

УДК: 524.3:52-355

О ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ОБЛАКОВ, ОБРАЗУЮЩИХ L_{α} -ЛЕС В СПЕКТРАХ КВАЗАРОВ

В.Г.ГОРБАЦКИЙ

Поступила 10 октября 1996

Из наблюдений следует, что облака, образующие L_{α} -лес, обладают иерархической структурой. Выдвигается предположение о том, что их структура является не только иерархической, но также и фрактальной. На этой основе объясняется хорошо известное из наблюдений соотношение между лучевой концентрацией нейтральных атомов водорода $N(HI)$ и концентрацией облаков с тем же значением $N(HI)$. Оцениваемая по данным наблюдений и из расчетов фрактальная размерность облаков равна $D = 2.5 \pm 0.2$.

1. *Введение.* Четверть века тому назад (1971г.) в спектрах нескольких квазаров был обнаружен " L_{α} -лес", т.е. множество линий поглощения водорода L_{α} , образуемых объектами (поглотителями), находящимися между квазаром и наблюдателем. С тех пор исследования L_{α} -леса сильно расширились, и к настоящему времени такие системы линий наблюдались уже в спектрах более чем 200 квазаров. Благодаря открывшейся с запуском HST возможности получать спектры УФ-области квазаров с малым красным смещением z , интервал значений z , в котором находятся поглотители, расширился и составил $0.1 \leq z \leq 5$. Достижимая при наблюдениях высокая разрешающая способность дает возможность детально изучать профили отдельных линий и, таким образом, делать выводы о внутренней структуре поглотителей, относительно природы которых до сих пор нет единого мнения. Наблюдательные данные и, в частности, свидетельства эволюции системы поглотителей [1], дают основание считать, что в большинстве эти объекты являются очень протяженными газовыми облаками, во всяком случае те из них, которые находятся на достаточно больших расстояниях ($z \geq 1.5$). Отличительной особенностью таких облаков является крайне низкое содержание в них тяжелых элементов ($Z \leq 0.01 Z_{\odot}$), синтезирующихся, как известно, в процессе эволюции звезд. Поэтому газ, составляющий облака, является первичным, т.е. образующая L_{α} -лес система состоит из догалактических облаков.

Результаты спектральных исследований L_{α} -леса, выполненных с очень высоким разрешением [2], привели к выводу о том, что догалактические облака обладают иерархической структурой. В данной статье на основе анализа наблюдательных данных выдвигается предположение о том, что структура облаков является не только иерархической, но к тому же и фрактальной. Оценивается фрактальная размерность для облаков по

наблюдательным данным о распределении эквивалентных ширин линий L_{α} в спектрах квазаров в сочетании с найденным теоретическим спектром масс облаков в системе.

2. *Эволюция спектра масс системы догалактических облаков.* Как было показано еще в ранних работах (напр., [3]), судить о том, эволюционирует система поглотителей, образующих L_{α} -лес, или нет, можно при посредстве следующего соотношения, получаемого из наблюдений

$$\frac{dN_r}{dz} \propto (1+z)^{\gamma}. \quad (1)$$

Здесь через N_r обозначено количество поглотителей вдоль луча зрения, приходящееся на единичный интервал z . Для стандартной космологической модели, при параметре замедления $q_0 = 0$, свидетельством эволюции системы является условие $\gamma > 1$ (при $q_0 = 0.5$ соответствующее условие $\gamma > 0.5$). Наблюдения дают для интервала $1.5 \leq z \leq 5$ значение $\gamma \geq 2$ и, следовательно, система является эволюционирующей.

Расчет эволюции спектра масс системы облаков был выполнен в предположении о том, что основным фактором, определяющим изменение спектра масс со временем, является слияние облаков при их столкновениях [1]. В качестве поглотителей принималась модель сферических однородных облаков. Очевидно, что вследствие слияний облаков распределение по массе должно смещаться в сторону больших масс. Поскольку при достижении достаточно большого значения массы $m > M_{\text{прек}}$ в облаках должно начаться звездообразование, то оно тем самым превращается в галактику (происходит, в некотором смысле, "фазовый переход"), и общая масса вещества, принадлежащего системе газовых облаков, будет уменьшаться.

