

## 背景紫外線と内部紫外線が及ぼす銀河形成への影響

鈴木 裕行 (筑波大学大学院 数理物質科学研究科)

### Abstract

本研究では、3次元流体計算に光電離、自己遮蔽、光加熱、電離波面の伝搬といった紫外線輻射輸送の物理モデルを組み込んだ計算を行うことで、背景紫外線輻射と形成された大質量星が放出する内部紫外線の銀河の星形成史への影響を調べた。その結果、質量が  $M_{gas} = 10^9 M_{\odot}$  より小さな系では多くの量のガスが紫外線によって光蒸発を起こし、星形成活動が著しく抑制されることがわかった。また、 $M_{gas} \sim 10^9 M_{\odot}$  程度の系では、進化の初期段階 ( $t \leq 1 Gyr$ ) では主に内部紫外線に、後期段階では主に背景紫外線によって星形成が抑制されることがわかった。質量の大きな系では重力ポテンシャルが深いことから、光蒸発はほとんど起こらないが、星形成活動は紫外線輻射によって抑制された。また、数値実験によって、銀河形成における内部紫外線と背景紫外線それぞれの効果を区別することができ、その上、コラプス時期の早い系においては、背景紫外線でなく主に内部紫外線によって星形成率が抑制されることがわかり、高赤方偏移での銀河形成では内部紫外線による feedback は非常に重要なものであることがわかった。

### 1 Introduction

近年の研究から初代星は質量の大きな星が多数であることが知られており (Susa 2013, Hirano et al 2013)、そのような天体は大量の紫外線を放出し、周囲のガスを電離する。このような初代星や初代銀河による電離領域が重なることによって宇宙には紫外線輻射場が形成され、やがて宇宙晴れ上がり以降、宇宙は再度電離される。WMAP などによる宇宙マイクロ波背景放射の観測によると、このような宇宙再電離は赤方偏移 10 程度にて起こったことが示されており (Komatsu et al. 2009)、これより、多くの銀河は電離された宇宙にて、つまり紫外線背景輻射場の影響を受けながら形成・進化するということが予想できる。紫外線は原始銀河ガス雲を電離加熱したり、原始ガスにおける重要な冷却材である水素分子を乖離する事から、銀河形成に著しい影響があることが予想され、銀河形成を考える上では紫外線輻射輸送を考慮することは非常に重要である。そして今日までは輻射輸送を数値計算で解くことによって矮小銀河形成に対する紫外線背景輻射の影響 (Susa & Umemura 2004) などが調べられてきた。この研究によると、比較的早くコラプスし、銀河形成を行う系や、質量の軽い系は背景紫外線の影響を著しく受け、星形成が大幅に抑制されることがわかった。

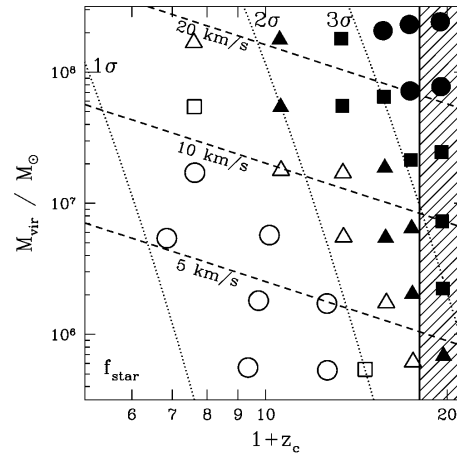


図 1: Susa & Umemura 2004 の計算結果。横軸がコラプス時期で、縦軸が系の質量である。黒く塗りつぶされたシンボルは十分に星形成が行われた計算。質量の小さな系で、遅くコラプスするものは背景紫外線による影響で著しく星形成が抑制されている。

しかし、これらの研究では、原始銀河内部にて形成された星々が放出する紫外線 (これを内部紫外線という) や超新星爆発の影響は、輻射輸送計算のコストが膨大である事などを理由に今まで調べられてこなかった。そこで本研究では、背景紫外線だけで

