# 星一つ一つまで分解した銀河や星団の形成シミュレーションと今後の展望

藤井　通子（東京大学）

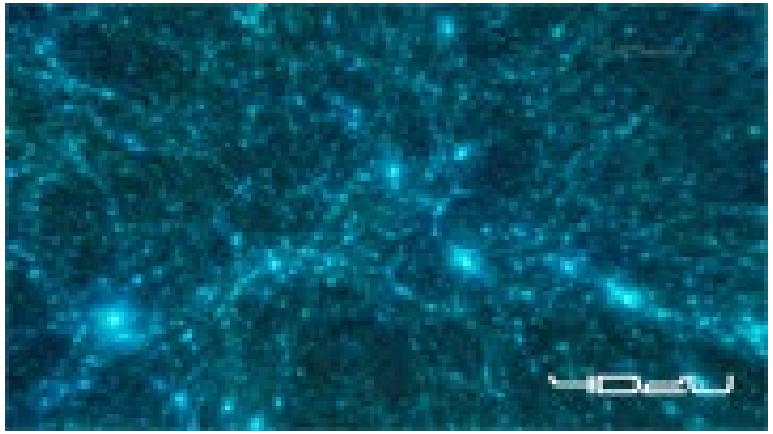
# 自己紹介

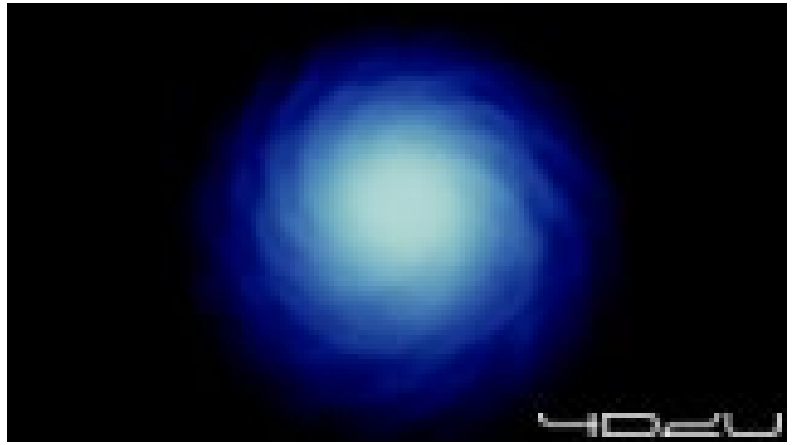
- 大学に入ってからシミュレーションを始める
  - 元々、観測をやるつもりだった
- 東大で学位取得後、3年ちょっとオランダでポスドク
  - チャンスがあれば海外で生活してみることをおすすめします
- N体シミュレーションを中心に星団や銀河のシミュレーション
  - 銀河のN体計算
  - 銀河＋星団のN体計算
  - 星団形成シミュレーション（N体＋流体）最近、参入したので…
- そのためのコード開発
  - 重力多体問題専用計算機：GRAPE
  - GPU
  - CPUクラスタ（数百〜数千CPUでの並列計算）

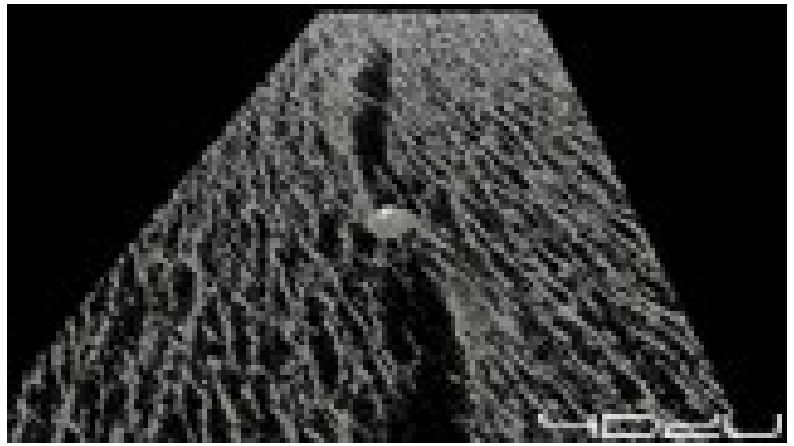
# N体シミュレーション

- 星や微惑星などを粒子で表現し、その重力による運動を運動方程式を数値積分することで求める
- 毎ステップ、重力を評価＝$O(N^2)$の計算量
  - アルゴリズムによって$O(N \log N)$に減らせる
- 基本はとてもシンプル
- Smoothed-particle hydrodynamics (SPH)法と組み合わせて流体入りの計算も

- 国立天文台CfCA N体の学校資料を参照







https://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/movie.html

# 星団と銀河、衝突系と無衝突系

- 緩和時間：
  - 重力多体系は緩和時間で進化する

$$t_{\rm rh} \approx \frac{0.065\langle v^2\rangle^{3/2}}{G^2\langle m\rangle\bar{\rho}\ln\Lambda} = 0.14\frac{N^{1/2}r_{\rm vir}^{3/2}}{G^{1/2}\langle m\rangle^{1/2}\ln\Lambda} \approx \frac{N}{7\ln\Lambda}t_{\rm dyn},$$

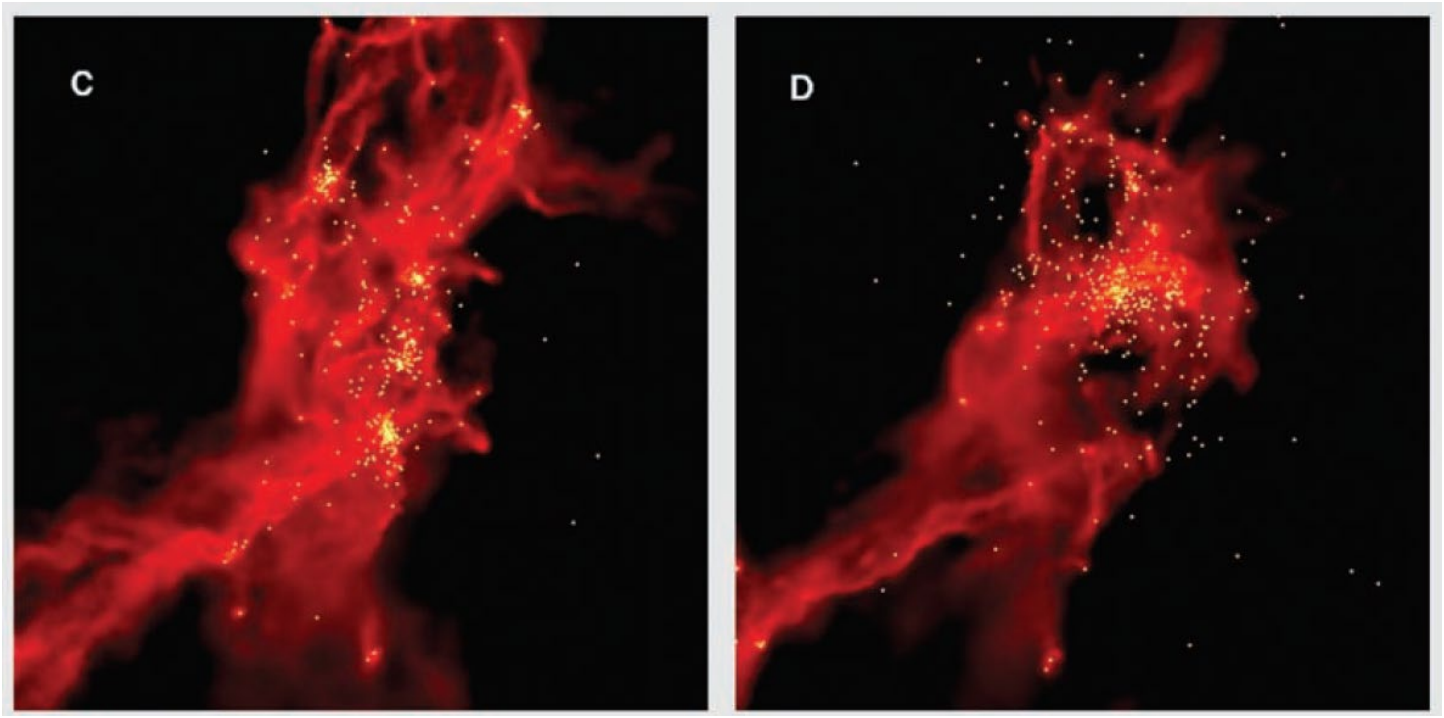
- 星団：衝突系
  - 緩和時間が系の年齢より短い
  - 粒子同士の近接相互作用が系の進化に重要＝短い時間刻みが必要
- 銀河：無衝突系
  - 緩和時間が系の年齢に対して長い
  - 近接相互作用は系の進化にとって重要ではない
    ＝近接相互作用はなまして計算（ソフトニング）し、長い時間刻みが取れる

$$\frac{{\rm d}^2\boldsymbol{x}_i}{{\rm d}t^2} = \sum_{j\neq i}^{N} Gm_j\frac{\boldsymbol{x}_j-\boldsymbol{x}_i}{(|\boldsymbol{x}_j-\boldsymbol{x}_i|^2+\epsilon^2)^{3/2}}$$

# 星団形成シミュレーション（N体＋流体）

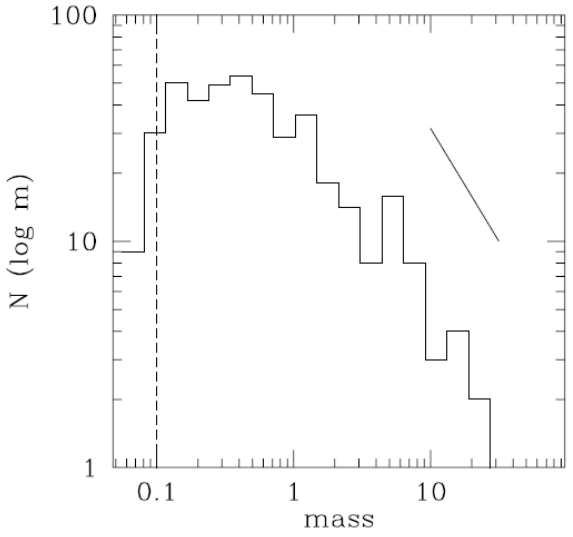
- 2000年代：Sink粒子を用いた星団形成シミュレーション
  - Sink粒子：Sink半径内のガス粒子を取り込んで質量が増える粒子
    (Bate, Bonnell, Price 1995)

- 例：Bonnell et al. （2003）
  - 乱流を入れた等密度球の
    分子雲を初期条件とし、
    星形成シミュレーション
  - 観測されている星形成領域、
    星団形成領域のようなもの
    ができる

