

СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ В СПЕКТРАХ ПОГЛОЩЕНИЯ КВАЗАРОВ

© 2023 г. М. Демянский^{1,2}, А. Дорошкевич^{3,4}, Т. Ларченкова³

¹ Institute of Theoretical Physics, University of Warsaw, Warsaw, Poland

² Department of Astronomy, Williams College, Williamstown, USA

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: ltanya@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 09.02.2023 г.

После доработки 06.03.2023 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Анализ линий поглощения, наблюдаемых в спектрах квазаров, позволяет изучать эволюцию структуры Вселенной вплоть до красных смещений $z \sim 5$. Наблюдаемое сгущение линий C IV демонстрирует множественное рождение маломассивных галактик в отдельных структурных элементах — филаментах и “блинах”. Это обеспечивает их последующее регулярное иерархическое слияние в центральной галактике или группе галактик. Остатки ранних “блинов” наблюдаются сегодня как Местная Группа, группы вокруг галактик Андромеда и Центавр, и другие небольшие группы галактик. В свою очередь наблюдаемое сгущение линий Лайман-альфа показывает, что беззвездные гало темной материи (ТМ) также образуются в структурных элементах и их иерархическое сгущение приводит к образованию массивных беззвездных гало ТМ умеренной плотности, которые возникают также в численных моделях.

Ключевые слова: квазары, спектральные исследования, строение галактик, структура Вселенной, темная материя

DOI: 10.31857/S000462992305002X, EDN: YVREYE

1. ВВЕДЕНИЕ

Крупномасштабная структура Вселенной, предсказанная нелинейной теорией гравитационной неустойчивости Зельдовича [1–4], была обнаружена в распределении наблюдаемых галактик [5–7] и позже в численных моделях [8–15] вплоть до красных смещений $z \sim 3$. Остатки ранних “блинов” Зельдовича наблюдаются сегодня как Местная Группа [16, 17], группы вокруг галактик Андромеда и Центавр [18–22], и группы галактик в каталоге [23]. При малых красных смещениях анализ наблюдаемой в каталоге SDSS структуры был выполнен в работе [24], отдельные филаменты выделялись в распределении галактик при $z \simeq 3\text{--}7$ [25–27].

Согласно Стандартной Космологической модели (СКМ) коррелированное со структурой распределение первых галактик в пространстве соответствует предсказаниям теории Зельдовича и обеспечивает их последующее иерархическое слияние [28, 29] в центральной гало-галактике (или небольшой группе галактик). Отдельные этапы последующей трансформации центрального гало в галактику рассматривались теоретически [30–34].

Процессы образования и эволюции галактик и скоплений галактик исследовались в численных моделях и обсуждались в многочисленных обзорах [17, 18, 35–41]. Ионизация и нагрев барионов ультрафиолетовым (УФ) излучением первых звезд резко снижают концентрацию барионов в гало ТМ, тормозят образование звезд и переход гало ТМ в галактики. Поэтому в многочисленных гало ТМ, возникающих после реионизации [17, 37–39], образование звезд почти невозможно, и часть наиболее плотных (почти) беззвездных гало наблюдается как ультрадиффузные галактики [42–45] и лес линий Ly_α [46]. Так, анализ, выполненный в работах [47–50], показал, что значительная часть наблюдаемых линий поглощения Ly_α сгруппирована в тесные системы линий и связана с беззвездными структурными элементами.

В свою очередь, наблюдаемая группировка линий поглощения C IV в системы линий вплоть до $z \sim 6$ [47, 48, 51–53] может служить подтверждением связи с линиями Ly_α и с ранними галактиками. При этом недостаточное разрешение по размеру объекта компенсируется высоким разрешением по красному смещению (наблюдения узких линий). Тем не менее ограниченная стати-

стика линий в этих наблюдениях затрудняет их использование для количественных оценок.

В настоящей работе используются прецизионные наблюдения линий поглощения C IV [54] для проверки концентрации галактик в структурных элементах при красных смещениях $z \geq 2$ и последующей оценки параметров структуры. Группировка этих линий в системы, как и в случае линий Ly_α , свидетельствует о множественном рождении маломассивных галактик в отдельных структурных элементах.

В разделе 2 анализируются свойства систем линий поглощения C IV [54], наблюдаемых на красных смещениях $4.2 \geq z \geq 2$. В разделе 3 анализируются системы линий поглощения леса Ly_α [55], наблюдаемые на тех же красных смещениях. В разделе 4 обсуждаются результаты анализа, в Приложении приведены простейшие теоретические оценки ожидаемых параметров структурных элементов.

Несмотря на то, что в настоящей работе анализируются свойства ограниченного количества систем линий поглощения C IV и Ly_α , 83 и 200 систем соответственно, полученные результаты позволяют приблизительно (с точностью до фактора 2–3) оценить размеры и массу наблюдаемых протогалактик в процессе их формирования при $z \geq 2$, а также подтвердить предположение, что маломассивные галактики концентрируются в редких массивных протогалактиках и вносят незначительный вклад в плотность Вселенной при всех красных смещениях.

А. Параметры космологической модели

Дальнейший анализ выполнен в рамках стандартной Λ CDM космологической модели со значениями параметра Хаббла $H(z)$, средней плотностью нерелятивистского вещества (темная материя и барионы) $\langle \rho_m(z) \rangle$ и плотностью барионов $\langle n_b(z) \rangle$, полученными в работах [56–58]

$$H^2(z) = H_0^2[\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda],$$

$$H_0 = 67.8 \text{ км/с/Мпк},$$

$$\langle \rho_m \rangle = 2.2 \times 10^{-30} (1+z)^3 \Theta_m \text{ г/см}^3,$$

$$\langle n_b \rangle = 1.9 \times 10^{-7} (1+z)^3 \Theta_m \text{ см}^{-3}, \quad (1)$$

$$\Omega_\Lambda \simeq 0.72, \quad \Omega_{DM} \simeq 0.24, \quad \Omega_b \simeq 0.04,$$

$$\Omega_m = \Omega_{DM} + \Omega_b, \quad \Theta_m = \Omega_m/0.28,$$

где Ω_b , Ω_m , Ω_{DM} и Ω_Λ — безразмерные плотности барионов, нерелятивистского вещества, темной материи и темной энергии.

