

On the faint-end of the high- z galaxy luminosity function

Bin Yue, et al., 2016

arXiv:1604.01314

Abstract

Recent measurement of the Luminosity Function (LF) of galaxies in the Epoch of Reionization (EoR, redshift $z > 6$) indicates a very steep increase of the number density of low-mass galaxies populating the LF faint-end. As star formation in such systems can be easily quenched by radiative feedback effects, a turn-off is expected at some faint magnitude. Using a physically-motivated analytical model, we quantify reionization feedback effects on the LF. If reionization feedback is neglected, the power-law Schechter parameterization characterizing the faint-end of the LF remains valid up to $M_{UV} \sim -9$. If (strong) feedback is included, the LF drops above $M_{UV} \sim -15$, slightly below the detection limit of current surveys at $z \sim 5$. However, the LF may rise again at higher M_{UV} as a result of the interplay between reionization topology and photo-evaporation physics. Moreover, we find that the stellar age — magnitude relation might be used as a probe of feedback strength as well: in models with stronger reionization feedback, stars in galaxies with $-13 < M_{UV} < -8$ are typically older. Other suggested constraints on feedback can come from galaxy number counts data, particularly those exploiting gravitational lensing magnification.

- 解析的モデルを構築し、再電離期の光度関数の faint-end を調べた。
- Reionization feedback の影響が強い場合は、 $M_{UV} \sim -15$ よりも暗い側で光度関数が急激に減少するが、さらに暗い側までいくと再度銀河の個数密度が増加する。
- Stellar age — magnitude relation が feedback の強さを測る指標として使える可能性がある。

Introduction

宇宙再電離

- どの天体の寄与によって、いつ頃宇宙再電離が完了したのかを特定するのは、観測的宇宙論の大きな問題の一つ。
- 暗い銀河は、明るい銀河よりも数が多いために、再電離に大きく寄与したと考えられる。
- 暗い銀河からの寄与を見積もるために、HUDF/XDF や HFF などの非常に深い観測によって、 $M_{UV} \sim -15$ ($z=7$) あたりまで光度関数が求められてきた (Atek+15 etc.).

Radiative Feedback

- 暗い銀河のハローはポテンシャルが浅いために、feedback で容易に星形成が抑制されてしまう。
- 銀河内部での星形成による internal feedback は星形成を弱める効果に留まるが、他の銀河からの radiative feedback は星形成を完全に止めることもある。

Previous Work

- Gnedin 16 は数値的に LF の faint-end を調べ、 $M_{UV} \sim -14$ を超えたあたりで Schechter function から乖離するとした。
- Trenti+10, Tacchella+13, Mason+15 は、star formation efficiency が redshift に依らないとの仮定のもとで、halo mass function から解析的に LF を求めた。

METHOD

From halos to galaxies

銀河の luminosity function をモデリングし, halo mass function と abundance matching することで, star formation efficiency $f(M_h)$ を求める.

■ 時刻 t_w に形成を始めた halo mass M_h の銀河内での時刻 t での星形成率 SFRは以下のように書ける.

■ $g(M_h, \Delta t')$ は獲得した halo mass と SFR との比, t' は獲得した時刻で $\Delta t' = t - t'$.

$$\text{SFR}(M_h, t) = \int_{t_w}^t g(M_h, \Delta t') \frac{dM_h}{dt'} dt'$$

■ $g(M_h, \Delta t')$ の関数形として “extended burst” を採用した.

■ $f(M_h)$ は star formation efficiency, κ は free parameter.

$$g(M_h, \Delta t') = f(M_h) \frac{\Delta t'}{\kappa^2 t_d^2(z')} \exp \left[-\frac{\Delta t'}{\kappa t_d(z')} \right]$$

■ SFR を時刻で積分して, redshift z_0 での銀河の luminosity を計算する.

