

УДК 524.86

ХИМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОСТ-РЕИОНИЗАЦИОННОЙ ВСЕЛЕННОЙ

© 2009 Е. О. Васильев^{1*}, С. Ю. Дедиков^{2**}, Ю. А. Щекинов^{2,3***}

¹НИИ Физики, Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

²Физический факультет, Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 3 апреля 2009 г.; принята в печать 28 мая 2009 г.

Исследуются статистические характеристики пространственного распределения металлов в межгалактической среде на начальных этапах ее обогащения в условиях, когда перемешивание определяется неустойчивостями Кельвина-Гельмгольца и Релея-Тейлора. Насыщение неустойчивостей, обусловленное затуханием относительных движений газовых потоков, приводит к неполному перемешиванию, так что на малых масштабах выделяются области с высокой (практически начальной) металличностью. Сравнение с наблюдательными данными показывает, что в “пост-реионизационной” Вселенной ($z < 5$) характер неоднородности распределения металлов проявляет черты, присущие перемешиванию с насыщением гидродинамических неустойчивостей.

Ключевые слова: галактики, группы и скопления галактик, межгалактический газ

1. ВВЕДЕНИЕ

По завершении процесса реионизации во Вселенной ($z \leq 5$) межгалактический газ оказывается обогащен металлами до уровня $[Z] \sim -3$, практически постоянного во всем интервале красных смещений, доступных для наблюдений в оптике $z = 2 - 5$ [1]. Последнее обстоятельство, независимость металличности межгалактической среды (МГС) от красного смещения, не укладывалось в обычные схемы обогащения МГС металлами, предсказывавшими в среднем увеличение $[Z]$ по мере увеличения возраста Вселенной [2, 3]. В качестве возможного объяснения в [4] было высказано предположение, что обогащение МГС было связано с первичным эпизодом звездного нуклеосинтеза при $z \sim 10$ в маломассивных гало темной материи ($M \sim 10^9 M_\odot$) со столь высокой скоростью звездообразования, которая бы обеспечила перекрывание (пересечение) обогащенных областей вокруг отдельных галактик по всему объему Вселенной. В такой модели независимость $[Z]$ от красного смещения является следствием того, что активность сверхновых при последующих эпизодах звездного нуклеосинтеза ограничена достаточно близкой окрестностью родительских галактик,

так что металлы не попадают в межгалактическую среду. В последние годы появились как наблюдательные данные, так и теоретические аргументы, которые допускают другую интерпретацию инвариантности $[Z]$.

В работе [5] на основе двумерного численного моделирования было показано, что перемешивание металлов в межгалактической среде, связанное с действием неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Релея-Тейлора, всегда ограничено и оставляет распределение металлов крайне неоднородным. При этом области с высоким содержанием металлов имеют всегда меньшие пространственные размеры [5, Рис. 2(b)], вследствие чего их трудно детектировать. Это позволило предположить, что в измерениях систематически недооценивается содержание тяжелых элементов в МГС, что в принципе может привести к видимой независимости $[Z]$ от красного смещения. Прямые указания на такого рода недооценку приведены уже в первых работах по определению металличности межгалактической среды [1]. В самом деле, металличность, определенная для систем поглощения линии $\text{Ly}\alpha$ в спектрах квазаров (так называемых $\text{Ly}\alpha$ -систем) в интервале значений количества атомов нейтрального водорода на луче зрения $12 < \lg N(\text{HI}) < 15$ оказывается на порядок больше той, которая получается, если ограничиться промежуточным интервалом $13 < \lg N(\text{HI}) < 14$. Более того, из-за быстрого уменьшения количества

*E-mail: eugstar@mail.ru

**E-mail: svside@mail.ru

***E-mail: yus@sffedu.ru

$L\alpha$ -систем с увеличением $N(\text{HI})$ и $N(\text{CIV})$: $\propto [N(\text{HI})]^{-1.4}$ и $\propto [N(\text{CIV})]^{-1.6}$ можно предположить, что основная потеря металличности связана с отбрасыванием систем с низкими концентрациями $\lg N(\text{HI}) = 12 - 13$.

Более поздние высокочувствительные наблюдения спектров поглощения нескольких квазаров [6] подтвердили характер распределения металличности, обнаруженный в численных расчетах, а именно: области с высокой металличностью имеют меньшие характерные размеры. Безусловно, что зависимость величины металличности от размера обогащенной области имеет фундаментальное значение и требует детального изучения. В настоящей работе мы покажем, что она является универсальной при перемешивании вследствие действия неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и обсудим ее следствия для интерпретации наблюдений металличности в МГС.

2. НАСЫЩЕНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Обогащение межгалактической среды металлами всегда связано с выбросами переработанного звездным нуклеосинтезом газа из галактик, и поэтому так или иначе с относительным движением химически неоднородных течений. К таковым могут относиться собственно выбросы обогащенных фрагментов газа из галактик в МГС, или потеря вещества газовых гало галактик при их движении сквозь МГС. При этом перемешивание, т.е. перераспределение металлов по большим объемам межгалактического вещества, осуществляется развитием нерегулярных движений в потоках, связанных с неустойчивостями Кельвина-Гельмгольца (КГ) и Релея-Тейлора (РТ).

Неустойчивость КГ развивается на тангенциальных разрывах, т.е. на поверхностях, разделяющих потоки с различными скоростями. Характерный инкремент неустойчивости КГ

$$\gamma_{\text{КГ}} = \frac{kv_r}{\chi^{1/2}}, \quad (1)$$

где k — волновой вектор возмущения поверхности раздела течений, v_r — относительная скорость течений по обе стороны границы раздела, $\chi = \rho_s/\rho_i$ — контраст плотности, т.е. отношение плотности в обогащенном газе к плотности МГС, как правило, $\chi > 1$. Легко видеть отсюда, что коротковолновые возмущения развиваются быстрее. Однако, как впервые показано в работе [7], при движении сферического (как обычно предполагается) облака сквозь межоблачный газ развитие неустойчивости КГ начинается с длины волны, сравнимой с радиусом облака, вследствие присутствия этого выделенного масштаба в начальной

конфигурации. Последующее развитие неустойчивости сопровождается дроблением масштабов вихревых возмущений, однако в конце процесса дробления достигаются масштабы лишь в конечное число раз меньшие начального радиуса облака [8]. Время развития неустойчивости КГ при движении обогащенного фрагмента газа в МГС (или при обдирании газового гало галактики) составляет $t_{\text{КГ}} \sim \chi^{1/2}R/v_r$, R — радиус фрагмента (гало). Очевидно, что неустойчивость КГ развивается ограниченное время, равное времени торможения фрагмента в МГС, после чего прекращается из-за того, что прекращается относительное движение: $v_r \rightarrow 0$. При этом время неустойчивости КГ оказывается лишь немногим короче времени торможения. В самом деле, легко показать, что характерное время торможения облака вследствие захвата межоблачного газа составляет $t_d \sim \chi R/v_r$, т.е. $t_d \sim \chi^{1/2}t_{\text{КГ}}$. Иными словами, даже для сравнительно контрастных течений с $\chi \sim 100$ время торможения оказывается лишь на порядок больше времени неустойчивости КГ. В действительности различие этих времен еще меньше из-за того, что по мере разрушения фрагмента его плотность и, следовательно, величина $\chi^{1/2}$ уменьшаются. В любом случае перемешивание, обусловленное неустойчивостью КГ, ограничено временем t_d , после чего процесс стабилизируется — достигается насыщение.

По той же причине — затухание относительных движений — происходит насыщение перемешивания, связанного с неустойчивостью РТ. Ее инкремент при больших контрастах плотности равен

$$\gamma_{\text{РТ}} \sim \sqrt{kg}, \quad (2)$$

где g — ускорение, обусловленное торможением обогащенного фрагмента. По порядку величины $g \sim v_r/t_d \sim \chi^{-1}v_r^2/R$. С учетом того, что при неустойчивости РТ быстрее всего развивается мода с $k \sim R^{-1}$, характерное время неустойчивости $t_{\text{РТ}} \sim t_{\text{КГ}}$. Очевидно, неустойчивость РТ развивается до тех пор, пока g отлично от нуля, т.е. пока есть относительное движение. При торможении фрагмента $g \rightarrow 0$, $t_{\text{РТ}} \rightarrow \infty$.

Из сказанного ясно, что процесс перемешивания химических неоднородностей в межгалактической среде всегда ограничен в том смысле, что по достижении определенного уровня их перераспределения по все возрастающей массе, перемешивание практически прекращается. В этом состоит принципиальное отличие характера перемешивания в межгалактической среде от такового в межзвездной среде, где каждый элемент газа испытывает многократное воздействие со стороны ударных волн, и поэтому временное насыщение

вследствие затухания относительных движений потоков сменяется следующим периодом перемешивания после очередного ударного возмущения [9]. Таким образом, естественным состоянием межгалактической среды является ее химическая неоднородность. Вопрос лишь в характере неоднородности, в ее статистических характеристиках.

