

§ 3. Взаимодействие возмущений со свободными частицами

При рассмотрении развития возмущений плотности, а также распространения гравитационных волн возникает вопрос о возможной роли таких частиц, как нейтрино и высокочастотные гравитоны. Выше, в связи с теорией горячей Вселенной, обсуждались пределы, в которых лежит плотность таких труднонаблюдаемых частиц (ТНЧ); напомним, что $0,5\rho_\nu < \rho_{\text{ТНЧ}} < 10\rho_\nu$ (см. § 5 гл. 7). Там же рассматривалось влияние ТНЧ на закон космологического расширения.

Упоминалось также косвенное влияние ТНЧ на развитие возмущений за счет изменения общего темпа расширения.

В принципе, однако, есть и специфический эффект необратимого отбора энергии от акустических колебаний, приводящий к нагреванию ТНЧ. Этот эффект зависит от гравитационного взаимодействия волны переменной плотности с ТНЧ. Поскольку ТНЧ образуют бесстолкновительный газ, рассматриваемое явление подобно затуханию Ландау в теории власовских колебаний бесстолкновительной плазмы.

Дадим оценку порядка величины эффекта.

Акустическая волна распространяется со скоростью $c/\sqrt{3}$. Возмущения гравитационного потенциала связаны с возмущением плотности соотношением

$$\Delta\varphi = -k^2\varphi_k = 4\pi G \delta\rho = 4\pi G\rho \cdot \delta. \quad (10.3.1)$$

Среди ТНЧ, движущихся со скоростью света во всех направлениях, есть также такие, которые движутся в фазе с волной: для этого нужно, чтобы их скорость была направлена под углом $\sim 55^\circ$ к волновому вектору. Доля частиц порядка φ/c^2 захвачена и движется, все время отбирая энергию. Скорость отбора энергии порядка $\rho_{\text{захв}} u_{\text{захв}} F$, где

$$\rho_{\text{захв}} = \frac{\rho_{\text{ТНЧ}}\varphi}{c^2}, \quad u_{\text{захв}} = \frac{c}{\sqrt{3}}, \quad F = -\nabla\varphi = ik\varphi_k. \quad (10.3.2)$$

Таким образом, скорость отбора энергии порядка

$$W = k\rho_{\text{ТНЧ}}\varphi^2 c^{-1} = (4\pi)^2 G^2 \rho^2 \delta^2 \rho_{\text{ТНЧ}} c^{-1} k^{-3} \text{ эрг/см}^3 \cdot \text{сек}. \quad (10.3.3)$$

Это выражение надо сравнить с плотностью акустической энергии

$$\varepsilon_{\text{ав}} = \rho u^2 = \rho c^2 \delta^2. \quad (10.3.4)$$

Получим уравнение

$$\frac{d\varepsilon_{\text{ав}}}{dt} = -\varepsilon_{\text{ав}} (4\pi)^2 G^2 \rho \rho_{\text{ТНЧ}} k^{-3} c^{-3} = -\varepsilon_{\text{ав}} \frac{\rho_{\text{ТНЧ}}}{\rho} \left(\frac{\lambda_{\text{Дж}}}{\lambda} \right)^{-4} \omega. \quad (10.3.5)$$

Следовательно, эффект — порядка единицы при переходе через нижнюю границу области устойчивости $t=t_1$. В этот момент $\omega \sim 1/t_1$, $\lambda \sim \lambda_{\text{дж}}$ (мы полагаем $\rho_{\text{тнч}} \sim \rho$). Однако в дальнейшем, как показал Пиблс (1973а) затухание снова мало; таким образом, при переходе границы устойчивости происходит однократное уменьшение амплитуды в \sqrt{e} раз (или около того), и на этом влияние ТНЧ ограничивается.

С другой стороны, до перехода границы устойчивости, при $t \ll t_1$, затухания возмущений, очевидно, не происходит. Уже отмечалось, что возмущенную область в этом периоде можно рассматривать как независимо развивающийся участок Вселенной с измененными (по сравнению с окружающим веществом) начальными параметрами. На краях возмущенной области имеют место градиенты плотности, давления, скорости, и от краев в глубь возмущенной области идут волны разгрузки, нарушающие вышеописанную идиллическую картину. Условие $t < t_1$ есть условие, чтобы разгрузка не затронула всю область; но скорость волны разгрузки $c/\sqrt{3}$ мало отличается от скорости ТНЧ, равной c , поэтому при $t \ll t_1$ картина эволюции возмущенной области сохраняется и в присутствии ТНЧ.

Итак, общий вывод заключается в том, что во всем интервале масштабов возмущений, где имеет место период акустических колебаний, присутствие ТНЧ вызывает очень небольшое уменьшение амплитуды колебаний по сравнению с теорией, не учитывающей ТНЧ. Это уменьшение практически не зависит от масштаба и происходит в период превращения растущих возмущений в колебательные (акустические).

§ 4. Энтропийные возмущения

Первичная плазма состоит из двух различных субстанций: излучения и вещества. Поэтому можно представить себе, что состав смеси, т. е. отношение вещества и излучения, может быть непостоянным, изменяться от точки к точке.

Неоднородности такого типа на ранних стадиях расширения, при $\rho_{\nu} \gg \rho_{\text{вещ}}$, не вызывают движения вещества или излучения и заморожены. Позже, после рекомбинации, неоднородности в распределении вещества на фоне однородного излучения приведут к возникновению движения качественно тем же путем, что и адиабатические возмущения.

В качестве первого приближения рассмотрим возмущения плотности вещества

$$\rho_{\text{вещ}} = \bar{\rho}_{\text{вещ}} (1 + \delta_{\text{вещ}}(t) e^{ikx}) \quad (10.4.1)$$

на фоне однородного излучения $\rho_{\nu} = \text{const}$. Предположим, что скорость вещества $u_{\text{вещ}} \neq 0$, тогда как фоновое излучение покоится,