■ $l_\nu(\Delta t)$ は, 星形成から Δt 経過後の SSP の luminosity.

$$L(M_h, z_0, z_w) = \int_{t_w}^{t_0} \text{SFR}(M_h, t) l_\nu(t_0 - t) dt$$

■ 銀河の形成を始めた時刻 z_w の分布は以下の式で表される (Giocoli+07).

$$p(w) = 2w \operatorname{erfc}(w/\sqrt{2}) \quad w = \sqrt{q} \frac{\delta_c(z_w) - \delta_c(z_0)}{\sqrt{S(M/2) - S(M)}}$$

■ z_w で $L(M_h, z_0, z_w)$ を積分して, halo mass M_h の銀河の z_0 での luminosity を求める.

$$\bar{L}(M_h, z_0) = \int L(M_h, z_0, z_w) p(w) dw$$

■ Halo mass function から, ある halo mass の halo の個数密度が求まる.
一方で上の式から, ある halo mass の銀河の luminosity がわかり, 観測された LF (Bouwens+15) からその luminosity の銀河の個数密度がわかる. 2つの個数密度が合うように $f(M_h)$ を決定する (abundance matching).

■ κ は, 観測とモデルの $z \sim 5, 6, 7, 8$ の luminosity function の bright-end を比較して $\kappa = 0.1$ とした.

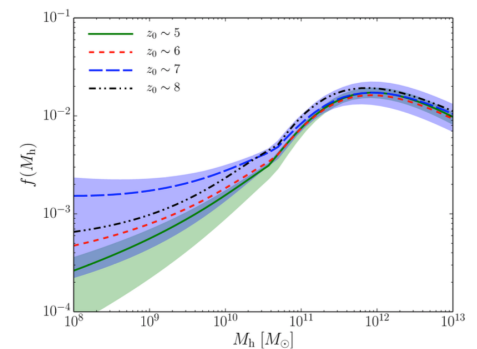


Figure 1. The function $f(M_h)$ calibrated by using the observed LFs at $z_0 \sim 5, 6, 7$ and 8 in Bouwens et al. (2015a). To avoid crowding we only plot the uncertainties for $z_0 \sim 5$ and 7 .

■ Radiative feedback during EoR

Radiative feedback の効果を入れて LF を求めなおす. また, $\text{QHII}(z)$ と τ も求める.

■ ある回転速度 v_c^* よりも遅く回転する halo ($v_c > v_c^*$) では, radiative feedback によって星形成が起きない可能性がある と仮定する.

■ ここで, 3つのパターンを考える. z_q は星形成が止まった quenching time.

1. $v_c < v_c^*$ であり, 軽い halo に属するが, 常に ionized bubble の外側にいるために RF の影響を受けない.
2. $v_c < v_c^*$ であり, 軽い halo に属し, z_q ($z_0 < z_q < z_w$) で星形成が止まった.
3. $v_c > v_c^*$ であり, 十分重いために radiative feedback (RF) の影響を受けない.

- それぞれのパターンでの z_q の分布を書き表すと以下の通りとなる.
 - 1, 2, 3 のそれぞれのパターンが, それぞれ 1つ目の式の1つ目の項, 2つ目の項, 2つ目の式に対応.
 - $P_b(M_h, z_0)$ は, redshift z での halo mass M_h の銀河が ionization bubble に含まれている確率.

$$\mathcal{F} = \begin{cases} [1 - P_b(M_h, z_0)]\delta(z_q - z_0) + \frac{dP_b}{dz_q} & v_c < v_c^* \\ \delta(z_q - z_0) & v_c \geq v_c^* \end{cases}$$

- それぞれのパターンを考慮して LF を書き直す. ただし, $w_0 = w(z_0)$, $w_q = w(z_q)$.

$$\begin{aligned} \Phi(M_{UV}, z_0) = & \int_{<v_c^*} dM_h \frac{dn_h}{dM_h} p(w_0) \frac{dw_0}{dM_{UV}} [1 - P_b(M_h, z_0)] \\ & + \int_{<v_c^*} dM_h \frac{dn_h}{dM_h} \int_{z_w}^{z_0} dz_q \frac{dP_b}{dz_q} p(w_q) \frac{dw_q}{dM_{UV}} \\ & + \int_{\geq v_c^*} dM_h \frac{dn_h}{dM_h} p(w_0) \frac{dw_0}{dM_{UV}} \end{aligned} \quad (19)$$

