

УДК: 524. 575

ОБ ЭВОЛЮЦИИ СИСТЕМЫ МЕЖГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ

В.Г.ГОРБАЦКИЙ

Поступила 26 октября 1993

Наличие " L_{α} -леса" в спектрах квазаров рассматривается как свидетельство клочковатой структуры межгалактической среды. Массы "комков" (облаков) должны увеличиваться в результате их слияния. Когда лучевая концентрация нейтрального водорода в облаке достигает своего критического значения, должно начинаться звездообразование, и облако превращается в галактику. Кратко рассматриваются некоторые физические свойства облаков и предлагается новый подход к исследованию эволюции систем облаков.

1. *Физические свойства межгалактических облаков.* Изучение комплексов абсорбционных линий водорода L_{α} (т.н. " L_{α} -леса") в течение последнего десятилетия стало одним из важных предметов астророфизических исследований. По данным наблюдений возможно определять некоторые параметры поглотителей — предположительно газовых облаков или протяженных корон галактик — таких, как лучевая концентрация нейтрального водорода $N_{H I}$, температура и, в ряде случаев, их размеры. Содержание тяжелых элементов в поглотителях оказывается очень низким — $Z \leq 10^{-2} Z_{\odot}$, и поэтому имеются достаточные основания рассматривать поглотители как гигантские межгалактические облака, возникшие до образования галактик, или как гало галактик, не испытавшие обогащения тяжелыми элементами от звезд, сформированных в основном теле галактики.

При посредстве наземных телескопов L_{α} -лес можно наблюдать лишь в спектрах очень далеких квазаров ($z \geq 1.6$). Недавние наблюдения спектра квазара 3C 273 ($z = 0.156$), произведенные на хаббловском телескопе из космоса [1],

показали, что в этом случае имеет место избыток линий поглощения L_α — число поглотителей N_c при $z < 0.15$ на порядок превосходит ожидаемое по экстраполяции зависимости $N_c(z)$, найденной по далеким квазарам. Такое богатство L_α -леса может быть объяснено как следствие резкого падения потока УФ излучения от квазаров при $z < 2$ [2]. Степень ионизации водорода решающим образом сказывается на образовании наблюдаемых линий поглощения, и чтобы линия стала видимой, значение N_{HI} должно превышать 10^{12} см^{-2} . Возрастание потока ионизирующего излучения приводит к уменьшению концентрации нейтрального водорода. По указанной причине пространственная концентрация поглотителей при $z > 1.5$, принимавшаяся до сих пор, может быть заниженной.

Что касается физической природы поглотителей, то необходимо заметить, что присутствие у многих галактик очень обширных гало, состоящих из водорода, подтверждается наблюдениями — в ряде случаев масса гало превышает массу звездной составляющей. Такие гало могут служить поглотителями, однако предположение о газовых облаках как основном факторе, образующем L_α -лес, кажется более предпочтительным. Следует отметить, что облака, состоящие из нейтрального водорода и имеющие массы, сравнимые с массами галактик, в ряде случаев непосредственно наблюдаются в межгалактическом пространстве. Существует множество нерешенных проблем, касающихся устойчивости межгалактических облаков, их эволюции и т.п., но здесь мы не будем на них останавливаться, поскольку имеются многочисленные обзоры, посвященные этим вопросам.

Оценки лучевой концентрации в облаках по наблюдательным данным привели к выводу, что величина N_{HI} находится в интервале $10^{12} \leq N_{HI} \leq 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Температура, найденная по ширине абсорбционных линий, лежит в пределах $2 \cdot 10^4 \leq T \leq 5 \cdot 10^4 \text{ К}$. Здесь уместно заметить, что для облака, состоящего из отдельных сгустков, или для вращающегося облака ширина линии может быть частично обусловлена макроскопическими движениями, и тогда указанные значения температуры должны быть скорректированы. Различные оценки размера облаков d привели к значениям $10 \text{ кпк} \leq d \leq 100 \text{ кпк}$.