2. СИСТЕМЫ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ МЕТАЛЛОВ НА КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЯХ $z \geq 2$

Линии поглощения металлов — C II, C IV, Si II, Si III, Si IV, N V, O VI и др., как и лес линий поглощения Ly_α , наблюдаются вплоть до красных смещений $z \sim 5$. Прецизионные наблюдения спектров 9 квазаров [54] позволили измерить в интервале $2 \leq z \leq 4.2$ красные смещения 1070 линий C IV, а также менее представительного числа линий поглощения других элементов. Из 1070 линий поглощения C IV 1000 собраны в системы, включающие от 2 до 21 линий различной интенсивности. В дальнейшем анализе будут использованы 83 системы линий, состоящие не менее, чем из 5 линий.

Логично предположить, что эти системы линий связаны с процессами образования металлов в первых маломассивных галактиках, сгруппированных в массивные элементы структуры — филаменты и “блины”. Дальнейшая эволюция приводит к их объединению в центральное гало — галактику. Можно ожидать, что эти “блины” подобны Местной Группе, группам маломассивных галактик около Андромеды и Центавра [17–22], или группам, выделенным в [16–23, 26, 28–34, 54].

2.1. Параметры систем линий поглощения металлов

Наблюдаемые линии поглощения C IV характеризуются красным смещением z , лучевой концентрацией ионов N_{CIV} и доплер-параметром b_c , который определяется профилем линии. Параметры N_{CIV} и b_c зависят от внешнего УФ-фона, температуры и плотности поглощающей среды. Как было показано в [46], лучевая концентрация H I зависит по меньшей мере от четырех параметров: интенсивности и спектра УФ-фона и двух параметров гало ТМ (размера и плотности), что делает интерпретацию и моделирование этих наблюдений весьма сложными. В свою очередь, лучевая концентрация ионов металлов критически зависит также и от процессов их образования, что делает интерпретацию таких наблюдений еще более сложной.

Наблюдаемая группировка линий C IV в системы позволяет также оценивать размер и массу гало ТМ, связанного с отдельной группой линий, и рассматривать их как важные характеристики ранних периодов процесса образования галактик. Согласно СКМ, системы линий C IV возникают в массивных нестационарных (медленно сжимающихся) анизотропных облаках повышенной плотности (“блины” Зельдовича [1], филаменты), образованных центральной галактикой и группой карликовых галактик — спутников, группой без-

звездных маломассивными гало ТМ и дисперсными ТМ и барионами (с выбросами С IV).

Сопутствующий размер поглощающего облака, содержащего систему K линий С IV, вдоль луча зрения определяется разностью красных смещений крайних линий системы $\Delta_K = z_K - z_1$. Предполагая приближенную сферичность сжимающегося облака диффузных ТМ, барионов, маломассивных гало и галактик, получим для видимого размера l_{cl} и массы облака M_{cl}

$$l_{cl} \simeq \frac{d_0 \Delta_K}{2\sqrt{(1+z_{sys})^3 + \Omega_\Lambda/\Omega_m}}, \quad M_{cl} = \frac{4}{3}\pi l_{cl}^3 \langle \rho_m \rangle, \quad (2)$$

$$d_0 = \frac{c}{H_0 \Omega_m^{1/2}} = \frac{8.4 \times 10^3 \text{ Мпк}}{\Omega_m^{1/2}},$$

где $\langle \rho_m \rangle$ — средняя плотность (1), z_{sys} — красное смещение системы линий, c — скорость света.

Интерпретация разности красных смещений соседних линий поглощения $\delta z_j = z_j - z_{j-1}$ в одной системе не столь определена. Для линий, образованных в медленно эволюционирующих гало ТМ, эти разности определяют случайные лучевые скорости отдельных выбросов С IV σ_{kin} и функцию H_v [49, 59]

$$\sigma_{kin}^2 = \langle v_{kin}^2 \rangle, \quad v_{kin} = \frac{c \delta z_j}{1 + z_j}, \quad H_v = v_{kin}/l_{cl}. \quad (3)$$

В стационарном гало ТМ эти скорости связаны с его размерами и массой следующим соотношением:

$$\langle \sigma_{kin}^2 \rangle \simeq GM_{kin}/l_{cl}, \quad \beta = GM_{kin}/l_{cl}/\sigma_{kin}^2 \simeq 1, \quad (4)$$

при этом в сжимающемся гало можно ожидать $\beta \leq 1$. Результаты анализа улучшаются, если и размер облака l_{cl} , и дисперсия скоростей σ_{kin} учитываются с весом N_{CIV} . Проверить надежность использования обсуждаемых подходов возможно путем сравнения получаемых значений M_{cl} из (2) и M_{kin} из (4) с помощью параметра β из (4), который должен быть близок к 1.