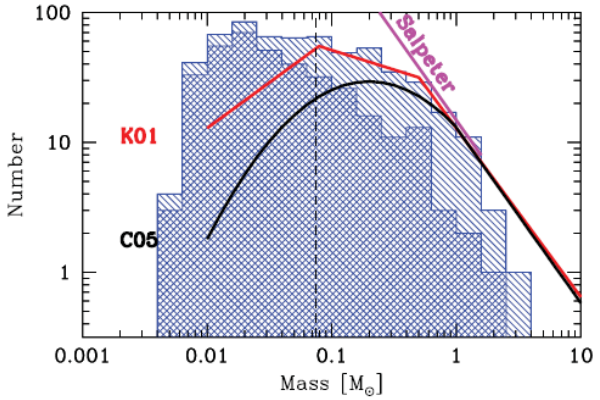


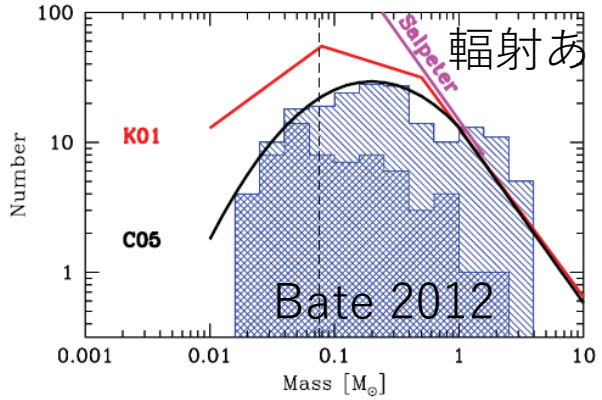
# 質量関数

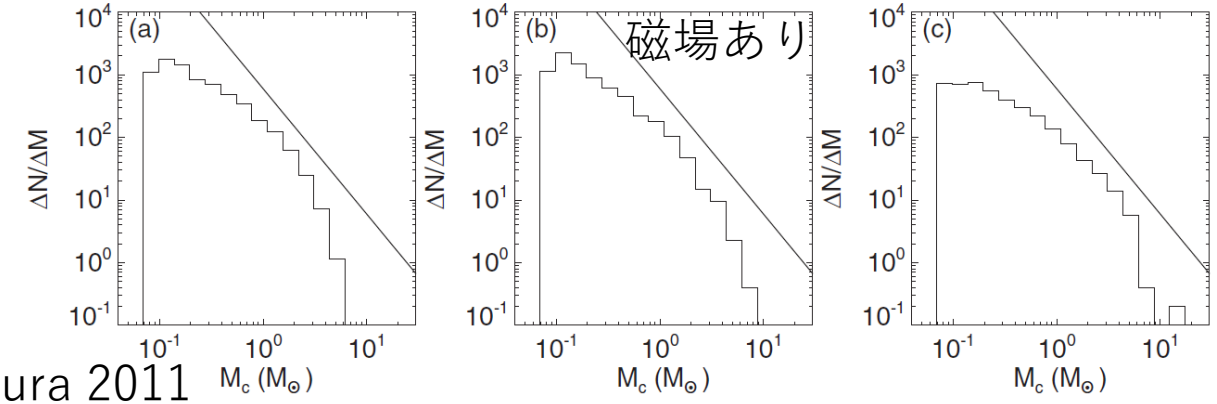
- Salpeter IMFのような質量関数はできる？
  - 輻射、磁場、アウトフローなどの影響
  - Sink半径やガス粒子の質量のような分解能に依存する可能性




Bonnell+2003

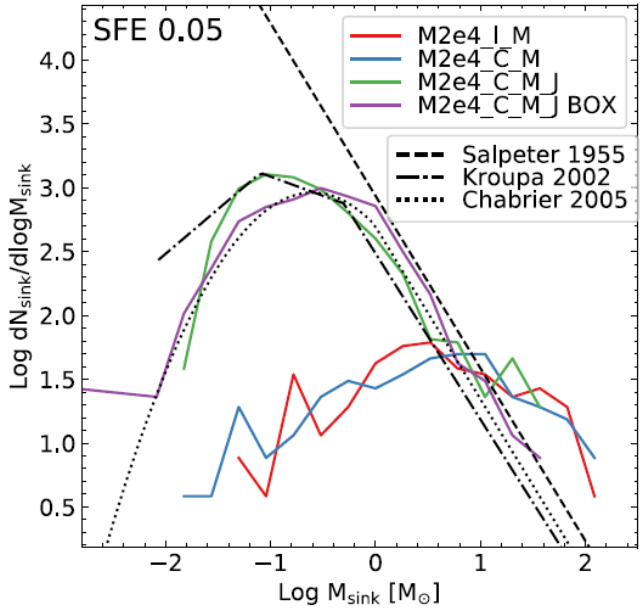



Li and Nakamura 2011

アウトフローあり




Guszejnov+2021
(STARFORGE project)

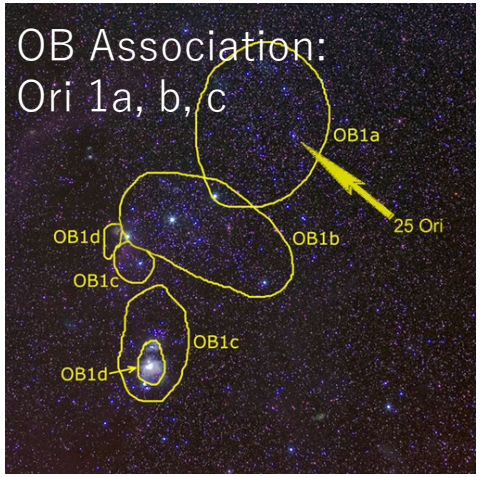
# 様々な種類の星団の形成

- 古典的には：散開星団 or (OB) アソシエーション
  - 違いは重力で束縛されているか、いないか、で分ける
- 近年では：Embedded cluster, Young massive cluster (Super star cluster, Starburst cluster)
  一般に ‘open cluster’ という単語は EC, YMC, and LC を含む
- バリエーションは何故生まれる？

Classical open cluster
Mostly<100Myr
100～1000Msun
A few pc
Low density

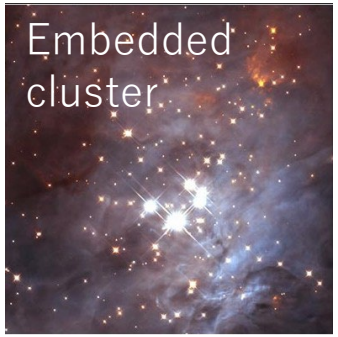
Embedded cluster
Embedded in gas
a few Myr
~100Msun
<1pc

Young massive cluster
a few ~ 10 Myr
Massive: $10^4$ Msun
Dense：$10^4$Msun/$pc^{-3}$
Mini globular cluster

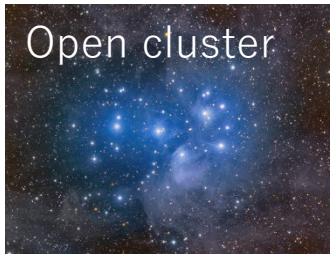


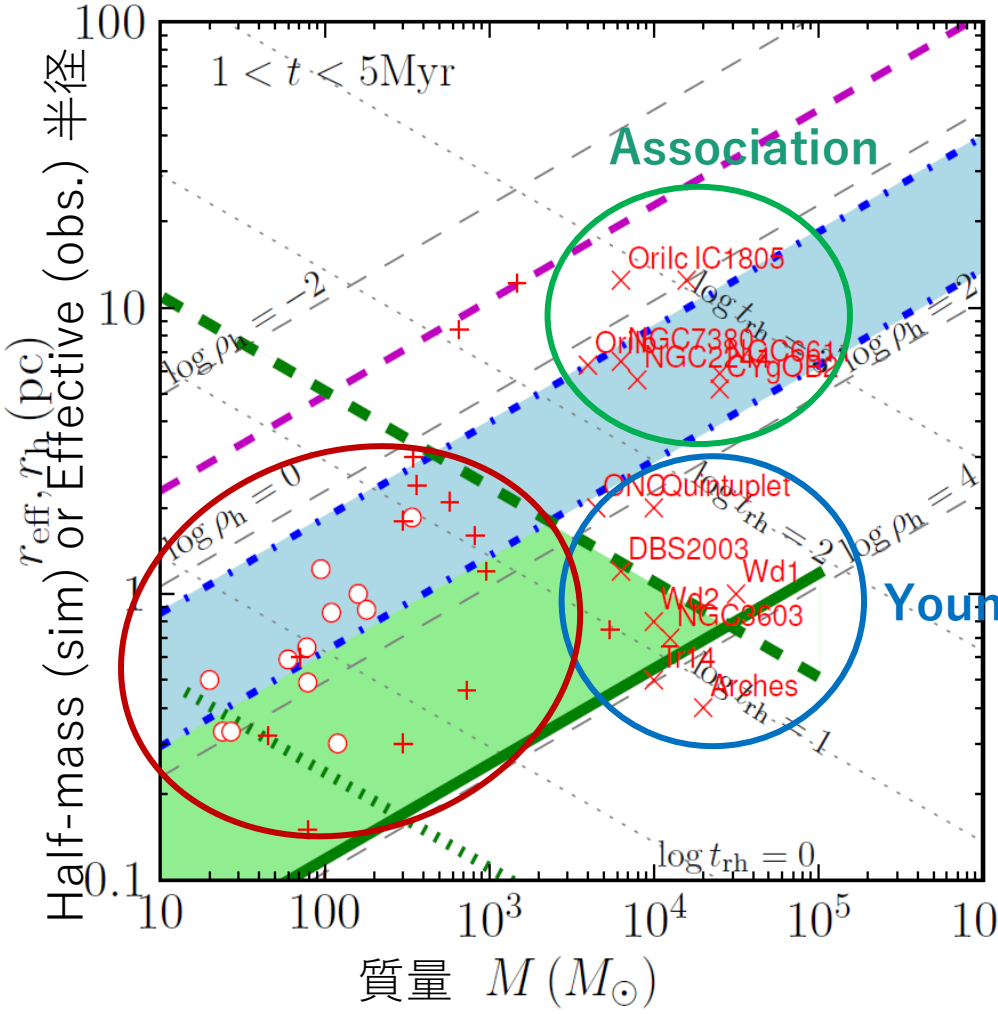

OB Association
Massive:$10^4$Msun
10～20pc
Less dense
＝ OB Association?

