銀河外からの原子気体の流入につ

1 : 日大理工・院(前)・物理 2 : 日大理工・教員・物理

いてはまだよくわかっておらず、銀河による差も大きいと思われる。まずは銀河の定常状態を求めたいので、今回の計算では M が一定になるようにした。

さらに変数を無次元化することで式(2)(3)は次のように書き換えられる。

$$\frac{da}{dt} = 1 - a - m - k_1 a^{n_2} (m + \alpha a)^{n_3} (1 - a - m)^{-n_4} + k_3 m^{n_1} \quad (6)$$

$$\frac{dm}{dt} = k_1 a^{n_2} (m + \alpha a)^{n_3} (1 - a - m)^{-n_4} - k_2 m^{n_1} (1 - a - m) + k_3 m^{n_1} \quad (7)$$

ここで $a, m, \tau, k_1, k_2, k_3$ は

$$a = \frac{A}{M}, m = \frac{M}{M}, \tau = (K_1 + K_2)t \quad (8)$$

$$k_1 = \frac{K_4 M^{n_2+n_3-n_4-1}}{K_1+K_2}, k_2 = \frac{K_5 M^{n_1}}{K_1+K_2}, k_3 = \frac{K_3 M^{n_1-1}}{K_1+K_2} \quad (9)$$

で表される。

$n_1, n_2, n_3, n_4, k_1, k_2, k_3, \alpha$ はこれまでの星形成の理論から制限がかけられており、今回の計算では

$$n_1 = 1, n_2 = 1, n_3 = 3, n_4 = 1 \\ k_1 = 5, k_2 = 10, k_3 = 5, \alpha = 0.1$$

を用いた a, m について初期条件を与えて式(6)(7)を4次のルンゲクッタ法を用いて計算を行った。刻み幅 $d\tau = 0.02$ とし分子気体と活動星に関する質量比の関係を Figure2 に示す。

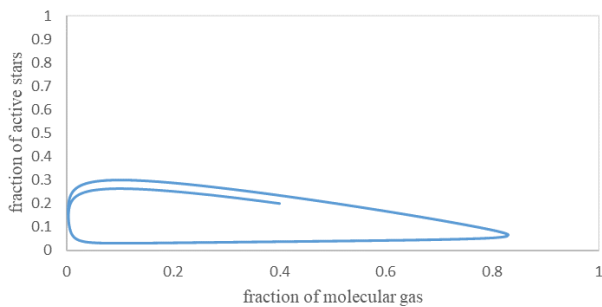


Figure2. The effect of the star formation

この計算では、銀河内の原子気体、分子気体、活動星の質量はほぼ一定の定常状態に収束した。パラメータを変えても収束はほぼ同じであったが、係数や指数を変えると収束せずに振動する解も得られた。

3. IMF を用いた銀河星形成シミュレーション

初期質量関数(IMF)は星が生まれるとき、どのような質量の星がどのような頻度で生まれるかを表す関数である。銀河の星形成を考える際、IMF は星形成過程だけ

でなく星間物質の全体像と関連しており重要となっている。観測から推定された IMF として最初に求められた Salpeter(1955)の IMF は星の質量 $M_* = (0.4 \sim 10)M_\odot$ で次のように近似できる。

$$\xi \equiv \frac{dn}{d \log M_*} \propto M_*^{-1.35} \quad (10)$$

Miller and Scalo(1979)は銀河における星形成の時間変化に関するいくつかのモデルについて調べた結果、IMF は

$$\xi \propto \exp[-1.09(\log M_* + 1.02)^2] \quad (11)$$

また、Scalo(1986)は $M_* \approx 3 - 60M_\odot$ において

$$\xi \propto M_*^{-\gamma}, \gamma \approx 1.5 \quad (12)$$

と近似できると結論を出している。今回は IMF として式(10)を用いて星の質量割合を決定し、シミュレーションを行う。係数および指数は前と同じく

$$n_1 = 1, n_2 = 1, n_3 = 3, n_4 = 1 \\ k_1 = 5, k_3 = 5, \alpha = 0.1$$

とし、 k_2 の値を変化させ星の質量に応じて変化させて計算し、星の質量割合を用いて a, m の和を求めた。分子気体と活動星に関する質量比の関係を Figure3 に示す

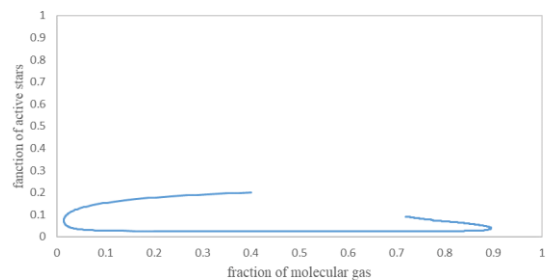


Figure3. The effect of the star formation considering IMF

この計算では分子ガスと原子ガスの割合が高く、活動星の量が少なくなることが分かった。

4. まとめ・今後の展望

銀河星内星形成を各状態間の質量遷移として計算し、さらに IMF を考慮したモデルでも定常状態になることを再現できた。今後は銀河外からのガスの流入や、係数による収束や振動の違いなども詳しく調べていきたい。

5. 参考文献

- [1] G.Bodifée and C. de Loore : Astron. Astrophys. 142, 297-315(1985)
- [2] C.A.Raithe, T.Sukhbold, F.Ozel: Astro-ph/1712.00021 12 Dec 2017
- [3] G.Chavrier: PASP 115 763-795(2003)