Очевидно, что соотношения (2) и (4) являются приближенными. Так, в (2) использован размер облака l_{cl} , полученный по разности скоростей при пересечении лучом зрения анизотропного гало ТМ в случайном месте. Как известно, для скоплений галактик такой размер превышает действительный размер скопления до ~ 3 раз (эффект “пальцы Бога”), но в рассматриваемых случаях при умеренном превышении плотности над средней влияние этого эффекта невелико. С другой стороны, предположение сферичности может переоценивать массу анизотропного гало ТМ в

2–4 раза. Для однородного шара радиусом R_{cl} размер l_{cl} оценивается как

$$\langle l_{cl} \rangle = \frac{1}{R_{cl}} \int_0^{R_{cl}} \sqrt{R_{cl}^2 - x^2} dx \simeq 0.25\pi R_{cl} \leq R_{cl},$$

что (частично) делает оценку (2) более реалистичной. Использование в (2) средней плотности $\langle \rho_m \rangle$ без учета возрастания плотности в гало ТМ также занижает массу гало ТМ. Рассмотренные факторы частично компенсируют влияние друг друга.

Взаимное расположение систем линий С IV характеризуется длиной свободного пробега d_{sys}^* [49] вдоль луча зрения между ними, которое определяется разностью красных смещений соседних систем линий $\Delta_{sys} = (z_{sys_{i+1}} - z_{sys_i})$,

$$d_{sys}^* = \frac{d_0 (1 + z_{sys_i})^2 \Delta_{sys}}{\sqrt{(1 + z_{sys_i})^3 + \Omega_\Lambda/\Omega_m}}, \quad (5)$$

где z_{sys_i} — красное смещение i -й системы линий.

Используя стандартную связь длины свободного пробега с плотностью n_{cl} и размером l_{cl} гало ТМ:

$$\langle d_{sys}^* \rangle = \frac{1}{\pi l_{cl}^2 n_{cl}},$$

получаем для средней пространственной плотности таких облаков $\langle n_{cl} \rangle$ и средней фракции массы $\langle f_m \rangle$, сосредоточенной в облаках,

$$\langle n_{cl} \rangle \simeq \langle (\pi l_{cl}^2 d_{sys}^*)^{-1} \rangle, \quad (6)$$

$$\langle f_m \rangle \simeq \langle n_{cl} M_{cl} \rangle \langle \rho_m \rangle^{-1} \simeq 0.667 \Delta_K / \Delta_{sys}.$$

Полученные оценки размеров, масс (2) и скоростей (3), (4) могут быть уточнены при сопоставлении с результатами численного моделирования.

2.2. Наблюдаемые параметры систем линий поглощения С IV

Анализ прецизионных наблюдений спектров 9 квазаров [54] позволяет оценить перечисленные выше параметры, средние значения которых для систем линий поглощения С IV ($5 \leq K$) каждого квазара приведены в табл. 1. Из этой таблицы видно, что средние значения параметров практически не зависят ни от координат, ни от красного смещения квазаров. Это может указывать на типичность и медленную эволюцию поглощающих облаков, содержащих рассматриваемые системы линий С IV.

Полученные значения масс этих объектов находятся в диапазоне $10^{10} \leq M_{cl}/M_\odot \leq 5.7 \times 10^{12}$. При этом средние значения масс $\langle M_{cl} \rangle$ и размеров $\langle R_{cl} \rangle$ (см. табл. 1) показывают, что уже при $z \sim 4$

Таблица 1. Параметры N_{st} систем линий поглощения C IV, наблюдаемых в спектрах 9 квазаров. Каждая система включает не менее 5 линий

QSR	N_{st}	$\langle z \rangle$	$\langle b_H \rangle$, км/с	$\langle N_c/N_0 \rangle$	$\langle \sigma_v \rangle$, км/с	$\langle H_v \rangle$, км/(с Мпк)	$\langle l_{cl} \rangle$, Мпк	$\langle M_{cl} \rangle$, $10^{12} M_\odot$	$\langle \beta \rangle$	$\langle d_{sys}^* \rangle$, 10^3 Мпк	$\langle n_{cl} \rangle/n_0$	$\langle f_m \rangle$, 10^{-3}
Q2237–0607	12	3.9	39	42	59	58	1.0	0.25	1.1	1.4	4.6	2.0
Q1055+4611	12	3.5	37	96	68	54	1.3	0.66	1.1	1.3	4.6	2.9
Q1645+5520	10	3.6	45	60	52	58	0.9	0.24	1.0	1.7	5.8	2.3
Q1422+2309	12	3.2	44	53	72	57	1.4	0.86	1.1	1.4	3.9	1.7
Q1425+6039	11	2.9	38	130	63	53	1.2	0.37	1.1	1.1	2.3	2.6
Q0636+6801	7	2.7	40	92	64	52	1.3	0.56	1.0	1.6	8.9	3.9
Q1107+4847	2	2.7	31	520	95	41	2.3	2.31	1.6	—	—	—
Q1442+2931	7	2.3	40	120	79	49	1.7	1.11	1.0	1.2	6.6	4.4
Q1626+5433	10	2.1	39	130	65	51	1.4	0.73	1.1	0.8	7.8	6.5

$$b_H = b_C \sqrt{12}, N_0 = 10^{12} \text{ см}^{-2}, n_0 = 10^{-4} \text{ Мпк}^3.$$

наряду с ожидаемым образованием маломассивных галактик происходит формирование представительной популяции структурных элементов с массами $\simeq 10^{12} M_\odot$.