В настоящей работе мы анализируем статистические характеристики перемешивания металлов в системе, идентичной рассмотренной в работе [5]: обогащенное металлами газовое облако, имитирующее протяженное газовое гало галактики, движется в межоблачном (межгалактическом) газе и за счет обдирания теряет массу (и металлы). Как и в [5] предполагается, что в начальном состоянии облако находится в динамическом равновесии с межгалактическим газом — это обеспечивается следующим выбором температуры и плотности для облака и межоблачного газа: радиус обогащенного гало $R_h = 31$ кпк, концентрация газа в нем $n_h = 4.4 \times 10^{-4} \text{ см}^{-3}$, температура $T_h = 10^4 \text{ К}$, концентрация межоблачного (межгалактического) газа $n_i = 4.4 \times 10^{-6} \text{ см}^{-3}$, температура $T_i = 10^6 \text{ К}$. Межгалактический газ движется относительно гало со скоростью $v_i = 100 \text{ км/с}$ в направлении z . Как и в [5], в настоящей работе мы не учитываем эффекты гравитации — такое приближение заведомо оправдано для галактик с массами $M_g \sim 10^9 - 10^{10} M_\odot$, с активностью которых связывается начальное обогащение Вселенной (см., например, [8, 9]). Такая постановка задачи позволяет существенно сократить вычислительное время и вместе с тем выявить основные черты динамики перемешивания. Включение гравитации и самогравитации в расчеты приведет, по-видимому, к уменьшению эффективности перемешивания из-за фокусировки движений (см. обсуждение в [5]). Не вполне реалистичный выбор температур в гало и в межгалактической среде — в определенном смысле обратный тому, который имеет место в действительности — обусловлен необходимостью стабилизировать начальное состояние численной модели. Следует однако отметить, что динамика перемешивания в существенно большей степени определяется соотношением плотностей, нежели температурами, поэтому полученные в таком приближении результаты отражают действительную картину не только качественно, но и количественно.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО МАСШТАБАМ

При развитии неустойчивости КГ на границе раздела течений генерируются вихревые структуры, которые впоследствии практически изолируются и формируют собственный поток в межоблачном газе. Каждая такая структура подвержена продолжающемуся действию неустойчивости КГ

из-за того, что разрывы скоростей или сдвиговые течения (градиенты скорости в поперечном потоку направлении) как поступательной, так и вращательной составляющих течений некоторое время сохраняются. В результате возмущенная область оказывается заполненной каскадом вихревых структур, ограниченных по масштабам снизу вследствие насыщения неустойчивости КГ (Рис. 1). Длинноволновая часть спектра нерегулярного течения во всей возмущенной области перераспределяет этот каскад вихрей по все возрастающему объему, охватывающему все возрастающую массу. Поэтому металличность газа, измеренная по всему охваченному каскадом объему оказывается меньше начальной металличности в каждой вихревой структуре. Вместе с тем, в отсутствии диссипативных процессов (молекулярной диффузии) при локализации каждой, даже минимальной, структуры каскада мы с необходимостью встречаем область с начальной металличностью, так что область, содержащая такую структуру будет характеризоваться сильной неоднородностью химического состава. В численной реализации искусственные диссипативные процессы могут становиться существенными на масштабах, сравнимых с пространственным разрешением, заданного в модели. В наших моделях мы достигали минимального пространственного разрешения 50 пк.

В реальной межгалактической среде минимальный масштаб структуры, сохраняющей свою химическую индивидуальность, определяется действием диффузии, если только она не подавлена магнитным полем. При дроблении вихревой структуры до масштаба L характерное время ее фрагментации в последующих каскадах имеет порядок L/v , в то время как диффузионное время составляет L^2/D , где D — коэффициент кинетической (нетурбулентной) диффузии. Химическая индивидуальность структуры сохраняется, если $L/v < L^2/D$, откуда минимальный масштаб $L \sim D/v$. Принимая для коэффициента диффузии значение $D \sim 10^{27} \text{ см}^2/\text{с}$ (соответствующее кулоновскому сечению $\sigma \sim 10^{-18} \text{ см}^2$ в полностью ионизованном газе с температурой $T \sim 10^4 \text{ К}$, концентрации газа $n \sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ и тепловой скорости $v_T \sim 10 \text{ км/с}$), а для характерной скорости вихревых движений в каскаде $v \sim 10 \text{ км/с}$ [5], найдем $L \sim 300 \text{ пк}$, что сравнимо с пространственным разрешением в наших моделях. Это позволяет надеяться, что наши модели правильно отражают характер перемешивания в межгалактической среде как в качественном, так и в количественном отношениях.

В условиях неполного перемешивания пространственное распределение металлов описывается поверхностью $Z(\mathbf{r})$, которая в нашей