# Mass-Radius diagram of observed clusters




**Typical open cluster Embedded cluster**





$1 < t < 5$Myr
Association
Young Massive Cluster
Orilc IC1805
NGC7380
NGC2244
NGC2244
NGC2244

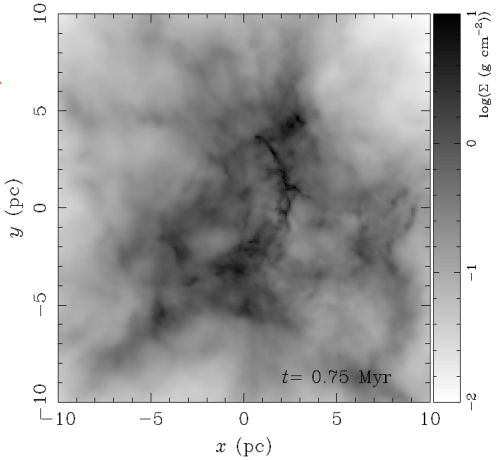
# 流体計算→N体計算

Fujii et al. (2016)

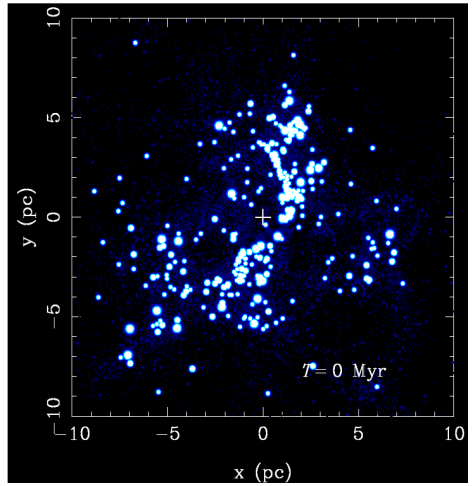
- Step1: SPH法を使って、乱流を持つ分子雲を約free-fall timeの間、流体シミュレーションで追う。フィラメント状の構造ができる。
- Step2: 流体計算を止めて、密度に応じた星形成効率を仮定し、流体粒子を星粒子に置き換え、残りの流体粒子は取り除く
- Step3: 星粒子のみでN体シミュレーションで10 Myrまで計算
- 計算コストを抑えて、大質量、長時間計算できる

Similar to Moeckel & Bate (2010)

