

УДК 524.8

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЯЧЕИСТОЙ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ ВСЕЛЕННОЙ

Я. Б. ЗЕЛЬДОВИЧ

Дано качественное объяснение своеобразной структуры Вселенной, в которой «черные» (лишенные галактик) области окружены со всех сторон замкнутыми сравнительно тонкими «яркими» слоями (содержащими галактики). Объяснение основано на самых общих представлениях о развитии длинноволновых возмущений в холодном газе.

FORMATION OF THE LARGE-SCALE STRUCTURE OF THE UNIVERSE, by Ya. B. Zel'dovich. A qualitative explanation is given for the specific large-scale structure of the Universe, according to which «dark» volumes devoid of galaxies are surrounded by rather thin «bright» layers being built up of galaxies. The explanation is based on very general ideas about the development of large-scale perturbations in a cold gas.

Наблюдения и теория показывают наличие больших «черных» областей, разделенных сравнительно тонкими слоями, в которых концентрируются галактики. Такую структуру можно назвать ячеистой. Концентрация галактик повышается на линиях пересечения слоев, в связи с чем иногда говорят о ячеисто-сетчатой структуре. Мы полагаем (Зельдович и Шандарин, 1982), что «черные» области заполнены ионизованным газом, плотность которого в несколько раз меньше средней плотности вещества во Вселенной. В этом газе галактики никогда не рождались. Общий объем «черных» областей, по-видимому, значительно больше «яркого» объема, занятого галактиками.

В данной статье рассматривается топологический вопрос: почему «яркий» объем образует сплошную совокупность стенок ячеек, а «черные» области разобщены друг от друга яркими стенками.

Очевидно, при случайном распределении двух типов областей — «ярких» и «черных» — следовало бы ожидать, что области, занимающие меньший общий объем, будут распределены как капли внутри сплошного массива области, занимающей больший объем. Бытовой пример: молоко содержит 6% жира и 94% воды (объемные проценты) и при этом отдельные капли жира окружены сплошной массой воды.

Грубо можно предположить, что во Вселенной 60—80% вещества (по весу) находится в «ярких» областях, где плотность приблизительно в 10 раз больше средней. Следовательно, «яркие» области занимают 6—8% всего объема. Остающиеся 40—20% вещества занимают 94—92% всего объема, что соответствует плотности вещества в «черных» областях 0.43—0.22 средней. Поэтому, казалось бы, «яркие» области должны быть разобщены и окружены сплошной темной областью. Ячеистая структура означает, что в действительности, как это ни удивительно, ситуация противоположная.

Яркой областью мы называем не сами отдельные галактики, а общую область, о контурирующую распределение галактик в пространстве. Ячеистая структура (см. Оорт, 1981) не установлена с достаточной определен-

ностью, несмотря на ряд указаний о наличии скоплений галактик, располагающихся в тонком слое определенных поверхностей (наблюдения, пожалуй, в большей мере обосновывают сетчатую структуру). Предположение о существовании ячеистой структуры основано в большей мере на результатах расчетов. В этих расчетах изучалось движение холодного газа в собственном поле тяготения. Начальные условия определяли общее (фридмановское, хаббловское) расширение вещества и рост малых возмущений, также заданных начальными условиями. Теория такого движения (Зельдович, 1970) показывает, что вначале образуются отдельные малые тонкие сгущения большой плотности — «блины». Строго и детально характер особенностей проанализирован в работе Арнольда и др. (1984). На начальной стадии ячеистой структуры нет. Однако топология ячеистой (в двумерных расчетах — сетчатой) структуры, наблюдаемой на поздних стадиях численных расчетов, до сих пор не имела теоретического обоснования. Здесь я предлагаю воспользоваться описанием движения в лагранжевых координатах, как в работе 1970 г., однако не настаивая на определенном виде решения.

Пусть положение частицы \mathbf{r} является функцией ее начального положения ξ и времени t :

$$\mathbf{r} = \Psi(\xi, t).$$

Начальное положение берем достаточно рано, в момент t_0 , когда плотность вещества ρ еще мало возмущена и везде равна ρ_0 . Рассмотрим «яркую» область (ту, в которой вещество будет сжато и где рождаются галактики) в координатах ξ . В этих координатах доля объема, занятая яркими областями, равна доле массы, т. е. $dm = \rho_0 d^3\xi$. Следовательно, когда в «ярких» областях находится больше половины вещества (см. 60—80% в примере, приведенном выше), естественно, что яркие области соединяются в одну сплошную среду. Темные области, занимающие 40—20% в ξ -пространстве, окажутся в этом пространстве отдельными каплями*.

Центральным моментом всего рассуждения является непрерывная зависимость \mathbf{r} от ξ : векторная функция $\Psi(\xi, t)$ нигде не имеет разрывов. Физически это означает, что две соседние точки всегда остаются соседними.

Возьмем в ξ -пространстве сплошную замкнутую поверхность, проведенную в яркой области, внутри которой находится капля «черной» области. Эта сплошная поверхность останется сплошной и после преобразования от ξ -к \mathbf{r} -пространству. Но это и означает, что «черные» области будут изолированы друг от друга на поздней стадии, что и требовалось доказать.

