

紫外線背景輻射場における原始銀河形成の物理

筑波大学大学院 博士前期課程
数理物質科学研究科 物理学専攻 1年
宇宙理論研究室
鈴木 裕行

1 Introduction

宇宙晴れ上がり後の密度ゆらぎの中から誕生した初代天体は紫外線を放射することによって周りのガスを電離し、最終的に宇宙の再電離を起こす。WMAPの宇宙マイクロ波背景放射の観測によると、宇宙再電離は赤方偏移 $z=10.6 \pm 1.2$ であることが分かってきた事に対し、高赤方偏移の宇宙では、 $z \sim 7$ 程の宇宙でも原始銀河が発見されている。その2点から考えると銀河の形成は宇宙再電離によって形成された紫外線輻射場の中で行われることが予想出来る。つまり、銀河形成を考える際には紫外線の物理的な効果を考えなければならない。銀河形成において紫外線の物理的な効果は、一つは光加熱 (Photoheating) であり、原始ガスを電離させ加熱する。電離されたガスは約 $10^4[K]$ 程まで温度があがるので、ピリアル温度が $10^4[K]$ より小さな系は重力ポテンシャルでガスをとどめておけず蒸発 (photoevaporation) してしまうことが考えられる。次に重要なのは水素分子の乖離である。原始ガス雲は重元素の割合が皆無か、極端に少ないのでガスが重力収縮した際の $10^4[K]$ 以下の冷却は主に水素分子が担うことになる。その重要な水素分子が紫外線によって乖離され、ガス雲が冷却できない可能性がある。

以上のように、紫外線はガス雲の冷却を妨げる様な働きがあり、そのため効率よく重力収縮できず天体形成に著しく影響をおよぼすことが考えられる。このような紫外線輻射場の中で天体が形成される、つまりガス雲が冷却し十分に重力収縮されるには局所的に密度が高く、紫外線が中心領域に浸透されない中性領域 (自己遮蔽領域) のなかで天体が形成される必要がある。そのためには、輻射輸送を正確に追い、紫外線の効果を見積もる必要がある。今回は、輻射輸送を考慮した銀河形成の研究を2つ紹介し、自分の研究の概要の紹介をする。

2 Tajiri & Umemura 1998 の研究

Tajiri & Umemura 1998 では、上に述べた自己遮蔽効果の定量的な見積りがされている。1次元球対称一様密度のガス雲を用意し、外側からの紫外線の輻射輸送と、その化学進化を矛盾なく計算した。この研究ではガス雲の半径や質量と、入射する紫外線の大きさをパラメータとして変化させて計算を行ない、自己遮蔽が起こる臨界半径や密度を求めている。入射する紫外線の強度を

$$I_\nu = I_{21} \times 10^{-21} \left(\frac{\nu_L}{\nu} \right)^\alpha \quad (1)$$

とする。 I_{21} は紫外線輻射の強度を 10^{-21} で規格化したもので、 I_{21} と、用意するガス雲の質量と半径をパラメータとして変化させる。パラメーターサーベイの結果、ガス雲の中心が電離されずに中性を保つ (自己遮蔽する) 臨界密度はガスの温度が 10^4 [K] で、

$$n_{\text{crit}} = 1.40 \times 10^{-2} \left(\frac{M}{10^8 M_{\odot}} \right)^{-1/5} I_{21}^{3/5} \text{ [}/\text{cm}^3] \quad (2)$$

となり、この臨界密度より密なガス雲は自己遮蔽がなされるということがわかった。解析的な議論では原子雲に入射する光子が全て電離に使われるという仮定のもとで行われるが、実際には電離に使われずに原子雲の外に逃げてしまう光子もあるのでこのような結果となり、解析的な値は実際の値より過大評価してしまうこともわかった。また、自己遮蔽が行われる中性領域のコアはシャープに電離領域と分割されず、なめらかになっているという結果も解析的な議論と異なる結果である。それは量は少なくとも無視できない高エネルギーな光子が中性コアに入り込み電離を起こすからであると予想される。このことから輻射輸送計算の重要性が指摘されている。

3 Susa & Umemura 2004 の研究

この研究は、矮小銀河のような比較的質量の小さな系の光蒸発に注目をした三次元輻射輸送計算である。この計算によると、最終的に出来上がる系の星成分の割合は系がコラプスする時期 z_c と、系の質量に依ることがわかった。系が進化していく段階で紫外線が照射されることにより、ガス雲は先に述べた紫外線の影響を受ける。この計算では、質量が $10^8 M_{\odot}$ よりも小さな系は紫外線により温度が上昇し、重力ポテンシャルでとどめておくことができず蒸発してしまい、天体形成がほとんどされないということがわかった。逆に質量の大きな系ではガスが電離されても深いポテンシャルにガスをとどめておくことができ、最終的に自己遮蔽をし、その中で天体が形成されるのである。