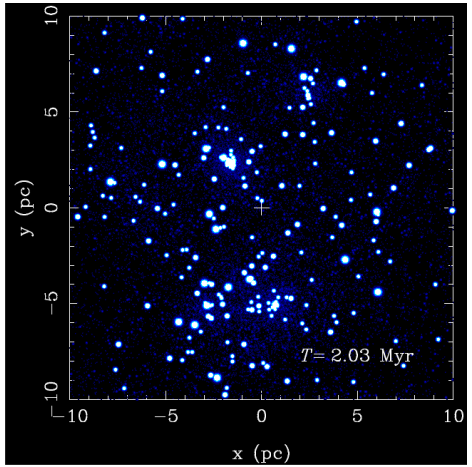
Step 1



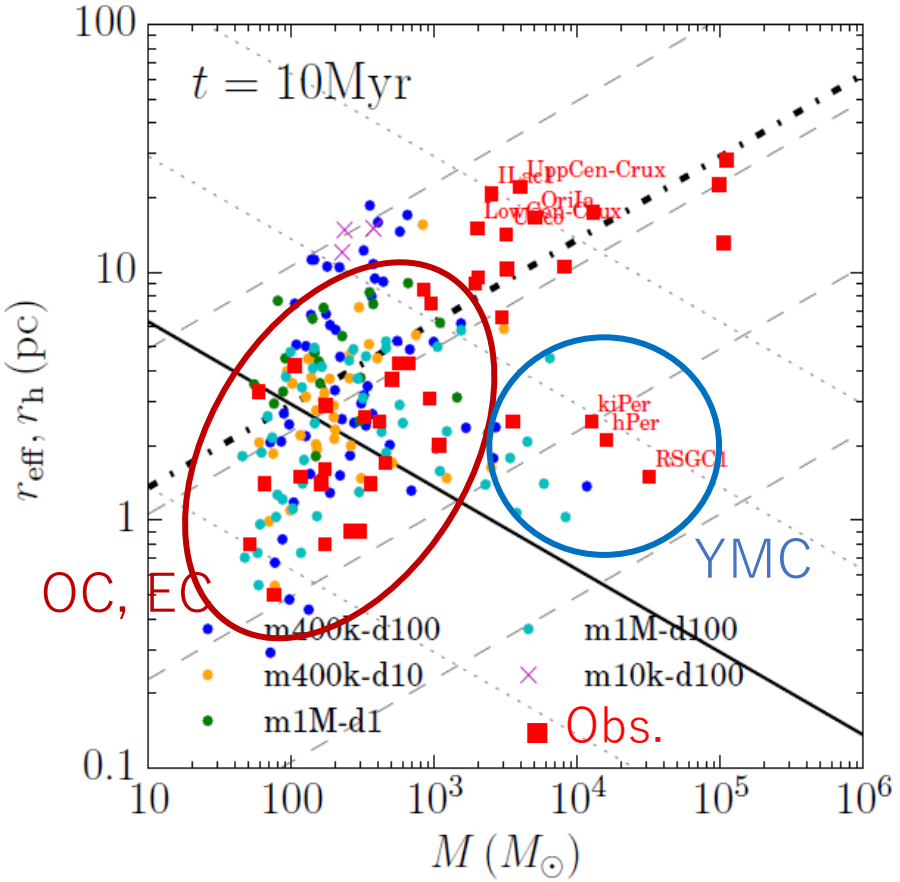

Step 2

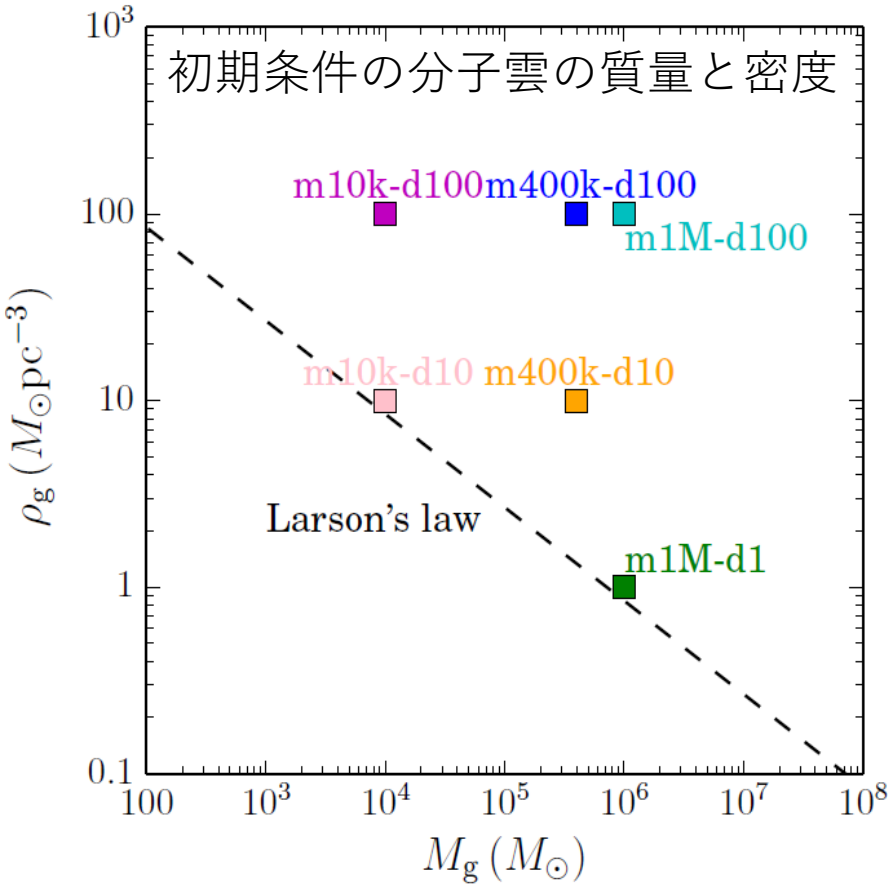



Step 3



# 初期条件と形成する星団の関係



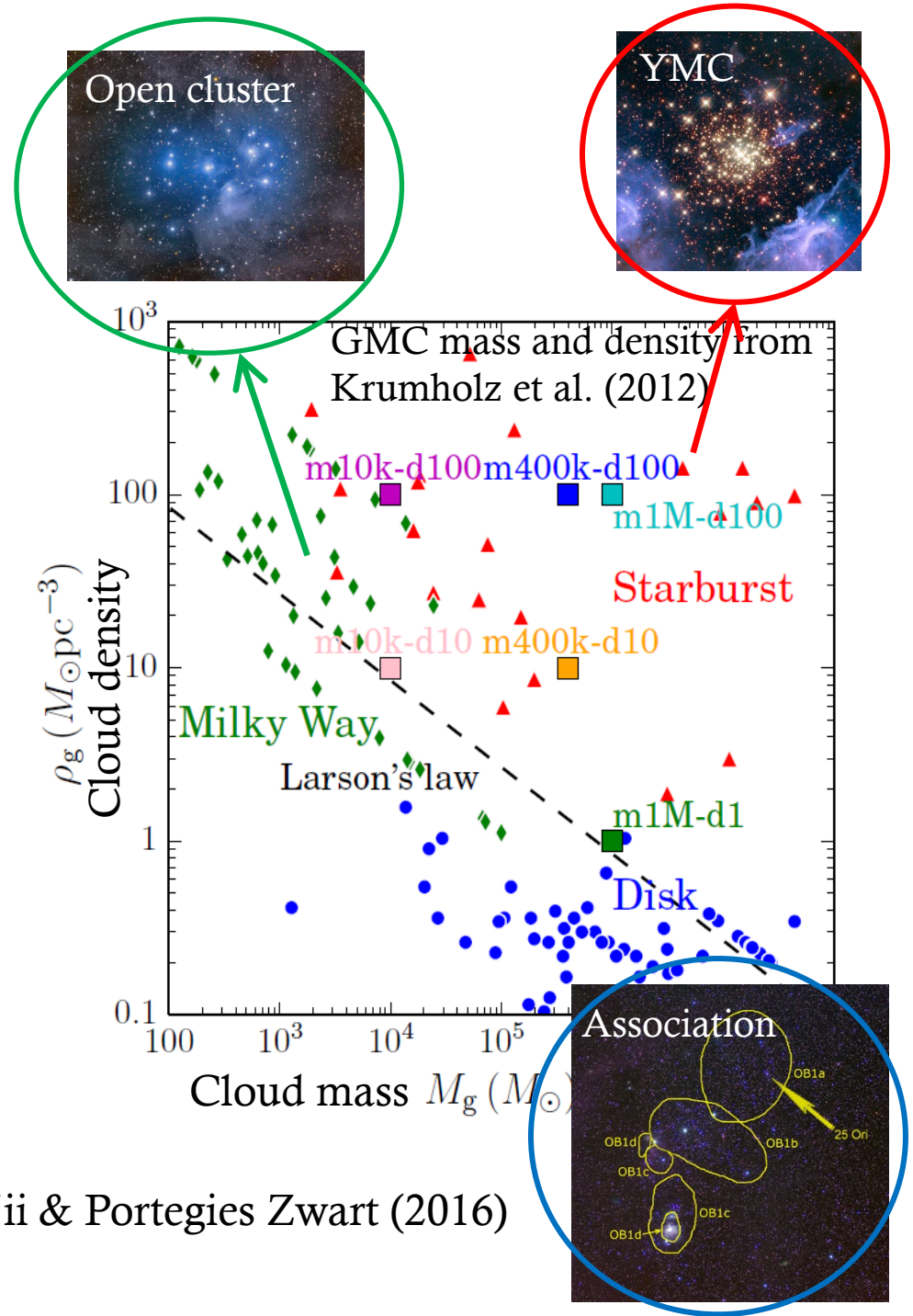




- Bonnell+2003と同様の初期条件
- 最大$10^6$Msunの分子雲

# 初期条件と形成する星団の関係

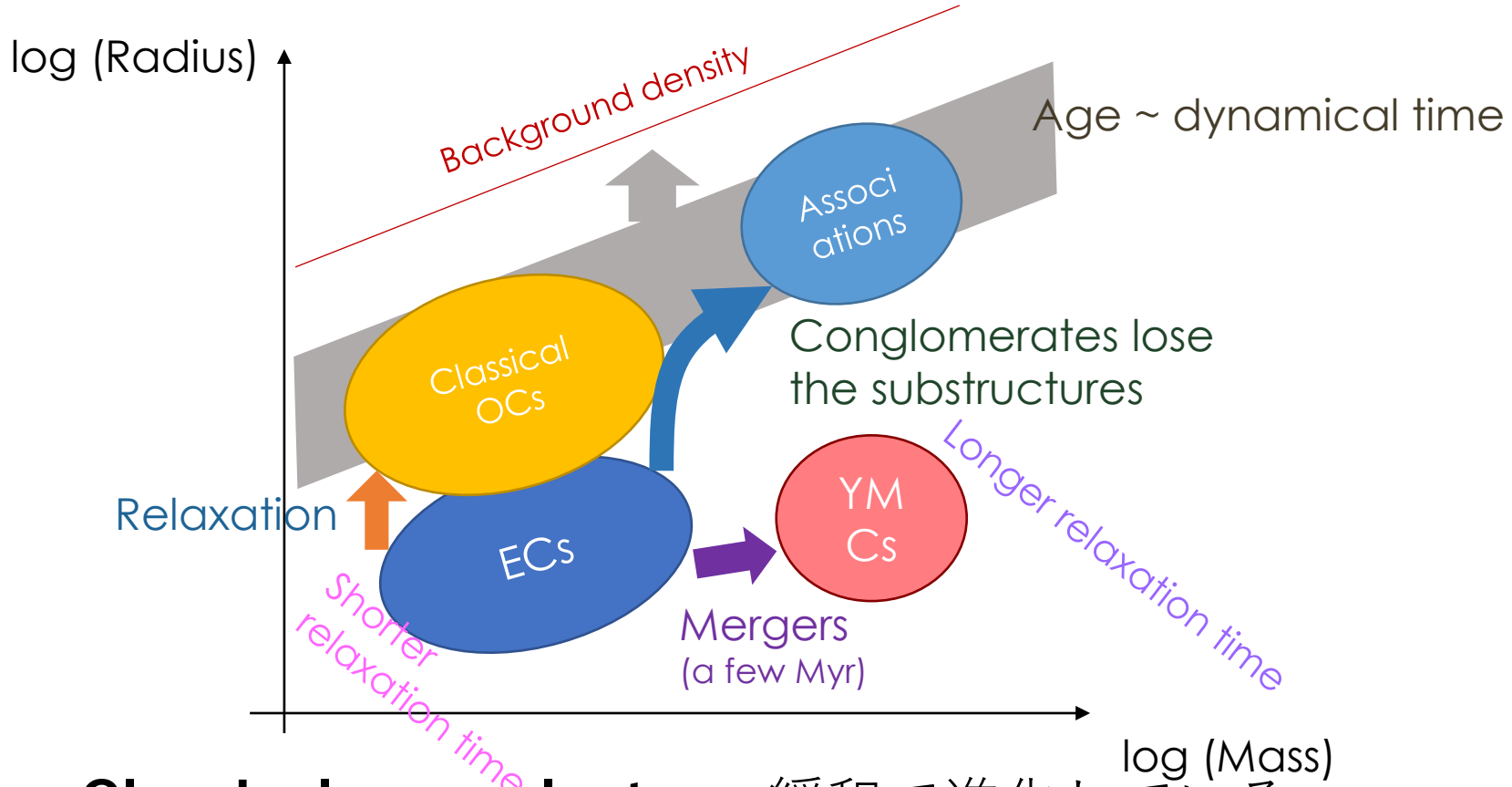
- 天の川銀河で典型的な分子雲からは散開星団が形成
- スターバースト銀河で典型的な分子雲（高密度、大質量）からは、大質量星団が形成
- 円盤銀河で典型的な分子雲からはアソシエーションが形成

- 銀河の種類→典型的な分子雲→そこで生まれる典型的な星団




Fujii & Portegies Zwart (2016)

# M-R diagramのまとめ

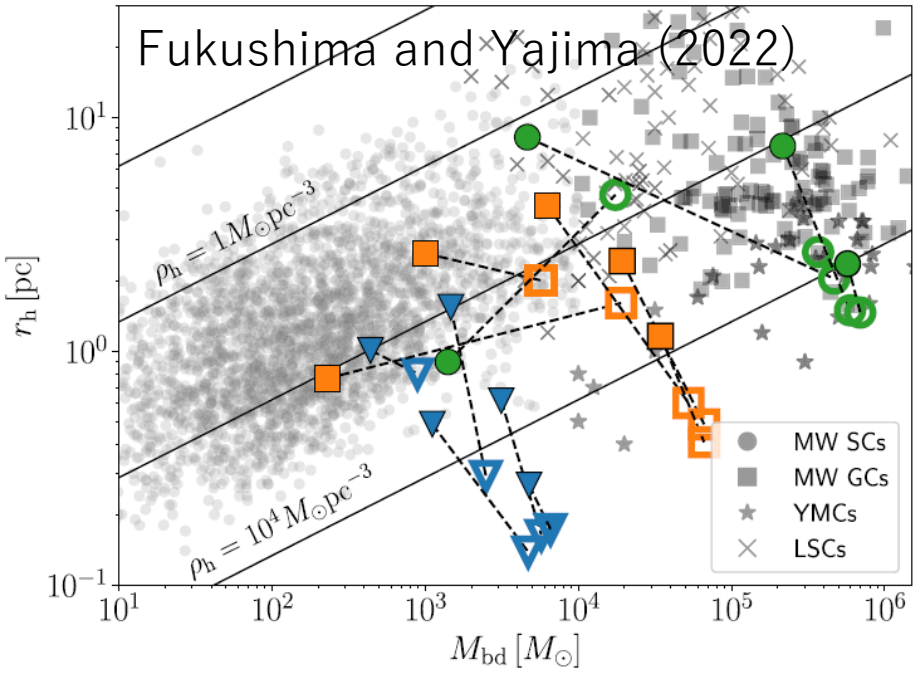


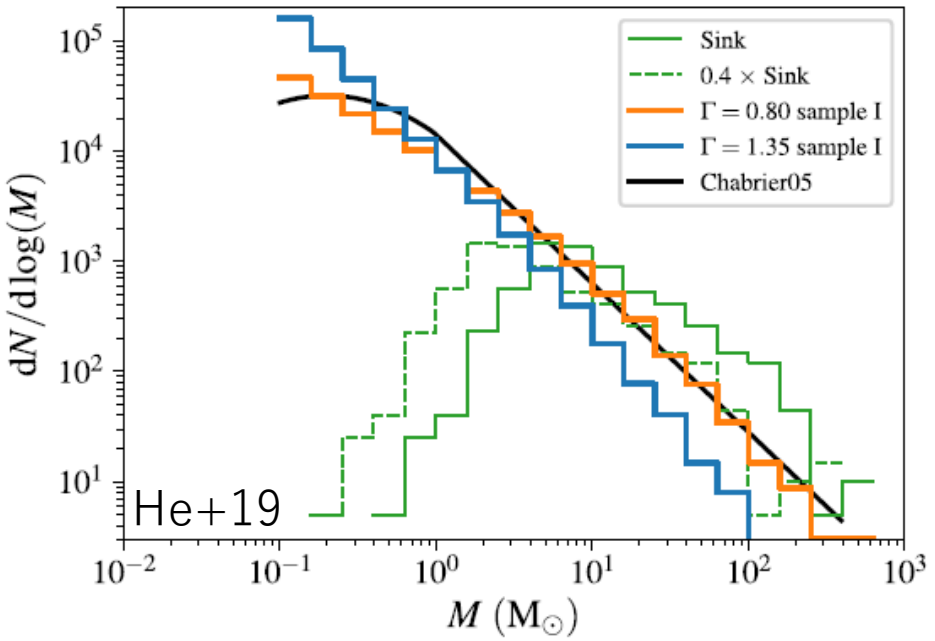

- **Classical open clusters**: 緩和で進化している
- **YMCs:** 緩和 + 合体で形成・進化
- **Associations**: 小さな構造が緩和の結果失われたもの

# 最近の大質量星団形成シミュレーション

- 大質量星団ができるのはどういう条件？
  - Fukushima et al. (20, 21, 22)
    - 面密度がcritical density以上なら大質量星団へ
  - Howard et al. (2018)
    - 最大$10^5$Msunの星団
    - Mcl ~ Mcloud^0.8 の関係を確認
  - He et al. (19, 20)
    - Sink粒子を適当なべきの質量関数で分割

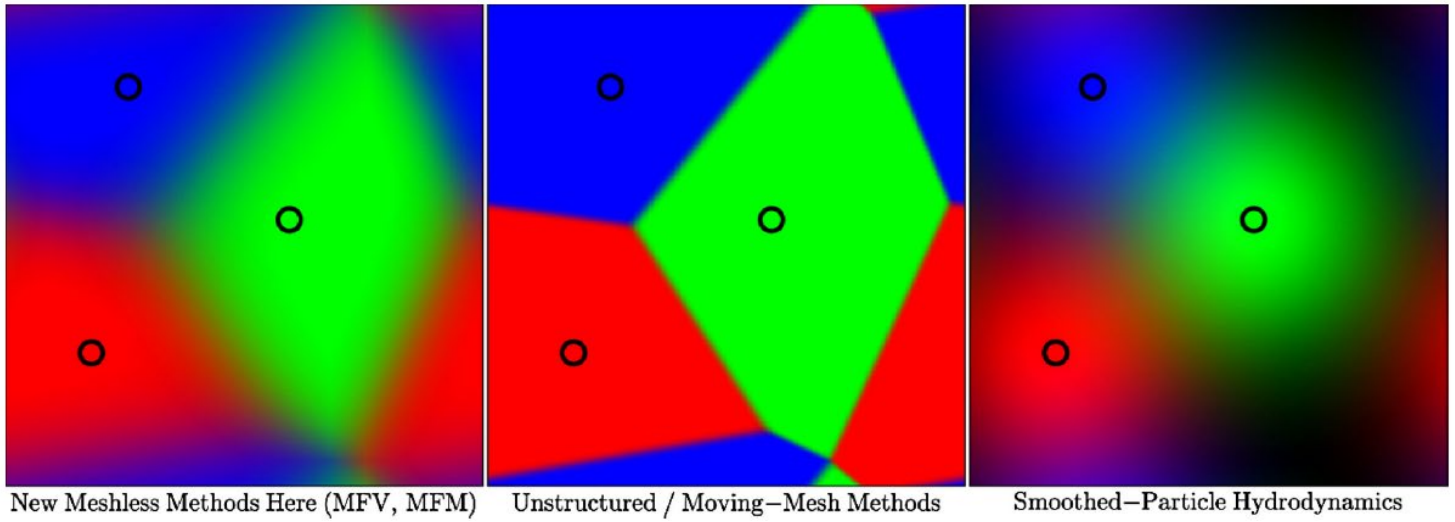
- 星団が$10^5$Msunくらいになると、sink粒子一つが複数の星の集まりを表す
  - 何か仮定をして星に変換する