Отметим, что всего были проанализированы 83 системы линий C IV, в которых число линий составляет не менее 5. Для этих систем получены следующие средние значения исследуемых параметров:

$$\langle M_{cl} \rangle = 0.6 \times 10^{12} (1 \pm 0.9) M_\odot, \quad (7)$$

$$\langle l_{cl} \rangle = 1.3(1 \pm 0.5) \text{ Мпк}, \quad \langle \beta \rangle = 1.1(1 \pm 0.3),$$

$$\langle b_H \rangle = 40(1 \pm 0.3) \text{ км/с},$$

$$\langle \sigma_v \rangle = 66(1 \pm 0.4) \text{ км/с}, \quad (8)$$

$$\langle H_v \rangle = 54(1 \pm 0.2) \text{ км/с/Мпк},$$

$$\langle n_{cl} \rangle = 10^{-3} \text{ Мпк}^{-3}, \quad \langle f_m \rangle = 6.4 \times 10^{-3}. \quad (9)$$

При этом среди проанализированных 83 систем линий поглощения C IV имеются 14 систем, в которых число линий K находится в диапазоне $21 \geq K \geq 15$. Наличие таких “богатых” систем указывает на формирование объектов с параметрами больших галактик или небольших скоплений галактик. Средняя масса таких объектов составляет $\langle M_{cl} \rangle \simeq 10^{12} M_\odot$.

На рис. 1 приведены функции распределения масс P_M , скоростей P_v и P_H , доплер-параметра P_b , и длины свободного пробега P_{sep} поглощающих облаков. Выражения для этих функций распределения приведены ниже:

$$P_M(x) \simeq 0.1 \exp(-0.8x),$$

$$P_v(x) \simeq 0.15 \exp(-6.2(x-1)^2),$$

$$P_H(x) \simeq 0.15 \exp(-6.2(x-1)^2), \quad (10)$$

$$P_b(x) \simeq 0.16 \exp(-8(x-1)^2),$$

$$P_{sep}(x) \simeq 0.07.$$

Функция $P_M(x)$ характеризует представительность рассматриваемых систем линий. Функции $P_v(x)$ и $P_H(x)$ подобны функциям распределения гало ТМ, полученным в численных моделях [59], а функции $P_b(x)$ и $P_{sep}(x)$ подобны функциям распределения этих параметров в наблюдениях леса линий Ly_α [46, 49].

При всех обсуждаемых выше недостатках используемого подхода он открывает уникальную возможность оценить некоторые наблюдаемые параметры гало ТМ, связанные с элементами структуры Вселенной на ранних этапах образования галактик. Полученные оценки достаточно близки к теоретическим ожиданиям. Особенно интересно появление при $z \sim 4$ объектов с массой $\simeq 10^{12} M_\odot$, которая разграничивает наблюдаемые популяции галактик и скоплений галактик.

3. СИСТЕМЫ ЛИНИЙ Ly_α , ОТОЖДЕСТВЛЯЕМЫЕ С МАССИВНЫМИ ГАЛО ТМ

Результаты, полученные для систем линий поглощения C IV, можно сравнить с оценками, полученными для ~ 5300 линий поглощения Ly_α 11 квазаров [55] для тех же красных смещений $2 \leq z \leq 4$. Наблюдаемые более многочисленные линии леса Ly_α связаны, как правило, с многочисленными беззвездными маломассивными гало ТМ, возникающими после реионизации [46, 59], и, частично, с барионами, собранными в структурные элементы — филаменты и “блины”.

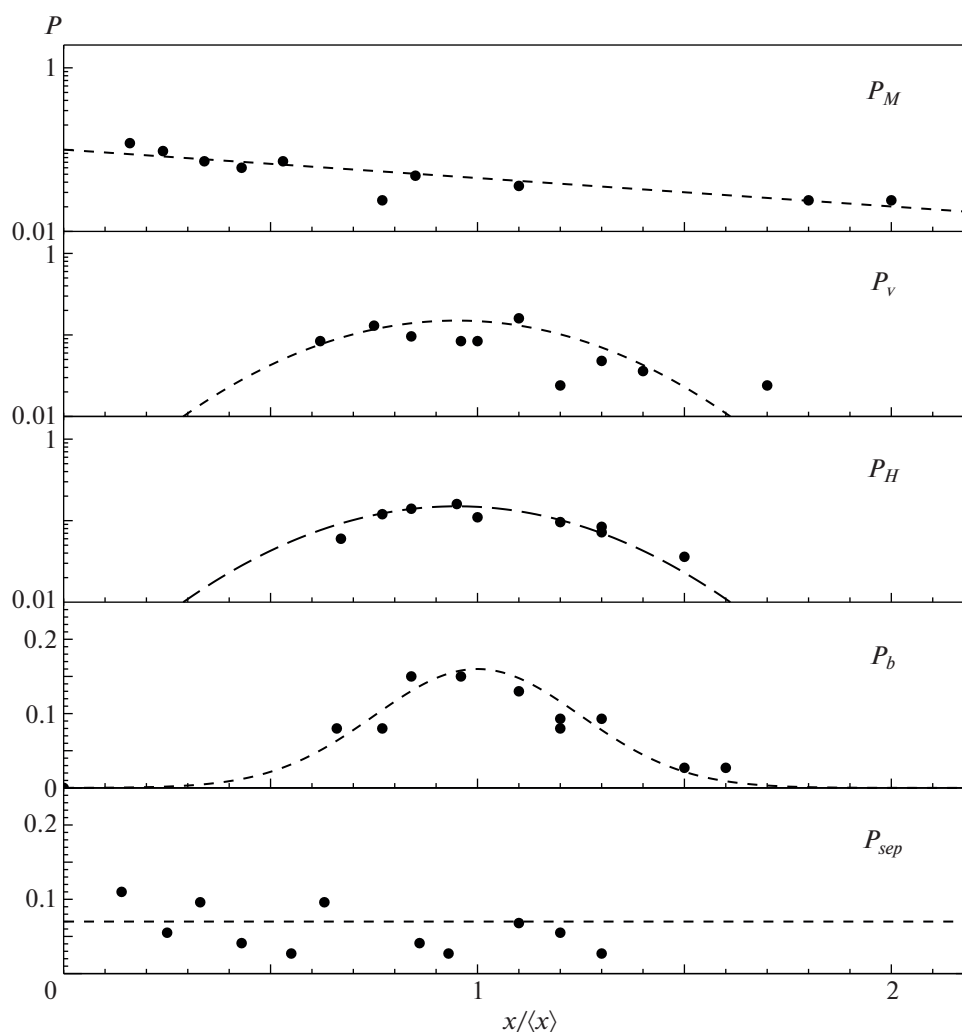


Рис. 1. Функции распределения масс P_M , скоростей P_v и P_H , доплер-параметра P_b и длины свободного пробега P_{sep} поглощающих облаков, полученные из анализа систем линий поглощения C IV. Штриховые линии соответствуют распределениям из выражения (10).