なく、内部紫外線も考慮に入れて、それぞれの紫外線が銀河形成、特に星形成史にどのような影響を及ぼすかを調べた。

## 2 Methods

### 2.1 初期条件・パラメータ

本研究の計算は、まず、宇宙論的な初期条件を作成し、その中から粒子分布を球状に切り取り、宇宙膨張の膨張速度を与えて、計算を開始する。しかしこれではハローの運動量獲得を再現できないので、ハローが最大膨張を迎える頃にスピンパラメータ  $\lambda = 0.05$  となる様に剛体回転を与えた。本研究でキーポイントとなるのは、紫外線による影響で系からガスが光蒸発する量や、紫外線が入射するタイミングである。なので、(Susa & Umemura 2004) と同様に系の質量と系がコラプスする時期をパラメータとして計算をおこなった。更に、それぞれの紫外線を ON/OFF した数値実験を行うことで、背景紫外線と内部紫外線のそれぞれが銀河進化にどのような影響をもたらすかを調べた。

### 2.2 計算コード

本研究の計算ではダークマターと流体、星団粒子を扱うので、それぞれの相互作用を解く必要がある。ダークマターは、それらを  $N$  個の粒子で表現する  $N$  体計算によって計算を行い、ガスは、流体を広がるの持った  $N$  個の粒子の重ねあわせによって表現する Smoothed Particles Hydrodynamics 法によって計算を行った。また、進化の際に形成された星団粒子は無衝突粒子であるのでダークマターと同様に計算した。加えて、ダークマター (+ 星団粒子) と流体も相互作用をするので、それらを解けるようにコードを作成し、計算の高速化のため、Tree 法によって計算コストを削減した TreeSPH 法によって計算を行った。

### 2.3 紫外線輻射輸送の物理モデル

以下の方法にしたがって、SPH の電離判定を行う。内部紫外線又は、背景紫外線によって電離された SPH

粒子は、 $3 \times 10^4$  [K] まで温度を上昇させることにする。これは、加熱率と冷却率が平衡となる温度がその粒子の密度や紫外線強度のスペクトル等によって異なりはするが、大体が  $10^4 \sim 10^5$  [K] となるので、この値を用いた。

#### 2.3.1 背景紫外線

背景紫外線における電離判定は、(Tajiri & Umemura 1998) の自己遮蔽条件、背景紫外線は、(Tajiri & Umemura 1998) の自己遮蔽条件、

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

を用いる。  $n_{\text{crit}}$  より密度の低くなった SPH 粒子は背景紫外線によって電離され、 $3 \times 10^4$  [K] まで加熱される。背景紫外線の強度は一定でなく時間進化するものとし、(Umemura et al 2001) より、  $I_{21}$  が、

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

のように時間進化するモデルを用いた。

#### 2.3.2 内部紫外線

形成された星団粒子は SIpeter の IMF ( $0.1M_{\odot} \sim 50M_{\odot}$ ) を仮定し、それから推定される電離光子数が周囲のガスを電離すると考える。また、内部紫外線によって進行する電離波面は、電離波面は再結合時間  $t_{\text{rec}}$  程度でシュトレングレン半径  $r_s$ 、

$$r_s = \left( \frac{3\dot{N}_{\text{ion}}(t)}{4\pi n_e n_p \alpha_B} \right)^{1/3} \quad (3)$$

まで伝搬するはずであるので、推定した電離光子数を再結合時間で補正した有効電離光子数、

$$\dot{N}_{\text{ion}}^{\text{eff}}(t) = \dot{N}_{\text{ion}}(t)[1 - \exp(-n_H \alpha_B t)] \quad (4)$$

を用いて電離判定を行う。星団粒子の周囲にある SPH 粒子を近いものから順番に電離判定を行い、有効電離光子数とガスの再結合数が釣り合い、

$$\dot{N}_{\text{ion}}^{\text{eff}}(t) = \sum n_e n_p \alpha_B \Delta V \quad (5)$$

となるまで電離判定を続ける。また、電離している領域は他の星団粒子からの電離には影響しないので、この判定で、すでに他の星団粒子に電離されている SPH 粒子は寄与しないようにする。