# 様々なコード、グループ

- AMR(Adaptive-mesh refinement)法
  - 粒子法より磁場や輻射が入れやすい
  - Fukushima+ (Sfumato), He+ (RAMSES), Howard+ (FLASH)
- Lagrangian meshless finite-mass method (Hopkins 2015)
  - STARFORGE, Grudic+ (GIZMO)
  - 銀河形成シミュレーションでも使われている




Hopkins (2015)

# 大質量星団から球状星団へ

- 球状星団
  - $10^6$Msun程度
  - Multiple population：年齢や化学組成の違う2, 3のpopulationを持つ
  - 銀河のハローにあるが、どこでできたか謎

- 球状星団形成過程を解明したい
  - 星一つ一つまで分解
  - 流体＋N体で
  - 化学進化入り

# 計算コストの削減と近接相互作用の追加

- 普通に$O(N^2)$の計算すると$10^5$粒子くらいが限界
- 近年、実用化された新しいアルゴリズムParticle-Particle Particle-Tree ($P^3T$)法：遠方の粒子はtree法で、近傍の粒子はソフトニングなしで
  - 100万体まで衝突系を計算可能

- $P^3T$法の公開コードPeTarをN体/SPH法のコードASURAに組み込む　→ASURA+BRIDGE(Hirai+2021, Fujii+2021)

# ASURA+BRIDGE code

- N-body/SPHコード「ASURA」(Saitoh) を基に開発
- 星団進化シミュレーション用に開発されたコード「PeTar」(Wang+2020)を組み込んでいる
  - 106粒子を超えて、ソフトニングなしで計算可能
  - 連星ができても計算できる
- 星形成は、銀河形成シミュレーションで用いられている密度に応じた確率で行う方法を採用
  - 任意の質量関数と星形成効率を与え、それに従い星形成 (Hirai+2021)
- 大質量星からのフィードバックは、HII領域を仮定して球対称に温度を上昇させる

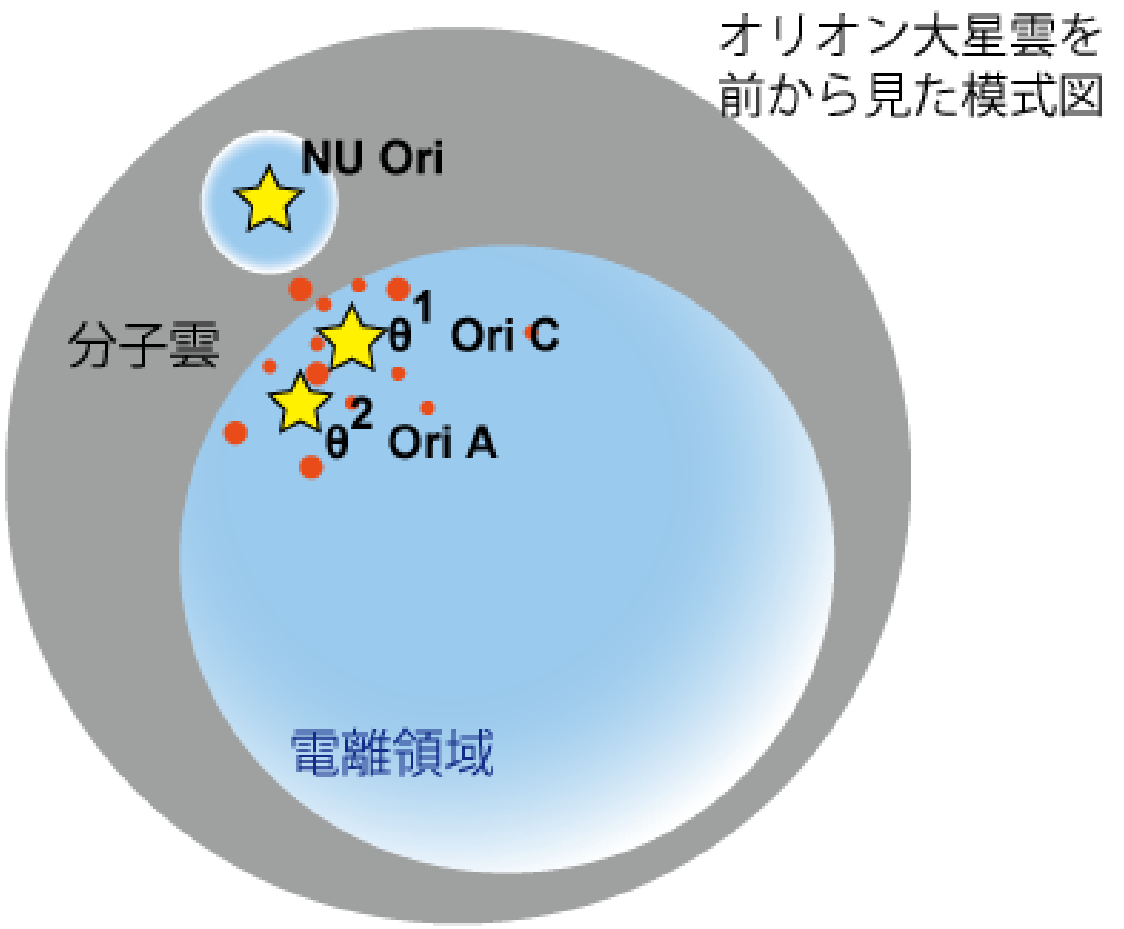
- SIRIUS Project
  - https://sites.google.com/g.ecc.u-tokyo.ac.jp/sirius-project/

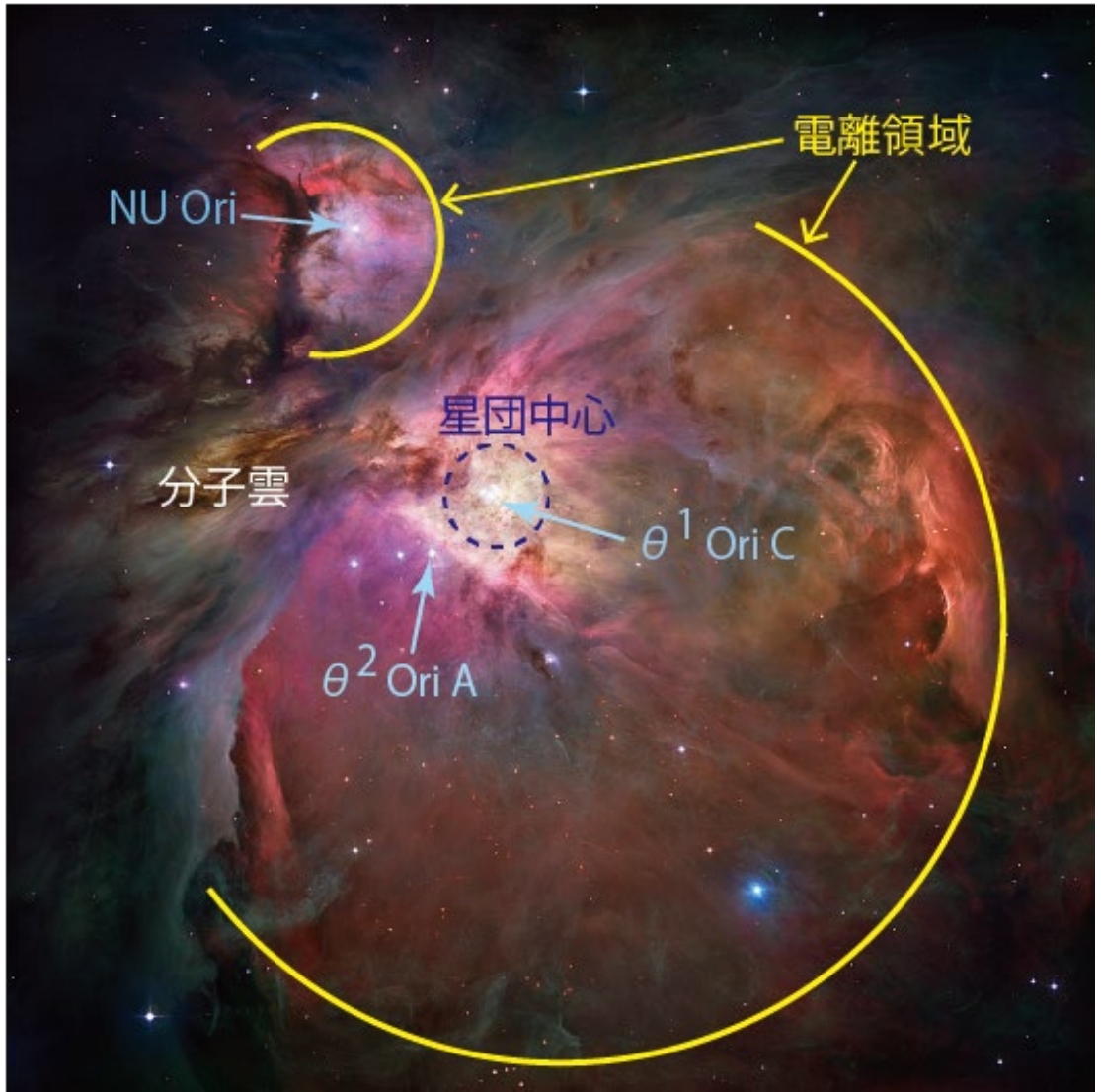
© Fujii, Takeda, 4d2u
Movie: https://www.youtube.com/watch?v=bvKDx8tneUM