今回の結果は、質量の小さな系の天体形成が光蒸発によって抑制されるという結果であるが、これは、標準的な宇宙論の計算で、観測よりも矮小銀河が多く出来てしまう「サブハロー問題」の説明ができる可能性が示唆されている。

4 本研究の概要

銀河は楕円や円盤など様々な形態をしているが、その形成過程は完璧には説明されていない。定性的には、ガス雲の進化の段階で星形成のタイムスケールが長く、ガスが落ち込んで円盤になってからその中で星が出来れば円盤状の銀河に (散逸的銀河形成)、その逆で円盤になる前に星ができると楕円銀河に (非散逸的銀河形成) と言われるているが、その星形成のタイムスケールが長くなったり遅くなったりする物理プロセスをまだ説明された計算はされていない。今まで述べたように紫外線の効果は銀河形成や星形成に著しい影響を及ぼし、銀河の形態を左右させる物理過程なのではないかと注目している。本研究では、そのような目的で紫外線輻射を考慮した銀河形成の流体シミュレーションを行う。

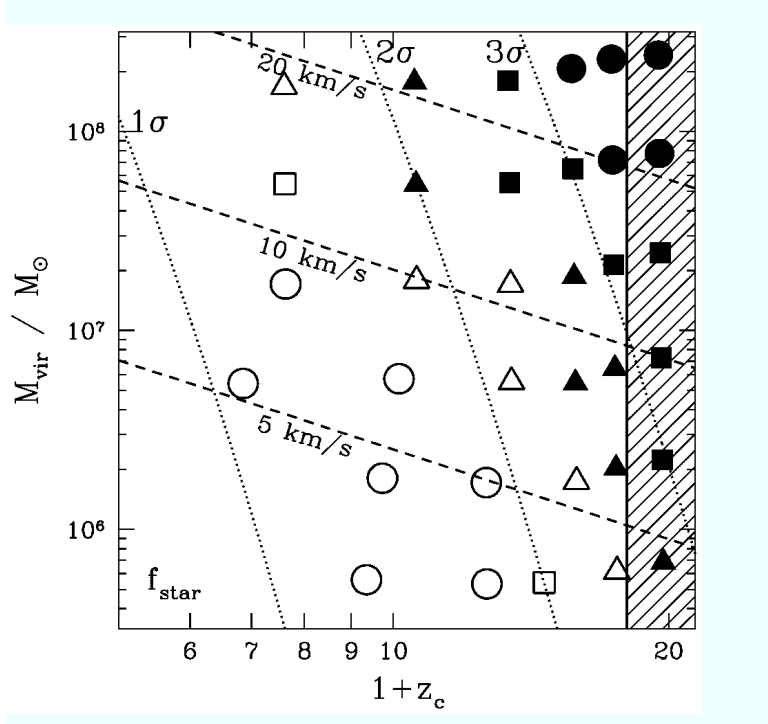


図1 数値実験による最終的な星質量の割合。横軸がコラプス時期で、縦軸が系の質量である。黒く塗りつぶされた丸印が9割以上星になった計算 ($0.9 \leq f$)。黒い四角印が $0.5 \leq f \leq 0.9$ 、黒三角印が $0.1 \leq f \leq 0.5$ 、中抜き三角印が $0.01 \leq f \leq 0.1$ 、中抜きの四角印が $10^{-3} \leq f \leq 0.01$ 、中抜きの丸が $f \leq 10^{-3}$ である。質量の小さな系で、遅くコラプスするものは紫外線による光加熱で蒸発し、天体を形成できないのがわかる。

4.1 計算の概要

計算は Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法による三次元流体計算で、ダークマター超粒子を共に計算するものとし、星形成の条件に先に紹介した Tajiri & Umemura 1998 の自己遮蔽の臨界密度、

$$n_{\text{crit}} = 1.40 \times 10^{-2} \left(\frac{M}{10^8 M_{\odot}} \right)^{-1/5} I_{21}^{3/5} \text{ [}/\text{cm}^3\text{]} \quad (3)$$

を入れて計算を行う。初期条件は、質量 $10^{10} M_{\odot}$ で球状の物質分布の中に宇宙論的な揺らぎをいれ、ハッブル膨張の速度を与えた状態から計算をし、線形成長段階でスピンパラメータ $\lambda = 0.05$ となるように角運動量を外から獲得させる。

銀河の形態を変化させる、つまり、星形成のタイムスケールに影響が出るのに重要となるのは紫外線が照射される時期とその強度である。コラプス時期を変化させて計算を行なった。紫外線背景輻射は Susa & Umemura 2004 と同様に、

$$I_{21} = \begin{cases} [(1+z)/3]^3 & (z \leq 2) \\ 1 & (2 \leq z \leq 4) \\ \exp[3(4-z)] & (z \geq 4) \end{cases} \quad (4)$$

