ЛЕС ЛИНИЙ ЛАЙМАН-АЛЬФА КАК ИНДИКАТОР ЭЛЕМЕНТОВ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ

© 2020 г. М. И. Демянский^{1,2}, А. Г. Дорошкевич^{3,4*}, Т. И. Ларченкова³

¹Институт теоретической физики Варшавского университета, Варшава, Польша

²Астрономический факультет Уильямс колледжа, Вильямстаун, США

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

⁴Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

Поступила в редакцию 25.02.2020 г.

После доработки 14.05.2020 г.; принята к публикации 26.05.2020 г.

Предложен метод анализа спектров поглощения квазаров, позволяющий получить приближенную оценку физических параметров поглощающих облаков — абсорберов: массы, размера и средней плотности. Анализ трех представительных каталогов леса Лайман-альфа (Ly_{α}) и систем линий поглощения металлов подтверждает, что эти наблюдения относятся к двум типам объектов с разными свойствами, каждый из которых образует однопараметрическую последовательность. Параметры систем линий поглощения металлов согласуются с соответствующими оценками параметров галактик. Параметры леса линий Ly_{α} значительно отличаются от галактических, но близки к параметрам большого числа гало, представленных в численных моделях. Обсуждаются возможные причины возникновения двух однопараметрических систем гало с разными свойствами.

Ключевые слова: космология, лес линий Лайман-альфа.

DOI: 10.31857/S0320010820060029

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения спектров поглощения далеких квазаров несут важную информацию о свойствах пространственного распределения вещества как при больших, так и при малых красных смещениях и, в частности, о свойствах элементов крупномасштабной структуры Вселенной и их эволюции вплоть до масштабов карликовых галактик с массами $\sim 10^6 - 10^7 M_{\odot}$ (Тегмарк и Залдаряга, 2002; Ирсик и др., 2017; Ирсик и МакКуинн, 2018). Современное состояние этих вопросов в наблюдениях, численном моделировании и интерпретации леса линий Ly_{α} представлено в нескольких обзорах (см., например, Мейксин, 2009; МакКуинн, 2016). При малых красных смещениях наблюдаемый лес линий поглощения связывают с окружением отдельных галактик и филаментов (circumgalactic medium). Свойства наблюдаемой и моделируемой крупномасштабной структуры Вселенной также неоднократно обсуждались (Дорошкевич и др., 2004; ван де Вейгерт и Платен, 2011; ван де Вейгерт, 2014; Либескинд и др., 2018).

Однако при таком подходе возникает разделение спектров поглощения металлов в галактиках и спектров поглощения водорода в межгалактической среде. Более того, отнесение всех линий поглощения водорода к межгалактической среде выглядит недостаточно обоснованным. Действительно, для каустик, образованных внутри галактик, типичны большие значения $N_{HI} \ge 10^{15}$ см⁻². Тем не менее сегодня надежно установлено существо-

В численных моделях в рамках стандартной ACDM космологической модели с подходящим однородным фоном ионизующего ультрафиолетового (УФ) излучения свойства леса линий поглощения водорода хорошо воспроизводятся каустиками, образующимися при турбулентных движениях в межгалактической газовой среде (Мак-Куинн, 2016; Руди и др., 2012; Болтон и др., 2014, 2017; Рораи и др., 2017; Тоннесен и др., 2017). Такие модели хорошо воспроизводят наблюдаемые значения допплер-параметра b и лучевой концентрации нейтрального водорода N_{HI} (Болтон и др., 2017; Рораи и др., 2017; Тоннесен и др., 2017). При этом, следуя высказанному в работе Шайе (2001) предложению, эти модели не рассматривают свойства темной материи.

^{*}Электронный адрес: dorr@asc.rssi.ru

вание обширных популяций маломассивных галактик, таких как карликовые и ультрадиффузные галактики (Уолкер и др., 2009; Мартинес-Дельгадо и др., 2016; Мерит и др., 2016; Ли и др., 2017; Роман и Тражилло, 2017; Ши и др., 2017) с малым количеством барионов и звезд, Ly_{α} эмиттеры, а также маломассивные гало темной материи без звезд в численных моделях (Тамлинсон, 2017; Нааб и Острайкер, 2017; Баллок и Бойлан-Колчин, 2017; Векслер и Тинкер, 2018), поэтому необходимо также выяснить их возможный вклад в наблюдаемый лес линий Ly_α. Наблюдаемые карликовые и ультрадиффузные галактики можно рассматривать как "промежуточные" объекты, расположенные между обычными галактиками и облакамиабсорберами, содержащими некоторое количество водорода, но без звезд и металлов.

Слабые линии леса с $N_{HI} \simeq 10^{13}$ см⁻², образующиеся в межгалактической среде и в маломассивных гало, во многом подобны, и поэтому их трудно различить только с помощью параметров N_{HI} и b. Сильная зависимость N_{HI} от ионизующего УФ-фона также усложняет эту задачу. Данный вопрос требует более детального изучения.

В работе Демянского и Дорошкевича (2018) было предложено использовать наблюдаемую величину разности красных смещений соседних линий поглощения водорода Δz в качестве характеристики эволюции во времени взаимного расположения поглощающих каустик. Для каустик, образованных в межгалактической среде, эта величина определяет расстояние между каустиками вдоль луча света, а для каустик, образованных внутри стабильного гало, определяет случайные скорости в этом гало.

В той же работе было показано, что для каустик, случайно расположенных в изотропно расширяющейся межгалактической среде, можно ожидать увеличение со временем расстояния между каустиками вдоль луча зрения $d_{\rm sep} \propto (1+z)^{-2}$, а также экспоненциальное распределение этих расстояний, скорректированных на расширение, $d_{\rm sep}^* = d_{\rm sep}(1+z)^{-2}$ $(+ z)^2$. Напротив, наблюдаемые расстояния между каустиками, образованными внутри стабильного гало, ограничены размерами гало, определяются соответствующими скоростями и слабо меняются со временем. По эволюционным свойствам линии поглощения водорода в гало подобны линиям поглощения металлов. Учет вышеизложенных факторов позволяет устранить противопоставление систем линий поглощения металлов и водорода, дополнить стандартную модель (МакКуинн, 2016) и разделить наблюдаемые линии Ly_{lpha} леса на две группы. Такое разделение было выполнено в работе

Демянского и Дорошкевича (2018) для трех каталогов систем линий поглощения.

