

"ПЕРЕМЕШАННЫЙ МИР" И ХОЛОДНЫЙ ВАРИАНТ

Я.Б.Зельдович

Недавно Мизнер [1, 2] поставил вопрос о космологической модели, в которой наблюдаемая изотропия Вселенной (в частности изотропия реликтового излучения [3]) имела бы естественное объяснение.

Другими словами, ищется более общее, анизотропное и неоднородное решение в начальной стадии при большой плотности, которое с течением времени асимптотически приблизилось бы к однородному и изотропному решению Фридмана, наблюдаемому в настоящее время.

Мизнер полагает, что такими свойствами обладает решение Белинского, Лифшица и Халатникова [4, 5] полученное этими авторами в ходе исследования сингулярности уравнений общей теории относительности. Термин предложенный Мизнером "mixmaster" переводим "перемешанный мир".

Исходное решение является однородным, но анизотропным и описывает замкнутый мир. Решение отличается тем, что в нем "нет горизонта", т. е. световой сигнал успевает много раз обождать весь мир на анизотропной стадии.

Вещество (кванты, частицы, античастицы) на ранней стадии не влияет на эволюцию решения. Гравитацией вещества можно пренебречь.

При однородном распределении вещества с течением времени, когда гравитация вещества становится существенной, происходит переход к **изотропному** замкнутому решению Фридмана.

Неоднородное распределение вещества можно рассматривать, как возмущения плотности, наложенные на однородное распределение. В той стадии, когда гравитация вещества не влияет на общее расширение, она не должна влиять и на возмущения. Это значит, что нет гравитационной неустойчивости и возмущения затухают в ходе адиабатического расширения, под влиянием вязкости (в особенности нейтринной вязкости [6]) и вследствие образования ударных волн [7].

Начальную неоднородность метрики, не зависящую от присутствия вещества ($R_{,k} = 0$) можно рассматривать как гравитационные волны, наложенные на однородное решение. Гравитационные волны также затухают в ходе расширения.

Условие "нет горизонта" очевидно необходимо для того, чтобы успело пройти выравнивание неоднородностей и затухание возмущений. Замкнутость мира ограничивает максимальную длину волны возмущения, что необходимо для применимости адиабатического затухания. Именно возможность выравнивания неоднородностей является новым свойством перемешанного мира. Анизотропное увеличение объема происходит так, что в каждый момент по двум осям происходит расширение, а по третьей сжатие. Возмущения с импульсом по третьей оси адиабатически растут. Однако, за счет искривления траекторий и смены оси, по которой происходит сжатие, можно полагать, что в среднем, за большой интервал времени возмущения затухают.

Затухание анизотропии в ходе эволюции анизотропного однородного решения и его превращение в изотропное однородное отмечалось раньше, например, для решения Казнера [8].

В настоящей работе внимание обращено на *энтропийные* возмущения. Так называются возмущения отношения $s = \gamma/b$ плотности квантов $\gamma \sim T^3$ к плотности барионного заряда $b = B - \bar{B}$, где s — безразмерная энтропия, T — температура, B — плотность барионов, \bar{B} — плотность антибарионов.

Адиабатические возмущения ($\delta s = 0$, $\frac{\delta \rho}{\rho} = 3 \frac{\delta T}{T}$) (распространя-

ются со скоростью звука $a = c/\sqrt{3}$, энтропийные возмущения выравниваются лишь за счет диффузии, т. е. весьма медленно.

В условиях перемешанного мира энтропийные возмущения не успевают выравниваться.

Задание начального состояния с возмущениями плотности и метрики, но с $s = \text{const}$, $\delta s = 0$, представляется искусственным. Но и при таком произвольно выбранном начальном состоянии в ходе эволюции возникнет $\delta s \neq 0$, так как затухание акустических и гравитационных волн сопровождается неравномерным нагревом вещества, особенно, когда образуются ударные волны.

На поздней стадии, уже после изотропизации общего расширения мира и после рекомбинации плазмы, энтропийные возмущения будут расти за счет гравитационной неустойчивости; об особенностях этого процесса см. [9, 10].

Заметим, что без учета энтропийных возмущений, рассматривая только адiabатические возмущения в перемешанном мире, мы столкнулись бы со следующей трудностью: возмущения малого масштаба (малой длины волны) выравниваются сильнее, чем возмущения максимального масштаба. С этой точки зрения отсутствие заметной анизотропии реликтового радиоизлучения трудно совместить с большими возмущениями в масштабе скоплений галактик.