- 同様に ionizing photon emissivity dn_{ion}/dt は以下の式で書き表せる. ここで, $dq(\Delta t)/dt$ は ionizing photon の放射率.

$$\begin{aligned} \dot{n}_{\text{ion}}(z_0) = & \int dM_h \frac{dn_h}{dM_h} \int dw p(w) \int_{z_w}^{z_0} \dot{N}_{\text{ion}} \mathcal{F}(M_h, z_q, z_w) dz_q \\ \dot{N}_{\text{ion}}(M_h, z_0, z_q, z_w) = & \int_{t_w}^{t_q} \text{SFR}(M_h, t) \dot{q}(t_0 - t) dt \end{aligned}$$

- f_{esc} などを仮定すると, filling factor Q_{HII} や optical depth τ を計算できる.

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{\text{HII}}}{dt} = & f_{\text{esc}} \frac{\dot{n}_{\text{ion}}}{n_H} - Q_{\text{HII}}^2 C(z) n_H (1+z)^3 \alpha_B \\ \tau = & \sigma_T n_H c \left(1 + \frac{Y_{\text{He}}}{4Y_H}\right) \int_0^z Q_{\text{HII}}(z') (1+z')^3 \left| \frac{dt}{dz'} \right| dz' \end{aligned}$$

- ただし, α_B は recombination coefficient であり, clumping factor $C(z)$ は以下の通りである.

$$C(z) = 6.8345 \times \exp(-0.1822z + 0.003505z^2)$$

RESULTS

Reionization history

- Optical depth が, CMB の観測結果と一致するかを確認する.
- f_{esc} が大きいほど再電離が進み τ が大きくなるが, 一方で ionized bubble に入る銀河の数も増加して ionizing photon が減少する feedback もかかる.
- $\tau = 0.066 \pm 0.016$ (Planck) と比較した結果, f_{esc} の値に矛盾がないこと, v_c^* には強い制限をかけられないことがわかった.

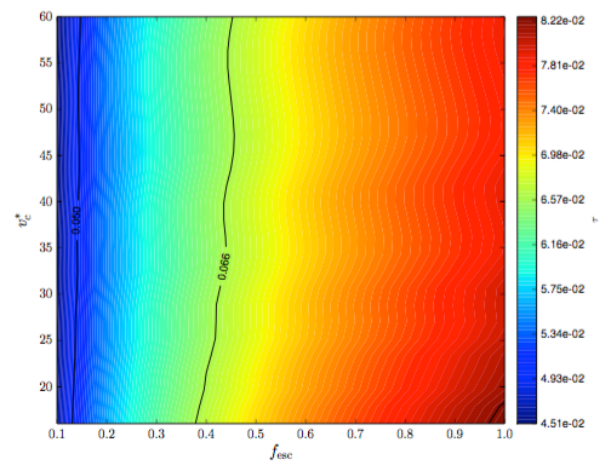


Figure 3. The redshift of the end of reionization (top) and the Thomson optical depth (bottom) as a function of f_{esc} and v_c^* . In the bottom panel we mark the Planck measurements $\tau = 0.066 \pm 0.016$ by lines.