Первая группа включает одиночные линии, не имеющие близких соседей. Эти линии могут возникать в каустиках, расположенных как в межгалактической среде, так и в отдельных стабильных гало, образованных темной материей и барионами. Функция распределения "скорректированных" расстояний, d_{sep}^* , близка к экспоненциальной (Демянский и Дорошкевич, 2018), что позволяет связать наблюдаемые линии с отдельными случайно расположенными вдоль луча зрения каустиками, разбегающимися в соответствии с хаббловским расширением.

Наибольший интерес представляет вторая группа линий поглощения — системы нескольких близко расположенных линий. Как и линии поглощения металлов, эти системы могут быть связаны с каустиками, возникающими в стабильных гало. Функция распределения параметра Δz между близкими линиями почти постоянна в некотором интервале расстояний и слабо зависит от времени (Демянский и Дорошкевич, 2018). В свою очередь, расстояние между системами линий меняется с красным смещением также, как для первой группы, и функция распределения "скорректированных" расстояний d* также близка к экспоненциальной. Это позволяет связать данные системы линий с несколькими каустиками, возникающими в отдельных стабильных гравитационно-связанных гало, расположенных случайно и разбегающихся в соответствии с хаббловским расширением. Подобные модели рассматривались ранее (Рис, 1986; Икеучи, 1986), но без сравнения с наблюдениями и непосредственной оценки параметров абсорберов.

Для группы, включающей системы линий металлов и системы линий Ly_{α} , можно приближенно восстановить основные параметры галактики или облака, в которых эти линии поглощения образованы. Строго говоря, эта задача некорректна и допускает разные решения. Тем не менее для понимания природы абсорберов и свойств маломассивных гало полезны даже приближенные оценки.

В настоящей работе анализируются три каталога систем линий поглощения (Боксенберг и Саргент, 2015; Демянский и др., 2006; Данфорс и др., 2016; Демянский и Дорошкевич, 2018), наблюдаемых при разных красных смещениях. При этом сопоставление их параметров проводится при z == 0. Полученные параметры абсорберов сравниваются со свойствами наблюдаемых галактик, а также свойствами гало в численных моделях.

Параметры космологической модели

Дальнейшие вычисления выполнены в рамках стандартной Λ CDM космологической модели со значениями постоянной Хаббла H(z), средней плотностью нерелятивистского вещества (темная материя и барионы) $\langle \rho_m(z) \rangle$, полученными в работах Комацу и др. (2011); Аде и др. (2016):

$$\begin{aligned} H^{2}(z) &= H_{0}^{2} [\Omega_{m} (1+z)^{3} + \Omega_{\Lambda}], \qquad (1) \\ H_{0} &= 67.8 \text{ KM/c/MIK}, \\ \langle \rho_{m} \rangle &= 2.2 \times 10^{-30} (1+z)^{3} \Theta_{m} \frac{\Gamma}{\text{cM}^{3}} = \\ &= 31 (1+z)^{3} \Theta_{m} \frac{M_{\odot}}{\text{KIIK}^{3}}, \\ \Omega_{\Lambda} &\simeq 0.72, \quad \Omega_{DM} \simeq 0.24, \\ \Omega_{b} &\simeq 0.04, \quad \Theta_{m} = \Omega_{m} / 0.28, \end{aligned}$$

где $\Omega_m = \Omega_{DM} + \Omega_b$ и Ω_{Λ} — безразмерные плотности нерелятивистского вещества и темной энергии, Ω_b — безразмерная плотность барионов.

НАБЛЮДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ

В задачах анализа спектров поглощения квазаров используются следующие основные параметры. Допплер-параметр b, определяемый шириной линии, и лучевая концентрация нейтрального водорода N_{HI} (или какого-либо иона, например, N_{CIV}), зависящая от плотности и степени ионизации, определяемой внешним УФ-фоном, характеризуют свойства вещества в области поглощения. Разность красных смещений соседних линий поглощения Δz_i в случае достаточно больших расстояний определяет расстояние вдоль луча зрения между линиями леса (каустиками) в системе отсчета, сопутствующей материи d_{sep} , а в случае нескольких близких линий, образованных в одном облаке, дисперсию случайных скоростей в поглощающем облаке v_{kin} :

$$d_{\rm sep}(z_i) = \frac{s_0 \Delta z_i}{\sqrt{(1+z_i)^3 + \Omega_\Lambda / \Omega_m}},$$
(2)
$$v_{\rm kin} = \frac{c \Delta z_i}{1+z_i},$$

$$s_0 = \frac{c}{H_0 \Omega_m^{1/2}} = \frac{7.8 \times 10^3 \,\,{\rm Mnk}}{\Theta_m^{1/2}},$$

$$\Delta z_i = z_{i+1} - z_i,$$

где *с* — скорость света, *z_i* — красное смещение линии. Второй случай (наличие систем близких

линий) типичен как для систем линий поглощения металлов, образующихся при пересечении луча зрения с галактикой, так и для систем линий поглощения водорода.

Как и в работе Демянского и Дорошкевича (2018), анализируются два каталога леса линий Ly_{α} и каталог линий поглощения металлов.

Свойства систем линий поглощения металлов

Для настоящей работы наибольший интерес представляет анализ так называемых богатых систем линий поглошения металлов. Такие системы обычно связаны либо с наличием галактики на луче зрения, либо в случае малых красных смещений с окологалактической средой, обогащенной металлами. В работе Демянского и Дорошкевича (2018) были проанализированы 160 поглощающих систем, содержащих не менее трех линий CIV, при красных смещениях $2 \le z \le 4$ из каталога, приведенного в работе Боксенберг и Саргент (2015). Важно отметить, что для этих систем характерна сравнительно большая лучевая концентрация нейтрального водорода $N_{HI} \ge 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (Боксенберг и Саргент, 2015), что типично для внешних районов галактик или близкой к ним окружающей среды. Для систем линий поглощения были получены следующие средние значения наблюдаемых парамет-DOB:

$$\langle b \rangle \approx 41(1 \pm 0.1) \text{ Km/c},$$

$$\langle v_{\text{kin}} \rangle \approx 125(1 \pm 0.2) \text{ Km/c},$$

$$(1+z)^2 \langle d_{\text{sep}} \rangle = \langle d_{\text{sep}}^* \rangle \approx$$

$$\approx 450(1 \pm 0.2) \text{ Mnk/}\Theta_m^{1/2}.$$

$$(3)$$

Малые значения дисперсий полученных величин указывают на слабую зависимость b и v_{kin} от красного смещения, что согласуется с медленной эволюцией свойств отдельной галактики.

