# 密度の非一様性を考慮した 電離構造の星団進化への影響

王蘊玉、斎藤貴之、牧野淳一郎、藤井通子、平居悠 209s404s@stu.kobe-u.ac.jp

© ESO The galactic HII region RCW 120

2023/09/05



□ 概要

- 1. 研究背景・目的
- 2. 研究手法
- 3. 研究結果・議論
- 4. まとめ・今後



- 大質量星は星団という形で水素を主成分とする低温の分子雲中で誕生すると、そこから放出される 電離光子は周辺ガスを加熱・電離することで高温高圧の電離ガスからHII領域を形成し、分子雲に大 きい影響を与えられている。
- 従来の銀河形成及び星団の形成と進化を高精度シミュレーションにより調べる SIRIUS プロジェクト(Hirai et al. 2021)では、一様密度場で成り立つストロムグレン球モデルを用いて電離領域を評価していたが(Fujii et al. 2021b)、このモデルは実際の密度場の非一様構造が発達した状況には相応していない。
- 本研究では、計算負担を軽減しつつ星形成領域の空間非一様性を考慮するため、正20面体を用いて 電離光子が各々の方向に放出されるとして電離領域を評価するモデルを作り、星団-銀河形成のシ ミュレーションコード ASURA-BRIDGE に導入しその評価を行った。また、より統計的な結果を得 るために、ランダムシードの異なる4つの計算を追加し、新モデルによって形成される星の質量の 違いをさらに調べた。
- 結果として、正20面体を用いたモデルでは、このモデルは異方的な電離構造を再現し、星団形成シ ミュレーションにおいて対応するアウトフローをもたらす。今後より現実的なフィードバックモデ ルのもとで星団進化を調べることが可能になる。

1. 研究背景·目的

a.星形成・進化





**小質量星(太陽質量以下)**では主に磁場に よって駆動されるアウトフローが最終的 な星質量の決定に重要な役割を果たす (Machida et al. 2013)

**大質量星(太陽質量数倍以上)**の形成領域 (GMC)は遠方にしか存在しないため観測 が難しく謎が多い。

- 低質量星形成と比べて、大質量星は星 雲の中で集団で形成され、そこからの 輻射の重要性が小質量星との重要な違 いとなる。
- 大質量星からの強力な輻射や超新星爆
  発などにより周囲の環境に多大な影響
  を与える。

1. 研究背景·目的

b. 大質量星フィードバック



星風フィードバックなど

**大質量星がコアの水素を使い尽くす後** → 超新星爆発により重元素を生成して宇宙全 体の化学進化の中心的役割を果たす。





1. 研究背景·目的



 大質量星(>10M<sub>☉</sub>)から電離光子(≥13.6eV)を放出する ことで周囲の中性水素を電離することによるフィード バックは光電離フィードバックである。

c. 光電離フィードバック

 星形成領域で早期に効き始める フィードバックであり、星形成 がトリガーされるなど、その後 の星形成領域の進化に重要な影 響を与える。

- Strömgren Sphere
- 成 後 影 Neutral gas (HI) HI+HII

- ©NASA, ESA, C.R. O'Dell
- 電離した水素ガスが作る HII 領域は、供給される 電離光子数と再結合のバランスで決定される。一 様密度場では球状になり、それはストレムグレン 球と呼ばれる(Strömgren,1939)。



1. 研究背景·目的

d. 先行研究

- SIRIUS プロジェクトで開発された銀河形成・星団形成シミュレー ションコード ASURA-BRIDGE では、電離領域を球状に評価する 単純なモデルしか用いられていない。
- ▶ 電離領域は必ず丸くなり、非等方密度分布に起因する複雑な構造は 分解できていない。
- 輻射流体を直接扱っているシミュレーション(e.g.,Fukushima et al.2021; Michael et al.2020; Menon et al.2022; Cournoyercloutier et al.2023)であれば、このような問題は生じない。
- ▶ 光源の数が多く、計算量が多いという問題が残っており、GMC以上の大規模な高精度シミュレーションを行うことは比較的困難である。



