

СИНГУЛЯРНОСТЬ И РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ТЯГОТЕНИЯ



ГЛАВА 22

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ СИНГУЛЯРНОСТЬ

§ 1. Введение

Мы обращаемся к рассмотрению важнейшего вопроса космологии — вопроса о начале космологического расширения, вопроса о сингулярности. Обобщающий итог изложенного в предыдущих разделах состоит в том, что Вселенная расширяется изотропно и однородно, начиная, по крайней мере, с момента, когда выполнялось равенство $\rho_{\text{вещ}} \approx \rho_{\gamma} \approx 10^{-12} \text{ г/см}^3$, и с большой степенью вероятности описывалась моделью Фридмана еще гораздо раньше, начиная с эпохи протекания синтеза химических элементов, т. е. с первых секунд расширения и с плотностей порядка 10^6 г/см^3 .

Что было еще раньше? Расширялась ли Вселенная по Фридману, начиная с сингулярности (или, по крайней мере, с «планковского» момента $t = 10^{-43} \text{ сек}$), или ранняя эпоха была существенно не фридмановской? Проходило ли вещество Вселенной через бесконечно большую плотность (или, по крайней мере, через «планковскую» плотность $\rho \approx 10^{93} \text{ г/см}^3$) или же сжатие Вселенной в еще более раннюю эпоху сменилось расширением при конечной плотности [см., например, Альвен (1971)]?

Согласно модели Фридмана, расширение Вселенной начиналось от сингулярности. Начиная с 30-х годов, на протяжении десятилетий перед космологией стоял вопрос: не является ли наличие сингулярности в начале расширения специальным свойством модели Фридмана (и других достаточно симметричных моделей), не исчезнет ли сингулярность при введении небольших пекулярных скоростей движения материи или вращения?

Аналогия с механической задачей о расширении шара в теории Ньютона подкрепляла такие предположения. Действительно, если рассматривать в теории Ньютона разлет тяготеющих частиц, одновременно вылетающих по радиусам из одной точки, то расширение начинается от сингулярности. Однако при наличии небольших пекулярных скоростей точки пролетают друг мимо друга вблизи центра, плотность частиц всегда конечна и сингулярности не

возникают. Может быть, аналогичная ситуация возможна и в космологической задаче теории Эйнштейна?

Здесь существенно отметить одно обстоятельство, которое подчеркивается Лифшицем и Халатниковым (1963а, б). Если сингулярности в прошлом не было и наблюдаемому расширению Вселенной в прошлом предшествовало сжатие, то космологическая модель, описывающая прохождение вещества через максимум плотности и последующее расширение, должна быть устойчивой, т. е. относиться к «общему решению» по терминологии Лифшица и Халатникова. Иначе говоря, пусть есть какая-то модель без сингулярности, описывающая сжатие вещества до конечной плотности (без сингулярности), а затем его расширение, и пусть малое изменение параметров модели на фазе сжатия приводит к возникновению сингулярности. Тогда, очевидно, эта модель не может осуществляться в действительности, так как всегда найдутся случайные флуктуации, уводящие модель от решения без сингулярности. Таким образом, решение без сингулярности должно быть не исключительным, не вырожденным, а общим, чтобы претендовать на описание реальной Вселенной.

Однако если расширение начинается от сингулярности, то требование общности решения вблизи сингулярности уже не обязательно. Действительно, в этом случае начальные условия, определяющие решение, задаются какими-то неизвестными процессами при огромных кривизнах пространства-времени, т. е. в условиях, не описываемых современной теорией. Возможно, процессы в этом случае приводят к специальным начальным условиям расширения Вселенной, например к почти полной однородности и изотропии [см. Пиблс (1971а)]. Поэтому, если бы даже удалось доказать, что общее решение не содержит сингулярности, то это еще не означало бы, что расширение начиналось не от сингулярности.

Итак, перед космологией стояло два разных вопроса: 1) имеется ли общее (в смысле «устойчивое») космологическое решение без сингулярности? и 2) была ли сингулярность в прошлом в условиях, имеющих место в реальной Вселенной?

В конце 60-х годов был дан положительный ответ на второй вопрос (Пенроуз, Хоукинг, Героч). Было доказано, что расширение Вселенной начиналось с сингулярности (если, конечно, справедлива ОТО, но само изменение ОТО, если это связано с большой кривизной, требует «почти» сингулярности), однако, как именно протекало расширение вблизи сингулярности — по Фридману или более сложным образом, — установлено не было. После этих работ острота первого вопроса для космологии опала*). Действительно, структура решения вблизи сингулярности не обязательно соответствует общему решению, и возникает задача: каким-либо способом

*) Общее аналитическое решение с сингулярностью чрезвычайно важно для проблемы гравитационного коллапса.

установить истинный характер начала расширения реальной Вселенной.

В 1972 г. после длительной работы Белинский, Лифшиц, Халатников построили общее (устойчивое) решение с сингулярностью, т. е. дали положительный ответ на первый вопрос.

По своим свойствам общее решение оказалось качественно таким же, как решение вблизи сингулярности для модели «перемешанного» мира (см. §§ 4 и 5 гл. 21).

При дальнейшем изложении мы остановимся на доказательстве наличия сингулярности в прошлом во Вселенной и на физических процессах вблизи самой сингулярности. Можно надеяться, что в будущем анализ этих процессов и следствий из них позволит установить истинный характер расширения Вселенной на самых ранних стадиях, при плотностях, существенно превышающих ядерную.

§ 2. Сингулярность в начале расширения

Предположения о том, что отклонения от фридмановской модели в начале расширения не позволяют избежать сингулярности, высказывались давно. Они основывались в общих чертах на следующих аргументах.

В настоящее время астрономическими методами непосредственно исследуется часть Вселенной, радиус которой меньше, чем гравитационный радиус массы этой части.

Тот факт, что при расширении массы из-под своего гравитационного радиуса сингулярность вначале неизбежна, казался весьма вероятным, хотя строгого доказательства не существовало. Отсюда делалось предположение, что расширение Вселенной начиналось от сингулярности, даже если ранние стадии расширения не описывались моделью Фридмана.

В 1965 г. появилась первая теорема Пенроуза (1965), касающаяся проблемы гравитационного коллапса. В этой теореме доказывалось, что сингулярность неизбежно возникает после сжатия тела до размеров меньше гравитационного радиуса. Вслед за этой работой последовал целый ряд теорем Пенроуза, Хоукинга и Героча, рассматривающих возникновение сингулярности как при коллапсе изолированных тел, так и в космологической проблеме. В 1970 г. Хоукингом и Пенроузом была опубликована обобщающая работа. Сформулированная в ней теорема использует предположения, которые непосредственно проверяемы астрономическими наблюдениями, поэтому она наиболее подходит для обсуждения проблемы сингулярности в космологии. В этой же работе можно найти подробную библиографию.

Все работы рассматриваемой серии используют для доказательства наличия сингулярности геометрические методы, в них не строятся аналитические решения вблизи сингулярности. Таким