

УДК: 524.3:52-355

О ПРОИСХОЖДЕНИИ ОБЛАКОВ L_{α} -ЛЕСА

В.Г.ГОРБАЦКИЙ

Поступила 17 декабря 1999

Предлагается модель образования облаков L_{α} -леса. Проведенные ранее расчеты показали, что УФ-излучение горячих звезд должно играть главную роль в реионизации догалактической среды (ДГС). Поэтому образование галактик происходило одновременно с ионизацией ДГС, и процесс реионизации был нелинейным. Учитывая это обстоятельство, эффект Ганна-Петерсона и также следующий из наблюдений факт существования галактик при $z \approx 5$, можно сделать вывод о том, что галактики начали образование ранее - может быть, при $z \geq 10$. Наблюдаемое наличие тяжелых элементов в облаках L_{α} -леса является свидетельством того, что эти облака образовались позже, чем галактики - из межзвездных облаков, выбрасываемых галактическим ветром. В результате возрастания масс облаков L_{α} -леса, обусловленного их слипанием, могут возникать галактики следующего поколения.

1. Введение. Существование крупномасштабных образований в межгалактической среде на больших красных смещениях ($z \approx 2 + 4$) было установлено при наблюдениях в спектрах квазаров систем абсорбционных линий L_{α} водорода (названных " L_{α} -лесом") около тридцати лет тому назад [1]. Однако природа этих образований стала выясняться лишь в последние годы, в значительной степени благодаря использованию крупных телескопов (HST, Keck-telescope и др.). Так, в частности, было показано, что совокупность поглотителей, образующих L_{α} -лес при $z \geq 1$, представляет собой эволюционирующую систему [2], причем с уменьшением z число объектов становится меньше, а масса их увеличивается. В рамках представлений о том, что поглотители представляют собой обширные газовые облака, этот факт подтвердил существенную роль процесса слияния облаков в эволюции системы.

Расчеты кинетики для системы взаимодействующих L_{α} -облаков показали, что процесс слияния их происходит достаточно часто и ко времени, когда $z \approx 1$, образуются объекты с массой порядка галактической [3]. Таким образом, имеются основания предполагать, что слияние L_{α} -облаков является одним из способов реализации механизма возникновения галактик, предложенных в [4].

После того, как в L_{α} -облаках было с уверенностью установлено наличие ионов тяжелых элементов [5,6], эти объекты уже нельзя считать догалактическими. По-видимому, возникновение галактик предшествовало

образованию системы L_* -облаков. Это обстоятельство делает изучение системы L_* -облаков актуальным для решения космогонических проблем, относящихся к ранним эпохам существования Вселенной ($z \approx 5 + 10$).

В данной статье на основе данных наблюдений анализируется состояние межгалактической среды при больших значениях z и предлагается модель образования L_* -облаков. Показано, что они могут формироваться путем агрегации межзвездных облаков, выметаемых из галактик при различных динамических процессах. Существование галактик при $z \geq 5$ следует из многочисленных наблюдений последних лет.

2. Состояние догалактической среды. При исследовании космогонических проблем - в первую очередь, механизмов образования галактик и L_* -облаков - необходимо основываться на тех или иных предположениях о физическом состоянии догалактической среды, которые получаются по используемой космологической модели. В настоящее время широкое распространение имеют модели, в которых предполагается, что пространство евклидово. Если космологический член Λ принимается равным нулю, то величина Ω - отношение средней плотности вещества $\bar{\rho}$ к его критической плотности ρ_{cr} равна 1.

В недавней работе было показано, что роль космологического члена в эволюции модели может быть весьма значительной - $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ [7]. В таком случае, чтобы обеспечить условие евклидовости пространства, нужно принять $\bar{\rho}/\rho_{cr} \equiv \Omega_{tot} \approx 0.3$. При этом, по современным оценкам, доля барионной массы значительна - $\Omega_b \approx 0.1 + 0.15$. Таким образом, для отношения "невидимой массы" $\mathcal{M}_{inv}$ к барионной получается $\mathcal{M}_{inv}/\mathcal{M}_b = 1 + 2$, и становится необходимой существенная корректировка космогонических моделей, разрабатывавшихся в предположении об определяющей роли "невидимого" вещества и, в частности, существующей теории первичного нуклеосинтеза.