Чтобы найти массу облака, необходимо знать состояние ионизации водорода в нем. Вычисления степени ионизации газа в облаках производились многими авторами (например, [3]) при предположениях об ионизационно-рекомбинационном равновесии и об однородности облака. Обычно принимается также, что поток УФ ионизирующего излучения обеспечивается квазарами. Эти расчеты показали, что

$$10^{-6} \leq \frac{n_{HI}}{n} \leq 10^{-5},$$

и при указанных выше значениях d и $N_{HI} \approx n_{HI} d$ массы сферических облаков находятся в интервале

$$10^6 \leq \frac{m_{cl}}{m_{\odot}} \leq 10^9.$$

Хотя упомянутые выше предположения не всегда могут оправдываться, вывод о том, что в большинстве случаев массы облаков, создающих L_{α} -лес, того же порядка, что и массы карликовых галактик, представляется обоснованным. Принимая во внимание наблюдаемую пространственную плотность облаков можно также заключить, что полная масса газа в облаках сравнима с полной массой содержащихся в галактиках звезд.

2. *Взаимодействие облаков и его возможные следствия.* Пространственные скорости облаков вряд ли могут превосходить среднюю скорость движения галактик и поэтому должны быть порядка нескольких сотен км/с. Столкновения облаков должны происходить часто — в среднем интервал между столкновениями около 10^7 лет. Если при столкновениях достаточно часто происходит слияние сталкивающихся облаков, то первоначальный спектр масс облаков должен видоизменяться — облака будут в среднем становиться более массивными.

Скорость увеличения массы облака $m_1(t)$, имеющего скорость $v_1(t)$, в предположении, что остальные облака неподвижны, оценивается из выражения

$$dm_1(t) = \left[\int_{m_0}^{m_{\max}} \sigma(m; m_1) \cdot n n_c(m, t) dm \right] v_1(t) dt, \quad (1)$$

где $\sigma(m; m_1)$ — сечение столкновения, $n(m; t)$ — пространственная плотность (концентрация) облаков с массой m , m_0 и $m_{\max}$ — нижняя и верхняя границы спектра масс соответственно. Для однородных по плотности сферических облаков геометрическое сечение (при лобовом столкновении)

$$\sigma(m_1; m) = \pi R_1^2 \left(\frac{m}{m_1} \right)^{2/3}, \quad (2)$$

и поэтому вместо (1) можно записать

$$dm_1(t) = \pi \langle R_1^2 \rangle \left\langle \left(\frac{m}{m_1} \right)^{2/3} \right\rangle \langle \rho_c \rangle v_1(t) dt, \quad (3)$$

где через $\langle \rho_c \rangle$ обозначена средняя ("распределенная") плотность ансамбля облаков

$$\langle \rho_c \rangle = \int_{m_0}^{m_{\max}} m n_c(m, t) dm.$$

Процесс роста массы облака описывается соотношением (3) лишь очень приближенно, поскольку не учитываются гравитационные столкновения и кинематика "полевых частиц". Тем не менее это выражение пригодно для оценки эффективности взаимодействий облаков в ходе эволюции спектра масс. Принимая, например, что при

$$t = 0, \quad m_1 = 10^6 \mu r_{\odot}, \quad v_1 = 10^7 \text{ см с}^{-1}, \quad R_1 = 10^{22} \text{ см},$$

$$\left\langle \frac{m}{m_1} \right\rangle^{2/3} = 10 \quad \text{и} \quad \langle \rho_c \rangle = 10^{-30} \text{ г см}^{-3}$$

получаем, что при $t = 10^9$ лет $m_1 \approx 10^8 \mu r_{\odot}$, то есть масса облака возрастает на два порядка. Таким образом, процесс столкновения облаков является эффективным фактором, приводящим за время, меньшее хаббловского, к образованию значительно более массивных облаков, чем имевшиеся вначале. Этот вывод подтверждается и более точными расчетами.