Расчеты показали [1], что распределение концентрации облаков по массе $n(m, t)$ независимо от начальных условий за короткое, по сравнению с продолжительностью существования системы, время выходит на самоподобный режим, в котором вид зависимости $n(m, t)$ может быть аппроксимирован выражением

$$n(m, t) = f(t) \cdot m^{-q}. \quad (2)$$

В большей части всего интервала масс $[m_0; M_{\text{прек}}]$ (кроме m близких к $M_{\text{прек}}$) показатель q равен

$$q = 1.15 \pm 0.05. \quad (3)$$

Используя известную зависимость между z и t для стандартной модели, при посредстве соотношения (2) нетрудно рассчитать величину dN_r/dz . Значение показателя γ в формуле (1), найденное из вычислений [1] для различных интервалов z , составляет $\gamma \approx 2$ и хорошо согласуется с вели-

чиной, определяемой из наблюдений. Таким образом, не только подтвердятся вывод об эволюции системы поглотителей при достаточно больших значениях z , но оказывается также, что при помощи простой модели системы, состоящей из однородных облаков, можно достаточно хорошо описать эволюцию.

При $0.1 \leq z \leq 1$ наблюдения дают $\gamma < 1$ [4] и, соответственно, система поглотителей не является эволюционирующей. По-видимому, на таких расстояниях природа поглотителей иная - они представляют собой обширное гало галактик, являющихся продуктом слияния догалактических облаков. Это обстоятельство находит подтверждение в результатах расчетов [1], которые показали, что при $z < 1$ концентрация образовавшихся галактик существенно превосходит концентрацию облаков. Столкновения галактик должны происходить значительно реже, чем столкновения облаков в силу относительной малости сечения столкновений для них. Поэтому система молодых галактик не является эволюционирующей со временем в отношении изменения их концентрации. Следовательно, уменьшение γ с уменьшением z при $z < 1.5$ представляется вполне естественным.

3. *Проблема структуры облаков, образующих L_{α} -лес.* Определение внутренней структуры облаков по профилям образуемых ими спектральных линий требует спектрограммы с очень высоким разрешением. В этом отношении важную роль сыграла работа [2], в которой было достигнуто разрешение 6.5 км/с. По этим спектрам для выборки неблендированных и ненасыщенных линий было установлено, что они соответствуют значениям лучевой концентрации нейтральных атомов водорода $N(\text{HI})$, поглощающих излучение в линии L_{α} , лежащим в интервале

$$10^{12.5} \leq N(\text{HI}) \leq 10^{14} \text{ см}^{-2}. \quad (4)$$

По профилям этих линий было определено значение параметра b

$$b = \sqrt{2} \cdot \sigma, \quad (5)$$

где σ - дисперсия скоростей атомов. Оказалось, что значение b соответствует температурам 5000+10000К, что на порядок меньше, чем предполагалось на основе данных, полученных по спектрам с более низкой дисперсией. Отсюда следует важное заключение: самые слабые линии (с эквивалентной шириной, составляющей сотые доли \AA) образуются сгустками сравнительно холодного и, следовательно, не очень сильно ионизованного ($n_{\text{II}}^+ / n_{\text{III}} \leq 10^4$) газа. При указанных значениях лучевой концентрации массы таких сгустков малы по сравнению с \mathcal{M}_{\odot} . Поскольку оценки массы облаков, полученные с помощью различных методов, превосходят $10^5 \mathcal{M}_{\odot}$, то количество таких сгустков в облаке должно быть очень большим ($\gg 10^6$).

В работе [2] была обнаружена корреляция между величиной параметра b и эквивалентной шириной W линий L_{α} . Это было подтверждено и в других наблюдениях, проводившихся с достаточно высоким разрешением, например, [5], [6]. Значение b лежит в пределах

$$5 \lesssim b \lesssim 80 \text{ км/с,}$$

т.е. "температура", определенная по самым слабым линиям, отличается от "температуры", найденной по сильным линиям ($W \geq 0.5 \text{ \AA}$) более чем на порядок. Поскольку в соответствии с выводами различных авторов ширина сильных линий обусловлена крупномасштабными движениями, то корреляция между b и W указывает на иерархическую структуру облаков. Для наименьших из наблюдаемых элементов структуры - "облачков" - лучевая концентрация нейтральных атомов водорода $N(\text{HI}) \geq 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Они движутся в пространстве со скоростями, на порядок превышающими тепловые скорости атомов в облачках. Более сильные линии возникают при поглощении излучения в следующих по иерархии образованиях и представляют собой бленды - результат наложения линий, образованных облачками, движущимися вдоль луча зрения с различными скоростями.