Наконец, в перемешанном мире не исключено возрождение гипотезы холодного начального состояния. В однородной модели анизотропное расширение сопровождается увеличением энтропии¹⁾. Необходимо, чтобы современное значение энтропии было достигнуто раньше, чем произойдут ядерные реакции, т. е. при температуре выше 10^{10} град. Только в этом случае останутся в силе расчеты ядерных реакций в изотропной горячей модели Фридмана, дающие весьма разумный состав первичного вещества (70% H, 30% He⁴).

В горячей изотропной модели есть известные трудности: при $T \gtrsim Mc^2$ (M — масса протона) концентрации барионов B и антибарионов \bar{B} весьма велики по сравнению с барионным зарядом $b = B - \bar{B} \sim 10^{-8} (B + \bar{B})$. Такой состав нуждается в объяснении! Подробнее об этом см. [14].

В холодной модели предполагается, что в начальной стадии везде есть только барионы, $\bar{B} = 0$, $b = B > 0$.

В ходе эволюции за счет анизотропной деформации температура повышается, возникает большое количество квантов, e^- , e^+ пар и даже B , \bar{B} пар. При этом однако естественно везде останется избыток барионов, $b = B - \bar{B} > 0$, что, по-видимому, и наблюдается в действительности [15]. С точки зрения обычной изотропной горячей модели с энтропийными возмущениями, т. е. с $b \neq \text{const}$ отсутствие областей с $b < 0$ требует специального объяснения.

Отметим некоторые нерешенные и незатронутые выше вопросы. На самых ранних, квантовых стадиях перемешанной модели в принципе возможно спонтанное рождение пар частица-античастица гравитационным полем, за счет быстрого изменения метрики [16].

Необходимо также рассмотреть поведение вращательных и магнитных возмущений в перемешанной модели. Высказанные выше предположения нуждаются в строгих доказательствах. И все же представляется несомненным, что мы находимся в начале нового этапа в космологии.

Благодарю И.Д.Новикова за ценные дискуссии.

Институт
прикладной математики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
5 февраля 1970 г.

Литература

- [1] C.W.Misner. Phys. Rev. Lett., 22, 1071, 1969.
- [2] C.W.Misner. Preprint 1969.

¹⁾ В изотропной модели Фридмана специальные расчеты показывают [11], что возрастание энтропии мало. В плоской анизотропной модели эффекты набора энтропии за счет нейтринных (а может быть и гравитонных) процессов велики [5, 12, 13]. Формально различие объясняется тем, что релятивистский газ имеет равную нулю вторую вязкость при нормальной первой вязкости.

- [3] E.K.Conklin, R.V.Bracewell, *Nature*, 216, 777, 1967.
 - [4] В.А.Белинский, И.М.Халатников, *ЖЭТФ*, 56, 1700, 1969.
 - [5] И.М.Халатников, Е.М.Лифшиц. *Phys. Rev. Lett.*, 24, 76, 1970.
 - [6] С.В.Миснер. *Nature*, 214, 40, 1967.
 - [7] P.J.E.Peebles. Preprint, 1969.
 - [8] O.Heckmann, E.Schüking. *N.Y.Gravitation*, 1962.
 - [9] А.Г.Дорошкевич, И.Д.Новиков, Я.Б.Зельдович. *Астрон.ж.*, 44, 295, 1967.
 - [10] R.H.Dicke, P.J.E.Peebles. *Ap. J.*, 154, 838, 1968.
 - [11] В.Якубов. *Астрон.ж.*, 41, 884, 1964.
 - [12] С.В.Миснер. *Ap. J.*, 158, 431, 1968.
 - [13] А.Г.Дорошкевич, И.Д.Новиков, Я.Б.Зельдович. *ЖЭТФ*, 53, 644, 1967;
Астрофизика, 5, 539, 1969.
 - [14] Я.Б.Зельдович. *Comments on Astr. a Sp. Sc.*, 1, november 1969.
 - [15] Р.А.Сюняев, Я.Б.Зельдович. *Astrophys. a Sp. Sc.*, 5, 1969.
 - [16] L.Parker. *Phys. Rev. Lett.*, 21, 562, 1968.
-