Добавим к сказанному некоторые замечания.

Функция преобразования не имеет особенностей как функция ξ . Это не исключает того, что функция может быть немонотонной** на поздней стадии, и при этом в обратной функции (в выражении $\xi = \Psi^{-1}(\mathbf{r}, t)$) появятся особенности. Физически это означает, что в одну точку в \mathbf{r} -пространстве приходят две или больше частицы из разных начальных положений. Возникновение такой ситуации (аналогичное каустике световых лучей) сопровождается сильным сжатием вещества. Однако использованное выше свойство замкнутой яркой поверхности оставаться замкнутой при этом не нарушается. На поверхности могут возникать складки, но не дырки — заключенная внутри яркой поверхности «черная» область не ускользнет, не соединится с другой черной областью.

Имея в виду, что движение происходит под действием гравитационных сил, можно утверждать, что движение является безвихревым и преобразование — потенциальным. Его можно записать, выделяя общее расшире-

* Говоря о каплях, я подчеркиваю изоляцию отдельных «черных» областей и не имею в виду округлой или близкой к сфере формы, для чего нет оснований.

** Для функции одной переменной обращается в нуль и затем меняет знак $\partial r / \partial \xi$. Для функции нескольких переменных роль производной играет якобиан $|\partial \tau_i / \partial \xi_k|$.

ние в виде

$$r_1 = a(t) \xi_i - \frac{\partial}{\partial \xi_i} \varphi(\xi_k, t).$$

В приближенной теории предполагается, что

$$r_i = a(t) \xi_i - b(t) \frac{\partial}{\partial \xi_i} \Phi(\xi_k), \quad \text{т. е.} \quad \varphi(\xi_k, t) \approx b(t) \Phi(\xi_k).$$

Высокая (формально — бесконечная) плотность возникает тогда, когда $\frac{b(t)}{a(t)} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi_k^2} = 1$, где ξ_k берется по наиболее опасному направлению, по которому эта производная максимальна в данной точке. Область, в которой $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi_k^2} < 0$ и бесконечная плотность никогда не достигается, занимает всего 8% объема в ξ -пространстве (Дорошкевич, 1970).

Необходим, однако, дополнительный физический анализ условий образования галактик там, где большая плотность достигается поздно.

С другой стороны, в областях, где галактики образовались рано, последующее их движение приводит к сосредоточению на линиях и в точках пересечения двух и трех областей. Формально сплошная яркая область может оказаться с течением времени настолько обедненной галактиками, что окажется ненаблюдаемой между линиями.

Ячеистая структура является некоей промежуточной асимптотикой решения задачи о развитии длинноволновых возмущений в холодном газе. По-видимому, за ячеистой структурой (яркие поверхности) следует сетчатая структура (яркие линии) и как последняя стадия релаксации появляются яркие капли. Вследствие статистического характера задачи, смена структур происходит нечетко; в один момент времени в разных участках в пространстве могут осуществляться разные стадии.

Наблюдения ячеистой структуры могут дать важнейшие сведения о моменте образования и возрасте структуры и об амплитуде начальных возмущений.

Во всяком случае ячеистая структура очень не похожа на совокупность отдельных более или менее сферических гигантских сверхскоплений галактик. Здесь необходимо отметить, что после образования первых блинов немедленно начинается процесс образования звезд. Эволюция массивных звезд за время малое по сравнению с космологическим приводит к взрывам сверхновых с выделением энергии, во много раз превышающей гравитационную. Согласно Острайкеру и Коуэ (1981), эти взрывы могут оказать решающее влияние на общую структуру вплоть до 100 Мпс. Рассмотрение движения холодного газа на поздних стадиях может оказаться чрезмерной идеализацией даже в теории первичных адиабатических возмущений.

Ячеистая структура является весьма специфическим следствием своеобразных начальных возмущений и условий эволюции Вселенной и потому ее исследование представляет огромное значение для космологии.

Благодарю А. Г. Дорошкевича и особенно С. Ф. Шандарина за обсуждение и помощь.

ЛИТЕРАТУРА

Арнольд В. И., Зельдович Я. Б. и Шандарин С. Ф. Препринт Ин-та прикл. матем. им. М. В. Келдыша АН СССР, № 100, 1981. *Geophys. and Astrophys. Fluid Dyn.*, 1982 (in press).

Дорошкевич А. Г. *Астрофизика*, 1970, 6, 581.

Зельдович Я. Б. *Астрофизика*, 1970, 6, 319; *Astron. and Astrophys.*, 1970, 5, 84.

Зельдович Я. Б. и Шандарин С. Ф. Письма в АЖ, 1982, 8, 131.

Oort (Oort J. N.). Preprint Sterrewasht, Leiden, 1981.

Острайкер и Коуэ (Ostriker J. P., Cowie L. L.). *Astrophys. J. (Letters)*, 1981, 243, L127.

Ин-т прикладной математики
им. М. В. Келдыша, Москва

Поступила в редакцию
26 января 1982 г.