Из имеющегося каталога линий Ly_α выделим системы линий, используя два метода селекции. Первый метод: выберем системы линии с близкими значениями красного смещения, разделенные пустым интервалом $\Delta z \simeq 5 \times 10^{-4}$. Второй метод: вокруг линии поглощения с большим значением N_{HI} выберем 2–3 близкие линии. В результате селекции первым методом были отобраны 174 системы линий Ly_α , а вторым — 200 систем. Ниже приведем результаты анализа этих систем.

3.1. 174 системы линий Ly_α , отождествляемые с массивными гало ТМ

Первый метод селекции был использован ранее в [49] для выделения линий леса Ly_α , собранных в массивные группы, и было показано, что

~ 30% линий входят в состав массивных облаков, а остальные распределены случайно вдоль луча зрения.

В табл. 2 приведены результаты более подробного анализа параметров облаков, выделенных этим методом в спектрах 11 квазаров в интервале красных смещений $2 \leq z \leq 4$ и включающих не менее 3 линий. Усредненные по всем 174 системам значения параметров приведены в последней строке табл. 2. Если сравнить их со средними параметрами, полученными для систем C IV (см. табл. 1), то можно видеть, в частности, что средние значения доплер-параметра близки. Это указывает на подобие свойств ультрафиолетового фона в окрестности гало ТМ. Также средние значения массы, размера, фракции массы выделенных беззвездных объектов сравнимы со средними

Таблица 2. Параметры 174 систем линий Ly_α

QSR	N_{lin}	K_{lin}	N_{cl}	$\langle z \rangle$	$\langle b \rangle$, км/с	$\langle N_H \rangle$, $10^{13}/\text{см}^2$	$\langle l_{cl} \rangle$, Мпк	$\langle M_{cl} \rangle$, $10^{12} M_\odot$	$\langle d_{sys}^* \rangle$, 10^{-3} Мпк	$\langle n_{cl} \rangle$, Мпк $^{-3}$	$\langle f_m \rangle$, 10^{-3}
1055+4611	1016	358	31	3.40	26.50	1.56	1.17	0.36	670	0.78	4.2
0000–263	420	84	10	3.85	46.04	1.55	1.08	0.23	860	0.88	3.0
0055–269	486	201	21	3.39	27.54	1.36	1.29	0.52	460	1.20	6.8
1422+23	755	329	29	3.16	30.85	1.44	1.32	0.52	430	0.88	8.5
0636+680	542	166	20	2.86	34.79	0.88	1.17	0.31	530	0.90	5.3
0636+680	292	77	6	2.85	27.40	1.38	1.36	0.45	1100	0.37	2.5
1946+7658	428	138	13	2.78	30.87	1.05	1.10	0.27	740	0.10	5.4
1107+4847	481	116	14	2.51	28.55	1.03	1.45	0.55	750	0.64	7.2
1347–2457	317	83	13	2.36	27.82	0.96	1.15	0.31	470	0.93	5.4
1122–1648	321	99	9	2.15	26.34	0.81	1.16	0.34	660	0.46	3.7
1101–264	252	66	8	1.87	27.94	1.11	1.29	0.53	700	0.89	4.9
			174	2.97	30.11	1.25	1.23	0.41	610	0.86	5.7

Примечание. N_{lin} — количество линий в спектре, K_{lin} — количество линий в облаках, N_{cl} — количество облаков в спектре, f_m — доля массы в облаках.

Таблица 3. Параметры 200 систем линий Ly_α

QSR	N_{lin}	N_{cl}	$\langle z \rangle$	$\langle b \rangle$, км/с	$\langle N_H \rangle$, $10^{13}/\text{см}^2$	$\langle l_{cl} \rangle$, Мпк	$\langle M_{cl} \rangle$, $10^{12} M_\odot$	$\langle d_{sys}^* \rangle$, 10^{-4} Мпк	$\langle n_{cl} \rangle$, Мпк $^{-3}$	$\langle f_m \rangle$
0000–263	420	50	3.76	37.4	15.3	3.2	8.1	240	3.4	0.031
0055–269	486	30	3.28	33.1	14.7	2.3	3.0	320	5.3	0.023
1422+23	755	58	3.19	34.0	14.8	2.5	4.3	240	6.2	0.029
0636+680	542	20	2.77	33.8	15.0	3.2	7.2	450	4.1	0.036
0636+680	292	17	2.76	34.5	15.2	4.2	16.5	420	2.8	0.052
1946+7658	428	11	2.78	36.0	14.9	2.7	4.6	960	1.1	0.011
1107+4847	317	4	2.26	32.7	14.7	2.9	4.0	1300	0.3	0.004
1122–1648	321	8	2.14	32.4	14.6	3.4	11.0	630	1.0	0.021
2217–2818	242	6	2.06	30.5	14.9	6.0	62.7	580	0.5	0.021
		200	2.78	33.8	14.9	3.5	13.5	570	2.7	0.025

значениями этих параметров (7), (8), полученных при анализе систем линий поглощения C IV.