Лес линий Ly_a при малых и больших красных смещениях

Свойства каталога линий Ly_{α} на красных смещениях $3 \ge z \ge 2$, включающего ~6900 линий в спектрах 19 квазаров, были рассмотрены ранее в работах Демянского и др. (2006), Демянского и Дорошкевича (2018). Проанализированы 780 систем линий со сложной структурой и малыми значениями Δz , для которых возможно определить $v_{\rm kin}$. Получены следующие средние значения исследуемых параметров:

ДЕМЯНСКИЙ и др.

$$\begin{array}{l} \langle b \rangle = 29(1 \pm 0.1) \ \text{KM/c}, \qquad (4) \\ \langle v_{\text{kin}} \rangle = 16(1 \pm 0.08) \ \text{KM/c}, \\ (1+z)^2 \langle d_{\text{sep}} \rangle = \langle d^*_{\text{sep}} \rangle \approx \\ \approx 40(1 \pm 0.3) \ \text{Mik/}\Theta_m^{1/2}. \end{array}$$

Как и в случае систем линий металлов, малые значения дисперсии указывают на слабую эволюцию b и $v_{\rm kin}$. При этом характерное расстояние между данными системами на порядок меньше расстояния между системами линий металлов.

Для анализа свойств систем линий Ly_{α} , наблюдаемых на малых красных смещениях $z \leq 0.5$, использованы спектры поглощения из работы Данфорс и др. (2016). Проанализированы 1230 систем линий поглощения со сложной структурой, содержащих 5200 линий, и получены следующие средние значения параметров:

$$\begin{split} \langle b \rangle &= 32(1 \pm 0.1) \text{ Km/c}, \quad (5) \\ \langle v_{\rm kin} \rangle &= 58(1 \pm 0.4) \text{ Km/c}, \\ (1+z)^2 \langle d_{\rm sep} \rangle &= \langle d^*_{\rm sep} \rangle \approx \\ &\approx 56(1 \pm 0.4) \text{ Mig} / \Theta_m^{1/2}. \end{split}$$

Заметная дисперсия v_{kin} и d^{*}_{sep} указывает на разнообразие наблюдаемых абсорберов, которые главным образом связывают с внешними областями галактик и галактической газовой короной.

Как уже было отмечено в работе Демянского и Дорошкевича (2018), полученные результаты хорошо согласуются с двухкомпонентной моделью абсорберов, в которой (почти) все линии поглощения связаны с каустиками, возникающими в турбулизованной среде (Болтон и др., 2017; Тоннесен и др., 2017), но заметная часть каустик образована внутри (почти) стабильных облаков с преобладанием темного вещества. Эти облака могут входить в структурные элементы (филаменты), при этом участвуют в (почти) свободном хаббловском расширении. Эта модель качественно согласуется с интерпретацией систем линий поглощения тяжелых элементов, которые наблюдаются при пересечении луча зрения и галактики. Тем не менее методы, использованные в работе Демянского и Дорошкевича (2018) для выделения систем линий леса, не позволяют достаточно точно отнести линии поглощения водорода к стабильным облакам либо к межгалактической среде и нуждаются в совершенствовании.

Отметим, что приведенные в выражениях (3)– (5) средние значения параметров соответствуют современным представлениям об эволюции плотных облаков и структуры Вселенной. Так, для систем линий металлов допплер-параметр в среднем мал по сравнению с дисперсией скоростей в абсорберах, что вполне соответствует наблюдаемой структуре галактик. Напротив, для леса линий Ly_{α} при больших красных смещениях допплерпараметр вдвое больше дисперсиии скоростей в абсорберах. А при малых красных смещениях дисперсии скоростей в абсорберах вдвое больше допплер-параметра, что свидетельствует о росте гравитационного потенциала облака-абсорбера при примерном сохранении параметров каустик. Соотношение $b-v_{\rm kin}$ для этих систем подобно соотношению для систем линий поглощения металлов.

Наблюдаемая сложная структура спектров поглощения объясняет медленную эволюцию допплер-параметра, связанного с турбулентными движениями внутри облака, и медленное возрастание дисперсиии скоростей, связанное с медленным ростом гравитационного потенциала облака.

АБСОРБЕРЫ ҚАҚ ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРЫ ВСЕЛЕННОЙ

Изучение свойств объектов, для которых наблюдается лес линий Ly_{α} , не ограничивается оценкой основных параметров этих линий. Важно получить физические характеристики абсорберов, чтобы сравнить их с теоретическими оценками и результатами численного моделирования. Однако доступной на сегодняшний день информации недостаточно для адекватного решения этой задачи.

Как было отмечено во Введении, с точки зрения математики это некорректная задача. Подобные задачи часто встречаются в физике и астрофизике. Например, к ним относится получение спектра малых возмущений реликтового излучения (Комацу и др., 2011; Аде и др., 2016), где число неизвестных на единицу больше числа уравнений. В результате она имеет много разных решений (см., например, Дорошкевич, Верходанов, 2011).

Для решения любой некорректной задачи необходимо использовать "наиболее естественные" дополнительные предположения, свойственные этой задаче. Для рассматриваемой в настоящей работе задачи два измеряемых параметра: расстояние между системами линий поглощения d_{sep} и дисперсия скоростей внутри облаков-абсорберов v_{kin} будут связаны с массой, размером, средней плотностью и энтропией облаков, содержащих каустики. При этом используются следующие упрощающие предположения:

 все облака рассматриваются как стабильные и сферически-симметричные;

- соотношения (6) и (7) связывают средние характеристики системы подобных элементов, но используются для описания отдельных элементов;
- выражение (8) верно для круговой скорости в сферически симметричном облаке; в качестве скорости используются грубые оценки v_{kin}, приведенные в выражениях (3)–(5).

Полученные оценки можно сопоставить с соответствующими результатами численного моделирования, что позволит в дальнейшем улучшить предложенную методику и уточнить параметры наблюдаемых популяций облаков-абсорберов. Кроме того, сравнение поверхностной плотности абсорбера $\Sigma_{\rm vir}$ и лучевой концентрации нейтрального водорода N_{HI} позволит оценить фракцию нейтрального водорода и свойства фона ионизующего излучения. В последнее время абсорберы, наблюдаемые при малых красных смещениях, часто отождествляются с окологалактической средой и газом, вовлеченным в филаментарные структуры (Уокер, Саваж, 2009; Уокер и др., 2015; Данфорс и др., 2016; Френч, Уокер, 2017; Прочаска и др., 2017; Сток и др., 2017; Кинни и др., 2017). Однако и в этих случаях необходимо учитывать заметный поперечный размер филаментов, образованных галактиками. Так, в каталоге SDSS филаменты выглядят "лохматыми" из-за множества коротких "веточек", состоящих из галактик (Дорошкевич и др., 2004).