# 星の運動に着目した星団形成シミュレーション

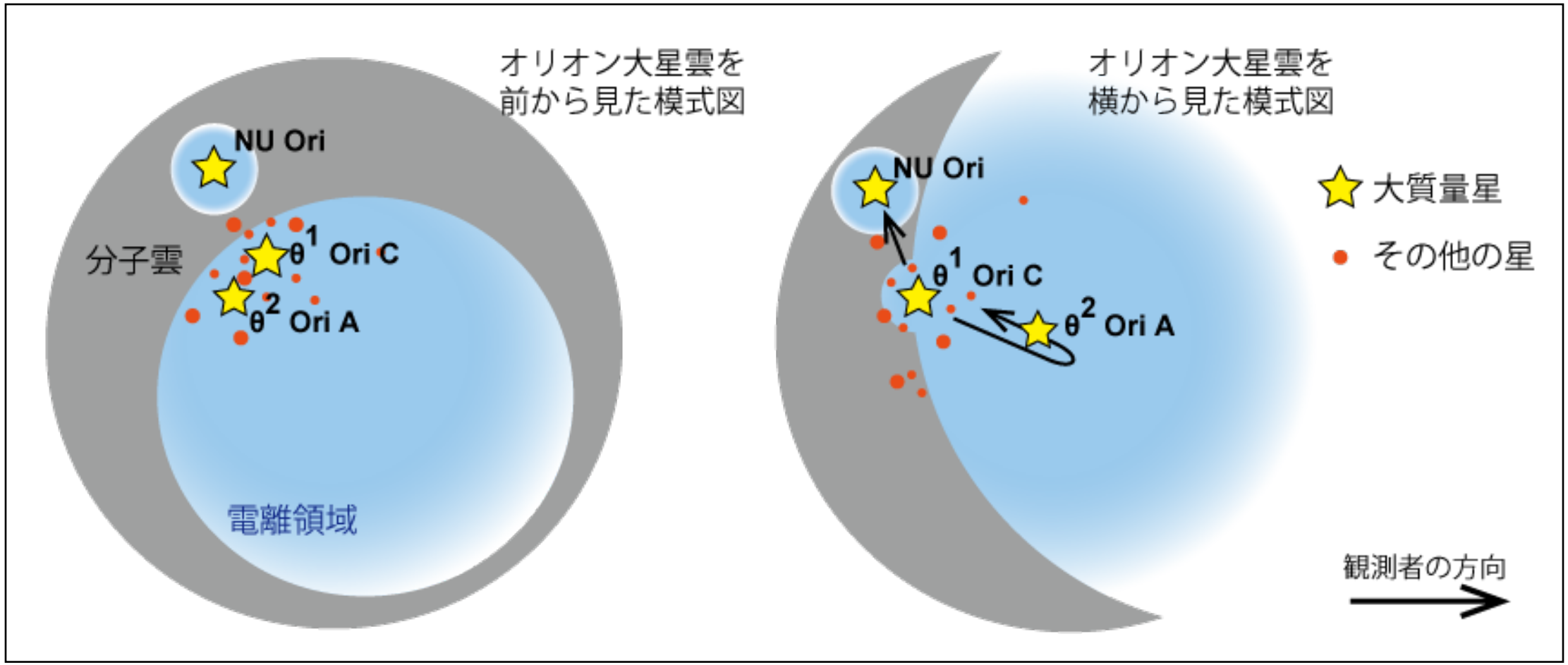
- 星同士が近接遭遇すると（連星＋単独星）、一つが速度を得て星団外へ弾き出され、連星はより束縛される
  - 星団では一般的な現象
  - これまでの星団形成シミュレーションではあまり着目されていない
- 大質量星は周りの星にエネルギーを与えて星団中心に集まる (mass segregation)
- 大質量星は効率よく散乱される→孤立した大質量星 (Fujii & Portegies Zwart 2011)