3.2. 200 систем линий Ly_α , отождествляемые с массивными гало ТМ

Результаты, полученные при анализе систем линий Ly_α , которые были отобраны с помощью второго метода селекции, когда система формируется из линии со значением N_{HI} , большим некоторого порогового, и нескольких ближайших к ней линий, приведены в табл. 3. Были использованы спектры 9 квазаров [55], пороговое

значение задано равным $N_{\text{HI}} = 3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Как в предыдущем случае, усредненные по всем 200 системам линий значения параметров приведены в последней строке табл. 3. При сравнении средних значений параметров систем, отобранных вторым методом, со средними значениями параметров систем, отобранных первым методом, обращает на себя внимание существенное различие средних значений массы. Это может быть связано как с низкой точностью используемого метода селекции систем линий, так и с выбором сравнительно высокого порогового значения N_{HI} .

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Главный результат анализа наблюдений линий поглощения C IV [54] — прямое подтверждение модели образования галактик путем иерархического сгущивания [28, 29]. Эти наблюдения позволяют связать процесс образования гало ТМ и галактик с предшествующим процессом образования структурных элементов — филаментов и “блинов” Зельдовича [1, 4], проследить распад этих элементов на отдельные маломассивные гало [60] с последующим их поглощением центральным массивным гало [33] и релаксацией образованной галактики [30–34].

Важно также, что этот результат получен по наблюдениям линий поглощения C IV и определено относится к образованию галактик, а не беззвездных гало ТМ. Согласно СКМ средняя плотность барионов $\langle \rho_b \rangle$ в ~ 7 раз меньше средней плотности барионов и ТМ $\langle \rho_m \rangle$ (1), а в галактики входит лишь около 20% барионов [61]. Это значит, что образование галактик связано с эволюцией особой малой фракции $\sim 3\%$ возмущений и может серьезно отличаться от типичной эволюции беззвездного гало ТМ, прослеживаемой по численным моделям.

Сегодня следы этой структуры наблюдаются и как бедные скопления галактик типа Virgo, и как группы [23], и как цепочки [26] галактик. Наиболее интересны сильно несимметричные группы, подобные Местной Группе и группам спутников Андромеды и Центавра [17–22]. Эти группы включают доминирующую центральную галактику и обширную несферическую область размером до ~ 1 Мпк, занятую десятками маломассивных, диффузных и ультрадиффузных галактик. Эволюция таких групп сводится к последовательной концентрации массы в центральной галактике.

Полученные количественные оценки (7)–(9) необходимо рассматривать как приближенные, поскольку они относятся к нестационарным объектам сложной формы и структуры. Тем не менее, в случае анализа большого массива наблюдательных данных как ценность, так и надежность подобных оценок возрастет многократно. Уже сейчас полученные средние значения n_{cl} и f_m (9) качественно согласуются с представлениями СКМ и могут быть использованы для сравнения с соответствующими результатами численных моделей [62].

Сравнение наблюдений линий поглощения C IV [54] с наблюдениями леса линий поглощения Ly $_{\alpha}$ (в разделе 3) подчеркивает общий характер эволюции и позволяет выявить количественные различия параметров структуры, связанной с галактиками и образующимися позднее беззвездными гало ТМ. Эти результаты показывают, что потенциал традиционных методов наблюдения

далеко не исчерпан и при использовании адекватных методов обработки наблюдений они могут существенно дополнить новейшие результаты, полученные в инфракрасных (JWST) [63, 64] и миллиметровых (ALMA) наблюдениях.

Анализ леса линий Ly $_{\alpha}$ показывает (см. табл. 2, 3), что после реионизации продолжается образование беззвездных гало ТМ, часть которых наблюдается как линии Ly $_{\alpha}$ [46]. Эти оценки также позволяют выделить характерные масштабы $\langle M_{cl} \rangle \simeq 10^{12} M_{\odot}$, $\langle d_{sys}^* \rangle \simeq 500$ Мпк, близкие к масштабам, полученным по линиям C IV. Можно ожидать, что иерархическое сгущивание этих гало приводит к образованию массивных беззвездных гало ТМ, подобных скоплениям галактик.

Большая величина длины свободного пробега $\langle d_{sys}^* \rangle$ для всех рассмотренных выше популяций свидетельствует в пользу “теплой” модели ТМ. Сравнение наблюдаемого расстояния между структурными элементами с теоретическими оценками (15) свидетельствует в пользу спектра, ограниченного условием $0 \leq k \leq 170 k_0$, что в модели “теплой” ТМ [65] соответствует массе частиц $M_{DM} \simeq 2$ кэВ.

Малая представительность выборки (14 массивных гало) не позволяет оценить свойства этих объектов, но демонстрирует образование структурных элементов с массами скоплений галактик при неожиданно больших красных смещениях $z \sim 4$. Их масса близка к “естественному” масштабу (11), характеризующему спектр первичных возмущений, и в процессе образования структурных элементов возможна трансформация этого масштаба как в большую, так и (чаще) в меньшую сторону.

Ни форма спектра возмущений в масштабах галактик, ни процессы образования галактик и гало ТМ все еще не ясны. Необходим не только подробный анализ этих вопросов в численных моделях [13, 24, 59, 66], но и массовые наблюдения галактик и скоплений галактик с измерением их кривых вращения и вириальных параметров.