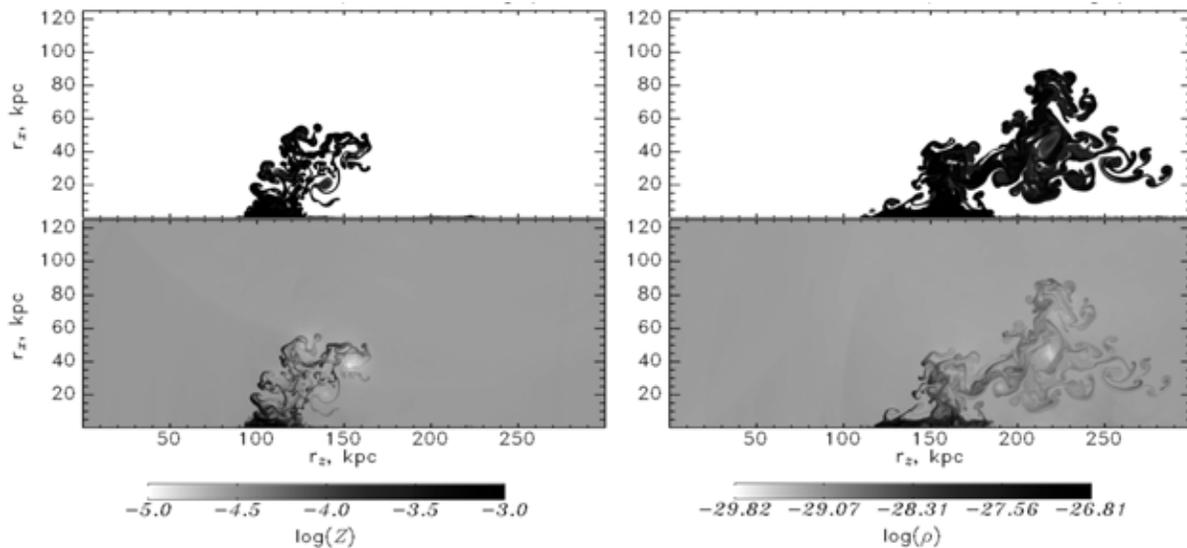


Рис. 1. Карты распределения металличности и плотности (верхняя и нижняя панели) для двух моментов времени: 1.27 (слева) и 2.54 млрд. лет (справа); шкала для металличности — внизу слева, шкала для плотности — внизу справа. Отчетливо видно развитие вихревых структур, обеспечивающих перемешивание.

двумерной осесимметричной модели имеет вид $Z(r_z, r_x)$, где r_z — пространственная переменная вдоль обтекающего потока, r_x — радиальная, перпендикулярная обтекающему потоку. Функция $Z(r_z, r_x)$ характеризуется в общем случае локальными максимумами и минимумами и напоминает горный рельеф, как показано на Рис. 2, где схематически показан участок поверхности $Z(r_z, r_x)$. Пересечение этой поверхности плоскостью $Z_1 = \text{const} < \text{Sup}(Z)$, где $\text{Sup}(Z)$ — значение металличности в глобальном максимуме, будет срезать вершины локальных максимумов и выделять области с металличностью $Z > Z_1$. Очевидно, что характерный размер областей должен увеличиваться с уменьшением Z_1 . Иными словами, если $Z_2 < Z_1$, то $\langle L_2 \rangle > \langle L_1 \rangle$, где $\langle L_i \rangle$ — усредненный размер области с металличностью $Z > Z_i$ (см. правую панель на Рис. 2).

Таким образом, в общем случае при неполном перемешивании независимо от его механизма следует ожидать, что металличность будет уменьшаться с увеличением характерного размера охватываемой области. Можно ожидать, что распределение $Z(L)$, соответствующее насыщению, будет иметь универсальный характер, коль скоро перемешивание обеспечивается в нашем случае в основном двумя неустойчивостями. Однако распределения, соответствующие ранним стадиям перемешивания будут, по-видимому, отражать особенности динамики обогащенного газа. Это утверждение подтверждается численными расчетами.

4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из наиболее эффективных механизмов выноса обогащенного металлами газа из галактик в межгалактическую среду является потеря вещества протяженных газовых гало галактик при их движении сквозь окружающий газ. Ниже мы приводим результаты именно для такого механизма. Численная модель, используемая нами для анализа процесса перемешивания, детально описана в [5], здесь мы даем лишь ее основные характеристики: галактика с протяженным ($R = 10$ кпк) газовым гало, заполненным обогащенным газом движется сквозь окружающий межгалактический газ с околозвуковой скоростью. В примерах, приведенных ниже, эта скорость равна 100 км/с; температура и плотность газа в гало и в МГС выбирались такими, чтобы в невозмущенном состоянии между ними существовало динамическое равновесие $p_h = p_i$, здесь p_h, p_i газовое давление в гало и в МГС. Следует подчеркнуть, что в реальной ситуации такое предположение заведомо несправедливо — давление межгалактического газа меньше давления в гало. Однако наше предположение не изменяет картины перемешивания и позволяет понять основные особенности его динамики без возможного усложнения картины, неизбежного при учете реального распределения давления, влияния внешней гравитации и самогравитации, возможного расширения гало и др.