# シミュレーションと観測から想像できるオリオン大星雲の構造

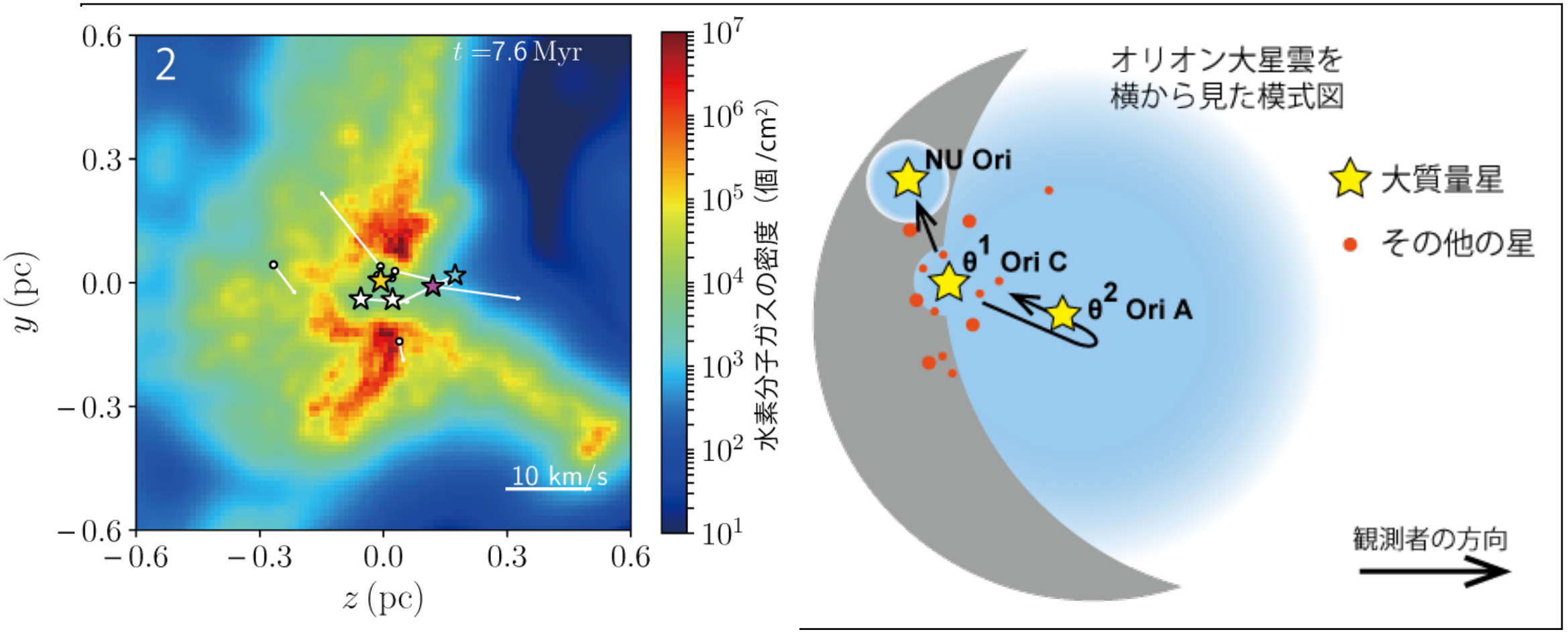


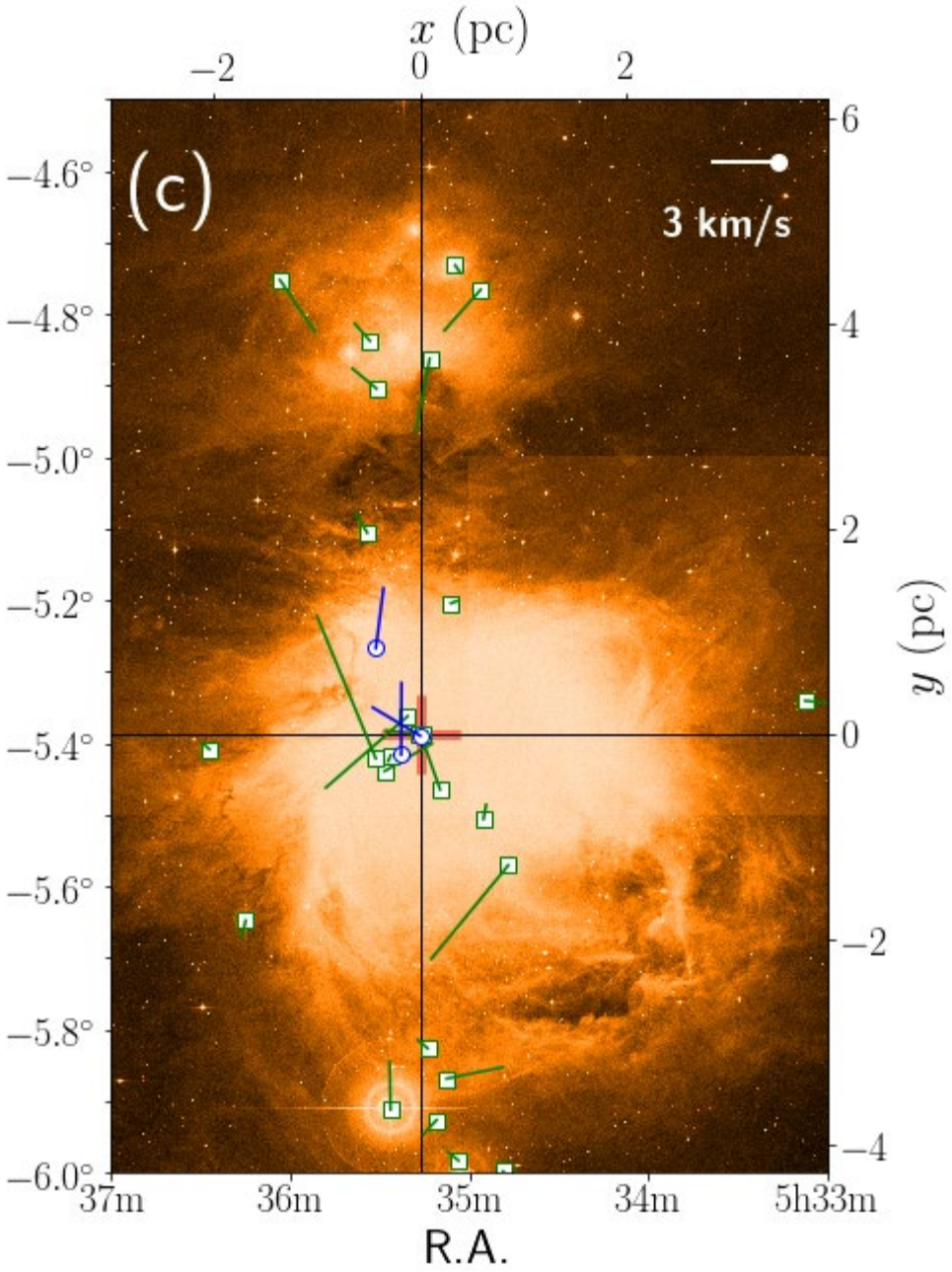
# シミュレーションと観測からわかる
# オリオン大星雲の構造



# シミュレーションと観測からわかる
# オリオン大星雲の構造



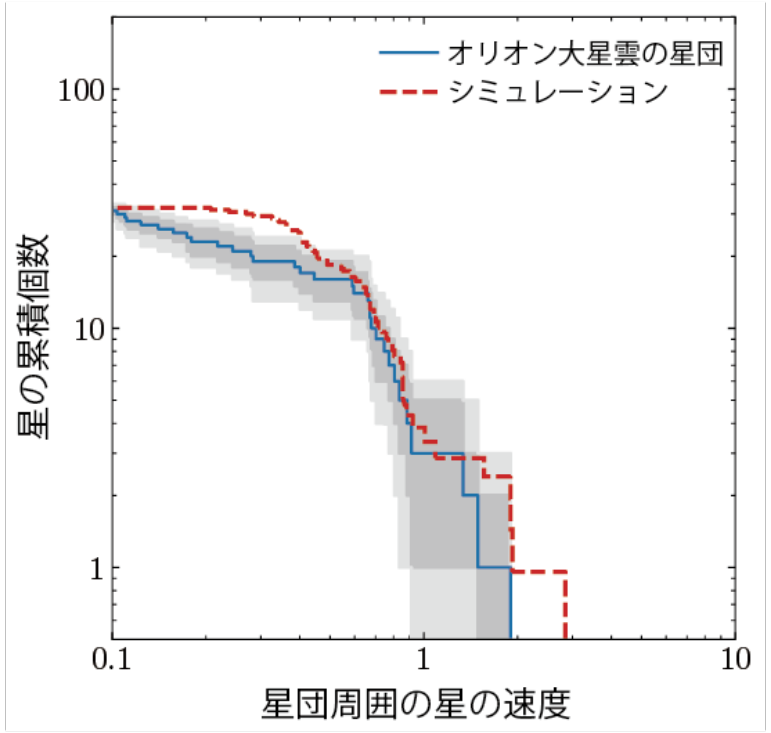

Fujii et al. (2022)




Fujii et al. (2022)

# Gaiaの結果との比較

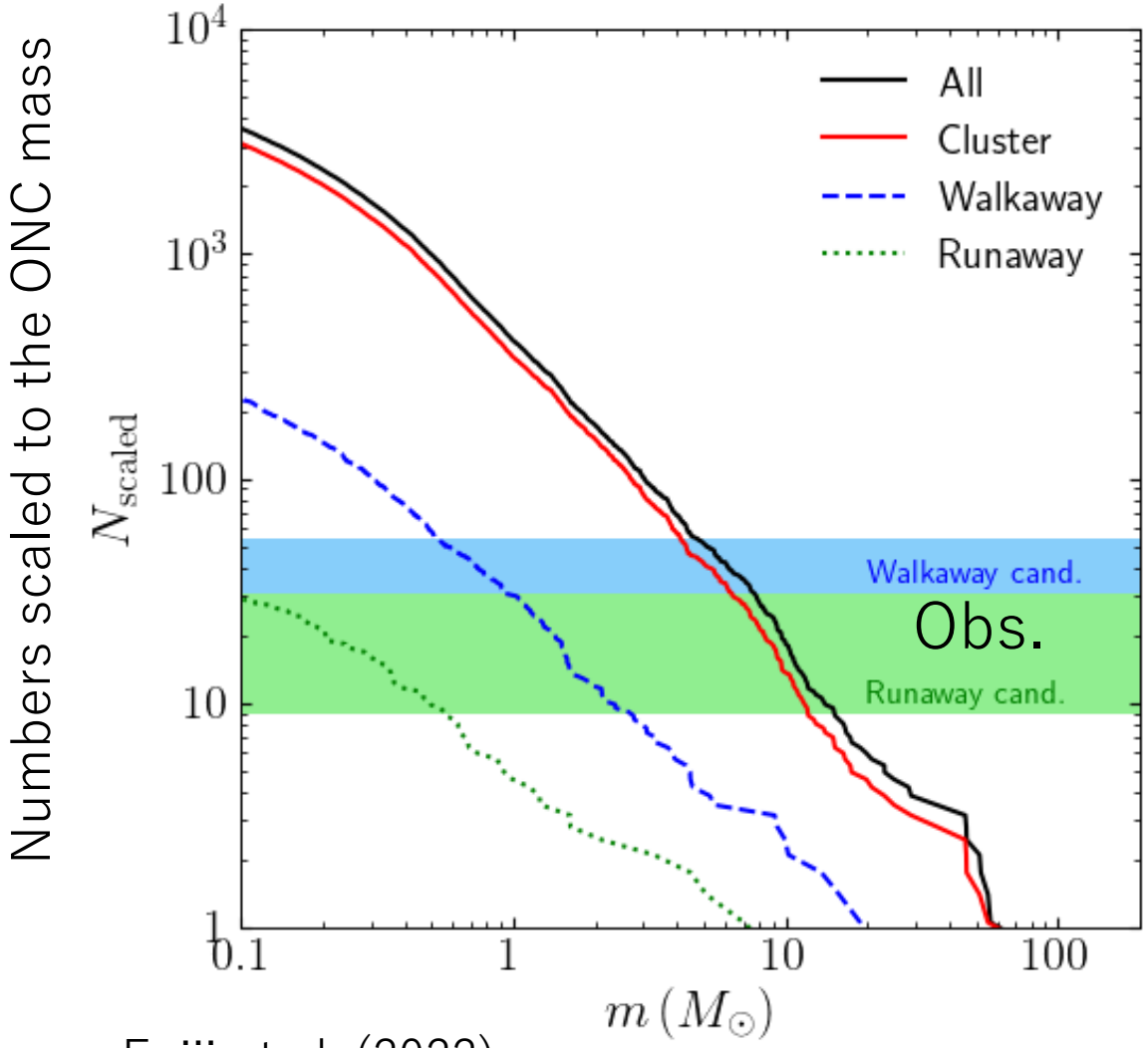
- ガイア衛星によって、星の位置と速度がより正確に測られている
- オリオン大星雲の星団中心から弾き出されたと思われる星が見つかってきている



# Runaway star

- 高速（30km/s以上）で運動する星
  - Runaway starより遅めの星をwalkaway starと呼ぶことも
- 連星が周りの星を重力相互作用によって弾き出すことによってできる
- 星団の中心部には連星があり、効率良くrunaway starを作る
- オリオン大星雲周りで見つかっているrunaway starは星雲内の星団によって説明できる

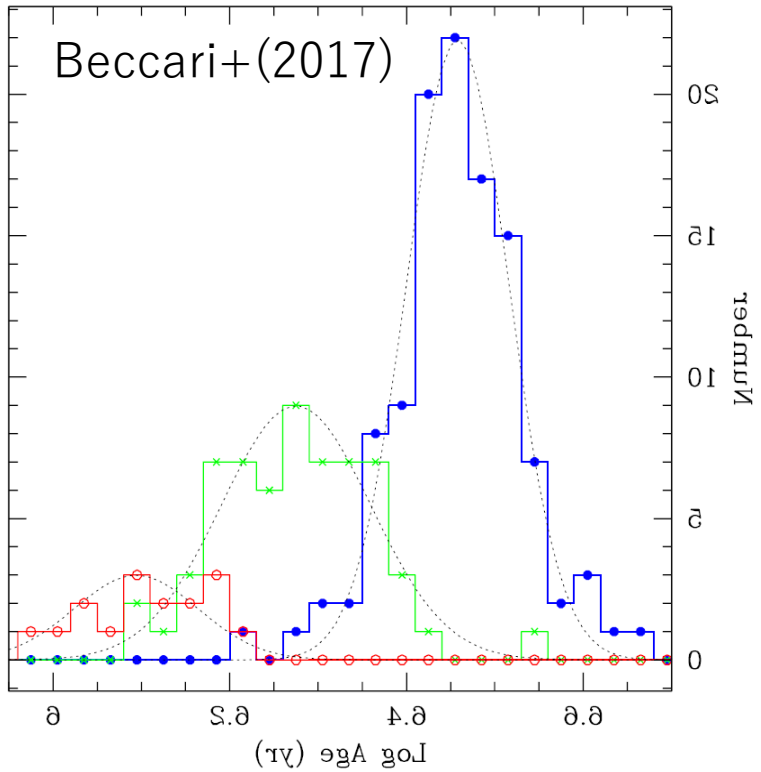
Runaway: v>30 km/s
Walkaway: 5<v<30 km/s

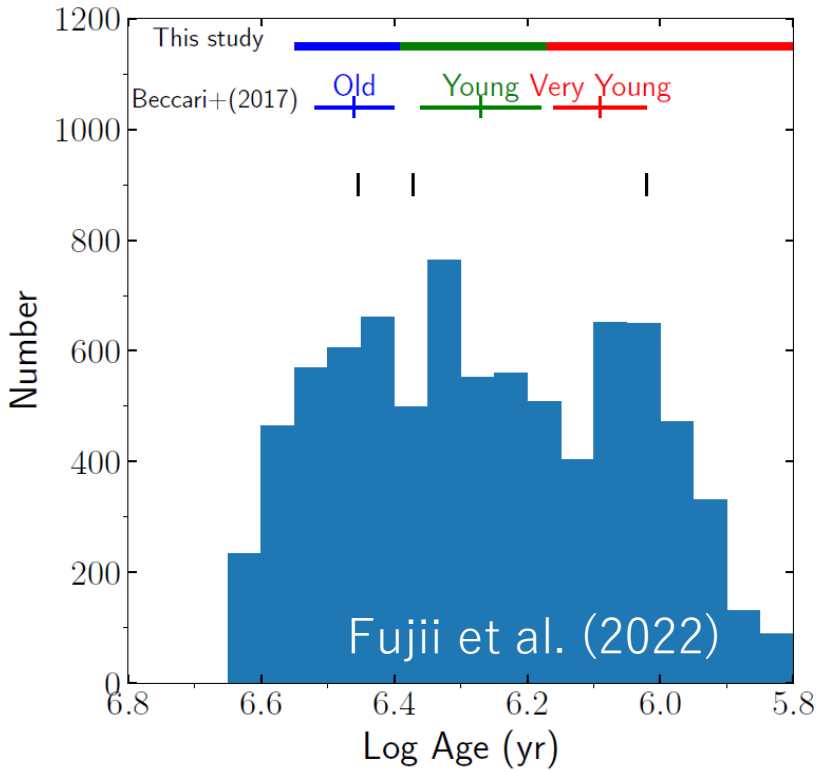



Fujii et al. (2022)