最後に、電離平衡から外れた粒子は再結合時間  $t_{\text{rec}}$  程度で中性化するので、そのようにプログラムをおこなった。

## 2.4 星形成条件

星団粒子形成は、密度の高くなった SPH 粒子が以下の条件を全て満たしたときに行われるとした。

- $\text{div} \cdot \mathbf{v} < 0$
- $\rho > 200\rho_c$
- not ionized

3 番目の条件は、今回作成した内部及び背景紫外線の物理モデルに直結しているところである。

## 2.5 熱進化

ガス球が宇宙膨張に乗って膨張している段階は、冷却や加熱は解かず、SPH の定式化に従い断熱的に進化するものと仮定する。やがて、ガスは収縮に転じて温度が上がり始めるが、その温度上昇は  $10^4$  [K] を上限とする。これは、収縮によって温度が一旦  $10^4$  [K] 以上に上昇したとしても、水素原子による冷却が効くことですぐに  $10^4$  [K] まで冷却される事を表している。また、水素原子の冷却効率は  $10^4$  [K] 以下で著しく下がるので、一度  $10^4$  [K] まで温度が上昇した粒子は  $10^4$  [K] 以下に冷却されないとする。つまり、水素分子による冷却は考えないこととする。(Umemura & Ikeuchi 1984; Thoul & Weinberg 1996)

# 3 Results

## 3.1 星形成史

図 2 は、 $z_c = 1.0, M_{\text{gas}} = 10^9 M_\odot$  の系の計算結果で、系の星質量の時間進化である。図によると、内部紫外線が入った計算 (緑色と桃色) は進化の初期段階

に置いて、星団粒子の割合の増加が遅れていることがわかる。これは内部紫外線は進化の初期段階に星形成を抑制する働きがある事が予想できる。また、赤と青、又は緑と桃色のペアは 1Gyr 過ぎから分岐を初めている。これは背景紫外線による効果で、次第にこれが卓越してくる。背景紫外線のパターン (青線) と、内部紫外線のパターン (緑線) の星団粒子割合の線が 4Gyr 付近で交差するのこの為で、背景紫外線による効果が進化の後期段階で卓越していることを裏付けている。

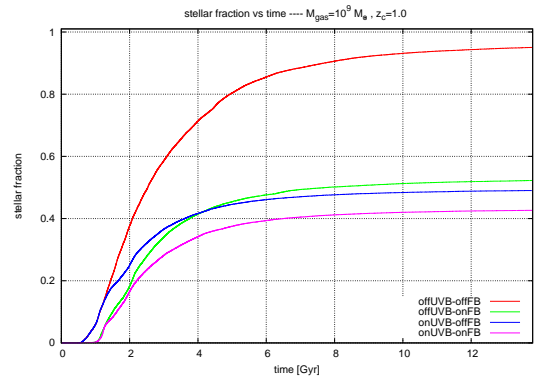


図 2:  $z_c = 1.0, M_{\text{gas}} = 10^9 M_\odot$  の系での星団粒子割合の時間変化。赤線がどちらのフィードバックもいれていない計算。緑線が内部紫外線のみ、青線が背景紫外線のみ、桃色がどちらも入れたケースの計算。

## 3.2 光蒸発率

図 3 は、 $z_c = 1.0, 3.0, 5.0, M_{\text{gas}} = 10^9 M_\odot$  の系において光蒸発したガスの割合の時間進化である。比較的コラプスの遅い  $z_c = 1.0$  の計算では、内部紫外線のみケースに比べて、背景紫外線が入っている光蒸発率のほうが影響が大きい。しかし、全体的にコラプス時期が早くなると、光蒸発率は低下することがわかる。これは、コラプス時期が早い系はより重力ポテンシャルによってガスをとどめておける事と、背景紫外線の入射が相対的に遅れることに起因していると思われる。また、背景紫外線の入射が遅れることで、内部紫外線が光蒸発を引き起こす主要因となっている。高赤方偏移での銀河形成では内部紫外線のフィードバックは非常に重要となることがわかつ

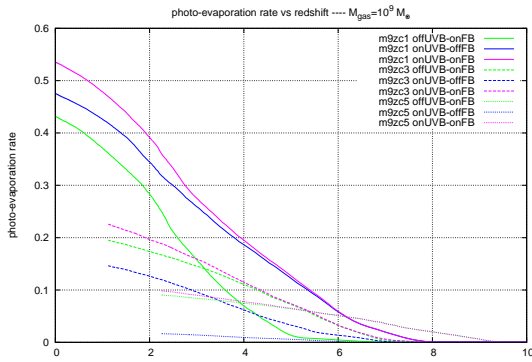


図 3:  $z_c = 1.0, 3.0, 5.0, M_{\text{gas}} = 10^9 M_{\odot}$  の系での光蒸発率の時間変化。横軸は赤方偏移。緑線が内部紫外線のみ、青線が背景紫外線のみ、桃色がどちらも入れたケースの計算。