Физическая модель абсорберов

Для однородной системы отдельных сферических облаков характерное расстояние между облаками задается их размером $R_{\rm vir}$ и средней плотностью системы облаков $\langle n_{cl}(z) \rangle$:

$$\langle d_{\rm sep} \rangle \approx \frac{1+z}{\langle n_{cl}(z) \rangle \pi \langle R_{\rm vir}^2 \rangle},$$

$$\langle n_{cl}(z) \rangle \simeq \frac{f_m \langle \rho_m(z) \rangle}{\langle M_{\rm vir} \rangle},$$

$$(6)$$

где $\pi \langle R_{\rm vir}^2 \rangle$ — средняя поперечная площадь стабильного вириализованного облака с массой $\langle M_{\rm vir} \rangle$, f_m — фракция массы в рассматриваемой популяции абсорберов, зависимость средней плотности нерелятивистского вещества ρ_m от красного смещения приведена в выражении (1). Тогда для поверхностной плотности облака имеем

$$\Sigma_{\rm vir} \simeq 0.75 \frac{f_m \langle \rho_m(z) \rangle d_{\rm sep}}{(1+z)} = \tag{7}$$

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 6 2020

$$= \frac{d_{\text{sep}}^*}{43.5 \text{ MIK}} \Sigma_0 \Theta_{\Sigma},$$

$$\langle \Sigma_{\text{vir}} \rangle = \langle \rho_{\text{vir}} R_{\text{vir}} \rangle = \langle \Sigma_{\text{vir}}^* \rangle \Theta_{\Sigma} \Sigma_0,$$

$$\Sigma_0 = M_{\odot} / \text{IK}^2, \quad \Theta_{\Sigma} = f_m \Theta_m,$$

где $\langle \rho_{\rm vir} \rangle$ и $\langle R_{\rm vir} \rangle$ — средняя плотность и радиус облака, $d_{\rm sep}$ и $d_{\rm sep}^*$ введены ранее. Для оценки массы и размера облака можно предположить, что эти величины связаны соотношениями, подобными вириальным:

$$\beta v_{\rm vir}^2 = \frac{GM_{\rm vir}}{R_{\rm vir}},$$

$$R_{\rm vir} \simeq 5\beta \frac{\Sigma_0}{\Sigma_{\rm vir}} \left(\frac{v_{\rm vir}}{10 \text{ km/c}}\right)^2 \text{ kmk},$$
(8)

$$M_{\rm vir} = 10^8 \ M_{\odot} \frac{\Sigma_0}{\Sigma_{\rm vir}} \left(\frac{v_{\rm kin}}{10 \ {\rm Km/c}}\right)^4 \times \qquad(9)$$
$$\times \frac{\beta^2}{f_m \Theta_m} = M_{\rm vir}^* \Theta_M,$$

$$\begin{split} R_{\rm vir} &\simeq \sqrt{\frac{3M_{\rm vir}}{4\pi\Sigma_{\rm vir}}} = R_{\rm vir}^*\Theta_R,\\ \Theta_M &= \frac{\beta^2}{f_m\Theta_m} \quad \Theta_R = \frac{2\Theta_M}{\beta} \end{split}$$

Величины Θ_{Σ} , Θ_M , Θ_R содержат два неизвестных параметра: случайный фактор β , зависящий от внутренней структуры облака и поля скоростей, и фракцию массы f_m , сосредоточенную в облаках.

В результате получены оценки массы и размеры облака, выраженные через измеряемые для отдельной системы линий поглощения величины $v_{\rm kin}$ и $d_{\rm sep}$. Используя полученные параметры облака, можно оценить редуцированные плотность G_{ρ} и энтропийную функцию G_S :

$$G_{\rho} \simeq \rho_{\rm vir} \sqrt{M_{\rm vir}/10^{12} M_{\odot}} = (10)$$

$$= 2 \times 10^{3} (\Sigma_{\rm vir}/\Sigma_{0})^{3/2} M_{\odot} / \, \mathrm{K} \mathrm{f} \mathrm{K}^{3} =$$

$$= G_{\rho}^{*} \Theta_{\rho} M_{\odot} / \, \mathrm{K} \mathrm{f} \mathrm{K}^{3}, \quad \Theta_{\rho} = \Theta_{\Sigma}^{3/2},$$

$$G_{S} \simeq T_{\rm vir} \left(\frac{m_{b}}{\rho_{\rm vir}}\right)^{2/3} \left(\frac{10^{12} M_{\odot}}{M_{\rm vir}}\right)^{5/6} =$$

$$= \frac{58 \, \mathrm{c} \mathrm{M}^{2} \mathrm{K} \mathrm{s} \mathrm{B}}{\beta} \sqrt{\frac{\Sigma_{0}}{\Sigma_{\rm vir}}} = G_{S}^{*} \Theta_{S} \, \mathrm{c} \mathrm{M}^{2} \mathrm{K} \mathrm{s} \mathrm{B},$$

$$T_{\rm vir} = \frac{m_{b} v_{\rm kin}^{2}}{2} \simeq \frac{1}{2} \left(\frac{v_{\rm kin}}{10 \, \mathrm{K} \mathrm{M/c}}\right)^{2} \, \mathrm{s} \mathrm{B},$$

$$\Theta_{S} = \frac{1}{\beta \sqrt{f_{m} \Theta_{m}}},$$

где $T_{\rm vir}$ — температура, m_b — масса бариона, параметры Θ_{ρ} и Θ_S содержат неизвестные величины β и f_m .

ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ АБСОРБЕРОВ

Полученные результаты для трех рассмотренных каталогов систем линий поглощения представлены в табл. 1 и на рис. 1-3. Важно отметить, что эти результаты искажены ошибками наблюдений и сложной процедурой отождествления линий. Наблюдаемые линии возникают при поглощении света в облаках неправильной формы со сложной структурой, образованных в результате случайных возмущений плотности и скорости. Напротив, как было сказано выше, при расчетах облако предполагалось сферическим и равновесным, а скорости рассматривались как круговые. Поэтому надежность и, особенно, точность полученных результатов сильно ограничены. Тем не менее эти результаты полезны, так как позволяют количественно сравнить свойства галактик и маломассивных гало и получить информацию для плохо исследованной области мелкомасштабной космологии. Для получения более аккуратных результатов необходимы более представительные спектры поглощения с отождествлением линий при всех красных смещениях, а также использование предложенной выше методики для анализа спектров, полученных в численных моделях.