Согласно стандартной космологической модели, после того, как взаимодействие вещества с излучением становится достаточно слабым, должна происходить рекомбинация водорода. Она заканчивается при $z \approx 10^3$; что при значении постоянной Хаббла $H = 65 + 70$ км/с Мпк соответствует $10^{13} + 10^{14}$ с после "Большого взрыва". Температура при окончании рекомбинации $T_K \approx (3 + 5) \cdot 10^3$ К, а среднее значение плотности вещества $\bar{\rho} \approx 10^{-21}$ г/см³.

В результате космологического расширения газа плотность его тепловой энергии уменьшается и при $z \approx 10$ он должен иметь температуру $T \approx 10$ К, а концентрация атомов водорода в нем (при $\Omega_b \approx 0.1$) $n_H \approx 10^{-4} + 10^{-5}$ см⁻³. В таких условиях почти весь водород должен быть в нейтральном состоянии.

В работе [8] приведено следующее выражение, определяющее оптическую толщину τ_H , обусловленную поглощением в межгалактическом газе излучения

от источника, для которого красное смещение равно z :

$$\tau_H = 3.53 \cdot 10^5 \chi_{HI} \Omega_{IGM} (1+z)^2 (1 + 2q_0 z^{-3/2}). \quad (1)$$

Здесь величина $\chi_{HI} = 1 - \frac{n_H^+}{n_H^{(0)}}$, $n_H^{(0)}$ - полная концентрация атомов водорода и $\Omega_{IGM} \equiv \bar{\rho}_{IGM} / \rho_{cr}$, $\bar{\rho}_{IGM}$ - средняя плотность межгалактической среды, принимаемой однородной. Из данных наблюдений спектров квазаров вытекает, что поглощение их излучения в межгалактической среде практически отсутствует ($\tau_H \leq 0.1$), если исключить поглощение в линиях L_α -леса. Отсюда с необходимостью следует вывод о том, что в межгалактической среде почти весь водород ионизован ($\chi_{HI} \approx 0$). Тем самым ставится важная проблема о механизмах реионизации и источниках необходимой для этого энергии.

3. *О реионизации межгалактической среды.* Процесс реионизации водорода в МГС должен заканчиваться на сравнительно ранних стадиях эволюции Метагалактики - при $z \geq 5$ - поскольку для самых удаленных QSO величина $\tau_H \leq 0.1$. Как отмечено выше, в это время уже существуют массивные галактики.

Источниками необходимой для реионизации энергии могут быть:

1. Излучение от активных ядер, QSO и галактик других типов.
2. Высокочастотное (УФ) излучение звезд, содержащихся в галактиках.
3. Энергия микроскопических движений межгалактической среды.

Возможность реионизации газа под действием указанных факторов исследовалась неоднократно, начиная с 70-х годов. Наиболее обоснованными представляются результаты расчетов, приведенные в работе [9]. В них использованы безразмерные параметры ζ_{ph} и ζ_{th} , определяющие значение τ_H . Значение параметра ζ_{ph} , равного

$$\zeta_{ph} \equiv \frac{j_{ph}(z)}{n_H(z)} t_H, \quad (2)$$

определяет τ_H в том случае, когда главную роль играет фотоионизация атомов. В (2) через $n_H(z)$ обозначена концентрация атомов H, $j_{ph}(z)$ - число ионизирующих их фотонов в расчете на единицу объема и единицу времени и t_H - время от момента начала реионизации до $z = 0$. Аналогичным образом вводится величина ζ_{th} , определяющая изменение τ_H при условии, что ионизация столкновительная и происходит за счет кинетической энергии газа. В выражении ζ_{th}

$$\zeta_{th} = \frac{j_{th}(z)}{n_H(z)} t_H \quad (3)$$

величина $j_{th}(z)$ пропорциональна скорости нагрева газа $\Gamma_{th}(z)$ (выражаемой в эрг $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$)

$$j_{th}(z) = \frac{\Gamma_{th}(z)}{h \nu_c}. \quad (4)$$

Здесь $h\nu_c$ - потенциал ионизации атома водорода.