として行う。

4.2 計算例

本研究はまだパラメータサーベイや解析の途中であるので計算例を示すことにする。 $z_c = 4$ の計算の結果を図 2 に示す。

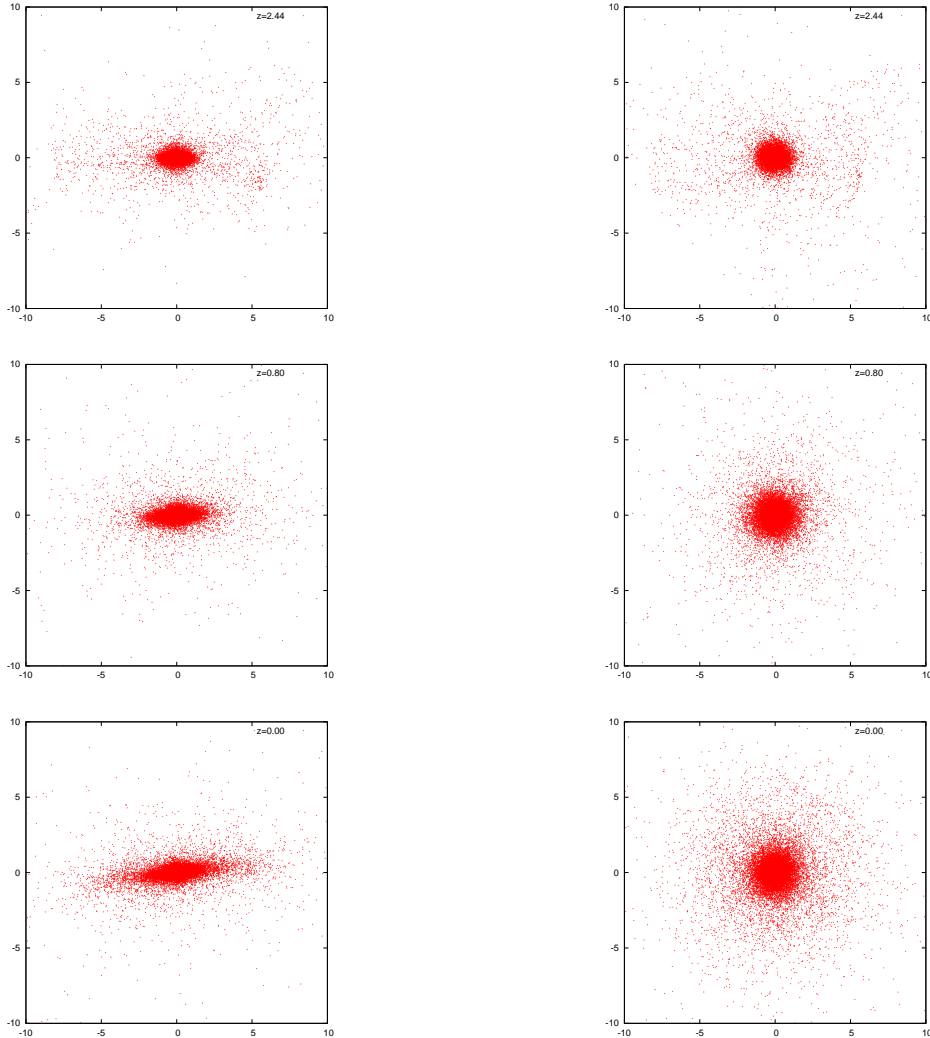


図 2 シミュレーションで得られた天体。左側は天体を edge on で見た図で、右側が face on の図。目盛りの単位は kpc である。上の段から $z=2.44, z=0.80, z=0.00$ の時の結果で、始めは楕円状の天体が形成され、その後に円盤状に星の分布が広がっていくように形成されているのがわかる。

最初に密度揺らぎの大きなところから紫外線の影響を受けずに楕円形の天体出来る。その後、膨張したガスが落ち込んできて、ガス円盤の中で星ができることにより次第に円盤状の天体が出来上がっていくのが見える。また、 $z_c = 7$ の計算ではほとんどのガスが紫外線の影響を受ける前に星となり、楕円状の天体となったことがわかった。

5 まとめと今後の課題

今回の計算で、コラプス時期の遅い系では紫外線の影響を受けて星形成のタイムスケールが遅れ、形態に変化が見られる傾向が見えてきている。今後はさらにコラプス時期のパラメータサーベイを行い、できた天体の表面輝度分布や星形成率を解析し、紫外線の効果の詳細を明らかにしていこうと思う。さらに、紫外線は背景放射だけでなく形成された星からの輻射も考えなければならない。背景輻射と星からの UV フィードバックどちらが良く効くのかの定量的な見積もりも行おうつもりである。最終的には輻射流体計算による計算でより本質的な議論を行い、銀河形成のモデルを構築したいと思っている。