Уже неоднократно отмечалось (например, [7]), что определение лучевой концентрации $N(\text{HI})$ для сильных ("насыщенных") линий, при посредстве обычной кривой роста, не является корректным, так как эффект блендирования невозможно учесть достаточно строго. Поэтому, полученное многими авторами соотношение

$$\frac{dN}{dN(\text{HI})} \propto [N(\text{HI})]^{-\beta}, \quad (6)$$

где N - пространственная концентрация поглотителей, обладающих лучевой концентрацией атомов водорода, равной $N(\text{HI})$, не может, как это часто делают, использоваться для линий большой ширины ($W \geq 1 \text{ \AA}$). Для линий, относящихся к линейной части кривой роста - в области, определяемой неравенствами (4), из (6) следует

$$\frac{dN}{dW} \propto W^{-\beta}, \quad 0.01 \lesssim W \lesssim 0.4, \quad (7)$$

где N - пространственная концентрация облаков, создающих линию с эквивалентной шириной W .

Соотношение (7) указывает на то, что по иерархической структуре все облака, образующие L_{α} -лес, сходны. Значение параметра β приблизительно одинаково для всех квазаров и равно $\beta = 1.7 \pm 0.2$. Следовательно, оно может лишь слабо зависеть от направления в пространстве и от z . Величина N определяется распределением поглощающих облаков по массе, которое, согласно [2] и [3], должно быть универсальным. Соответственно, универсальной должна быть и зависимость W от массы облака.

Величины N (см^{-3}) и W ($\text{Å} \propto \text{см}$) оказываются связанными степенной зависимостью, что дает основание предполагать фрактальную структуру облаков, образующих L_α -лес, а соотношения (2) и (7) позволяют оценить их фрактальную размерность.

4. *Фрактальность облаков.* Фрактальные структуры обладают, как правило, нецелой размерностью D , значения которой могут находиться в интервале $0 < D < 3$. Для самоподобных фракталов возможно масштабное преобразование ("скейлинг") с размерностью подобия, равной D . Интересно отметить, что как облака в атмосфере Земли, так и межзвездные облака в Галактике являются фракталами. В первом случае это было установлено [8] на основании известного соотношения между площадью проекции S и периметром P

$$P \propto S^{D_2/2}.$$

Из наблюдений получается, что $D_2 = 1.35$ независимо от размера облака, тогда как при нефрактальной структуре было бы $D_2 = 1$.

Во втором случае на большом интервале размеров облаков имеет место самоподобие проекций по изофотам, и $D_2 = 1.3 + 1.4$ [9] (в обоих случаях речь идет о пространстве с размерностью, равной 2).

Примем, что межгалактические облака, создающие линии L_α -леса, представляют собой самоподобные фракталы с размерностью D . Наименьший из элементов - сферическое "облачко", имеет массу m_0 и радиус r_0 , а его оптическая толщина τ_0 в частоте линии $L_\alpha \ll 1$. Будем называть такое "облачко" элементарным поглотителем (ЭП). Если количество поглотителей конечно, в этом случае нельзя говорить о фрактальности в строгом смысле, но поодобная терминология обычно применяется при изучении структуры физических объектов, содержащих конечное число элементов. Эквивалентная ширина линии L_α , создаваемой облаком размера $R > r_0$, определяется количеством поглотителей $N_{\text{полл}}$, находящихся на луче зрения от наблюдателя на квазар.

При оптической толщине ЭП равной τ_0 , создаваемая им линия поглощения имеет эквивалентную ширину W_0 , равную

$$W_0 = \sqrt{\pi} \frac{\lambda_0^2}{c} \Delta\nu_T \tau_0, \quad (8)$$

где $2\Delta\nu_T$ - ширина линии, обусловленная тепловым движением атомов, содержащихся в ЭП. Так как для ЭП значение $N(\text{НП}) \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, то $W_0 \approx 10^{-2} \text{ Å}$ и наблюдаемые линии, имеющие $W \approx 0.3 + 0.4 \text{ Å}$, являются ненасыщенными, т.е. $N_{\text{полл}} \tau_0 < 1$ и эквивалентная ширина наблюдаемой линии W , создаваемой облаком в спектре, равна

