

параметров законы физики имеют другой вид, поэтому существующая инфляционная модель не является окончательной и в будущем описание процессов, происходящих в самой ранней Вселенной, может в той или иной степени измениться.

## 12.16. Рост малых возмущений

Рост малых начальных возмущений плотности в расширяющейся Вселенной зависит от растущего масштабного фактора  $a(t)$ . Возмущения (скоростей или плотности) могут иметь различные длины волн, которые изменяются пропорционально масштабному фактору  $\lambda(t) \sim a(t) \sim (1+z)^{-1}$ . Теория эволюции возмущений в расширяющейся среде показывает, что на радиационно-доминированной стадии расширения (давление  $P = \epsilon/3$ ,  $a(t) \sim \sqrt{t}$ ) возмущения плотности с длинами волн меньше горизонта не растут — они представляют собой акустические колебания, амплитуда которых остается малой из-за диссипативных процессов. В то же время амплитуда флуктуаций плотности с размером больше горизонта  $\lambda > ct$  на радиационной стадии растет пропорционально квадрату масштабного фактора,  $\delta\rho/\rho \sim a(t)^2 \sim 1/(1+z)^2$ . Флуктуации метрики пространства-времени (гравитационные волны) в масштабах больше горизонта вообще не растут (Е. М. Лифшиц, 1946).

На радиационно-доминированной стадии из-за роста масштабного фактора ( $a \sim \sqrt{t}$ ) в каждый момент времени под горизонт, радиус которого растет быстрее ( $l_h \sim t$ ), входят возмущения с длиной волны  $\lambda(t) = l_h(t)$ , и после этого их рост прекращается из-за диссипативных процессов. В эпоху рекомбинации  $t_r$  должен существовать спектр флуктуаций плотности, который приводит к флуктуациям температуры реликтового излучения  $\delta T/T = 1/3(\delta\rho/\rho)|_{t_r}$ . На стадии доминирования вещества (т. е. начиная с  $z \sim 10^4$ ) флуктуации плотности растут как масштабный фактор  $\delta\rho/\rho \sim a(t) \sim t^{2/3}$ , а флуктуации температуры после рекомбинации не меняются, поэтому по измерениям величины  $\delta T/T$  сегодня можно судить о флуктуациях плотности к моменту рекомбинации ( $z_r \sim 1000$ ).

### 12.16.1. Гравитационная (джинсовская) неустойчивость

Причина возникновения наблюдаемых структур во Вселенной — развитие гравитационной неустойчивости из малых возмущений. Гравитационная неустойчивость была впервые количественно рас-

смотрена Джинсом в 1902 г. Физическая причина этой неустойчивости — гравитационное притяжение (см. главу 5).

Произвольное малое возмущение плотности всегда можно разложить в ряд Фурье и проследить за поведением отдельных гармоник. Если найдется хотя бы одна гармоника, растущая со временем, это будет свидетельствовать о неустойчивости. Точное решение дает для гармоник с волновыми векторами  $k = 2\pi/\lambda$

$$\delta\rho_k/\rho_0 = A_k e^{\gamma t + ikx}, \quad (12.53)$$

где декремент моды

$$\gamma = \pm \sqrt{4\pi G\rho_0 - k^2 c_s^2}. \quad (12.54)$$

Отсюда сразу следует точное выражение для джинсовской длины волны — экспоненциальная неустойчивость развивается для моды с действительным декрементом, т. е.  $4\pi G\rho_0 > k^2 c_s^2$ , чему соответствует  $\lambda_J = c_s \sqrt{\pi/G\rho}$ .

Оценим джинсовскую массу в эпоху, следующую за рекомбинацией. Скорость звука падает до  $\sqrt{kT/m_H}$ , где  $T \sim 3 \cdot 10^3$  К — температура среды,  $m_H$  — масса атома водорода. Подставляя численные значения, находим:  $c_s \sim 5$  км/с,  $\rho = \rho(t_0)(1+z_r)^3 \sim 10^{-22}$  г·см<sup>-3</sup>,  $\lambda_J = c_s/\sqrt{G\rho} \sim 2 \cdot 10^{20}$  см,  $M_J = (4\pi/3)\lambda_J^3 \rho \approx 10^6 M_\odot$ , т. е. порядка массы шарового звездного скопления. Расчеты показывают, однако, что непосредственно после окончания рекомбинации формирования гравитационно-связанных объектов, по-видимому, не происходило. Подходящие физические условия для начала формирования объектов сложились позже, при красных смещениях  $z \sim 20-30$ . К этому времени джинсовская масса уменьшилась, поэтому первые объекты (звезды населения II и их скопления) во Вселенной могли иметь массу  $\sim 10^3 M_\odot$ . Их мощное УФ излучение ионизовывало окружающую нейтральную среду и обогащало ее тяжелыми элементами — продуктами ядерной эволюции.

## 12.17. Образование крупномасштабной структуры Вселенной

Таким образом, крупномасштабная структура Вселенной (галактики, скопления галактик, войды — пустоты с размерами в десятки мегапарсек) возникает из малых возмущений плотности, которые,