

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800108

研究課題名(和文) 銀河円盤内での星団形成過程と星団のバリエーションの起源の解明

研究課題名(英文) Formation of star clusters in galactic disks and the origin of the variation of star clusters

研究代表者

藤井 通子 (Fujii, Michiko)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：90722330

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：銀河系内にある星団には、古くから知られている球状星団、散開星団の他、近年では若くて散開星団よりも高密度かつ大質量の星団、ガスに埋もれた星団など、様々な種類の星団が見つまっている。本研究では、それらの様々な星団の形成過程について、どのような共通点があり、どのような相違点があった様々な星団の形成に至っているのか、銀河という環境との関係を明らかにする。分子雲からの星団形成シミュレーションを行った結果、天の川銀河で典型的な分子雲では散開星団が、星形成銀河で典型的な分子雲では若い高密度星団が形成することがわかった。また、天の川銀河のモデルも検討し、天の川銀河に似た銀河を形成するための条件も明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Recent observations have found various kinds of star clusters such as massive, dense clusters as young as open clusters and embedded clusters, which are beyond classical classification: open or globular clusters. We study the formation mechanism of these various star clusters. We especially focus on their similarities/differences and the relation to the galactic environment. We performed numerical simulations of star clusters forming in giant molecular clouds (GMC) and found that GMCs typical in the Milky Way (MW) form open clusters, but ones typical in star-forming galaxies form young massive (dense) star clusters. We in addition investigated a galaxy model which is similar to the MW and found parameters in order to reproduce the MW in numerical simulations.

研究分野：理論天体物理学

キーワード：星団 N体シミュレーション 天の川銀河

## 1. 研究開始当初の背景

銀河内の星の多くは星団やアソシエーションとして生まれ(Lada & Lada 2003)、その母体となる分子雲の形成・進化は銀河円盤の運動と密接に関わっていると考えられている。近年の研究から、銀河の渦状腕は非定常な構造であることが明らかになっており(Fujii et al. 2011; Sellwood 2011)、そのような銀河円盤中で分子雲がどのように運動し、どこで何がトリガーとなって星形成が起こるのか、ローカルな星・星団形成とグローバルな銀河の進化の関係を理解することが重要になってきている。

しかし、銀河円盤と星形成領域では典型的な時間・空間スケールに大きなギャップがあるため、単純に銀河シミュレーションの分解能を上げ、星形成領域スケールまで到達することは難しい。(仮に、銀河形成シミュレーションの空間分解能を10倍にすると、時間積分に必要なステップ数は約30倍となる。)このため、既存のシミュレーションは、銀河全体(質量分解能  $1000\text{-}10^4 M_{\odot}$ 、空間分解能  $10\text{-}100\text{pc}$ 、積分時間数 Gyr; Grand et al. 2013)か、星・星団形成領域(総質量  $10^4\text{-}10^6 M_{\odot}$ 、質量分解能  $10^3 M_{\odot}$ 、空間分解能  $0.01\text{pc}$ 、積分時間  $<3\text{Myr}$ ; Dale et al. 2013)のどちらかに分かれている。今後の計算機の発展を見据えた場合、この2つのスケールの壁をいかに乗り越えるかも非常に重要な課題である。

## 2. 研究の目的

銀河系内で今でも形成している星団のほとんどは散開星団である。若くて大質量の星団でも  $10^4 M_{\odot}$  程度であり、球状星団のような星団は生まれにくい。一方、**high-z** の銀河や合体途中の銀河は大質量の星団を数多く含んでいる。個々の星の形成過程は大きく変化していないとするならば、星団の質量やサイズは、形成した環境に依存していると考えられる。本研究では  $N$  体/流体シミュレーションを用いて、星団はどのようにして生まれたのか、銀河内の環境による星団の形成・進化の違い、その結果、星団が銀河の進化にどのように関わっているのかを調べる。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず、大質量星団の  $N$  体シミュレーションを、その母体となる分子雲の状態から計算できるシミュレーション手法を開発する。

次に、そのシミュレーションを銀河全体で行い、銀河の運動の中で分子雲がどう成長し、

星・星団形成に至るのかを調べる。

さらに、そのために必要な天の川銀河モデルの構築を行う。

## 4. 研究成果

① 星団の母体となる分子雲と形成する星団の関係

① -1 星団形成シミュレーションと乱流を持つ分子雲から形成する星団の質量関数

粒子法を用いた流体シミュレーションである smoothed particle hydrodynamics (SPH) 法は星団形成シミュレーションによく用いられてきた。特に、ある十分小さい半径以内のガス粒子を集めて一つの「シンク粒子」として扱うことで、星形成を近似的に取り入れた計算へと発展してきた。しかし、シンク粒子を用いた手法では、星の質量に対し、ガス粒子の質量を十分小さくする必要があるので、大質量星団の形成シミュレーションでは計算コストが大きくなってしまい、現在の計算機の能力では実行が難しい。そこで、本研究では、まず、ガス粒子が星の平均質量程度の比較的粗い SPH シミュレーションを行い、ガスの密度が十分上がったところで、ガスの密度に依存した星形成効率(Krumholz et al. 2012)を仮定し、ガス粒子を星粒子に置き換え、その後、 $N$  体シミュレーションとして星のみのシミュレーションを行った。こうすることで、計算時間を大幅に短縮し、星形成から星団形成まで  $10\text{Myr}$  程度、系の進化を追うことができるようになった。