Параметры систем линий металлов

Для систем линий металлов (3) приведенные в табл. 1 оценки массы облаков несколько больше ожидаемых значений, а оценки их размеров достаточно близки к ожидаемым параметрам галактик, что свидетельствует о перспективности предложенного метода. Функция масс для этих облаков представлена на рис. 1 в сравнении с функцией $F_{obj}(z_f, M)$, описывающей распределение масс в модели Пресса-Шехтера (Пресс, Шехтер, 1974; Клыпин и др., 2011) со спектром возмущений Гаррисона–Зельдовича (Бардин и др., 1986):

$$F_{obj}(z_f, M) = 19x_m(1 + 0.8/y^{0.6}) \exp(-y^2), \quad (11)$$

$$y = 0.36(1 + z_f)x_m^{0.077}(1 + 0.3x_m^{0.133} + 0.6x_m^{0.333}),$$

$$x_m = 2 \times 10^{-14} x_0 M/M_{\odot}.$$

~ ~

Эта функция имеет два свободных параметра: красное смещение $(1 + z_f)$ и перенормировку массы x_0 . Для рассматриваемой системы абсорберов принято $1 + z_f \simeq 4$ и $x_0 \simeq 10$. Отметим, что даже с учетом значительных неопределенностей в предложенном подходе, и оценки поверхностной плотности темной материи $\langle \Sigma_{\rm vir} \rangle$, и оценки редуцированных средней плотности и энтропии ($\langle G_{\rho} \rangle$ и $\langle G_S \rangle$) для этой выборки близки к соответствующим величинам для галактик и скоплений галактик. Так, для 100 скоплений галактик (Эрбоне и др., 2019) с массами $M_{\rm vir} \simeq \simeq 10^{14}~M_{\odot}$ средние значения этих характеристик

$$\begin{split} \langle \Sigma_{\rm vir} \rangle &\simeq 55(1\pm0.17) \ M_{\odot}/{\rm nk}^2, \eqno(12) \\ \langle G_{\rho} \rangle &\simeq 2\times 10^6(1\pm0.3) \ M_{\odot}/{\rm knk}^3, \\ \langle G_S \rangle &\simeq 3(1\pm0.1) \ {\rm cm}^2 {\rm k} {\rm s} {\rm B}, \end{split}$$

а для 53 галактик Свотерс и др. (2009) с массами $M_{
m vir}\simeq (10^9-10^{11})~M_{\odot},$

$$\begin{split} \langle \Sigma_{\rm vir} \rangle &\simeq 59(1 \pm 0.5) \ M_{\odot}/{\rm n\kappa}^2, \end{split} \tag{13} \\ \langle G_{\rho} \rangle &\simeq 10^6(1 \pm 0.7) \ M_{\odot}/{\rm \kappa n\kappa}^3, \\ \langle G_S \rangle &\simeq 4(1 \pm 0.3) \ {\rm cm}^2 {\rm \kappa 9B}. \end{split}$$

Таблица 1. Параметры трех рассматриваемых популяций абсорберов

Параметры	Линии металлов	$Ly - \alpha, z \sim 3$	$Ly - \alpha, z < 1$
N_{sys}	160	780	1230
$\langle z \rangle$	3	3	0.3
$\langle b angle$, км/с	$41(1 \pm 0.1)$	$29(1\pm0.1)$	$30(1\pm0.1)$
$\langle v_{\rm kin} angle$, км/с	$125(1\pm0.2)$	$16(1\pm0.1)$	$5.3(1\pm0.1)$
$\langle d^*_{ m sep} angle$, Мпк	$450(1 \pm 0.2)$	$40(1\pm0.3)$	$70(1\pm0.3)$
$\langle M_{ m vir}^*/M_\odot angle$	$\sim 10^{12}$	$\sim \! 3 \times 10^8$	$\sim 4 \times 10^8$
$\langle R^*_{ m vir} angle$, кпк	$120(1 \pm 0.4)$	$15(1\pm0.5)$	$23(1\pm0.7)$
$\langle \Sigma_{\rm vir}^* \rangle$	$18(1\pm0.8)$	1 ± 0.2	$1(1\pm0.5)$
$10^{-4} \langle G_{\rho}^* \rangle$	$22(1\pm0.9)$	$0.25(1 \pm 0.4)$	$0.8(1\pm0.8)$
$\langle G_s^* \rangle$	$1.4(1\pm0.3)$	$4.1(1 \pm 0.1)$	$14(1\pm0.9)$

Примечание. N_{sys} — количество проанализированных систем линий поглощения, $\langle z \rangle$ — среднее значение красного смещения.



Рис. 1. Для выборки 160 систем линий металлов при больших красных смещениях представлены фракция абсорберов f_{obj} , поверхностная плотность $\Sigma_{\rm vir}/\langle \Sigma_{\rm vir} \rangle$, редуцированные средняя плотность $G_{\rho}/\langle G_{\rho} \rangle$ и энтропия $G_s/\langle G_s \rangle$ в зависимости от массы абсорберов $M_{\rm vir}/M_{\odot}$.



Рис. 2. Те же функции, что и на рис. 1, представлены для 780 систем леса линий Ly_{α} при больших красных смещениях.

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 6 2020



Рис. 3. Те же функции, что и на рис. 1, представлены для 1230 систем леса линий Ly_a при малых красных смещениях.

Сравнение (12) и (13) указывает на слабую связь $\langle \Sigma_{\rm vir} \rangle$, $\langle G_{\rho} \rangle$ и $\langle G_S \rangle$ с вириальной массой объекта в случае галактик и скоплений галактик. Как видно на рис. 1, слабая связь этих параметров с массой облака подтверждается и для рассматриваемой популяции абсорберов. Неожиданной может показаться экспоненциальная функция распределения для поверхностной плотности $\Sigma_{\rm vir}$, что непосредственно следует из линейного соотношения (7) между $\Sigma_{\rm vir}$ и $d_{\rm sep}^*$. Однако эта функция распределения является прямым следствием формирования исследуемой выборки абсорберов как объектов, расположенных случайно вдоль луча зрения, и не воспроизводится при другом формировании выборки.

В каталогах, полученных в численных моделях (см., например, Клыпин и др., 2011), представлены гало в широком интервале масс, плотностей и других параметров. Поэтому в больших численных моделях можно найти представительные выборки, соответствующие разным значениям параметров гало. Так, для выборки 4×10^3 гало с массами $(10^{10}-10^{12}) M_{\odot}$ из численной модели (Клыпин и др., 2011) получаем (Демянский и др., 2020)

$$\langle \Sigma_{\rm vir} \rangle \simeq 47(1 \pm 0.8) \ M_{\odot}/\pi\kappa^2, \tag{14}$$
$$\langle G_{\rho} \rangle \simeq 0.8 \times 10^6 (1 \pm 0.9) \ M_{\odot}/\kappa\pi\kappa^3,$$

$$\langle G_S \rangle \simeq 10(1 \pm 0.5) \text{ см}^2$$
кэВ.