- すべての光度の銀河に対して $f_{\text{esc}} = 0.5$ を仮定した場合、やはり暗い銀河から ionizing photon の大半が出ている。
- Radiative feedback が働かず、atomic-cooling が働く限界の halo まで星形成が起きているとしたのが no feedback モデルである。
- Radiative feedback の効果は EoR の後半に強く出ている。

Feedback imprints on the LF

- $f_{\text{esc}} = 0.5$ と固定したとき、 v_c^* を変えると LF がどのように変わるのかを調べる。
- Radiative feedback が入ると、atomic-cooling が働くよりも重く明るい銀河から個数密度が減少し始める。
- これは、 $v_c < v_c^*$ である halo では、大半が星形成を行えないためである。
- また、より暗い側で再度個数密度が増加することも分かった。
- これは、再電離期の後半で ionized bubble に入り星形成が止まった銀河が、それ以前に形成した星で光っているためである。
- これらの結果、LF にギャップが生じる。

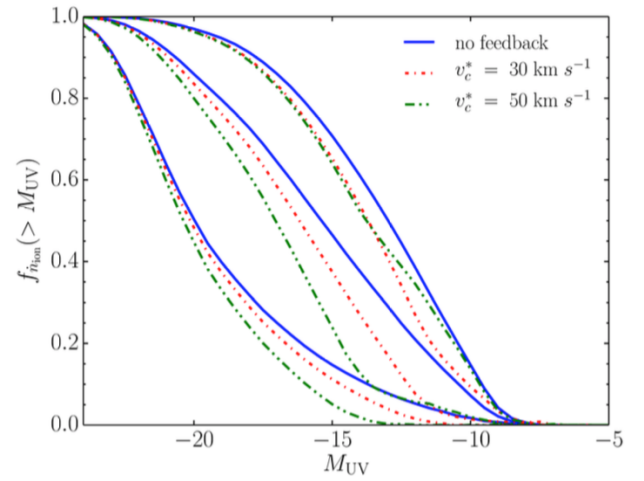


Figure 4. Fractional ionizing photon rate from galaxies with absolute magnitude above M_{UV} , in models all with a fixed $f_{\text{esc}} = 0.5$, but different v_c^* . From top to bottom, each group of curves corresponds to redshift 10, 8, and 5 respectively.