# 小さなクランプの合体による形成

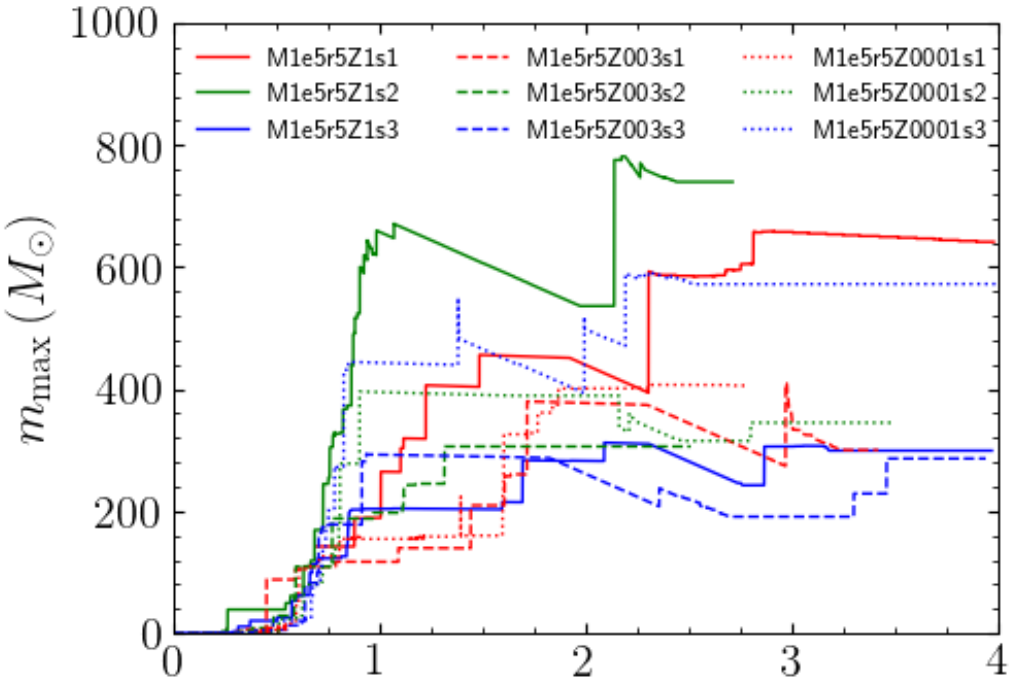
- 星の集まり（クランプ）が合体して星団ができていく
- 合体時に、星がたくさんできる
  → 観測で言われている年齢の３つのピークはこうしてできた
- 球対称でない星の運動も、最近合体があったことを示している
- **星の運動を正確に追えるのが、今回のシミュレーションの強み**



# 球状星団形成シミュレーションと星の合体

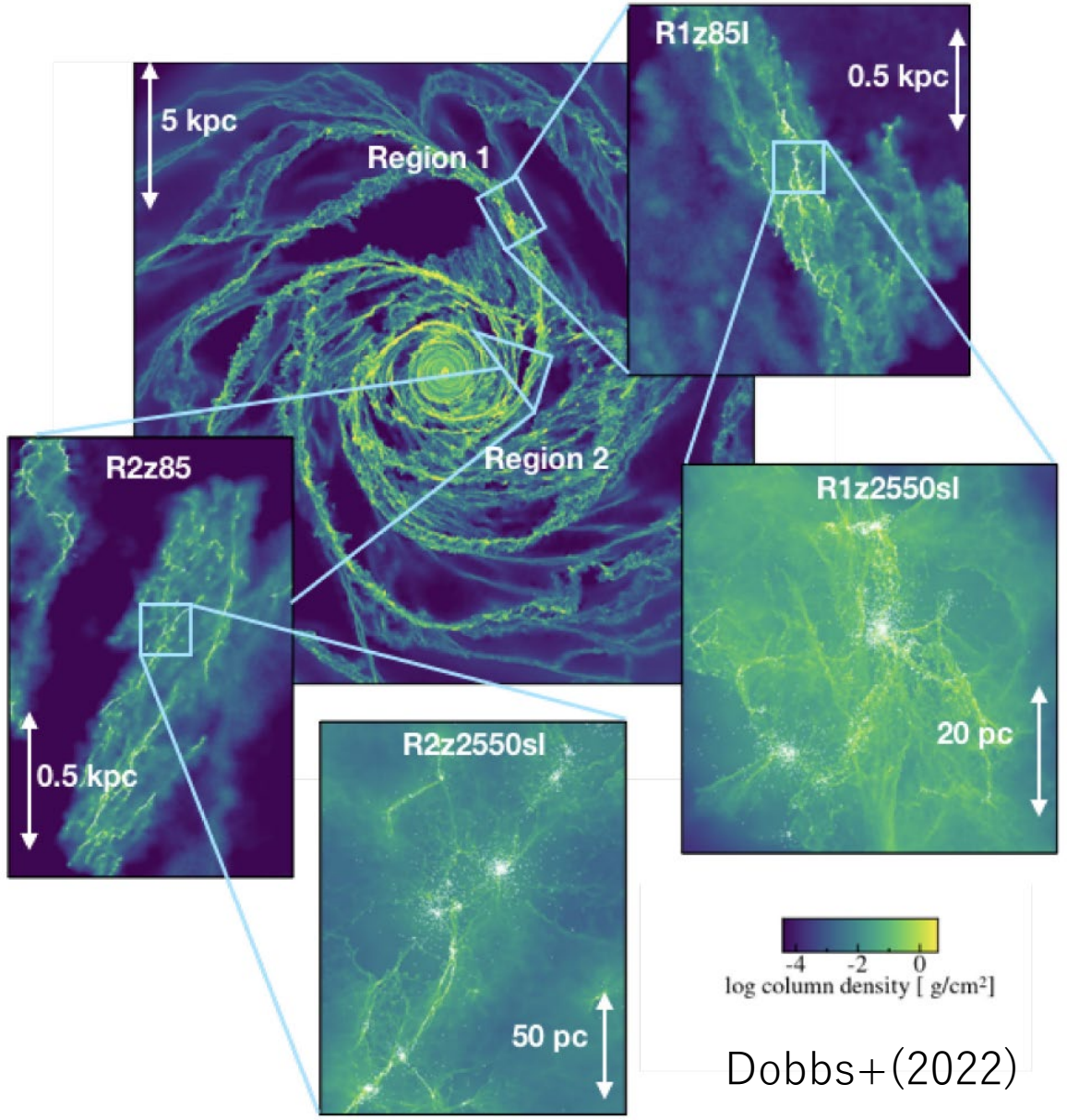
- 星団では星同士がぶつかることがある
- 星一つ一つを分解し、ソフトニングなしで計算できると、星の合体が取り入れられる
  - 連星からの合体：連星進化の一部、BSEなどのコード
  - 連続的な合体（runaway collision）：intermediate-mass black hole形成 (Portegies Zwart et al. 2004など)




Fujii＋(2022年学会秋季年会)

# より大きなスケール：銀河の中の星団

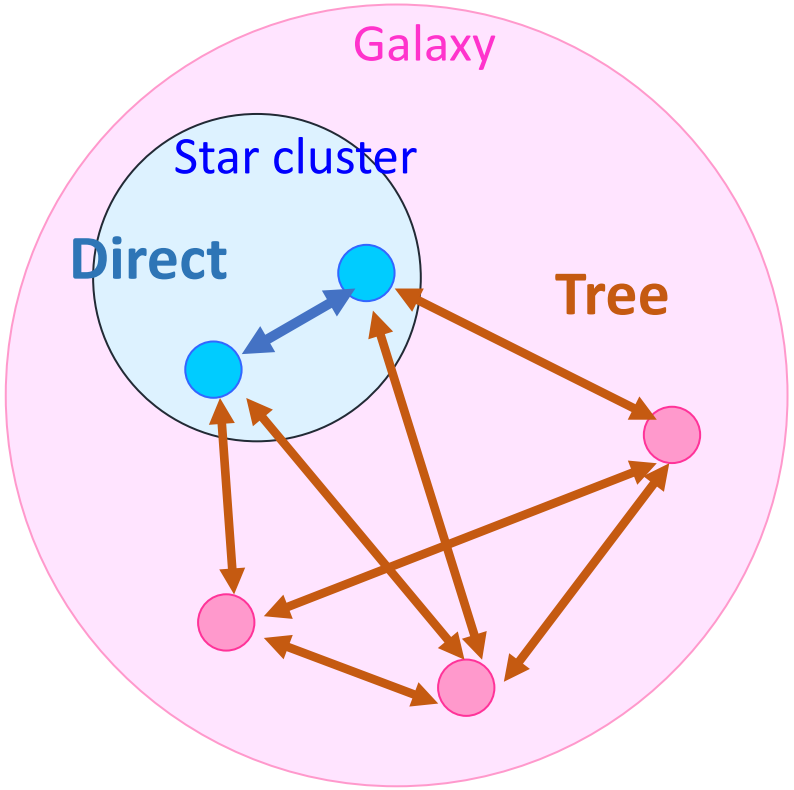
- 初代星団形成シミュレーション
  - 小さいものなら可能になってきている
- 銀河形成シミュレーション：星一つ一つを分解へ
  - 銀河は基本的には無衝突系
  - 星団や銀河中心は衝突系
- 星団形成シミュレーション：銀河の中での形成へ
  - 銀河の運動、Cloud-cloud collision(CCC)によるトリガー
  - Dobbs+(2022): Zoom-in simulation
- **スケールや向いている計算手法が異なるものをどう計算する？**




Dobbs+(2022)

# ハミルトニアン分割

- Fujii et al. (2007)
  - 星団：衝突系
    →独立時間刻み＋4次の積分法
  - 銀河：無衝突系
    →ツリー法＋2次の積分法
- ハミルトニアン分割し、それぞれ違うスキームで積分
- $P^3T$もこの一種
- いろいろなところに応用可能
  - 惑星形成：GPLUMコード (Ishigaki+2021), PENTACLEコード (Iwasawa, Oshino+2017)
  - 流体計算：FASTスキーム(Saitoh and Makino 2010)



# シミュレーションの発展

- シミュレーションの発展の方向性
  - 高分解能：空間(質量)分解能が上がる
  - 大規模化：同じ分解能でも広い領域を計算できる
  - 長時間化：長い時間計算を続けることができる
  - 複雑化：これまで入っていなかった物理を入れる
- 高分解能化はステップ数も増やす
- 大規模シミュレーションでは、どう並列化するかが大きな問題
- GPU等アクセラレータは複雑な問題に向かない

- これらを考慮して、できることを考える必要がある

# 学生のみなさんへ

- 昔は、計算機の性能も限られていたので、できることも限られていた
  → 一人でコードを書いてシミュレーションをしていた
- 今は、コードが大規模化、複雑化している
  → 一人で一からコードを書いても最先端に追いつかない
- 計算機のアーキテクチャやアルゴリズムが大きく変わる時がある
  - 若いうちは時間も体力もあるのでチャンス
- 日本は学生や若いPDが自由にスパコンを使える
  - コードを書ける人は貴重

# まとめ

- 星団形成シミュレーションは星一つ一つを分解できるところまで来ている
  - 磁場、フィードバック、アウトフローの影響については、今後より詳しく調べられるだろう
- 球状星団のような大質量星団のシミュレーションは可能になってきたが、数多くはまだ難しい
- 銀河形成シミュレーションも高分解能化
  - Zoom-inなら星団を分解できつつある
- シミュレーションの大規模化には、常に新しいアルゴリズム開発、コード開発が必要