Соответствующая наблюдениям величина $\tau_H \approx 0.1$ получается, как показали модельные расчеты, лишь при больших - порядка нескольких сотен - значениях ζ_{ph} и ζ_{th} . Это означает, что для создания и поддержания в дальнейшем высокой степени ионизации в МГС необходимо порядка десяти фотонов на один атом H или, в том случае, когда преобладает ионизация столкновениями, достаточно большая величина Γ_{st} .

Результаты модельных расчетов, выполненных в указанной работе, привели к выводу о том, что преобладающую роль в реионизации МГС должно играть не излучение от QSO, как принималось обычно, а излучение от массивных горячих звезд (класса O), находящихся в галактиках. При этом коротковолновое излучение, испускаемое ядрами QSO и активными ядрами галактик, также может играть определенную роль, особенно при ионизации He, содержащегося в межгалактическом газе.

Вопрос о роли столкновительной ионизации остается не до конца выясненным. Процессы формирования галактик, в ходе которых вследствие преобразования потенциальной энергии вещества в кинетическую должны возникать крупномасштабные движения газа, ударные волны и т.п., с достаточной полнотой не изучены. То же можно сказать о динамике ионизационных фронтов, распространение которых должно сопровождаться возрастанием кинетической энергии межгалактической среды.

При расчетах реионизации обычно предполагается, что источники, создающие необходимую энергию, к началу процесса уже существуют, то есть продолжительность формирования QSO и галактик Δt_f считается малой по сравнению с продолжительностью реионизации Δt_r . Указанное предположение не является оправданным. Нетрудно показать, что время, требующееся для образования массивной галактики из первоначально однородной среды с плотностью $\bar{\rho} \approx 10^{-27} \text{ г/см}^3$, порядка 10^{16} с или больше, и поэтому $\Delta t_g \approx \Delta t_f$. Формирование источников излучения и реионизация МГС должны протекать одновременно, и соответствующая эволюционная задача оказывается нелинейной. Расчеты, выполненные в предположении о том, что $\Delta t_g \ll \Delta t_f$, могут дать лишь величину, близкую к нижней границе возможных значений Δt_r . Однако при этом должен оставаться в силе важнейший вывод о том, что реионизация вызывается, главным образом, действием излучения, испускаемого звездами галактик.

4. *Обогащение межгалактической среды тяжелыми элементами.* Одновременно с образованием в звездах галактики ионизирующих газ МГС фотонов, в них должен происходить синтез тяжелых элементов. Соотношение между количеством произведенных к моменту t тяжелых элементов $\mathcal{M}_\mu$ и излученной звездой энергией на частоте $\nu_c - L_\nu$ (эрг $\text{с}^{-1} H\gamma^{-1}$), имеет, согласно [10], следующий вид:

$$\mathcal{M}_m \approx \frac{500}{c^2} \int_{t_{0n}}^t dt \int_{v_c}^\infty L_v dv. \quad (5)$$

Используя выражение (2) и (3) можно получить

$$\frac{\mathcal{M}_m(t)}{\mathcal{M}_{1GM}} \approx 10^{-5} \zeta_{ph} \frac{t - t_{0n}}{t_H} \quad (6)$$

при $\tau_H = \text{const}$ значение $\mathcal{M}_m \propto \mathcal{M}_{1GM}^2$, так как $\zeta_{ph} \propto \mathcal{M}_{1GM}$. Отношение массы вещества, содержащегося в галактиках при $z \approx 4 + 5$, к массе межгалактической среды в это же время $\mathcal{M}_{gal}/\mathcal{M}_{1GM} \equiv \eta$ неизвестно. Если принять $\eta = 1/2$, $\zeta_{ph} \approx 500 + 1000$ и $\Omega_b = 0.1$, то для содержания тяжелых элементов в галактиках к моменту $t_{1/2} = t_{0n} + t_H/2$ ($z \approx 3$) получается $Z(t_{1/2}) \approx 0.1 Z_\odot$. Это значение соответствует межзвездной среде (МЗС) галактик, которая, насколько можно судить по наблюдениям Галактики и ближайших галактик, является структуризированной, то есть представляет собою совокупность газовых облаков.

В результате различных динамических процессов межзвездные облака должны выметаться из галактики. В частности, это происходит при вспышках звездообразования, когда облака выметаются под действием усилившегося давления излучения на содержащуюся в них пыль [11].

