

А. Д. ЧЕРНИН, А. Н. ШВАРЦ

АНИЗОТРОПНАЯ КОСМОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

(Представлено академиком Я. Б. Зельдовичем 13 XII 1971)

Крупномасштабная однородность и изотропия мира в современную эпоху не исключает, как известно, сильной неоднородности и анизотропии на начальных фазах космологического расширения. Если такое состояние мира действительно осуществлялось в прошлом, оно должно было не позже чем при $Z \simeq 100$ ⁽¹⁾ смениться нынешним состоянием изотропии и однородности в масштабах, превосходящих размер «ячейки однородности» $L \simeq 100$ Мпс. Интересно, что величина L удовлетворяет приближенному соотношению $L \simeq \omega c / H$, где $\omega \simeq (1 - 3) \cdot 10^{-2}$ — отношение «размазанной» плотности вещества галактик к критической плотности, $H \simeq 1/t_0$ — фактор Хаббла; $t_0 \simeq 3 \cdot 10^{17}$ сек — современный возраст мира.

Мы хотели бы обратить здесь внимание на то, что процесс гомогенизации и изотропизации при общем космологическом расширении может развиваться в больших пространственных масштабах ($\lambda > L$) быстрее, чем в малых. При этом наблюдаемая космическая структура — галактики, скопления галактик со значительными отклонениями от однородности и изотропии в сравнительно малых масштабах ($\lambda < L$), могла бы рассматриваться как остаток, реликт гипотетической анизотропной начальной фазы расширения мира ⁽²⁾. Мы продемонстрируем принципиальную возможность такой эволюции мира на примере некоторых простых решений уравнений общей теории относительности для свободного гравитационного поля, которое в ряде случаев можно понимать как совокупность гравитационных волн с различными длинами волн.

Пусть распределение по длинам волн таково, что в масштабе, большем некоторого λ_0 , имеется изотропный в среднем фон коротких гравитационных волн с длинами волн $\lambda \ll \lambda_0$ и кроме того имеются длинные ($\lambda > \lambda_0$) гравитационные волны. Для масштабов $\lambda \gg \lambda_0$ коротковолновое гравитационное излучение эквивалентно жидкости с уравнением состояния $p_g = \frac{1}{3}\varepsilon_g$. Что же касается длинных волн, то мы будем считать, что они создают лишь малые возмущения в метрике, определяемой в основном изотропным излучением и веществом. Математической основой рассматриваемой ситуации служит решение для малых возмущений в изотропном мире ⁽³⁾.

На начальной стадии расширения ($t < t_*$), когда плотность энергии излучения (электромагнитного или гравитационного) превосходит плотность энергии вещества, возможны гравитационные волны, амплитуда которых h_{α}^{β} изменяется со временем по закону $h_{\alpha}^{\beta} \propto 1/t^{1/2}$, не зависящему от длины волны *. Если вблизи космологической сингулярности имелось равномерное распределение энергии по различным модам возмущений ⁽⁴⁾, то в период $t < t_*$ остается постоянным и равным примерно единице отношение плотности энергии коротких волн ε к плотностям энергии коротковолновых акустических и вихревых возмущений. На стадии преобладания вещества ($t > t_*$) амплитуда длинных гравитационных волн падает быст-

* Длинным волнам в решении ⁽³⁾ отвечает условие $\lambda > a \gg ct$; это означает, что строго говоря, они не являются волнами в обычном смысле.

рее ($\propto 1/t$), чем амплитуда коротких волн ($\propto 1/t^{2/3}$), что и означает преимущественную изотропизацию в больших масштабах.

Пусть теперь одновременно с изотропными коротковолновым гравитационным излучением имеется крупномасштабное гравитационное поле, характеризующееся очень большой, формально бесконечной длиной волны, которое уже не считается слабым. Такому полю отвечает метрика, значительно отличающаяся от метрики Фридмана; в простейшем случае ее можно локально описать интервалом ds , соответствующим однородному, но анизотропному пространству (⁵, ⁶). Анизотропия, а значит, и длинноволновое гравитационное поле существенны вблизи сингулярности ($t \rightarrow 0$), когда метрика принимает казнеровский вид; но при больших временах ($t \rightarrow \infty$) метрика определяется изотропными коротковолновым излучением и веществом (¹, ⁷⁻⁹). В этом примере общая изотропизация мира при $t > t_*$ сопровождается более быстрым ослаблением амплитуды длинноволнового поля, чем коротковолнового (с тем же временным законом, что и выше).

Рассмотренные здесь примеры являются, конечно, весьма ограниченными; они не позволяют, в частности, полностью учесть особенности взаимодействия гравитационного поля с веществом. Такое взаимодействие приводит к поглощению гравитационных волн, если эффективны диссипативные процессы в веществе (¹⁰). С другой стороны, и это особенно важно, неоднородное и анизотропное гравитационное поле способно, по-видимому, создавать локальные возмущения в веществе, которые могли бы затем усиливаться на фридмановской фазе космологического расширения. Такое усиление возможно, однако, лишь до эпохи $t_i \simeq \Omega t_0$, где Ω — отношение полной плотности мира к критической, которое скорее всего не слишком отличается от значения ω . Заметим, что при $t = t_i$ радиус кривизны, разделяющий волны на короткие и длинные, принимает значение $a(t_i) \simeq \Omega c t_0 \simeq \omega c / H$; эта характерная длина (¹¹) решения Фридмана близка к размеру «ячейки однородности» (см. выше).

Авторы выражают признательность акад. Я. Б. Зельдовичу за внимание к работе и полезные указания. Один из авторов (А. Ч.) благодарен Ч. Мизнеру, К. Торпу и Дж. Уилеру за обсуждение проблемы и В. А. Рубану за ценные замечания.

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

Поступило
9 XII 1971

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. Б. Зельдович, Н. Д. Новиков, Релятивистская астрофизика, М., 1967, стр. 558. ² А. Д. Чернин, *Astrophys. Let.*, 8, 31 (1971). ³ Е. М. Лифшиц, *ЖЭТФ*, 16, 587 (1946). ⁴ Я. Б. Зельдович, Н. Д. Новиков, *Астрон. журн.*, 46, 960 (1969). ⁵ О. Heckmann, E. Schucking, in: *Gravitation*, N. V., 1962, Chap. 11. ⁶ А. С. Компанец, А. С. Чернов, *ЖЭТФ*, 47, 1939 (1964). ⁷ А. Г. Дорошневич, *Астрофизика*, 2, 37 (1966). ⁸ C. W. Misner, *Astrophys. J.*, 151, 431 (1968). ⁹ C. W. Misner, *Phys. Rev.*, 186, 1319 (1969). ¹⁰ S. W. Hawking, *Astrophys. J.*, 145, 544 (1966). ¹¹ А. Д. Чернин, *Письма ЖЭТФ*, 8, 633 (1968).