Приложение

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ ВСЕЛЕННОЙ

Как было показано в [33], в линейной теории гравитационной неустойчивости существует “естественный” масштаб длины,

$$L_0 = \frac{1}{k_0} = \frac{\text{Мпк}}{\Omega_m h^2} \simeq 7.29 \text{ Мпк} \frac{0.14}{\Omega_m h^2}, \quad (11)$$

$$M_L = \frac{\pi}{6} \langle \rho_m \rangle L_0^3 \simeq 7.5 \times 10^{12} M_{\odot}.$$

В теории Зельдовича появляются несколько характерных масштабов, связанных с “естественным” масштабом и процессами образования структурных элементов — “блинов” и филаментов. Эти масштабы непосредственно связаны с моментами спектра возмущений

$$Q_n = \int_0^\infty k^n P(k/k_0) dk, \quad (12)$$

где $P(k)$ — спектр возмущений, нормированный обычным условием

$$\sigma_8^2 = \int_0^\infty k^2 P(k/k_0) W^2(k R_8) dk \simeq 0.64,$$

и $W(x)$,

$$W(x) = 3(\sin x - x \cos x)/x^3,$$

— фильтр, соответствующий сферическому гало с радиусом $R_8 = 8h^{-1}$ Мпк.

Как было показано в [4, 67], в космологических моделях с “холодной” ТМ эволюция структуры определяется смещением частиц ТМ из невозмущенного положения и характерной длиной

$$l_0 = \sqrt{Q_0} \simeq 13 \text{ Мпк}, \quad (13)$$

$$M_0 = M_L(l_0/L_0)^3 \simeq 4 \times 10^{13} M_\odot.$$

Этот масштаб появляется в наблюдениях скопления галактик и в параметрах структуры Вселенной при малых красных смещениях [24].

На более ранних стадиях эволюции Вселенной проявляются меньшие масштабы. Так, для стандартного спектра [33], ограниченного областью

$$0 \leq k \leq k_{mn} = 170k_0 \simeq 23 \text{ Мпк}^{-1}, \quad (14)$$

$$M_{mn} = M_0(k_0/k_{mn})^3 \simeq 10^5 M_\odot,$$

$$l_1 = \sqrt{Q_0/Q_2} \simeq 2 \text{ Мпк}, \quad (15)$$

$$M_1 = 1.33\pi \langle \rho \rangle l_1^3 \simeq 1.3 \times 10^{12} M_\odot.$$

Эти значения близки к наблюдаемым размерам групп (7). Эти же масштабы видны в распределении по массам наблюдаемых галактик и скопления галактик. Используя стандартные методы теории случайных процессов [4, 68, 69], можно грубо оценить среднюю линейную плотность “блинов” вдоль случайной прямой как

$$\sigma_1 = \frac{f_m}{2\pi l_1}, \quad (16)$$

где f_m — фракция массы, входящей в наблюдаемые объекты. Наблюдаемая длина свободного пробега между системами поглощения C IV $\langle d_{sys} \rangle$

(9) при фракции $\langle f_m \rangle \sim 0.6 \times 10^{-3}$ соответствует характерной длине $l_1 \simeq \langle f_m d_{sys} \rangle / 2\pi \simeq 0.6 \text{ Мпк}$,

близкой к оценке l_1 (15). В модели [65] такой спектр соответствует массе частиц темной материи $M_{DM} \sim 2 \text{ кэВ}$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках программы ФИАН ННГ 41-2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ya. Zeldovich, *Astron. and Astrophys.* **5**, 84, (1970).
2. Я. Зельдович, И. Новиков, *Строение и эволюция Вселенной* (М.: Наука, 1975).
3. S. Shandarin and Ya. Zeldovich, *Rev. Modern Physics* **61**(2), 185 (1989).
4. M. Demiański and A. Doroshkevich, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **306**, 779 (1999).
5. L. Thompson and S. Gregory, *Astrophys. J.* **220**, 809 (1978).
6. S. Gregory and L. Thompson, *Astrophys. J.* **222**, 784 (1978).
7. M. Ramella, M. Geller, and J. Huchra, *Astrophys. J.* **384**, 396 (1992).
8. S. Ikeuchi, *Astrophys. Space Sci.* **118**, 509 (1986).
9. L. Gao, S. White, A. Jenkins, C. Frenk, and V. Springel, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **363**, 379 (2005).
10. V. Springel, S. White, A. Jenkins, C. S. Frenk, et al., *Nature* **435**, 629 (2005).
11. M. Boylan-Kolchin, V. Springel, S. White, and A. Jenkins, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **398**, 1150 (2009).
12. A. Klypin, S. Trujillo-Gomez, and J. Primack, *Astrophys. J.* **740**, id. 102 (2011).
13. M. Demiański, A. Doroshkevich, S. Pilipenko, and S. Gottlober, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **414**, 1813 (2011).
14. A. Klypin, G. Yepes, S. Gottloeber, F. Prada, and S. Hess, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **457**, 4 (2016).
15. Y. Kim, R. Smith, and J. Shin, *Astrophys. J.* **935**, id. 71 (2022).
16. M. Walker, M. Mateo, E. Olszewski, J. Peñarrubia, N. W. Evans, and G. Gilmore, *Astrophys. J.* **704**, 1274 (2009).
17. J. Bullock and M. Boylan-Kolchin, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **55**(1), 343 (2017).
18. I. de Martino, S. Chakrebarthy, V. Cesare, A. Gallo, L. Osotorero, and A. Diaferio, *Universe* **6**, 107 (2020).
19. M. Pawlowski, J. Pflamm-Altenburg, and P. Kroupa, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **423**, 1109 (2012).
20. O. Müller, M. Pawlowski, H. Jerjen, and F. Lelli, *Science* **359**, 534 (2018).
21. A. Helmi, F. van Leeuwen, P. J. McMillan, D. Massari, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A12 (2018).
22. M. Pawlowski and P. Kroupa, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **491**, 3042 (2020).
23. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **412**, 2498 (2011).
24. A. Doroshkevich, D. Tucker, S. Allam, and M. Way, *Astron. and Astrophys.* **418**, 7 (2004).