#### ©藤井通子、武田隆顕、4D2U

# 1. 研究背景・目的 e. 目的

• 軽い計算コストや高い分解能で、大規模の星団・銀河一連のシミュレーションを行う。

 電離過程と流体力学を併せて解く輻射流体法を使い、三次元空間中で輻射輸送の方程 式を扱う六次元の発展方程式を解く。

• 星形成領域の非等方性を考慮する精密のシミュレーションを行う。

×)SIRIUSプロジェクトが使われている従来の球状モデルを用いる。

SIRIUSプロジェクトに基づいて開発されたASURA-BRIDGEシミュレーションコードを拡張し、 HII 領域の非等方性を考慮するため、電離光子が飛ぶ方向を制限することで、空間非等方性を取 り込む**正二十面体 HII 領域のモデル**を導入する。また、それによる星団進化への影響を測る。 2. 研究手法

### a. HII領域モデル

従来の球体モデル

 大質量星の周辺ガスを近傍探査し、放出 される光子(Q)とガスによる吸収(A)がバ ランスする半径を求めることで電離領域 をとる



電離領域の中で等方な分布を仮定したことになるので、特定の方向に高密度クランプがあるとそこに全ての光子がいってしまい、電離領域を過小評価





- で、放出される光子(Q<sub>i</sub>=Q/20)と吸収(A<sub>i</sub>)がバ ランスする半径を求める
- 全ての方向について収束するまで反復

2. 研究手法

a. モデル



2. 研究手法

• シミュレーションコードは **ASURA-BRDIGE**(Saitoh et al. 2008, 2009; Fujii et al. 2021b)

- 重力、流体力学、ガスの放射冷却、星形成、電離光子によるガス電離
- 高密度ガスに粒子分割法(e.g., Martel et al. 2006)を導入
- 星形成は SIRIUS モデル(Hirai et al. 2021)、Salpeter IMF (0.1->120 $M_{\odot}$ )
- 恒星系の時間積分は6次エルミート+PeTar(Wang et al. 2020)

### 初期条件 (AMUSE)

- 内部乱流を持つ分子雲 (v<sup>-4</sup>)
- 総ガス質量 = 10,000M<sub>☉</sub>
- 初期半径 = 9.5 pc
- 個数密度 = 2.78
- $\alpha_{vir} = |E_k|/|E_p| = 0.5$
- 初期自由落下時間 = 4.84
- 粒子数 = 100,000









3. 研究結果·議論

b. 速度場





#### c.水素密度-温度の相図

#### 従来のモデル





Phase diagram T=07.30 Myr <sup>5.0</sup> <sup>4.5</sup> <sup>4.5</sup> <sup>4.5</sup> <sup>5.0</sup> <sup>5</sup>



正二十面体モデル





3. 研究結果·議論

d. 星質量



## 4. まとめ・今後

- 星形成領域の空間的非一様性を星形成シミュレーションのHII領域フィードバックモデルに組み込むために、ASURA-BRIDGEに正20面体モデルを導入し、内部に乱流速度場を持つ分子雲の進化のシミュレーションを行った。
- ✓ 二十面体モデルで空間の非一様性を考慮することにより、星団形成の数値シミュレーション は、非等方な電離構造とそれに伴う非等方のアウトフローを再現した。一方、球体モデルは 常に単純な球状構造を示す。
- ✓ より統計的な結果を得るために、初期条件として5つの異なるランダムシードを用いてシミュレーションを行った。5つのシミュレーションにおいて、異なる質量区間において2つのモデルによって形成された星の数に差があり、全体として正20面体モデルは球体モデルよりも多くの星を形成し、そのうち2つのシミュレーションでは、正20面体モデルによって形成された星の総質量は球体モデルよりも有意に大きかった。この結果はさらに分析・調査する必要がある。
- ▶ 今後、空間非一様性を再現できる大質量星の電離構造が、大きな分子雲及び銀河における階層的な星団の形成に与える影響についても調べる可能性がある。