Эти значения близки к значениям, полученным для наблюдаемых выборок (12) и (13). Важно отметить, что исследованная выборка из численной модели включает лишь незначительную фракцию (~10⁻⁴) всех гало.

Параметры леса линий Ly_a

Результаты реконструкции параметров абсорберов для выборки линий Ly_{α} значительно отличаются от результатов, полученных для выборки линий металлов. Во-первых, массы этих абсорберов ожидаемо в $\sim 10^4$ раз, а размеры ~ 10 раз меньше, что согласуется с отсутствием в них звезд и, вероятно, соответствует их более позднему рождению (при z < 10, после реионизации и вторичного разогрева межгалактического газа). Для этих объектов поверхностная плотность $\langle \Sigma_{
m vir}
angle$, редуцированные средняя плотность $\langle G_{\rho} \rangle$ и энтропия $\langle G_{S} \rangle$ слабо зависят от времени, что указывает на близость свойств этих объектов, наблюдаемых при существенно разных красных смещениях. Это подтверждает стабильность и образование большинства этих объектов при красных смещениях $z_f \ge 3$, а

также дальнейшее их скучивание в окрестности галактик и/или элементов структуры.

При этом параметры данных объектов отличаются от параметров наблюдаемых галактик и скоплений галактик (12) и (13), и от значений, полученных для систем линий металлов, приведенных в табл. 1. Что указывает на различия в свойствах этих абсорберов и галактик, а также на особенности образования данных объектов. Функция масс для этих облаков представлена на рис. 2 и 3 в сравнении с функцией $F_{obj}(z_f, M)$ (11), описывающей распределение масс в модели Пресса–Шехтера (Пресс и Шехтер, 1974; Клыпин и др., 2011). Для рассматриваемых систем абсорберов принято $1 + z_f \simeq 4$ и $x_0 \simeq 10^3$ и 10^4 .

Как и для предыдущей выборки, для леса линий Ly_{α} параметры $\langle \Sigma_{\rm vir} \rangle$, $\langle G_{\rho} \rangle$ и $\langle G_S \rangle$ слабо связаны с массой абсорберов. Сравнение с численными моделями показывает, что гало со свойствами, близкими к приведенным в табл. 1 для леса линий Ly_{α} , типичны для численных моделей. Так, для выборки 10^6 гало численной модели (Клыпин и др., 2011) с массами $(10^{10}-10^{12})~M_{\odot}$ получаем (Демянский и др., 2020)

$$\langle \Sigma_{\rm vir} \rangle \simeq 3(1 \pm 0.8) \ M_{\odot}/\pi\kappa^2,$$
 (15)
 $\langle G_{\rho} \rangle \simeq 10^4 (1 \pm 0.9) \ M_{\odot}/\kappa\pi\kappa^3,$
 $\langle G_S \rangle \simeq 36(1 \pm 0.7) \ \mathrm{cm}^2\kappa$ əB.

Эти результаты показывают, что гало, отождествляемые с лесом линий Ly_{α} , составляют часть представительной популяции невидимых и плохо видимых объектов, определяющих значительную часть плотности Вселенной.

ОБСУЖДЕНИЕ

С развитием наблюдательной астрономии обнаруживается все большее число маломассивных объектов — карликовых и ультрадиффузных галактик (Уолкер и др., 2009; Мартинес-Дельгадо и др., 2016; Мерит и др., 2016; Ли и др., 2017; Роман и Тражилло, 2017; Ши и др., 2017), свойства которых содержат важную информацию о мелкомасштабных возмущениях в ранней Вселенной. Эти же данные можно получить, изучая спектры поглощения квазаров и других объектов. После улучшения методов анализа количество уже известных спектров позволяет извлекать важнейшую информацию для космологии малых масштабов. В настоящей работе показано, как можно связать наблюдаемые характеристики этих спектров с физическими параметрами поглощающих облаков. Сравнение с численными моделями позволяет усовершенствовать методы анализа, увеличить точность результатов и открывает пути получения новых знаний о процессах возникновения этих возмущений и начальных периодах образования галактик.

Характерное расстояние и плотность темной материи в абсорберах

На первый взгляд какая-либо связь характерного расстояния между абсорберами d^*_{sep} с поверхностной плотностью темной материи $\Sigma_{\rm vir}$ представляется удивительной, поскольку первая относится к пространственному распределению объектов, а вторая — к их внутреннему строению. Однако, как можно видеть из (6) и (7), обе характеристики зависят от площади абсорбера πR^2 . Рассматриваемая в подразделе "Физическая модель абсорберов" приближенная модель позволяет оценить величину этой площади. Физические характеристики абсорберов зависят также от их пространственной плотности $\langle n_{cl} \rangle$ или от средней плотности нерелятивистской материи $\langle \rho_m \rangle$. Эти плотности не тождественны, что искажает связь этих характеристик, но не может полностью скрыть влияние общего фактора. Принципиальное различие d^*_{sep} и Σ_{vir} проявляется в различии их функций распределения экспоненциальной для d_{sep}^* и близкой к гауссовой для $\Sigma_{\rm vir}$, что, очевидно, связано с формированием выборки абсорберов.

Несмотря на то, что количественные оценки получены с плохой точностью, они демонстрируют значительные различия величины d_{sep}^* и для систем поглощения линий металлов, отождествляемых с галактиками, и для леса линий Ly_{α} . Аналогичная ситуация наблюдается при сопоставлении значений масс M_{vir} и поверхностной плотности Σ_{vir} , приведенных в табл. 1. При этом важно отметить, что оценки параметров систем линий металлов близки к оценкам (12)–(14), а оценки параметров леса линий Ly_{α} близки к оценкам (15). Это показывает, что, несмотря на все сделанные приближения, полученные результаты отражают реальные свойства абсорберов в широком диапазоне масс.

Корреляция вириальных массы и размера галактик и абсорберов

Близкие значения вириальной поверхностной плотности, полученные и для систем линий металлов (табл. 1), и для галактик и скоплений галактик (12) и (13), указывают на заметную корреляцию их размеров и масс, что делает семейство данных объектов однопараметрическим. Это значит, что по заданной вириальной массе объекта можно приближенно установить его размеры, среднюю плотность и другие параметры. Однако влияние случайных факторов размывает жесткую зависимость.

