

Письма в ЖЭТФ, том 10, стр. 394 – 398

20 октября 1969 г.

СЛЕДЫ "ФОТОННЫХ ВИХРЕЙ"

Л.М. Озерной

Согласно выдвинутой некоторое время назад гипотезе [1], в ранней Вселенной на фазе почти полной однородности существовали наложенные на общее космологическое расширение локальные динамические движения фотонного газа и увлекаемой им плазмы ("фотонные вихри"). Гидродинамика этой смеси в сочетании с гравитационной неустойчивостью с необходимостью определяет последующую структурность Все-

ленной. Ниже показано, что следствия гипотезы, относящиеся к спектрам скоростей и плотностей метагалактических структур, находят подтверждение в астрономических наблюдениях.

В ходе космологического расширения в первичных вихрях, предполагаемых первоначально дозвуковыми, устанавливается колмогоровский спектр скоростей:

$$v_k \propto k^{-\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

Интервал волновых чисел, где имеет место спектр (1), со стороны больших k ограничен диссипативными процессами (в основном, лучистой вязкостью). Границу со стороны малых k , которыми мы и будем интересоваться ниже, определяет требование малости гидродинамического времени t_g по сравнению с космологическим t_{exp} . Верхняя граница масштабов со спектром (1) составляет, в пересчете на сегодня, $30\Omega^{-1} \text{Млс}$, охватывая массу до $2 \cdot 10^{15} \Omega^{-2} M_\odot$ ($\Omega = \rho / \rho_{\text{крит}}$).

Неоднородности плотности, возникающие за счет гидродинамической неустойчивости в момент рекомбинации плазмы (при красном смещении $z_{\text{рекомб}} \sim 10^3$), существенно отличаются по амплитуде в зависимости от соотношения $t_g \leq t_{exp}$. В больших масштабах (нижний знак) они малы, а их Фурье-спектр имеет вид, характерный для малых знакопеременных возмущений в однородной изотропной среде [2]:

$$(\delta \rho / \rho)_k \propto k^2. \quad (2)$$

При $z < z_{\text{рекомб}}$ малые неоднородности растут (как z^{-1} вплоть до $z \sim \Omega^{-1}$) под действием гравитационной неустойчивости, которая, в зависимости от масштаба неоднородностей и величины Ω , приводит на сегодня к одной из двух возможностей.

I. Неоднородности остаются гравитационно несвязанными. В этом случае: а) Пространственная корреляция скоростей сохраняется неизменной ("замораживается") и не меняется начальный показатель спектра скоростей. б) Скорость внутренних движений не превосходит дифференциальную скорость космологического расширения в этом же масштабе. в) Показатель спектра неоднородностей плотности не меняется. г) Контраст плотности между неоднородностями и фоном остается сравнительно небольшим.

II. Неоднородности успевают стать гравитационно связанными. Определим условие обособления от фона в масштабе $R = 2\pi/k$ формаль-

ным требованием $(\delta \rho / \rho)_k = 1$. Пусть спектр неоднородностей плотности в момент рекомбинации есть $(\delta \rho / \rho)_k = \alpha k^x$ рекомб ($x > 0$). С учетом связи $k = k_{\text{рекомб}} (1+z)/(1+z_{\text{рекомб}})$ момент изоляции системы, в зависимости от ее масштаба, дается равенством $(1+z_{\text{изол}})^{x+1} = \alpha k^x (1+z_{\text{рекомб}})^{x+1}$. Итак, образование агломератов галактик начинается одновременно с процессом обособления самих галактик и завершается тем позже, чем больше масса скопления. Средняя плотность системы, достигаемая к моменту ее изоляции от фона,

$$\rho_{\text{изол}} \sim z_{\text{изол}}^3 \sim R^{-3x/(x+1)} \sim M^{-x}.$$

Аналогично, если спектр турбулентных скоростей на момент рекомбинации имел вид $v_k \sim k^y$ рекомб, то за счет гравитационного обособления он трансформируется к сегодняшнему моменту в спектр

$$v \sim R^{-y+x(y+\frac{1}{2})/(x+1)},$$

Следовательно, неоднородности, формирующие гравитационно замкнутые системы, отличаются от гравитационно не связанных в следующих существенных отношениях: а) спектр скоростей внутренних движений, при начальных спектрах (1), (2), переходит в

$$v \sim R^{4/9}, \quad (3)$$

б) среднеквадратичная скорость внутренних движений становится больше дифференциальной хаббловской, в) результирующий спектр неоднородностей, при начальном спектре (2), имеет вид

$$(\rho - \rho_0)/\rho_0 \sim R^{-2}, \quad (4)$$

т.е. сохраняется тем же, г) контраст по плотности между неоднородностями и фоном (средняя плотность которого ρ_0) становится значительным.

Таким образом, существование первичных вихревых движений во Вселенной приводит к следующим принципиальным следствиям: спектр пекулярных скоростей метагалактических структур должен расти с масштабом и иметь колмогоровский (0,33) или близкий к нему (0,44) показатель, а контраст плотности между структурами и фоном должен убывать обратно пропорционально квадрату размеров соответствующей структуры, вне зависимости от ее гравитационной связанности.