$$W = N_{\text{полл}} W_0. \quad (9)$$

Поскольку предполагается фрактальность всего облака, то распреде-

ление ЭП на луче зрения также фрактально. Согласно "теореме о сложении" (см., напр., [10]), при пересечении фрактальной структуры с размерностью D_A со структурой размерности D_B в пространстве с топологической размерностью d получится структура, обладающая размерностью D_C , равной

$$D_C = D_A + D_B - d. \quad (10)$$

В случае пересечения облака ($D_A = D$) с прямой, для которой $D_B = 1$, имеем

$$D_C = D - 2 = D_1.$$

Если $D < 2$, то $D_C < 0$. Это означает, что далеко не всякий луч попадет хотя бы на один из ЭП, и поэтому облако практически прозрачно в частоте линии. При $D = 2$ фрактальность на поглощении не сказывается - могут образовываться только самые слабые линии. Поэтому будем рассматривать значения D_1 , лежащие в интервале $0 < D_1 < 1$.

При сферической симметрии фрактального облака распределение массы в нем определяется из соотношения

$$m(r) = m_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^D, \quad r_0 \leq r \leq R, \quad (11)$$

где $m(r)$ - масса, содержащаяся в сфере радиуса r .

Шаровой слой $[r, r+dr]$ имеет массу $dm(r)$

$$dm(r) = \frac{m(r_0)}{r_0^D} D r^{D-1} dr, \quad (12)$$

и отсюда, учитывая, что объем этого слоя $dV(r)$ равен

$$dV(r) = 4\pi r^2 dr, \quad (13)$$

находим распределение плотности $\rho(r)$ вдоль радиуса

$$\rho(r) = \frac{D}{3} \rho_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{3-D}. \quad (14)$$

Вводя среднюю плотность в облаке $\bar{\rho} = \frac{m(R)}{V}$, находим

$$\rho(r) = \frac{D}{3} \bar{\rho} \left(\frac{R}{r} \right)^{3-D}. \quad (15)$$

В рассматриваемой модели облака концентрация ЭП ($n_{\text{погл}}$) должна быть пропорциональна локальной плотности вещества $\rho(r)$ и поэтому

$$n_{\text{погл}} \propto \rho(r^{D_1}) \propto \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1-D_1}. \quad (16)$$

При очень большом содержании ЭП в облаке функцию $\rho(r)$ можно приближенно принять непрерывной, и при вычислении $N_{\text{погл}}$ суммирование по элементам заменить интегралом

$$N_{\text{пог}} \propto \int_0^R \rho(r^{D_1}) d(r^{D_1}). \quad (17)$$

Из (17) при учете (9) и условия $R \gg r_0$ имеем

$$W \propto R^{D_1}, \quad R \propto W^{1/D_1}. \quad (18)$$

Соотношение (7) даст зависимость между распределением облаков по эквивалентным ширинам образуемых ими линий и величинами W . При посредстве (18) оно отражает распределение облаков по радиусам. С другой стороны, (2) даст распределение по массе. Для того, чтобы согласовать его с указанным распределением по радиусам, используем следующее из (11) выражение

$$R \propto [m(R)]^{1/D}. \quad (19)$$

Отсюда имеем

$$m(R) \propto W^{D/D_1} \quad (20)$$

и далее

$$dm(R) \propto W^{\frac{D}{D_1}-1} dW. \quad (21)$$

Распределение концентрации облаков по массе, согласно (2), имеет вид

$$n(m) \propto W^{-q \frac{D}{D_1}} \quad (22)$$

и отсюда

$$dN = n(R) dR = n(m) dm \propto W^{-q \frac{D}{D_1}} W^{\frac{D}{D_1}-1} dW. \quad (23)$$

Из сравнения (23) с (7) получаем

$$\beta = \frac{2(q-1)}{D_1} + q \quad (24)$$

и для D_1

$$D_1 = \frac{2(q-1)}{\beta - q}. \quad (25)$$

При указанных выше значениях параметров q и β из (25) находим фрактальную размерность рассматриваемой модели облаков

$$D \equiv D_1 + 2 = 2.5 \pm 0.2. \quad (26)$$

Заметим, что величина D сильно зависит от значения q , определяемого из расчетов. Так как находимся из наблюдений значение β можно считать фиксированным, то при $0 < D_1 < 1$ возможные значения q лежат в узком интервале $1 < q < 1.25$. Отсюда следует, что для подтверждения соответ-

вия предложенной модели облака реальным облакам необходимы более детальные, чем выполненные в [1] расчеты эволюции спектра масс облаков с учетом их внутренней структуры.

