



概要

- 本研究ではGPUで高速化された3次元輻射流体シミュレーションコード”AROGT”を用い、宇宙で最初に行われる**初代星**形成において、電離領域から放射される再結合光子の輸送(**再結合放射**)がどのように寄与するのかを調べる
- 今までの結果より、再結合放射により星形成に重要となる水素分子の形成が促され、再結合放射を考慮しない場合に比べ初代星が形成しやすくなる傾向を示すことができた

重要な物理過程

1. 星間空間での水素分子形成



- 中性水素と触媒となる電離水素、電子が必要となる

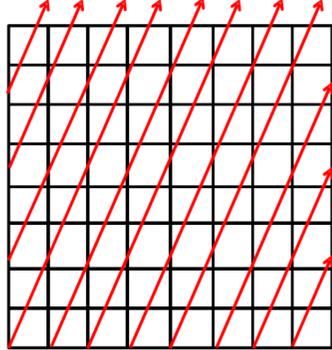
2. 水素の自己遮蔽効果

- 水素分子は Lyman-Werner 波長 (11.26–13.6 eV) の光子により乖離する
- 水素分子の柱密度が $n_{\text{H}_2} > 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の領域では Lyman-Werner 光子が遮蔽され、遮蔽された領域では水素分子冷却が十分に働き、星形成が行われる

手法

1. 空間的に広がった光源からの輻射輸送 (ST et al. 2015)

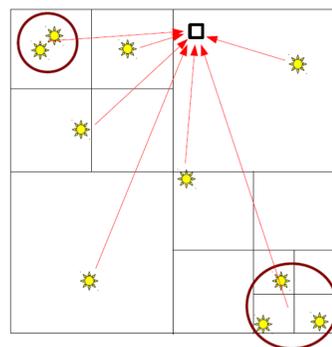
ART(Authentic Radiative Transfer)法



- 点光源 (恒星、レーザー) 以外からの輻射: 再結合放射、ダスト放射
- 計算領域の境界から平行な光線を飛ばす
- 光線の上流からの輻射を吸収し、各メッシュでの輻射と合わせて、下流へ輸送
- atomic な演算が起きないように光線の計算の順序を工夫(GPUでも効率的に計算)
- 計算量は $O(N_m^{5/3})$

2. 点光源からの輻射輸送 (Okamoto et al. 2012)

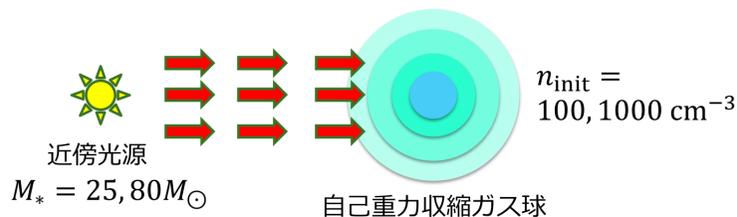
ARGOT (Accelerated Radiative transfer on Grids using Oct-Tree) 法



- 非常に多数の光源からの輻射輸送を効率的に計算する手法
- Tree構造をたどりながら見込み角が一定値より小さい光源の集団は一つの光源とみなす
- 輻射輸送を計算する光線の数減らすことで高速化を実現
- 光源数 N_s に対する計算コストの依存性は $O(\log N_s)$

シミュレーション設定

- すでにある初代星近傍の始原ガス雲の星形成における再結合放射の効果を計算



- 始原ガス雲と光源の距離、光源の質量、始原ガスの中心密度がパラメータ
- $2t_{\text{ff}}$ までに密度 $n_{\text{H}} > 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ の領域ができれば星が形成されたとみなす (t_{ff} : 自由落下時間)
- 再結合放射がある場合は近傍星だけでなく、電離された始原ガス自身からも放射が重要となる

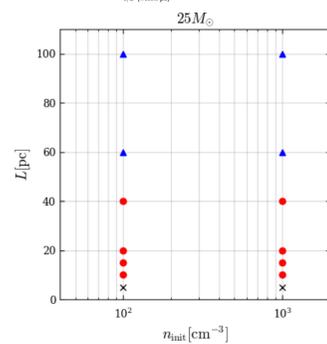
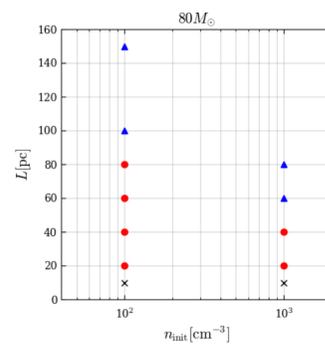
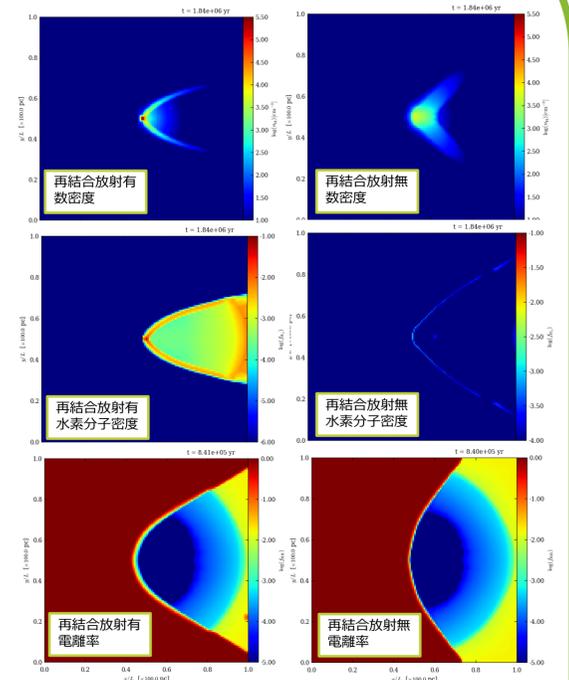
結果

- $M_* = 80 M_\odot$, $n_{\text{init}} = 1000 \text{ cm}^{-3}$ の結果

- 再結合放射がある場合は clump と放射源の境目に適度な電離領域が形成される(電離率の図)

- 適度な電離領域で水素分子形成が起こり、自己遮蔽領域が形成される

- 自己遮蔽領域により、水素分子の乖離が阻止されるため、星形成が行われやすい環境になる



▲: 再結合放射の有無にかかわらず星形成
●: 再結合放射がある場合は形成
×: どちらの条件でも星形成は起きない

- 再結合放射を考慮した場合は星形成が起きない場合でも、再結合放射を考慮すると星形成が起きる
- 光源が近い場合でも再結合放射による水素の自己遮蔽領域が形成された効果が大きい

今後

- 今回は $N_m = 128^3$ メッシュでの結果なので、 $N_m = 256^3$ メッシュの高解像度計算を行う
- 再結合放射を入れた際の初代星形成をより一般的にモデル化し、宇宙論シミュレーションの初代星形成に反映し、宇宙再電離期の天体形成をより正確に理解する
- 将来的な 21cm 線の観測のために現実的な予言を行う