Так, например, при вспышке звездообразования, охватывающей область, содержащую массу $\mathcal{M}_{burst} \approx 10^8 \mathcal{M}_\odot$, при общем выделении энергии излучения $E_{burst} \approx 10^{58} + 10^{59}$ эрг из галактики с массой $10^{11} \mathcal{M}_\odot$ может быть выметена масса газа, превосходящая $10^8 \mathcal{M}_\odot$. Аналогичное действие оказывает давление излучения активного ядра галактики. Наконец, возможно выметание газа из галактики под действием динамического давления, вызванного движением галактик в МГС.

По аналогии с межзвездными облаками Галактики массу выметаемых облаков можно принять равной $10 + 10^2 \mathcal{M}_\odot$, а их размеры - $5 + 10$ пк. Характерная скорость движения $V \leq 10^8$ см/с, время, требующееся для отделения облака от "родительской" галактики, $\approx 10^8$ лет. За несколько миллиардов лет (от $z \approx 5$ до $z \approx 3$) галактика может потерять массу, сравнимую с ее начальной - это было показано в работе [12] при расчетах эволюции галактик в скоплениях. Таким образом, содержание тяжелых элементов в межгалактической среде может составить, при $z \approx 3 + 4$, $Z_{1GM} \approx 0.1 \eta_1 Z_\odot$. Здесь через η_1 обозначено отношение $\mathcal{M}_{ge}/\mathcal{M}_*^{(n)}$ массы газа, потерянного галактиками, к начальной массе галактик. Так как $\eta \leq 1/2$ и $\eta_1 \leq 1/2$, то $Z_{1GM} \approx (0.02 + 0.03) Z_\odot$.

5. *Формирование облаков L_α -леса.* Изучение профилей линий поглощения, принадлежащих L_α -лесу, показало, что структура образующих их облаков фрагментарна [13]. Этот факт был подтвержден при наблюдениях с высоким разрешением на Кеск-телескопе [6]. Как отмечают авторы этой

работы, "Отдельные облака L_{α} -леса представляют собой не изолированные объекты, но скорее являясь скоплениями меньших облачков, блендированных в линии L_{α} , но часто разрешаемых в CIV". Среднее значение параметра $\langle b \rangle = \sqrt{2} \langle \sigma \rangle$, где σ - дисперсия скоростей, по линиям L_{α} около 10 км/с, а по линиям CIV составляет 7-8 км/с.

Линии поглощения CIV обнаруживаются практически всегда в спектрах облаков с достаточно высокой лучевой концентрацией нейтрального водорода ($N(\text{HI}) \geq 10^{14} \text{ см}^{-2}$), а во многих случаях и при меньшем значении величины $N(\text{HI})$. По-видимому, для наблюдений этих линий в спектрах облаков, обладающих малой лучевой концентрацией, необходимо использовать методику с достаточно большим значением отношения S/N [5]. Оценка отношения $[C/H]$ по наблюдаемым абсорбционным линиям зависит от результатов моделирования при расчетах степени ионизации газа в L_{α} -облаках. В работе [6] в предположении, что ионизация обусловлена излучением от QSO, найдено для облаков, находящихся при $z \approx 2.4$:

$$\left[\frac{C}{H} \right] > -2.5 \left[\frac{C}{H} \right]_{\odot} \quad (7)$$

Содержание тяжелых элементов в L_{α} -облаках возрастает с течением времени. Так, в работе [14] при наблюдениях облаков, находящихся в интервале $0.1 < z \leq 1.3$, получено, что при $z \approx 0.5$

$$\left[\frac{C}{H} \right] = (-1.6 \pm 0.1) \left[\frac{C}{H} \right]_{\odot} \quad (8)$$

Это на порядок больше, чем при $z \approx 2.4$.

Фрагментарность структуры облаков L_{α} -леса и наличие в них тяжелых элементов дают основание предполагать, что они формируются путем агрегации межзвездных облаков, выброшенных из галактик в межгалактическое пространство. Изменение химического состава выметаемых межзвездных облаков с уменьшением z , происходящее в результате эволюции МЗС, может объяснить различие величин $[C/H]$, характеризующее соотношениями (7) и (8).