При перемешивании металлов одной из основных характеристик эффективности процесса является распределение металличности по масштабам неоднородностей. Применим следующую методику расчета распределения металлов: поверхность

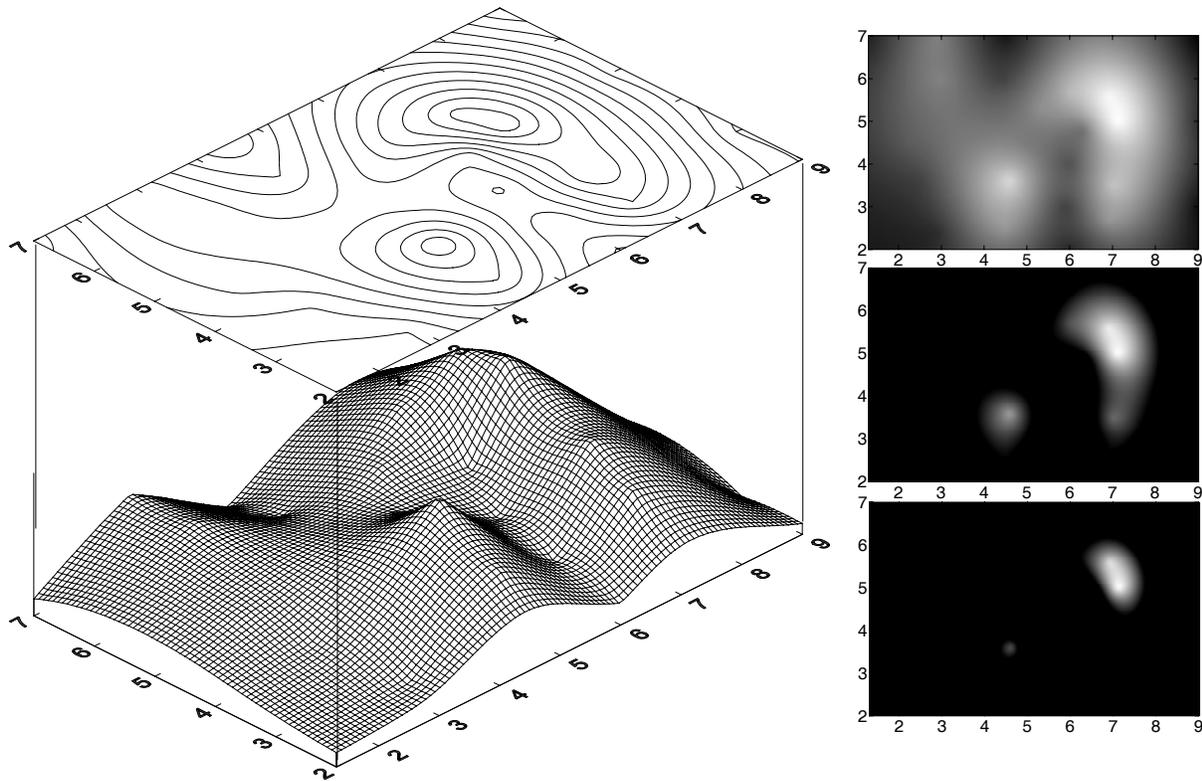


Рис. 2. Схема участка поверхности распределения $Z(r_z, r_x)$ (слева внизу) и соответствующих изолиний металличности (слева вверху); справа градацией серого показаны распределения металличности $[Z]$ для все возрастающего (сверху вниз) значения $[Z]$. Легко видеть, что области с наибольшей металличностью имеют наименьшие размеры.

$Z(r_z, r_x)$ пересекается плоскостью, параллельной (r_z, r_x) и соответствующей фиксированному уровню металличности Z , при этом выделяются области, в которых металличность превышает заданное значение Z — это видно на Рис. 2 (верхний рисунок слева), где на плоскости (r_z, r_x) показаны изолинии металличности. Понятно, что выделяемые области будут иметь иррегулярную структуру, однако, в дальнейшем мы будем говорить о линейном размере области $L = \sqrt{S}$, где S — площадь каждой из областей. На Рис. 3 мы приводим распределение областей с металличностью выше величины Z по размеру L в момент времени 1.27 млрд. лет, на Рис. 4 — то же самое для момента времени 2.54 млрд. лет. Как и следовало ожидать, на временах, сравнимых с временем развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца $t_{\text{КГ}} \sim \chi^{1/2} R/v_r$, равного в нашем случае 10^9 лет, металличность распределяется по иерархии масштабов (связанных с вихревыми структурами), оставаясь низкой на больших масштабах и сохраняя первоначальное значение на нижнем пределе масштабов возникающих вихревых структур. Вообще говоря, каждому значению металличности соответствует набор масштабов вихревых структур, однако средний масштаб

(показанный на Рис. 3 и 4 сплошными ромбиками) уменьшается с увеличением металличности. На меньших временах (1.27 млрд. лет) хаотические движения в возмущенном потоке неразвиты, так что полное число деталей, которые можно было бы идентифицировать как фрагменты, невелико. Вместе с тем, заметно преобладание крупномасштабных структур, сравнимых с начальным радиусом газового гало — отражением этому является крутая зависимость $Z(L)$. По мере развития хаотической составляющей течения и дробления потока на мелкомасштабные вихревые структуры полное число фрагментов увеличивается. Однако их доля в общем количестве вихревых структур хотя и увеличивается, но остается небольшой вследствие того, что число крупных фрагментов продолжает расти (см. нижнюю часть Рис. 3 и 4). Следствием этого является незначительное по сравнению с предыдущими стадиями выполаживание зависимости $Z(L)$, которая, однако, остается все еще достаточно крутой, что связано с насыщением неустойчивостей КГ и РТ.