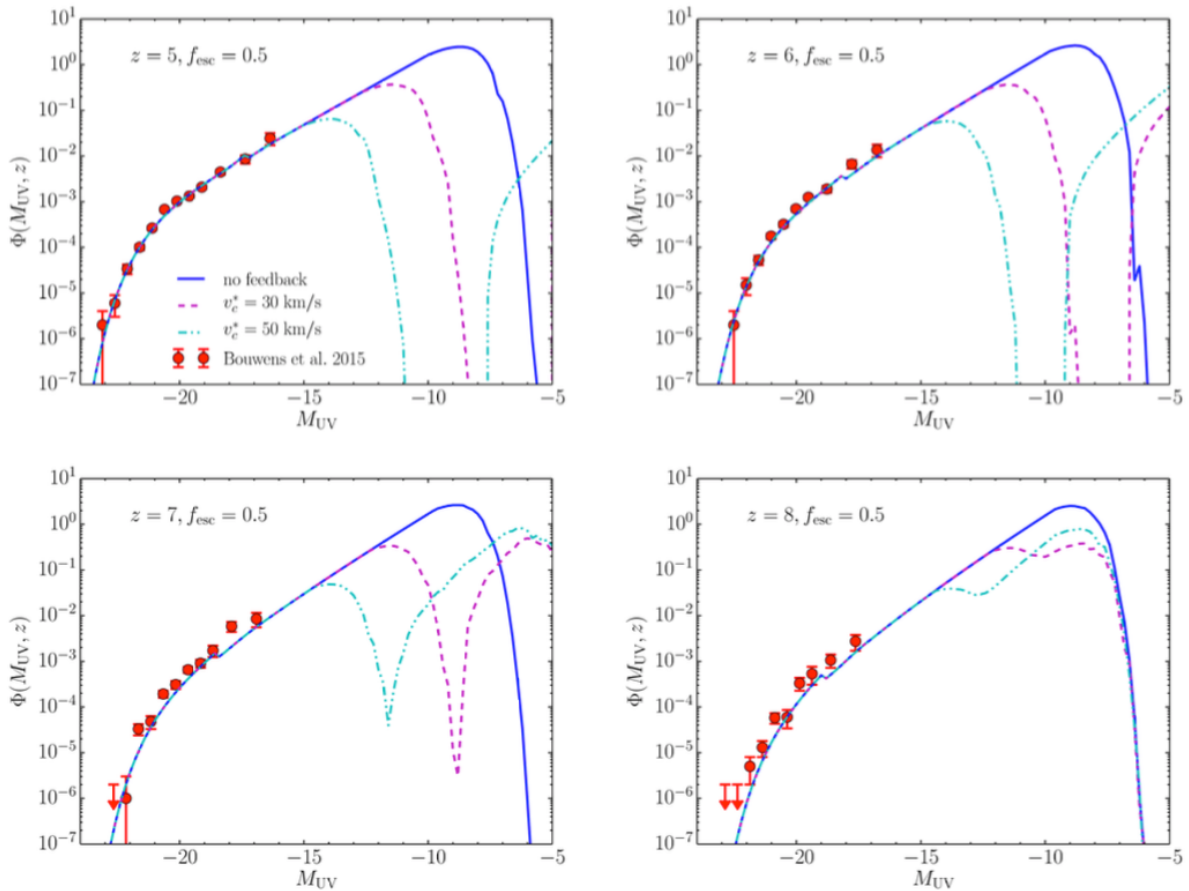


Figure 5. The LFs at redshift 5, 6, 7 and 8 for models with varying v_c^* .

Feedback imprints on galaxy properties

- 実際の銀河では halo mass assembly history が多様であるため, Monte Carlo によってランダムサンプルを構築する.
以下の物理量をランダムに分布させる.
 - Halo mass: halo mass function に従って分布
 - formation time: $p(w)$ に従って分布
 - quenching time: dP_b / dz_q に従って分布
- $M_{UV} - M_h$ 関係を見ると, radiative feedback によって小質量 halo の銀河が暗くなっており, この関係がある明るさで折れ曲がるのがわかる.
- モデルと観測 (Salmon+15) の SFR - m^* 関係 を比較すると良い一致を示す.
- $t^* - M_{UV}$ 関係を見ると, radiative feedback によって $M_{UV} > -16$ の銀河がより古くなっていることがわかる. $-13 < M_{UV} < -8$ の銀河を観測することで, radiative feedback の強さを測ることができる.

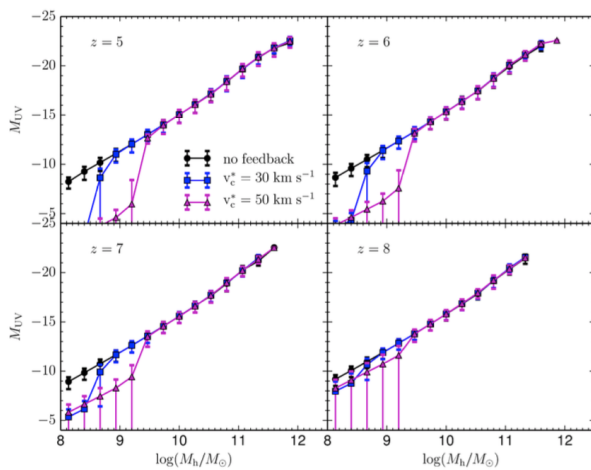


Figure 8. The $M_{UV} - M_h$ relations for halos at redshifts 5, 6, 7 and 8 in models with $v_c^* = 30$ and 50 km s^{-1} , and in no-feedback model, respectively.

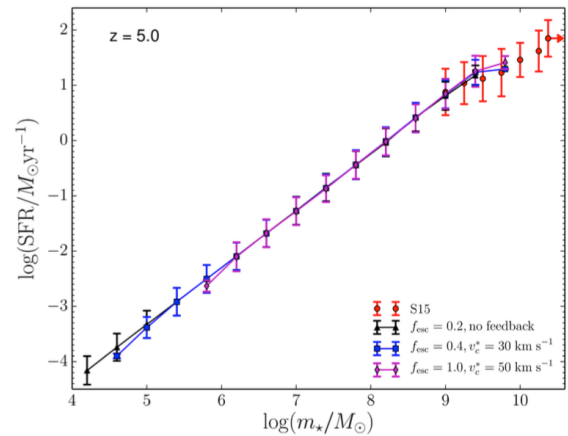


Figure 9. The SFR vs. m_* at redshift 5 for three models respectively. Errorbars are the r.m.s of the SFR in each m_* bin. For comparison we also plot the observed relation in Salmon et al. (2015).