Мы предприняли поиски в скоплениях галактик указанных следов космологической турбулентности. На рис. 1 и 2 представлены взятые из [3]

средние по 143 системам галактик различной численности (87 пар, 11 тройных систем, 29 групп, 15 скоплений и 1 сверхскопление, т.е. скопление скоплений) значения диисперсии лучевых скоростей и плотности видимой материи в зависимости от средних эффективных радиусов систем. Обработка этих данных регрессионным анализом дает

$$\langle v^2 \rangle^{1/2} \sim R^{0.40 \pm 0.08}, \quad (\rho - \rho_0) / \rho_0 \sim R^{-(2.09 \pm 0.22)} \quad (5)$$

с коэффициентами корреляции, соответственно, 0,97 и 0,99. Доверительный интервал вычислен по уровню значимости 0,32, отвечающему методу наименьших квадратов.

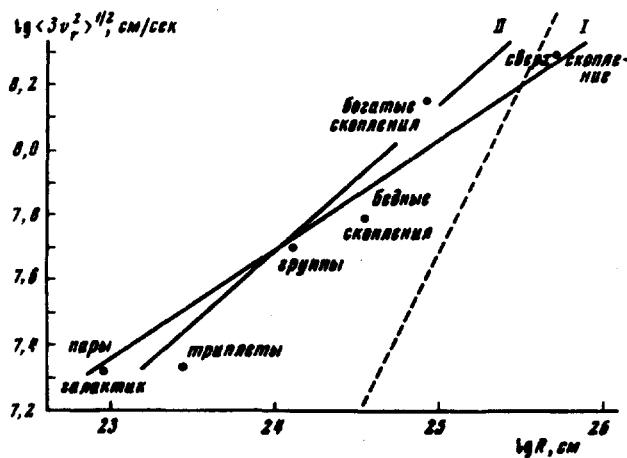


Рис. 1. Средние по выборке значения среднеквадратичной скорости внутренних движений в зависимости от эффективного радиуса систем галактик. Сплошными линиями показаны наклоны (1) и (2) ожидаемых спектров в крайних ситуациях I и II. Пунктир — дифференциальная хаббловская скорость

Соотношения (5) в пределах точности согласуются с ожидаемыми для обеих указанных выше возможностей I и II. Для выбора между ними достаточно принять во внимание, что ситуация I, как следует из данных рис. 1 и 2, противоречит невыполнение ее следствий б) и г). Ситуация II, напротив, во всех обсуждавшихся следствиях согласуется с наблюдениями для всех масштабов, кроме сверхскопления, для которого, во всяком случае, не выполнено следствие б). Поэтому можно заключить, что скопления галактик, в среднем, представляют собой гравитационно связанные системы, кроме наибольших масштабов типа сверхскоплений,

у которых дифференциальная хаббловская скорость погашена лишь частично. В таких больших масштабах "заморожен" как спектр, так и пространственная корреляция скоростей, что позволяет, в принципе, получить отсюда информацию о корреляционных свойствах первичных вихрей. В меньших масштабах следы этих свойств, вероятно, сохранились в несконденсированных облаках межгалактического газа, находящихся в ситуации I.

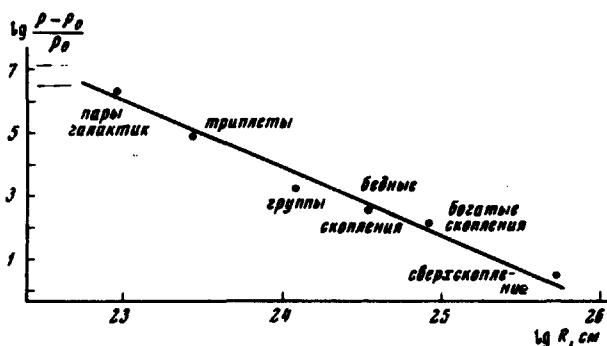


Рис. 2. Контраст плотности между системами галактик и фоном в зависимости от среднего эффективного радиуса системы. Сплошной линией показан ожидаемый наклон (3). Горизонтальная полоса соответствует переходу к отдельным галактикам ($\langle \rho \rangle = \text{const}$ [4])

Подтверждение обсуждавшихся выше соотношений дает веские аргументы в пользу гипотезы о существовании первичной космологической турбулентности. Дальнейшее выяснение ее свойств возможно при более детальных данных наблюдений.

Физический институт
им. Н.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28 августа 1969 г.

Литература

- [1] Л.М.Озерной, А.Д.Чернин. Письма в ЖЭТФ, 7, 436, 1968; Астрон. ж. 44, 1131, 1967; 45, 1137, 1968.
- [2] Я.Б.Зельдович, Advances Astron and Astrophys. 3, 241, 1965.
- [3] И.Д.Каракенцев. Сообщ. Бюраканской обсерв. 39, 96, 1967.
- [4] Л.М.Озерной. Астрон. журн. АН СССР, №422, 1, 1967.