25. *L. Jiang, K. Finlator, S. Cohen, E. Egami, et al.*, *Astrophys. J.* **816**, id. 16 (2016).
26. *M. Ginolfi, E. Piconcelli, L. Zappacosta, G. C. Jones, et al.*, *Nature Comm.* **13**, id. 4574 (2022).
27. *Y. Ning, L. Jiang, Z. Zheng, and J. Wu*, *Astrophys. J.* **926**, id. 230 (2022).
28. *R. B. Partridge and P. J. E. Peebles*, *Astrophys. J.* **147**, 868 (1967).
29. *R. B. Partridge and P. J. E. Peebles*, *Astrophys. J.* **148**, 377 (1967).
30. *S. Chandrasekhar*, *Rev. Modern Physics* **15**, 1 (1943).
31. *D. Lynden-Bell*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **136**, L101 (1967).
32. *J. Fillmore and P. Goldreich*, *Astrophys. J.* **281**, 1 (1984).
33. *J. Bardeen, J. Bond, N. Kaiser, and A. Szalay*, *Astrophys. J.* **304**, 15 (1986).
34. *A. Gurevich and K. Zybin*, *Physics Uspekhi* **38**, 687 (1995).
35. *M. McQuinn*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 313 (2016).
36. *A. B. Засов, A. C. Сабурова, A. B. Хонепсков, C. A. Хонепсков*, *Успехи физ. наук* **187**, 3 (2017).
37. *T. Naab and J. Ostriker*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **55**, 59 (2017).
38. *J. Tumlinson, M. Peebles, and J. Werk*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **55**, 389 (2017).
39. *R. Wechsler and J. Tinker*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **56**, 435 (2018).
40. *P. Salucci*, *Astron. and Astrophys. Rev.* **27**, 2 (2019).
41. *T. Zavala and C. Frenk*, *Galaxy* **7**, 81 (2019).
42. *D. Martinez-Delgado, R. Läsker, M. Sharina, E. Toloba, et al.*, *Astron. J.* **151**, 96 (2016).
43. *J. Roman and I. Trujillo*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **468**, 703 (2017).
44. *J. Roman and I. Trujillo*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **468**, 4039 (2017).
45. *D. D. Shi, X. Z. Zheng, H. B. Zhao, Z. Z. Pan, et al.*, *Astrophys. J.* **846**, id. 26 (2017), arXiv:1708.00013 [astro-ph.GA].
46. *M. Demiański, A. Doroshkevich, and T. Larchenkova*, *Astron. Letters* **48**(7), 361 (2022).
47. *T.-S. Kim, R. Carswell, and D. Ranquist*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **456**, 3509 (2016).
48. *T.-S. Kim, R. Carswell, C. Mongardi, A. Partl, J. Mucket, P. Barai, and S. Cristiani*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **457**, 2005 (2016).
49. *M. Demiański and A. Doroshkevich*, *Astron. Rep.* **52**, 859 (2018).
50. *B. Wakker, A. Hernfandes, D. French, T.-S. Kim, B. D. Oppenheimer, and B. D. Savage*, *Astrophys. J.* **814**(1), id. 40 (2015).
51. *S. E. I. Bosman, G. D. Becker, M. G. Haehnelt, P. C. Hewett, R. G. McMahon, D. J. Mortlock, C. Simpson, and B. P. Venemans*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **470**, 1919 (2017).
52. *A. Codoreanu, E. V. Ryan-Weber, L. A. Garcia, N. H. M. Crig-hton, G. Becker, M. Pettini, P. Madau, and B. Venemans*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **481**, 4940 (2018).
53. *V. D'Odorico, K. Finlator, S. Cristiani, G. Cupani, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **512**(2), 2389 (2022).
54. *A. Boksenberg and W. Sargent*, *Astrophys. J. Suppl.* **218**, id. 7 (2015).
55. *M. Demiański, A. Doroshkevich, and V. Turchaninov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **371**, 915 (2006).
56. *E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley, C. L. Bennett, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **192**, id. 18 (2011).
57. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **594**, id. 13 (2016).
58. *A. Cuceu, J. Farr, P. Lemos, and A. Font-Ribera*, *J. Cosmology and Astroparticle Phys.* **10**, id. 044 (2019).
59. *M. Demiański, A. Doroshkevich, T. Larchenkova, and S. Pilipenko*, *Astron. Rep.* **66**, 766 (2022).
60. *A. Doroshkevich*, *Soviet Astron.* **24**, 152 (1980).
61. *J. Shull, B. Smith, and C. Danforth*, *Astrophys. J.* **759**, id. 23 (2012).
62. *М. Демянский, А. Дорошкевич, Т. Ларченкова, С. Пулипенко, С. Готтлобер*, в печати (2023).
63. *Y. Harikane, A. Inoue, K. Mavatan, T. Hashimoto, et al.*, *Astrophys. J.* **929**(1), id. 1 (2022).
64. *R. Lee, F. Pacucci, P. Natarajan, and A. Loeb*, arXiv:2209.06830 [astro-ph.GA] (2022).
65. *M. Viel, J. Lesgourgues, M. Haehnelt, S. Matarrese, and A. Riotto*, *Phys. Rev. D* **71**, id. 063534 (2005).
66. *T. Ishiyama*, *Astrophys. J.* **788**, id. 27 (2014).
67. *M. Demiański and A. Doroshkevich*, *Astron. and Astrophys.* **422**, 423 (2004).
68. *M. Kendall and P. Moran*, *Geometrical Probability* (London: Griffin, 1963).
69. *А. А. Свешников*, *Прикладные методы теории случайных функций* (М.: Наука, 1968).