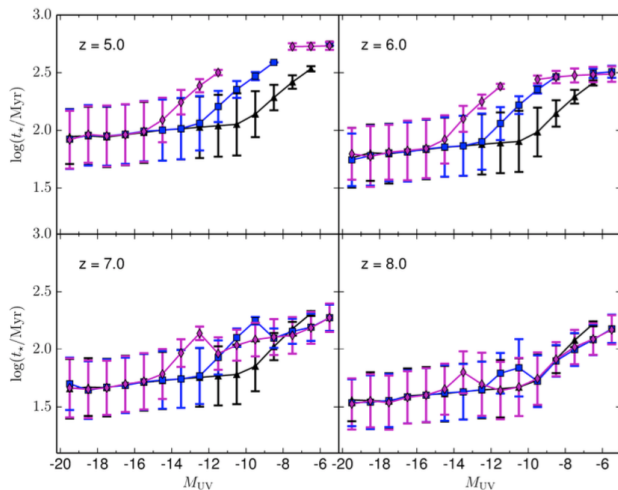


Figure 10. The $t^* - M_{UV}$ relations at redshifts 5, 6, 7 and 8 respectively.

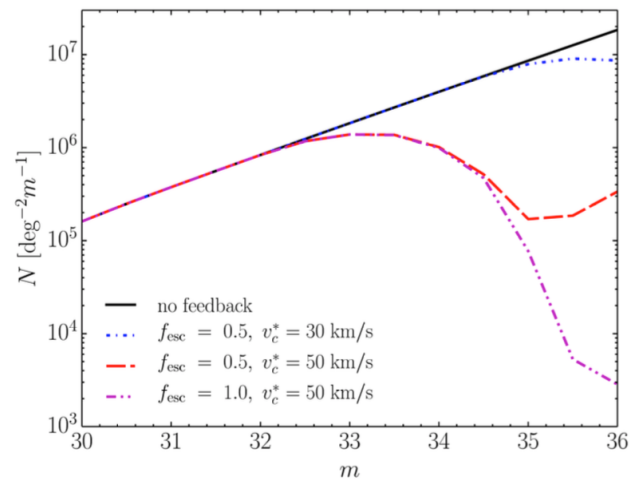


Figure 11. The predicted number counts of galaxies with $z = 5 - 8$ in models with different parameters.

Feedback imprints on galaxy counts

- 銀河の個数を数えることで v_c^* や f_{esc} を制限できる.

$$N(m) = \int r^2 \Phi(M_{UV}, z) \frac{dr}{dz} dz$$

- HFF などの重力レンズ効果を生かした観測で, これらを制限できる可能性がある (Yue+14).

CONCLUSIONS

- 小質量 halo の重力ポテンシャルは比較的浅く、外部の天体からの ionizing flux によって星形成が止まってしまう.
- この効果を考慮に入れるため、解析的な LF を radiation feedback の効果を入れて求めた.
- もし radiation feedback がなければ、atomic-cooling が働かなくなる $M_{UV} \sim -9$ まで、LF の faint-end は伸び続ける.
- 強い feedback を入れると、 $M_{UV} \sim -15$ を超えたあたりで LF が急激に減少する.
- また、より暗い光度で光度関数が上昇し始める.
- $t^* - M_h$ 関係を調べることで、feedback の強度を評価できる可能性がある.
-
- 今回の解析では、いくつかの仮定をおいている.
 - Radiative feedback が効くか否かは、circular velocity に依存し、 f_{esc} には依存しないこと.
 - Ionized bubble に含まれた銀河は、即座に星形成をやめること.