Для металличности выше $[Z] \gtrsim -4$ при $t \gtrsim 2$ млрд. лет она оказывается близкой к степенной $Z \propto L^{-2/3}$. Области с меньшей металличностью, вероятно, участвуют только в крупномасштабных

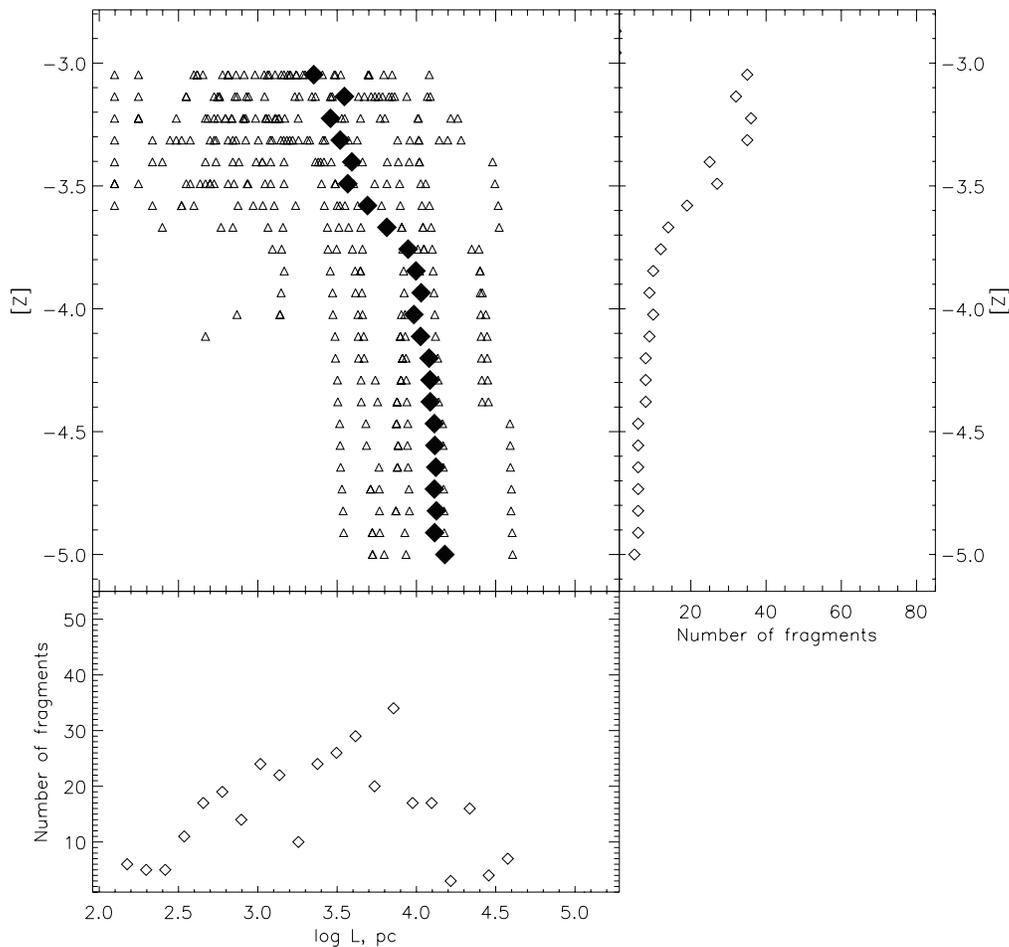


Рис. 3. Левая верхняя панель: распределение областей с металличностью выше величины Z по размеру L (незаполненные треугольники), усредненное по металличности распределение областей (заполненные ромбики) в момент времени 1.27 млрд. лет. Правая панель: распределение числа фрагментов по металличности. Левая нижняя панель: распределение числа фрагментов по размеру.

течениях, поэтому средний масштаб остаётся независимым от металличности. Обращает на себя внимание следующее обстоятельство: из-за насыщения неустойчивостей и функции распределения фрагментов по размерам, вклад в полное сечение наиболее металлических фрагментов малых размеров ($L < 1$ кпк) составляет лишь около 1%. Вследствие этого при наблюдении спектров поглощения квазаров вклад таких фрагментов может не учитываться, что приводит к недооценке полной массы металлов, сосредоточенной в них.

