

## **"ФОТОННЫЕ ВИХРИ" В ГОРЯЧЕЙ ВСЕЛЕННОЙ**

*Л.М.Озерной, А.Д.Чернин*

Серьезные трудности флуктуационной теории образования галактик во фридмановской космологической модели заставили обратиться к осуждению старой идеи о существовании уже на сравнительно ранней

стадии эволюции Метагалактики той или иной догалактической структурности, значительно превосходящей по амплитуде статистические флуктуации плотности. Наиболее распространено представление о *статической* структурности — сгущениях избыточных барионов на однородном фоне излучения [1, 2]. Однако в ряде пунктов данная гипотеза не является полностью удовлетворительной. Это относится, главным образом, к проблеме происхождения собственных движений галактик и, особенно, их вращения. В [3] была сформулирована альтернативная гипотеза о *динамической* структурности, согласно которой в эпоху, когда плотность энергии излучения  $\epsilon_r$  превосходила плотность энергии вещества  $\epsilon_m$ , во Вселенной существовали вихревые движения фотонного газа и увлекаемой им плазмы ("фотонные вихри"). К представлению о наличии заметных макроскопических движений в догалактической среде приводит картина современных динамических движений галактик [4, 5].

Из гипотезы "фотонных вихрей" необходимо вытекает существование четырех фаз догалактической эволюции динамической структуры в Метагалактике. (I) Дофридмановская стадия, на которой вихревые движения определяли метрические свойства пространства — времени. (II) Фаза крупномасштабной изотропии и почти полной однородности плотности ( $\delta\rho/\rho \ll 1$ ). (III) Переход скорости вихревых движений через звуковой рубеж, генерация потенциальных движений и немалых возмущений плотности ( $\delta\rho/\rho \sim 1$ ). (IV) Фаза диссипации макроскопических движений и образования гравитационно связанных систем.

Отсутствие затухания движений (обязанного вязкости в двухкомпонентной смеси излучения и плазмы) вплоть до IV фазы требует, чтобы наибольший масштаб вихрей был достаточно велик. Это требование, однако, не является очень жестким и, согласно численным оценкам [3], масса, заключенная в наименьшем незатухающем масштабе, во всяком случае, не превосходит массу наибольшего метагалактического образования — скопления галактик.

Остановимся подробнее на двух переломных этапах эволюции динамической структуры.

Существование вихревых движений совместимо с фридмановской метрикой (II фаза) при условии малости наибольшего масштаба вихрей по сравнению с характерной длиной  $ct$  (последняя в моделях с космологической особенностью есть расстояние до горизонта). Математическая сторона этой ситуации близка к решению [6] линеаризованных уравнений общей теории относительности для вихревых движений в изотропной космологической модели.

Вихревые ( $s$ ) движения порождают за счет гидродинамической нелинейности потенциальные ( $p$ ) движения и соответствующие им возмущения плотности [7, 8]:

$$\frac{v_p}{v_c} \sim \frac{v_s^2}{u^2}, \quad \frac{\delta\rho}{\rho} \sim \frac{v_p}{v_s}.$$

На фазе II, когда  $\epsilon_r > \epsilon_m$ , скорость звука  $u$  близка к скорости света,  $u = c/\sqrt{3}$ . Для дозвуковых вихрей величины  $v_p/v_s$  и  $\delta\rho/\rho$  остаются

весьма малы. Однако в ходе последующего расширения наступает, начиная с гелия, рекомбинация гелиево-водородной<sup>i</sup> плазмы, отключающая в конечном счете взаимодействие плазмы и излучения. При этом резко падает упругость среды и, соответственно, скорость звука. Если незадолго до рекомбинации скорость звука