Предполагаемый механизм возникновения крупных структур L_{α} -леса путем агрегации газовых облаков аналогичен рассмотренному в работе Горбачкого и Тараканова [15] процессу образования гигантских молекулярных облаков в Галактике. Как показали расчеты, этот процесс приводит к образованию облаков фрактальной структуры с показателем фрактальности, соответствующим наблюдаемому [16]. То обстоятельство, что облака L_{α} -леса оказываются фрактальными [17], может служить подтверждением предлагаемого механизма их образования.

В результате слияний облаков L_{α} -леса спектр масс системы эволюционирует - возрастает среднее значение массы облака [3,18]. При достижении облаком

массы $\approx 10^8 M_{\odot}$ и лучевой концентрации $N(\text{HI}) \approx 10^{21} \text{ см}^{-2}$ в нем должно начаться звездообразование. Происходит “фазовый переход” - облако превращается в галактику. Этот вывод согласуется с высказанным ранее [19] предположением о том, что т.н. “damped L_{α} -systems” - облака с большой лучевой концентрацией HI ($N(\text{HI}) \geq 10^{20}$) являются “предшественниками” галактик. Образующиеся указанным путем карликовые галактики уместно называть “галактиками II поколения”, так как они возникают из вещества, выбрасываемого существующими галактиками. Вместе с тем возможно возникновение из “damped L_{α} -clouds” дисковых структур вокруг галактик “I поколения”.

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия

ON THE ORIGIN OF L_{α} -FOREST CLOUDS

V.G.GORBATSKY

The model of L_{α} -forest clouds formation is proposed. The calculations that were performed earlier had shown that UV radiation from hot stars must play the main role in reionization of pregalactic medium (PGM). Therefore the formation of galaxies and PGM ionization must took place simultaneously and process of reionization was nonlinear. Taking into attention this circumstance, Gunn-Peterson effect and also the observed existence of galaxies at $z \approx 5$ one must conclude that galaxies formation began earlier — may be at $z \geq 10$. Observed presence of heavy elements in L_{α} -forest clouds is the evidence of their formation later than of galaxies from interstellar clouds ejected with galactic wind. As the result of L_{α} -forest clouds masses increase due to their sticking together the next generation galaxies may appear.

ЛИТЕРАТУРА

1. C.R.Lynds, *Astrophys. J.*, **164**, 173, 1971.
2. A.Boxenberger, in *QSO Absorption Lines*, G. Meylan, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 253, 1995.
3. В.Г.Горбацкий, А.Б.Кириенко, С.П.Прохоров, *Астрон. ж.*, **73**, 499, 1996.

4. *R.B.Larson*, Publ. Astron. Soc. Pacific, **102**, 709, 1990.
5. *D.Tytler, X.M.Fan, S.Burles, L.Cottrell, C.Dave, D.Kirkman, L.Zuo*, in QSO Absorption Lines, G.Meylan, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 289, 1995.
6. *L.L.Cowie, A.Songaila, T.-S.Kim, E.M.Hu*, Astron. J., **109**, 1522, 1995.
7. *S.Permutter, G.Aldering, G.Goldhaber et al.*, Astrophys. J., **517**, 565, 1999.
8. *J.E.Gunn, B.A.Peterson*, Astrophys. J., **142**, 1633, 1965.
9. *M.Giroux, P.R.Shapiro*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **102**, 191, 1996.
10. *P.Madau, J.M.Shull*, Astrophys. J., **457**, 551, 1996.
11. *В.Г.Горбацкий*, Астрофизика, **18**, 234, 1982.
12. *М.Нервеу*, Astron. Astrophys., **101**, 352, 1981.
13. *M.Pettini, R.W.Hunstead, R.W.Smith, D.P.Mar*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **246**, 545, 1990.
14. *T.A.Barlow, D.Tytler*, Astron. J., **115**, 1725, 1998.
15. *В.Г.Горбацкий, П.А.Тараканов*, Письма в Астрон. ж., **25**, 270, 1999.
16. *П.А.Тараканов*, в сб.: "Астрофизика на рубеже веков", изд. АКЦ ФИАН, М., 1999.
17. *В.Г.Горбацкий*, Астрофизика, **40**, 29, 1997.
18. *А.С.Соколов*, Астрофизика, **40**, 535, 1997.
19. *A.M.Wolfe*, in QSO Absorption Lines, G.Meylan, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 13, 1995.