Подобное утверждение справедливо и для леса линий Ly_{α} , но нам не известны прямые наблюдения этих абсорберов. Конечно, каталоги гало темной материи с соответствующими значениями поверхностной плотности выделяются в численных моделях (15), но это специальные популяции гало.

Корреляцию масс и размеров гало темной материи можно объяснить, например, тем, что эти гало образуются в окрестности высоких максимумов плотности с универсальным профилем плотности вокруг максимумов. Конечно, это сильно упрощенное описание в духе модели Пресса-Шехтера (Пресс и Шехтер, 1974), но и оно отражает некоторые важные особенности процесса: около таких максимумов случайные возмущения профиля плотности подавлены, и этот профиль определяется соответствующей корреляционной функцией. которая, в свою очередь, определяется общим спектром возмущений. Эта функция связывает высоту максимума с массой и размером будущего гало и делает популяцию однопараметрической. Подобная картина может реализоваться в рамках разных моделей рождения галактик, скоплений галактик и других объектов. Эти корреляции трансформируются и частично разрушаются в процессе иерархического скучивания и релаксации объектов, но они могут быть прослежены как в наблюдаемых объектах (12) и (13), так и в численных моделях (14) и (15) (см., например, Нааб и Острайкер, 2017; Завала и Френк, 2019).

Такая картина почти регулярного образования гало темной материи справедлива для массивных гало, но эти связи ослабевают по мере уменьшения высоты максимума и соответственно массы образующегося гало. Критическая масса, разграничивающая области сильной и слабой корреляции, связана с формой спектра возмущений и с моментом равенства плотности релятивистской и нерелятивистской фракций при красном смещении $z_{eq} \simeq 3400$ (Аде и др., 2016). Соответствующие размер гало $l_0 \simeq 7$ Мпк/ Θ_m и его масса $M_0 \simeq 25 \times 10^{13} \ M_{\odot}/\Theta_m^2$ зависят от величины постоянной Хаббла H_0 и средней плотности $\langle \rho_m(z) \rangle$. Для спектра Гаррисона–Зельдовича с асимптоти-кой $P(k) \propto k, \quad k \to 0$, на малых масштабах получаем $P(k) \propto k^{-3}$ при $kl_0 \gg 1$ (Бардин и др., 1986).

Этот спектр был использован в (11) при обсуждении модели Пресса-Шехтера.

Причина различий как в свойствах галактик и менее массивных абсорберов, связанных с линиями $Ly\alpha$, так и в гало темной материи, образованных в численных моделях, до сих пор не выяснены. Возможно, они связаны с ранним, при красных смещениях $z \ge 10$, образованием галактик и массивных гало численных моделей. Этот вопрос требует дальнейшей проверки в специальных численных моделях.

Влияние этого фактора усиливается в космологической модели с двумя типами темного вещества, где небольшая фракция тяжелых частиц формирует галактики при больших z, а при $z \leq 10$ гало меньшей массы образуются из преимущественно легких частиц. Такая модель, являющаяся суперпозицией моделей с холодной темной материей ΛCDM и с теплой темной материей ΛWDM , может успешно решить проблему различий двух типов гало.

Рассматриваемая корреляция размера и массы также нуждается в специальном изучении в соответствующих численных моделях. В современных моделях проверка модели раннего рождения гало темного вещества затруднена техническими ограничениями, в частности, невозможностью совместить большой размер и хорошую представительность модели с высоким разрешениием. Современные численные модели в действительности воспроизводят эволюцию спектров возмущений, обрезанных либо на больших (Ишияма, 2014; Диеманд и др., 2005; Андерхалден, Диеманд, 2011, 2013), либо на малых (Оман и др., 2015; Пилипенко и др., 2017) масштабах. Первые показывают нелинейную эволюцию возмущений при красных смещениях z> ≥ 30 для нескольких гало, вторые — при $z \leq 10$ в широком диапазоне масс и размеров, но без связи с ранней эволюцией.

Модели, выполненные с высоким разрешением, показывают также хорошее согласие с наблюдаемым профилем плотности в центральных областях маломассивных галактик (соге — сиsp problem) (Ишияма, 2014). Анализ этого вопроса необходимо продолжить с помощью представительных моделей с высоким разрешением. В ближайшее время и модели раннего рождения галактик, и вопросы строения и эволюции центральных областей можно будет изучать в численных моделях с использованием переменного по пространству разрешения. C. Baccigalupi, A. Banday, R. Barreiro, et al.), Astron. Astrophys. **594**, 13 (2016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Работа выполнена при частичной поддержке

программы ФИАН ННГ-01-2018.

- 2. Андерхалден, Диеманд (D. Anderhalden and J. Diemand), MNRAS **415**, 2293 (2011).
- Андерхалден, Диеманд (D. Anderhalden and J. Diemand), JCAP 04, 009 (2013).
- Баллок, Бойлан-Колчин (J. Bullock and M. Boylan-Kolchin), Ann. Rev. 55, 343 (2017).
- 5. Бардин и др. (J. Bardeen, J. Bond, N. Kaiser, and A. Szalay), Astrophys. J. **304**, 15 (1986).
- 6. Боксенберг, Саргент (A. Boksenberg and W. Sargent), Astrophys. J. Suppl. Ser. **218**, 7 (2015).
- 7. Болтон и др. (J. Bolton, G. Becker, M. Haehnelt, M. Viel), MNRAS **438**, 2499 (2014).
- Болтон и др. (J. Bolton, E. Puchwein, D. Sijacki, M. Haehnelt, T.-S. Kim, A. Meiksin, J. Regan, M. Viel), MNRAS 464, 897 (2017).
- 9. ван де Вейгерт, Платен (R. van de Weygaert and E. Platen), IJMPS 1, 41 (2011).
- ван де Вейгерт (R. van de Weygaert) The Zeldovich Universe: Genesis and Growth of the Cosmic Web Proceedings IAU Symposium No. 308 (Ed. R.van de Weygaert, S. Shandarin, E. Saar, J. Einasto, 2014).
- 11. Векслер, Тинкер (R. Wechsler and J. Tinker), Ann. Rev. **56**, 435 (2018).
- 12. Данфорс и др. (С. Danforth, В. Keeney, E. Tilton, J. Shull, J. Stocke, M. Stevans, M. Pieri, B. Savage, et al.), Astrophys. J. **817**, 111 (2016).
- 13. Демянский и др. (M. Demiański, A. Doroshkevich, and V. Turchaninov), MNRAS **371**, 915 (2016).
- Демянский, Дорошкевич (M. Demiański and A. Doroshkevich), Astron. Astrophys. Trans. **30**, 185 (2017).
- 15. Демянский, Дорошкевич (М. Demiański and A. Doroshkevich), Astron. Rep. **62**, 859 (2018).
- Демянский М., Дорошкевич А.Г., Ларченкова Т.И., Пилипенко С.В., Астрон. журн. (2020) направлена в редакцию [M. Demiański, A. Doroshkevich, T. Larchenkova, S. Pilipenko, Astron. Rep. (2020) submitted].
- 17. Диеманд и др. (J. Diemand, B. Moore, and J. Stadel), Nature **433**, 389 (2005).
- Дорошкевич и др. (A. Doroshkevich, D. Tucker, S. Allam, and M. Way), Astron. Astrophys. 418, 7 (2004).
- 19. Дорошкевич, Верходанов (A. Doroshkevich and O. Verchodanov), Phys. Rev. D 83, 4 (2011).
- 20. Завала, Френк (T. Zavala and C. Frenk), Galaxy 7, 81 (2019).