た。更に、図 4 は  $z_c = 3.0, 5.0, 7.0, M_{\text{gas}} = 10^8 M_{\odot}$  の系において光蒸発したガスの割合の時間進化であるが、系の質量が小さくなると、重力ポテンシャルが浅くなることから、光蒸発率がより大きい事がわかる。系から光蒸発したガスは最終的に系に落ち込むことはないので、形成される銀河の最終的な質量や形態などに大きく影響を与えるということが理解できる。

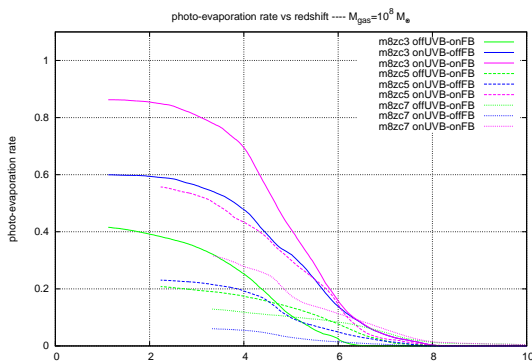


図 4:  $z_c = 3.0, 5.0, 7.0, M_{\text{gas}} = 10^8 M_{\odot}$  の系での星団粒子割合の時間変化。

## 4 Discussion & Conclusion

本研究は、宇宙の進化で形成される紫外線背景放射場と、銀河の進化の中で形成される星団粒子が放出する内部紫外線のそれぞれが銀河進化のどのよう

な影響を及ぼすかを知るために、3次元流体計算に背景紫外線と内部紫外線の輻射輸送効果を物理モデルとして取り入れることによって調べた。本来輻射輸送計算は計算コストが非常に高いのだが、このようにモデル化して計算することによって、多くのパラメータ領域において計算し、また、それぞれのフィードバックを ON/OFF した数値実験を行うことを可能とした。

本研究の結果として、内部紫外線は、進化の初期段階に形成される原始銀河雲内部の高密度領域を系の内側から破壊し、星形成を抑制し、ガスの加熱により重力収縮による系の密度の上昇を抑える効果があるということが分かった。特に、高赤方偏移では背景紫外線の効果が薄れることから、高赤方偏移での銀河の形成・進化を知る上では欠かせないフィードバックであると確認することができた。また、背景紫外線は、比較的進化の後期段階に影響が大きく、光蒸発を起こすことで最終的な銀河の星質量を低下させる働きがあることが分かり、内部紫外線・背景紫外線それぞれのフィードバックの役割、効果を知ることができた。これらのフィードバックは低質量 ( $M_{\text{gas}} \lesssim 10^9 M_{\odot}$ ) の系やコラプス時期の遅い系において特に効果が顕著であり、銀河形成を考える際にこれらのフィードバックを考えることは必要不可欠であると言える。

また、従来の銀河形成シミュレーションは進化の初期段階において星を多く作りすぎることによって形成される銀河のもつ物理量が観測と著しく異なるという諸問題 (Scannapieco et al. 2012) があるが、内部紫外線は、それを物理的に解決する一つの糸口であることが分かり、今後の銀河形成シミュレーションにおいて非常に重要なフィードバックの一つであることを確認することができた。

## Reference

- Komatsu, E., et al. 2011, ApJS, 192, 18
- Susa, H., & Umemura, M. 2004a, ApJ, 600, 1
- Susa, H., & Umemura, M. 2004b, ApJ, 610, L5
- Tajiri, Y., & Umemura, M. 1998, ApJ, 502, 59
- Umemura, M., Nakamoto, T., & Susa, H. 2001, in ASP Conf. Ser. 222, The Physics of Galaxy Formation, ed M. Umemura & H. Susa (San Francisco: ASP), 109
- Scannapieco C., et al., 2012, MNRAS, 423, 1726