Очевидно, что со временем металлы распространяются на все больший объём: вихревые структуры с одной стороны дробятся на малых, а с другой формируются на больших масштабах. На правых панелях Рис. 3, 4 представлены распределения количества областей по металличности $N(Z)$. Хорошо видно, что число областей с

металличностью $[Z] \gtrsim -4$ растёт со временем, в то время как для меньших значений остаётся практически неизменным. Если первое свидетельствует о процессах дробления вихревых структур с высокой металличностью, то второе — об участии мало-металлического газа в крупномасштабных течениях, вообще говоря, близких к ламинарным. На поздних временах, $t \gtrsim 1.5$ млрд. лет, число наиболее высокометаллических ($[Z] \sim -3$) областей остаётся в пределах $N \simeq 20 - 40$. Примерно в это же время число фрагментов с металличностью близкой к -3.3 начинает быстро расти, $N \sim t^{3/2}$, при этом зависимость числа областей от металличности в интервале значений $[Z] = (-3.3, -4)$ становится более крутой. Положение пика в районе $[Z] \simeq -3.3$ для $t \gtrsim 1.5$ млрд. лет остаётся почти неизменным в течение последующего миллиарда лет, что также

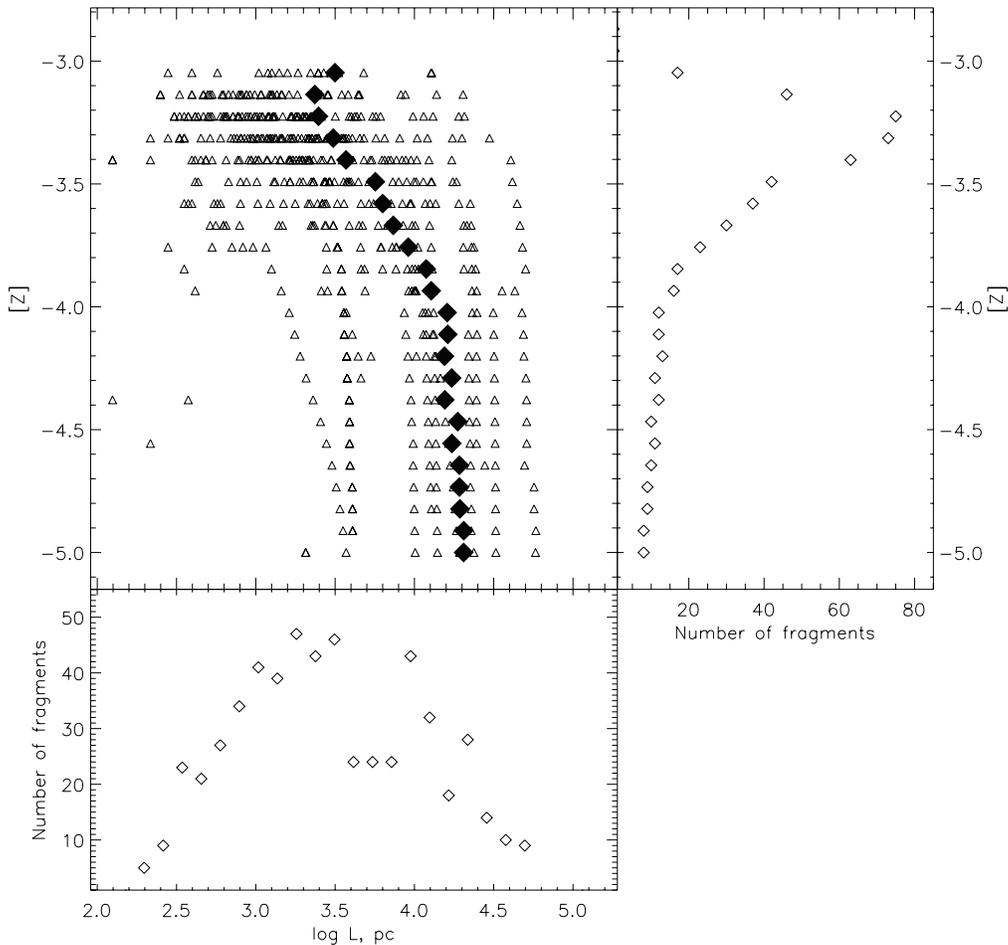


Рис. 4. То же, что на Рис. 3, для момента времени 2.54 млрд. лет.