Плотность в облаке в результате его столкновения с другим облаком должна увеличиваться вследствие сжатия газа ударной волной и его охлаждения путем излучения из-за фронта. Кроме того, гравитационная неустойчивость может приводить к уплотнению центральной части облака. В этих условиях степень ионизации водорода должна падать. Как известно, когда N_{HI} достигает критического значения $\approx 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$, должно начинаться звездообразование [4]. Таким образом, на достаточно поздней стадии эволюции системы межгалактических облаков становится возможным образование галактик. В то же время образующиеся молодые галактики должны обладать обширными гало, состоящим из первичного газа без тяжелых элементов. Предлагаемый сценарий образования галактик близок к высказывавшейся ранее [5] гипотезе о формировании протогалактик как процессе агрегации газовых облаков. При этом механизм агрегации не конкретизировался.

3. *О расчете эволюции системы облаков.* Изучение эволюции системы частиц, которые способны "слипаться" (коагулирующих), производится путем решения уравнения Смолуховского, которое может быть записано в следующей форме:

$$\frac{\partial n(m;t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^m K(m', m-m', t) n(m', t) n(m-m', t) dm' - \\ - n(m, t) \int_0^\infty K(m, m', t) n(m', t) dm', \quad (4)$$

где $n(m, t)$ — число частиц, имеющих массу m в момент t , $K(m, m', t)$ — величина, характеризующая вероятность слипания двух частиц с массой m и m' соответственно. Система предполагается однородной в пространстве и поэтому можно за $n(m, t)$ принимать не полное число частиц, а их количество в единичном объеме.

Для рассматриваемой задачи об эволюции системы облаков уравнение Смолюховского нужно записать в несколько ином виде:

$$\frac{\partial n(m;t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_{m_{\min}}^m K(m', m-m', t) n_c(m', t) n_c(m-m', t) dm' - \\ - n_c(m, t) \int_{m_{\min}}^{m_{\max}-m} K(m, m', t) n_c(m', t) dm' - Q(m; t) \quad (5)$$

В (5) учитывается возможность преобразования облака, превосходящего по массе $m_{\max}$, в галактику, и "сток" облаков из системы в другую фазу (галактики) учитывается величиной $Q(m, t)$.

Попытка решения проблемы эволюции спектра масс для системы газовых облаков была предпринята в работе [6]. При этом использовалось уравнение Смолюховского в модифицированной форме, предложенной в [7], и учитывалось разрушение облаков при достижении ими критической массы, поскольку рассматривались межзвездные облака в Галактике. Был определен зависящий от времени спектр масс. Вследствие слияния облаков спектр со временем смещается в сторону больших масс. При решении задачи был сделан ряд очень грубых предположений, в частности, величина $\langle \rho_c \rangle$ принималась постоянной. Однако качественный характер изменения спектра отражается достаточно правдоподобно.

Решение уравнения (5) в аналитической форме затруднительно. Численное же решение сильно облегчается, если аппроксимировать распределение облаков по массам ступенчатой функцией. В этом случае уравнение (5) заменяется системой дифференциальных уравнений первого порядка, для решения которой на ЭВМ нетрудно использовать известные алгоритмы. Пусть ансамбль вначале состоит из облаков, имеющих массы, равные $k m_0$ ($k = 1, 2, \dots, N$). Если

количество облаков с массой km_o равно Y_k , то изменение со временем описывается уравнением

$$\frac{dY_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} K_{i,k-i} Y_i Y_{k-i} - \sum_{i=1}^N K_{i,k} Y_i Y_k \quad (6)$$

