

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,

по-видимому, являются следствием квантовых флуктуаций физических полей в очень ранней Вселенной, «раздутых», в основном, за короткую эпоху экспоненциального расширения. Когда контраст плотности флуктуации становится порядка  $\delta\rho/\rho \sim 1$ , возмущения перестают участвовать в космологическом расширении и могут образовать гравитационно-связанные системы. Расширение таких областей замедляется и сменяется сжатием. Существенно, что нелинейная стадия роста возмущений приводит к преимущественному сжатию вдоль одного из направлений с образованием уплощенных структур (т. н. «блины» Зельдовича). Пересекаясь, «блины» создают ячеистую структуру. В местах наибольшей плотности образуются галактики и формируются скопления галактик (иерархическое сгущивание).

Наблюдаемая крупномасштабная структура не могла сформироваться без участия скрытой массы — невидимой материи, которая проявляется только по своему гравитационному взаимодействию. Действительно, из флуктуаций температуры реликтового излучения мы знаем, что флуктуации плотности на момент рекомбинации были  $(\delta\rho/\rho)_r \lesssim 10^{-5}$ . После рекомбинации эти флуктуации растут пропорционально масштабному фактору, и к моменту  $z \approx 1$  могут вырасти в  $\sim 1000$  раз, т. е. до уровня  $10^{-2}$ , что совершенно недостаточно (на два порядка!) для начала развития гравитационной неустойчивости и образования структур. Это является независимым веским аргументом в пользу существования невидимой материи, взаимодействующей с обычным веществом только посредством гравитации. Именно флуктуации плотности темной материи, которые должны были быть на два порядка больше, чем флуктуации обычного (барионного) вещества в момент рекомбинации, и создали потенциальные «ямы». Эти «ямы», по-видимому, послужили центрами конденсации обычного вещества, из которого впоследствии стали образовываться галактики и скопления галактик.

Для формирования крупномасштабной структуры обычно рассматривается модель т. н. холодной темной массы (CDM), состоящей из «холодных», т. е. движущихся с нерелятивистскими скоростями, массивных элементарных частиц, которые взаимодействуют с обычным веществом только через создаваемое ими гравитационное поле. Такими частицами, например, могут быть гипотетические аксионы (реликтовые бозоны с массой покоя меньше  $10^{-5}$  эВ) или суперсимметричные партнеры элементарных частиц (нейтрали-

но, масса покоя  $\geq 100$  ГэВ). Численные расчеты показывают, что существенную роль в формировании наблюдаемой крупномасштабной структуры Вселенной должна играть «темная энергия» (т. н. модель « $\Lambda$ CDM»). Более подробно об этом см. в книгах А. Долгов, Я. Б. Зельдович, М. В. Сажин. «Космология ранней Вселенной». (Изд. МГУ, 1988); М. В. Сажин, «Современная космология в популярном изложении» (М: УРСС, 2002).

## 12.18. Заключение

В настоящее время неплохо известны, по крайней мере в общих чертах, характер расширения Вселенной в современную эпоху, особенности и общая направленность эволюции галактик и систем галактик. Очевидным представляется и рождение наблюдаемой Вселенной из состояния сверхвысоких плотностей и температур. Однако вопросы о наиболее ранних этапах расширения Вселенной, о формировании и росте возмущений, о свойствах пространства, времени, элементарных частиц на планковских масштабах остаются открытыми и допускают различные варианты решений. Физической картины, описывающей динамическую эволюцию Вселенной с самого начала ее расширения еще не создано, поскольку существующие фундаментальные физические теории остаются справедливыми лишь в ограниченной области параметров. Так, основа космологии — ОТО — не объясняет квантовых эффектов, по-видимому, игравших фундаментальную роль в первые мгновения расширения. Инфляционная теория ранней Вселенной, как и теория горячей Вселенной, теория холодного темного вещества, ответственного за появление крупномасштабной структуры, или вовсе загадочной «темной энергии» остаются пока лишь, в лучшем случае, хорошо аргументированными гипотезами, проверяемыми и развивающимися по мере накопления новых данных.

Поэтому ответ на вопрос о «рождении» Вселенной не может быть дан в учебнике. Само «рождение» следует понимать как возникновение 13–15 млрд. лет назад «нашей» Вселенной, безграничной в любой момент своего существования, Вселенной со знакомыми современной физике свойствами пространства, времени, энергии, которые описываются известными фундаментальными физическими законами. Неясно даже, может ли существовать в принципе простой и наглядный ответ на вопрос о том, что было до «начала» —