- 21. Икеучи (S. Ikeuchi), Astrophys. Space Sci. **118**, 509 (1986).
- 22. Ирсик и др. (V. Irsic, M. Viel, T. Berg, V. D'Odorico, M. Haehnelt, S. Cristiani, G. Cupani, T.-S. Kim, et al.), MNRAS **466**, 4332 (2017).
- 23. Ирсик, МакКуинн (V. Irsic and M. McQuinn), JCAP 04, 026 (2018).
- 24. Ишияма (Т. Ishiyama), Astrophys. J. 788, 27 (2014).
- 25. Кинни и др. (B. Keeney, J. Stocke, C. Danforth, J. Shull, C. Pratt, C. Froning, J. Green, S. Penton, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **230**, 6 (2017).
- 26. Клыпин и др. (A. Klypin, S. Trujillo-Gomez, and J. Primack), Astrophys. J. **740**, 102 (2011).
- 27. Комацу и др. (E. Komatsu, K. Smith, J. Dunkley, C. Bennett, B. Gold, G. Hinshaw, N. Jarosik, D. Larson, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **182**, 18 (2011).
- 28. Ли и др. (M. Lee, J. Kang, J. Lee, and I.S. Jang), Astrophys. J. **812**, L34 (2017).
- 29. Либескинд и др. (N. Libeskind, R. van de Weygaert, M. Cautun, B. Falck, E. Tempel, T. Abel, M. Alpaslan, M. Aragon-Calvo, et al.), MNRAS **473**, 1195 (2018).
- 30. МакКуинн (М. McQuinn), Ann. Rev. 54, 313 (2016).
- Мартинес-Дельгадо и др. (D. Martinez-Delgado, R. Lasker, M. Ssharina, E. Toloba, J. Fliri, R. Beaton, D. Valls-Gabaud, I. Karachentsev, et al.), Astrophys. J. 151, 96 (2016).
- 32. Мейксин (A. Meiksin), Rev. Mod. Phys. 81, 1405 (2009).
- 33. Мерит и др. (A. Merritt, P. van Dokkum, S. Danieli, R. Abraham, J. Zhang, I. Karachentsev, and L. Makarova), Astrophys. J. **833**, 168 (2016).
- 34. Нааб, Острайкер (Т. Naab and J. Ostriker), Ann. Rev. **55**, 59 (2017).
- 35. Оман и др. (K. Oman, J. Navarro, A. Fattahi, C. Frenk, T. Sawala, S. White, R. Bower, R. Crain, et al.), MNRAS **452**, 3650 (2015).
- 36. Пилипенко и др. (S. Pilipenko, M. Sanches-Conde, F. Prada, and G. Yepes), MNRAS **472**, 4918 (2017).
- 37. Пресс, Шехтер (W. Press and P. Schechter), Astrophys. J. **187**, 425 (1974).
- Прочаска и др. (J. Prochaska, J. Werk, G. Worseck, T. Tripp, J. Tumlinson, J. Burchett, A. Fox, M. Fumagalli, et al.), Astrophys. J. 837, 116 (2017).
- 39. Рис (M. Rees), MNRAS 218, 25 (1986).
- 40. Роман, Тражилло (J. Roman and I. Trujillo), MNRAS 468, 703 (2017).
- 41. Рораи и др. (A. Rorai, G. Becker, M. Haehnelt, R.F. Carswell, J.S. Bolton, S. Cristiani, V. D'Odorico, G. Cupani, et al.), MNRAS **466**, 2690 (2017).
- 42. Руди и др. (G. Rudie, C. Steisel, R. Trainov, O. Rakic, M. Bogosavljevic, M. Pettini, N. Reddy, A. Shapley, et al.), Astrophys. J. **750**, 67 (2012).

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 6 2020

- 43. Свотерс и др. (R. Swaters, R. Sancisi, T. van Albada, and J. van der Huls), Astron. Astrophys. **493**, 871 (2009).
- 44. Сток и др. (J. Stocke, B. Keeney, C. Danforth, B. Oppenheimer, C. Pratt, and A. Berlind), Astrophys. J. **838**, 37 (2017).
- 45. Тамлинсон и др. (J. Tumlinson, M. Peebles, and J. Werk), Ann. Rev. **55**, 389 (2017).
- 46. Тегмарк, Залдаряга (М. Tegmark and M. Zaldarriaga), Phys. Rev. D **66**, 103508 (2002).
- 47. Тоннесен и др. (S. Tonnesen, B. Smith, J. Kollmeier, and R. Cen), Astrophys. J. **845**, 47 (2017).
- 48. Уолкер и др. (M. Walker, M. Mateo, E. Olszewski, J. Penarrubia, N. Evans, and G. Gilmore), Astrophys. J. **704**, 1274 (2009).
- 49. Уокер, Саваж (В. Wakker and В. Savage), Astrophys. J. Suppl. Ser. **182**, 378 (2009).

- 50. Уокер и др. (B. Wakker, A. Hernandes, D. French, T.-S. Kim, B. Oppenheimr, and B. Savage), Astrophys. J. **814**, 40 (2015).
- 51. Френч, Уокер (D. French and B. Wakker), Astrophys. J. **837**, 138 (2017).
- 52. Шайе (J. Schaye), Astrophys. J. 559, 507 (2001).
- 53. Ши и др. (D.D. Shi, X.Z. Zheng, H.B. Zhao, Z.Z. Pan, B. Li, H. Zou, X. Zhou, K. Guo, et al.), Astrophys. J. **846**, 26 (2017).
- 54. Эрбоне и др. (R. Herbonnet, C. Sifon, H. Hoekstra, Y. Bahe, R. van der Burg, J.-D. Melin, A. von der Linden, D. Sand, et al.), arXiv:1912.04414 (2019).