и для облаков наименьшей массы

$$\frac{dY_1}{dt} = - \sum_{i=1}^N K_{1,i} Y_1 Y_i . \quad (7)$$

Облако, достигшее массы, превышающей $m_{\max}$, превращается в галактику и поэтому теряется системой. Поскольку имеет место очевидное соотношение

$$\sum_{i=1}^N K_{ik} Y_i Y_k = \sum_{i=1}^{N-k} K_{ik} Y_i Y_k + \sum_{i=N-k+1}^N K_{ik} Y_i Y_k , \quad (8)$$

то число облаков, теряемых системой, получается путем суммирования

$$\sum_{k=1}^N Q(km_o, t) = \sum_{k=1}^N \left\{ \sum_{i=N-k+1}^N K_{ik} Y_i Y_k \right\} .$$

Если обозначить количество галактик, образовавшихся к моменту t , через X , то для скорости рождения галактик имеем уравнение:

$$\frac{dX}{dt} = \sum_{k=1}^N \left\{ \sum_{i=N-k+1}^N K_{ik} Y_i Y_k \right\} . \quad (9)$$

Нетрудно получить из приведенных соотношений и спектр масс образующихся указанным путем галактик. Заметим, что взаимодействия облаков с вновь образованными галактиками в (6) и (7) не учитывается.

Коэффициенты K_{ik} зависят от соответствующих эффективных сечений для процесса столкновения облаков и относительной скорости движения их. Результаты расчетов этих коэффициентов, выполненных при учете как контактных, так и гравитационных взаимодействий, имеются в форме таблиц и, как оказалось, достаточно хорошо аппроксимируются для сферических облаков анали-

тическими выражениями. Предварительные результаты расчетов эволюции ансамбля облаков, произведенные с использованием вычисленных коэффициентов по указанной методике, показали ее эффективность. Полные результаты расчетов как для систем межзвездных облаков, так и для систем, образующих L_α -лес, будут приведены позже в отдельной статье.

4. *Заключение.* Имеется три типа объектов, у которых наблюдается очень малое содержание тяжелых элементов ($Z \leq 10^{-2}$):

1. Межгалактические облака, образующие L_α -лес в спектрах квазаров.
2. Газ в некоторых нерегулярных галактиках (т.н. "изолированных НII-областях).
3. Протяженные газовые гало у некоторых карликовых галактик (например, DDO 170).

Можно полагать, что эти объекты представляют различные стадии процесса образования галактик из предгалактической среды. На этот процесс должны оказывать сильное влияние внешние условия, в частности, величина потока ионизирующего водород излучения. Эти условия в различных областях пространства могут быть различными, и поэтому не одинаковой должна быть и скорость образования галактик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований РФ (Проект 93-02-2957).

Санкт-Петербургский государственный университет

ON THE EVOLUTION OF THE INTERGALACTIC CLOUDS SYSTEM

V.G.GORBATSKY

The presence of " L_α -forest" in spectra of QSO is taken as the evidence of a clumpy structure of intergalactic medium. The masses of clumps ("clouds") must grow due to their coalescence. When the column density of neutral hydrogen in cloud reaches its critical value the star formation is ensued and the cloud transforms in galaxy. Some physical properties of clouds are considered shortly and a new approach to investigation of the clouds system evolution is proposed.

ЛИТЕРАТУРА

1. *S.J.Morris, R.J.Weyman, B.D.Savage, R.L.Gilliland, Astrophys.J.*, 377, L 21, 1991.
2. *S.Ikeuchi, E.L.Turner, Astrophys.J.*, 381, L 1, 1992.
3. *Ph.Maloney, Astrophys.J.*, 398, L 89, 1992.
4. *И.Г.Колесник, Phys. Processes in Fragmentation and Star Formation, Eds.R.Caputto-Dolcetti et al., Kluwer Acad.Press. 1990, p.187.*
5. *R.B.Larson, Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 102, N653, 790, 1990.
6. *А.Г.Буткевич, Вестник ЛГУ, сер.1, N2,89, 1989.*
7. *J.Kwan, Astrophys.J.*, 229, 567, 1979.