является следствием насыщения неустойчивостей КГ и РТ.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Существенным свойством совокупности обогащенных металлами облаков, наблюдаемых в [6], является их нестабильность — они не могут удерживаться ни гравитационными силами, ни давлением окружающего газа. Характерное время их жизни оценивается величиной порядка 10^7 лет. С другой стороны, принимая во внимание их малые характерные размеры и сечения и высокую (близкую к 1) вероятность попадания на луч зрения, можно предположить, что они были чрезвычайно многочисленны на красных смещениях $z \sim 2$: их плотность порядка 10^4 Мпк^{-3} в сопутствующей системе, что в 10^6 раз превышает плотность всех наблюдаемых галактик со светимостью большей $0.1L_*$, [6]. Поэтому кажется естественным предположить, что богатые металлами облака из выбор-

ки [6] представляют собой фрагменты, образующиеся в результате дробления крупномасштабных потоков, окружающих отдельные галактики. Это может быть, например, галактический ветер, как это предлагается в [6], или поток, возникающий при обтекании крупномасштабного галактического гало межгалактическим газом, как предлагается в нашей модели [5]. В том и другом случае гидродинамические неустойчивости приводят к возникновению сравнительно короткоживущих структур, исчезновение которых вследствие расширения или дробления на более мелкие структуры восполняется в каждый данный момент продолжающимся развитием неустойчивостей крупномасштабного течения. Этот процесс характеризуется двумя временами: временем крупномасштабного течения, обеспечивающего поддержание квазистационарной картины — в приведенных выше примерах эта величина может составлять около 10^9 лет, и динамическим временем мелкомасштабных вихревых структур, возникающих вследствие неустойчиво-

стей. Вместе с тем, даже при разрушении мелко-масштабных структур, их диссипации или выравнивания по давлению с окружающим газом, они будут, по-видимому, сохранять свою химическую индивидуальность до тех пор, пока не придет в действие диффузионное перемешивание.

Следует подчеркнуть, что, хотя в настоящей работе мы привели результаты анализа распределения металлов при неполном перемешивании в процессе обдирания галактического газового гало натекающим на галактику межгалактическим газом, подобный же характер распределения будет устанавливаться и в том, например, случае, когда из активной галактики в МГС выбрасывается компактный сгусток обогащенного вещества. В этом случае отличия будут только в пространственных масштабах и характерных временах, которые зависят, в частности, от соотношения плотностей в обогащенных сгустках и в межоблачной (межгалактической) фазе.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы показали, что

- при неполном перемешивании металличность всегда уменьшается при увеличении размера выделенной структуры. Асимптотическое, соответствующее насыщению, распределение металличности по размерам имеет вид $Z \propto L^{-2/3}$ — это близко к распределению, обнаруженному в [6] по данным наблюдений. Таким образом, наблюдаемые распределения $Z(L)$ облаках $L\alpha$ -леса на $z \simeq 2$ несут черты перемешивания с насыщением;

- следствием полученного соотношения между металличностью и размером может быть потеря определенной доли металлов в спектрах поглощения квазаров;
- химические неоднородности в межгалактической среде могут сглаживаться на масштабах 300 пк, если только диффузия не подавлена магнитным полем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 06-02-16819 и № 08-02-91321) и Федерального агентства по образованию (коды проектов № РНП 2.1.1.3483 и 2.1.1/1937). Е.О.В. благодарен РФФИ за поддержку (проект № 08-02-90706).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Songaila, *Astrophys. J.* **561**, L153 (2001).
2. B. Nath, and N. Trentham, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **291**, 505 (1997).
3. A. Ferrara, M. Pettini, and Yu. A. Shchekinov, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **319**, 539 (2000).
4. P. Madau, A. Ferrara, and M. Rees, *Astrophys. J.* **555**, 92 (2001).
5. С. Ю. Дедиков, Ю. А. Щекинов, *Астрон. ж.* **81**, 11 (2004).
6. J. Schaye, R. F. Carswell, and T.-S. Kim, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **379**, 1169 (2007).
7. R. I. Klein, C. F. McKee, and P. Colella, *Astrophys. J.* **420**, 213, (1994).
8. Е. Е. Матвиенко и Ю. А. Щекинов, *Астрон. ж.* **84**, 128 (2007).
9. M. A. de Avillez and M.-M. Mac Low, *Astrophys. J.* **581**, 1047 (2002).

CHEMICAL INHOMOGENEITY OF THE POST-REIONIZATION UNIVERSE

E. O. Vasil'ev, S. Yu. Dedikov, Yu. A. Shchekinov

The statistical properties of the spatial distribution of metals in the intergalactic medium are analyzed during the initial stages of its enrichment, when mixing is determined by the Kelvin–Helmholtz and Rayleigh–Taylor instabilities. The saturation of instabilities due to the damping of relative motions of gaseous flows leads to incomplete mixing so that regions with high (i.e., close to the initial) metallicity show up on a small scale. A comparison with observational data shows that in the “post-reionization” Universe ($z < 5$) the irregularity of the metal distribution exhibits features characteristic of mixing with saturation of hydrodynamic instabilities.

Key words: *galaxies, galaxy groups and clusters, intergalactic gas*