$$u \approx (kT/m)^{1/2} (n_r/n_m)^{1/2},$$

то практически вскоре после нее

$$u \approx (kT/m)^{1/2}.$$

Отношение концентрации фотонов  $n_r$  к концентрации нуклонов  $n_m$  есть постоянная и весьма большая величина, равная, по современным данным,  $10^9 \div 10^{10}$ . За тот сравнительно малый промежуток времени, когда  $u$  претерпевает сильный скачок,  $v_s$  остается фактически неизменной. В результате появляются масштабы, в которых  $v_s > u$ . В этих масштабах, согласно приведенным формулам, могут генерироваться немалые возмущения плотности. Эффективность генерации в масштабе  $R$  зависит от соотношения между характерным временем  $t_{sp} = R/v_s$  взаимодействия ( $s$ ) и ( $p$ ) — движений и характерным временем космологического расширения  $t_{exp} = (d \ln \rho / dt)^{-1}$ . В области масштабов, где  $v_s(R) > u$ , а  $t_{sp} < t_{exp}$  (последнее равносильно условию  $v_s(R) > v_{exp}(R)$ , где  $v_{exp}$  — скорость регулярного расширения) возникают — благодаря переходу макроскопических движений в сверхзвуковой режим с образованием ударных волн — сильные возмущения плотности. При спектральном индексе турбулентности  $n < 1$  ( $v_s \propto R^n$ ) условия генерации неоднородностей легче выполняются в малых масштабах.

Судьба возмущений плотности, принадлежащих двум областям масштабов, где  $t_{sp} \gtrless t_{exp}$ , существенно различна. В больших масштабах, где

$$v_s(R) < v_{exp}(R),$$

регулярное расширение не погашается полностью. Возникшие здесь сгущения продолжают расширяться, хотя и медленнее, чем космологический фон. Эти сгущения самых больших масштабов можно отождествить со скоплениями галактик. В рамках данного подхода расширение скоплений галактик, на которое указывает ряд астрономических данных, находит естественное объяснение как остаточное космологическое расширение.

В малых масштабах, где  $v_s(R) \geq v_{exp}(R)$ , космологическое расширение оказывается полностью погашенным. Соответствующие сгущения впоследствии превращаются в галактики, причем знаку равенства в написанном условии отвечает верхний предел массы галактики.

Для образования галактики — гравитационно связанной системы — необходимо, помимо появления сгущения плотности с  $\delta\rho/\rho \gtrsim 1$ , еще и отрицательность его полной энергии. Последнее условие не выполняется в момент генерации неоднородностей. Механизм, обеспечивающий переход полной энергии сгущения через нуль, есть диссипация кинетической энергии с последующим теплоотводом. Уменьшение кинетиче-

ской энергии происходит до тех пор, пока не окажется выполненным условие гравитационного сжатия для отдельного сгущения. Его сжатие автоматически отключает неупругие столкновения как раз на том уровне полной энергии, который нужен для образования связанной системы. Это превращение является вторым (после перехода движений в сверхзвуковой режим) качественным скачком в эволюции метагалактической структурности.

В заключение подчеркнем, что в образовании догалактических сгущений главную роль играет гидродинамическая неустойчивость, тогда как роль гравитационной неустойчивости становится существенной лишь на относительно позднем этапе, причем она развивается в нелинейном режиме.

Мы признательны В.Л.Гинзбургу, Л.Э.Гуревичу, А.Г.Дорошкевичу, Я.Б.Зельдовичу и И.Д.Новикову за внимание и интересные дискуссии.

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

Поступило в редакцию  
13 апреля 1968 г.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

#### Литература

- [1] А.Г.Дорошкевич, Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков. Астр. журн., 44, 295, 1967.
- [2] P.J.E.Peebles. *Astrophys. Journal*, 147, 859, 1967.
- [3] Л.М.Озерной, А.Д.Чернин. Астр. журн., 44, 1131, 1967.
- [4] C.F.von Weizsäcker. *Astrophys. Journal*, 114, 165, 1951.
- [5] G.Gamow, *Phys. Rev.*, 86, 251, 1952.
- [6] Е.М.Лифшиц. ЖЭТФ, 16, 587, 1946.
- [7] В.И.Кляцкин. Изв. АН СССР, Сер. физики атмосферы и океана, 2, 474, 1966.
- [8] Л.М.Озерной, А.Д.Чернин. Астр. журн., 45, 1968 (в печати).