5. Заключение. Сделанное в данной работе заключение о фрактальности облака, перехватывающего идущее от квазара излучение в частоте линии L_{α} , позволило в рамках простой модели получить соответствующее данным наблюдений соотношение (6) между содержанием облаков и лучевой концентрацией нейтрального водорода в них. Как нам представляется, это может служить основанием для дальнейших исследований в указанном направлении.

Иерархическую структуру облаков, образующих L_{α} -лес, которая была установлена в работе [2], подтверждаю результаты недавнего исследования [11], где показано, что линия поглощения, создаваемая отдельным облаком, является блендой, образованной узкими слабыми линиями в результате крупномасштабных движений. Стохастичность поля скоростей связывается с предполагаемой в облаке турбулентностью. Более детально проблема образования линий поглощения L_{α} в среде со стохастическим полем скоростей была рассмотрена в работе [12]. В ней показано, что определяемые по эквивалентной ширине линии W значения лучевой концентрации $N(HI)$ могут различаться на один-два порядка, в зависимости от принимаемой величины корреляционной длины, т.е. расстояния по лучу зрения, на котором скорости движения существенно различны. Поэтому проблема изучения линий L_{α} и, соответственно, определения по ним лучевых концентраций $N(HI)$ должны решаться не путем стандартной процедуры с использованием кривой роста, а совместно с исследованием динамики среды, составляющей поглощающие облака. Вопрос о том, какой из двух подходов к проблеме, предлагаемый в данной статье или в [12], лучше соответствует реальной ситуации, остается открытым из-за отсутствия динамических моделей облаков.

Подчеркнем, что в данной статье рассматривалась возможность фрактальной структуры отдельных облаков. В работе [13] демонстрируется возможность того, что система L_{α} облаков обладает мультифрактальной структурой. Не исключено, что фрактальность отдельных облаков и всей системы каким-то образом связаны между собой. Здесь мы опять встречаемся с необходимостью исследования динамики догалактического газа на ранних стадиях эволюции Вселенной.

Астрономический институт Санкт-Петербургского
государственного университета, Россия

ON THE FRACTAL STRUCTURE OF CLOUDS
FORMING L_{α} -FOREST IN QSO SPECTRA

V.G.GORBATSKY

As it follows from the observational data the clouds forming L_{α} forest are of hierarchial structure. The suggestions is advanced that their structure is not only hierarchial but also it is fractal. On such base the well known from observations connection between column density of neutral hydrogen atoms $N(\text{HI})$ and concentration of clouds having this value of $N(\text{HI})$ is explained. The fractal dimension of clouds estimated from observational data and computations is $D = 2.5 \pm 0.2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *В.Г.Горбацкий, А.Б.Кириенко, С.П.Прохоров*, Астрон. ж., 73, №4, 1996.
2. *M.Pettini, R.W.Hunstead, L.J.Smith, D.P.Mar*, Mon. Notic. Roy. Astr. Soc., 246, 545, 1990.
3. *W.L.W.Sargent, P.J.Joung, A.Boksenberg, D.Tytler*, Astrophys. J. Suppl., 42, 41, 1980.
4. *A.Boksenberg*, ESO Workshop on QSO Absorbtion Lines, 1994, Garching, p. 26.
5. *R.F.Carswell, K.M.Lanzetta, H.S.Parnell, J.K.Webb*, Astron. J., 371, 36, 1991.
6. *G.M.Willinger, J.A.Baldwin, R.F.Carlswell, A.J.Cooke, C.I.Hazard, M.J.Irwin, R.G.McMahan, L.J.Storne-Lombarbi*, Astron. J., 428, 574, 1994.
7. *S.A.Levshakov*, Astron. J., 104, 950, 1992.
8. *S.Lovejoy*, Nature, 216, 185, 1982.
9. *E.Falgarone, J.L.Puget, M.Perault*, Astron. Astrophys., 257, 715, 1992.
10. *P.H.Coleman, L.Pietronero*, Phys. Rev., 213, 313, 1992.
11. *L.L.Cowie, A.Songalia, T.S.Kim, E.M.Hu*, Astron. J., 109, 1522, 1995.
12. *S.A.Levshakov, W.H.Kegel*, Mon. Notic. Roy. Astr. Soc., 278, 497, 1996.
13. *V.Carbone, S.Savaglio*, Mon. Notic. Roy. Astr. Soc., 1996 (in press).