質量  $10^{4.6}$  太陽質量の乱流を持つ分子雲 ( $10^6$  太陽質量はこれまで計算できなかったサイズ)、大質量の分子雲からは様々な質量を持つ星団が形成し、その質量関数のべきは  $-1.6$  から  $-1.7$  であり、観測されている星形成領域の星団の質量関数と一致することがわかった。この結果は雑誌論文⑦⑧として出版された。

① -2 銀河と星団形成モードの関係

星団は巨大分子雲の中で集団的な星形成が起こることによって形成する。よって、形成する分子雲は母体となる分子雲の条件によって決まっていると推測される。そこで、前述の手法を用い、星団形成シミュレーションを行い、母体となる分子雲と形成する星団の関係を調べた。

その結果、天の川銀河や類似した円盤銀河で典型的な質量、密度を持つ分子雲からは、天の川銀河でよく見られる散開星団や OB ア

ソシエーションが形成し、系外のスターバースト銀河で典型的な質量や密度を持つ分子雲からは、スターバースト銀河で見られるような大質量高密度星団(Super star cluster)が形成することがわかった(図1)。しかしながら、天の川銀河にも大質量高密度星団は存在するため、今後、天の川銀河のような穏やかに星形成する円盤銀河でも時々スターバースト銀河で見られるような星団形成、またはそのような星団を形成できるような分子雲形成が起こるメカニズムを明らかにする必要がある。この結果は、雑誌論文⑤として出版された。

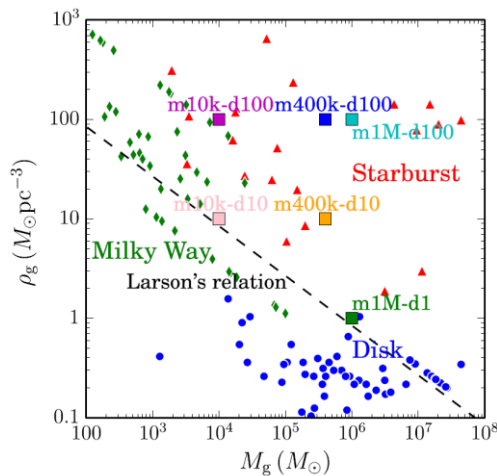


図1：天の川銀河(緑の菱形)、系外の円盤銀河(青丸)、スターバースト銀河(赤三角)での分子雲の質量と密度と我々のシミュレーションの初期条件(四角)の関係

## ② 天の川銀河モデル

### ② - 1 銀河円盤の力学的進化

天の川銀河モデルを作成するためには、まず、どのような条件を満たした時にどのような(棒)渦巻銀河が形成するのかを明らかにする必要がある。バーや渦状腕は円盤の自己重力不安定によって発展し、その進化はシミュレーションの分解能(粒子数)に依存してしまうことがわかっている(Fujii et al. 2011)。そのため、一つのシミュレーションに十分な粒子数を用い、さらに、銀河の質量の大半を占めるハローも粒子で表現する必要がある。そこで、GPUを用いて高速化した並列計算コード Bonsai を用いて、最大5億体の粒子を用いて、様々なパラメータを持つ初期条件について、銀河円盤の進化シミュレーションを行い、どのようなパラメータが銀

河円盤の力学進化を決めるのに重要なパラメータを調べた。

その結果、銀河円盤の力学進化に最も重要なパラメータは銀河全体に対する円盤の質量の比( $f_d$ )であり、 $f_d$ が0.35あたりで、バー形成までの時間が指数関数的に長くなることがわかった(図2)。これは、宇宙年齢と比べて、実質的なバー形成条件が、 $f_d > 0.35$ であることを示している。この結果は雑誌論文①として出版された。

