излучения). Это соотношение справедливо для гравитационных волн, длина которых мала по сравнению с горизонтом, но при этом условии оно не зависит от длины волны. Такое соотношение поддерживается и до и после момента рекомбинации водорода, поскольку ε_γ изменяется пропорционально a^{-4}, т. е. так же, как и ε_g. К роли гравитационных волн в космологии мы вернемся в гл. 16.

§ 6. Энтропийные возмущения в релятивистской теории

Интерес к энтропийным возмущениям связан с тем, что они позволяют получить современную структуру Вселенной из сингулярного состояния, метрика которого (асимптотически) точно описывается решением Фридмана, без каких-либо отклонений от однородности. Это обстоятельство отмечает Чибисов (1972б). Неоднородно в пространстве распределен барионный заряд (разность $r=\frac{n_B-n_{\bar{B}}}{n_\gamma}$ плотности барионов и антибарионов, отнесенная к плотности фотонов), но вблизи сингулярности заряд не влияет на метрику.

В пределе, при высокой температуре, соотношение между плотностью энергии и давлением не зависит от удельного барионного заряда. В частности, при ограниченном спектре масс элементарных частиц для давления имеем формулу $P=\varepsilon/3$ при $kT\gg mc^2$ (m — наибольшая масса частиц) независимо от того, является ли вещество зарядово-симметричным, $r=0$, или «заряженным», $r>0$.

Отсюда и следует возможность построить решение с невозмущенной метрикой и давлением и плотностью энергии, не зависящими от координат. Лишь в дальнейшем ходе расширения, при $kT<mc^2$, из-за неоднородности r возникают различные уравнения состояния в различных местах согласно приближенной формуле

$$P=\frac{\varepsilon}{3}\left(1-r(x)\,\varepsilon^{-1/4}\right). \tag{11.6.1}$$

Возникают возмущения метрики, а также движение вещества, вызванные различием уравнений состояния в разных точках пространства. Начальные энтропийные возмущения порождают адиабатические возмущения плотности и, в частности, порождают растущую моду адиабатических возмущений, если длина волны достаточно велика. Этот факт не является специально следствием релятивистской теории. Важно лишь, что рассматриваются возмущения в эволюционирующей Вселенной, в которой с течением времени меняется уравнение состояния вещества (в отличие от джинсовской постановки задачи). Энтропийное возмущение с длиной волны, соответствующей массе меньше $10^4 M_\odot$, вызывает только затухающие общие колебания плазмы. Но наряду с этим неравномерность энтропии сохраняется и проявляется (для $M > 10^5 M_\odot$) после рекомбинации водорода.

В принципе можно также рассматривать неравномерное распределение лептонного заряда, т. е. избытка нейтрино над антинейтрино. В этом случае также можно задаться невозмущенной метрикой в сингулярности. Вследствие большого пробега нейтрино неравномерность выравняется рано, и амплитуда растущего возмущения плотности окажется относительно малой.

Такая гипотеза лишена изящества и никем подробно не разрабатывалась. Известным сходством с энтропийным возмущением обладает и начальное возмущение в виде хаотического магнитного поля: магнитное поле вморожено в плазму, как и энтропийные возмущения. Однако магнитное поле возмущает метрику. Гипотеза магнитной неоднородности высказана Зельдовичем (1969), но не находит доводов, которые обосновывали бы ее предпочтительность (см. об этой гипотезе § 3 гл. 19).

§ 7. Квазиизотропное решение и гипотеза равнораспределения возмущений

Кажется заманчивой картина Вселенной, различные части которой вблизи сингулярности имеют слегка различную кривизну в один и тот же момент времени и вместе с тем расширяются подобно модели Фридмана.

Математическим выражением такой картины является квазиизотропное решение [Лифшиц и Халатников (1963а, б)], которое для уравнения состояния $P = \varepsilon/3$ описывается метрикой

$$ds^2 = c^2\,dt^2 - [t a_{\mu\nu}(x^\alpha) + t^2 b_{\mu\nu}(x^\alpha) + \ldots]\,dx^\mu\,dx^\nu. \quad (11.7.1)$$

Эта формула показывает, что решение содержит произвольную функцию пространственных координат $a_{\mu\nu}$. Подставляя (11.7.1) в уравнения ОТО, можно найти $b_{\mu\nu}$ и следующие члены разложения, соответствующие данному $a_{\mu\nu}$. Задание $a_{\mu\nu}$ дает полный набор начальных условий в данной задаче. Вблизи сингулярности главным является член $t a_{\mu\nu}$. Пренебрегая всеми другими членами, мы видим, что каждый элемент пространства расширяется изотропно с одной и той же постоянной Хаббла во всех направлениях. Пространственная кривизна, зависящая от $\dfrac{\partial^2 a_{\mu\nu}}{\partial x^\tau\,\partial x^\lambda}$, произвольна, но мала по сравнению с компонентами тензора кривизны $R_{0_\alpha 0_\beta}$ и $R_{0_\alpha \beta\gamma}$. В тензоре кривизны, с помощью которого можно подсчитать распределение плотности энергии и скорость движения вещества, главным членом являются производные по времени от $t a_{\mu\nu}$, и учет их дает для выражения плотности вещества результат, совпадающий с