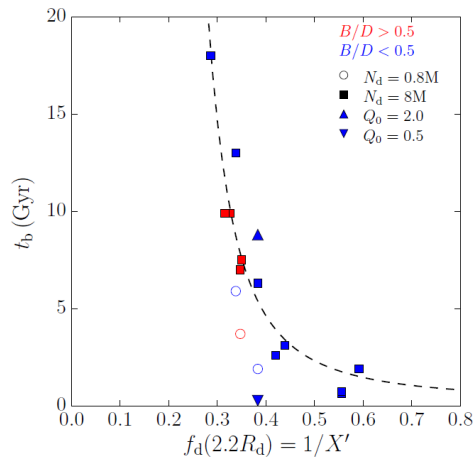


図2：銀河全体に対する円盤の質量(横軸)とバー形成までの時間(縦軸)

### ② - 2 天の川銀河の形成条件

天の川銀河モデルを作成するにあたって、シミュレーションを始めて10Gyr程度経過した時に観測されている天の川銀河の力学的条件を満たすような初期条件について調べた。その結果、銀河全体に対する円盤の質量が0.45程度、円盤の質量が $3.7 \times 10^{10}$ 太陽質量程度、初期にハローが銀河円盤の回転と同じ方向のスピンを持っているときに、天の川銀河のような円盤の密度、回転速度、バルジの速度分散、バーの長さが再現できることがわかった。

### <引用文献>

- ① Lada, C. J., & Lada, E. A., Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 41, 57 (2003)
- ② Fujii, M. S. et al., The Astrophysical Journal, Volume 730, Issue 2, article id. 109, 14 pp. (2011)
- ③ Sellwood, J. A. et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 410, Issue 3, pp. 1637-1646. (2011)
- ④ Grand, R. J. J. et al., Astronomy & Astrophysics, Volume 553, id. A77, 11

- pp. (2013)
- ⑤ Dale, J. E. et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 431, Issue 2, p.1062-1076 (2013)
  - ⑥ Krumholz M. R., et al., The Astrophysical Journal, 745, 69 (2012)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件) (全て査読有り)

- ① Fujii, M. S., Bédorf, J., Baba, J., Portegies Zwart, S., **The dynamics of stellar disks in live dark-matter halos**, 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 477, 2, p.1451-1471
- ② Hirano, S., Yoshida, N., Sakurai, Y., Fujii, M. S., **Formation of the First Star Clusters and Massive Star Binaries by Fragmentation of Filamentary Primordial Gas Clouds**, 2018, The Astrophysical Journal, 855, 1, id. 17, 10 pp.  
doi: 10.3847/1538-4357/aaaaba
- ③ Sakurai, Y., Yoshida, N., Fujii, M. S., Hirano, S., **Formation of intermediate-mass black holes through runaway collisions in the first star clusters**, 2017, Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, 472, p.1677-1684  
doi: 10.1093/mnras/stx2044
- ④ Fujii, M. S., Tanikawa, A., & Makino, J. **The Detection Rates of Merging Binary Black Holes Originating from Star Clusters and Their Mass Function**, 2017, Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, 6, id.94  
doi: 10.1093/pasj/psx108
- ⑤ Fujii, M. S., & Portegies Zwart, S., **The Formation and Dynamical Evolution of Young Star Clusters**, 2016, The Astrophysical Journal, 817, 1, id. 14, 14 pp.  
doi: 10.3847/0004-637X/817/1/4
- ⑥ Nguyen-Luong, Q., Nguyen, H. V. V., Motte, F., Schneider, N., Fujii, M., Louvet, F., Hill, T., Sanhueza, P., Chibueze, J. O., Didelon, P., **The scaling relations and star formation laws of ministarburst complexes**, 2016, The Astrophysical

Journal, 833, id. 23, 12 pp.  
doi: 10.3847/0004-637X/833/1/23

- ⑦ Fujii, M. S., **Formation of young massive clusters from turbulent molecular clouds**, 2015, Publications of the Astronomical Society of Japan, 67, 4, id.5910  
doi: 10.1093/pasj/psu137
- ⑧ Fujii, M. S., & Portegies Zwart, S., **The initial mass function of star clusters forming in turbulent molecular clouds**, 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 449, 1, p.726-740  
doi: 10.1093/mnras/stv293

[学会発表] (計 9 件)

- ① 藤井通子, **天の川銀河のパー形成史とダークマターハローの回転**, 日本天文学会 2018 年春季年会, 2018 年 3 月
- ② 藤井通子, **Star clusters as a host of compact binaries**, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2017, 2017 年
- ③ 藤井通子, **Can globular clusters bring millisecond pulsars in the Galactic center?: Tidal disruption of star clusters in the Galactic center**, 特別推進研究研究会・宇宙線研究所共同利用研究会「高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2015」, 2016 年
- ④ 藤井通子, 馬場淳一, **10 億体を用いた銀河円盤の N 体シミュレーション**, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 2014 年

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：

種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://cas.astron.s.u-tokyo.ac.jp/~fujii/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤井 通子 (FUJII, Michiko)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号：90722330

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )