

Может быть, более надежны будут данные по далеким скоплениям галактик. Подробнее о предлагаемых наблюдениях см. работы Соколова и Шварцмана (1974), Соколова и Старобинского (1975).

Невозможно и ненаучно определять «вероятность» того, что мир топологически сложен. Организация тщательных наблюдений для выяснения вопроса весьма желательна: строгое экспериментальное установление нетривиальности топологической структуры Вселенной имело бы огромное значение.

### § 13. Локальная топология, «белые дыры» и космология

Возможность необычных топологических структур в ОТО использовалась рядом авторов для объяснения астрономических явлений. Еще в 1928 г. Джинс писал в связи с вопросом о спиральных ветвях галактик: «Настойчиво заявляет о себе предположение, что центры туманностей имеют природу точек сингулярности, в которых в нашу Вселенную вливается вещество из каких-то других, совершенно неизвестных нам пространственных измерений и которые проявляют себя в нашей Вселенной как точки, где происходит непрерывное образование вещества».

Еще большее искушение — использовать втеkanie материи и энергии из «других измерений» для объяснения активности ядер галактик и квазаров. Нельзя ли это втеkanie использовать в теории стационарной Вселенной? Выясним, какие ограничения накладывает ОТО.

Окружим трехмерную область, в которой находится локальная сингулярность, далекой двумерной замкнутой поверхностью \*), лежащей в области, где гравитационное поле уже слабо. Изучая метрику пространства вне этой поверхности, можно определить общую массу, находящуюся внутри (а также вращательный момент), а измеряя электрическое поле, — полный заряд.

Уравнения ОТО, написанные для наружной, не сингулярной области, приводят к законам сохранения: масса, находящаяся внутри области, меняется лишь тогда, когда через поверхность втекает или вытекает вещество или энергия, в том числе и энергия гравитационных волн. Значит, независимо от самых фантастических предположений о сингулярности внутри поверхности, можно заранее сказать, сколько массы и энергии можно получить из внутренней области \*\*).

Таким образом, наглядная картина Джинса — отверстие в «другой мир», откуда в любом количестве может поступать энергия, — оказывается несовместимой с ОТО. Тем самым отпадает возможность

\*) Например, это может быть сферическая поверхность  $r = \text{const}$ .

\*\*) Необходимы две оговорки: 1) мы считаем справедливой ОТО; 2) не существуют отрицательные массы, области с отрицательной плотностью энергии.

переформулировать теорию стационарной Вселенной, заменяя втеканьем рождение вещества из  $S$ -поля.

Обсудим гипотезу «белых дыр»; в настоящее время это название употребляется вместо длинного названия «задержавшиеся в космологическом расширении ядра...» [Новиков (1964в)].

«Белая дыра» представляет собой гипотетическое тело, которое расширяется от сингулярности из-под своего гравитационного радиуса. Новиковым (1964в), а затем позже Неemanом (1965) была показана возможность существования таких тел (в рамках классической общей теории относительности, без учета квантовых эффектов) в расширяющейся Вселенной. Согласно этой гипотезе, белые дыры представляют собой задержавшиеся в космологическом расширении (из-за локальной неоднородности начальных условий) ядра вещества фридмановской космологической модели. Задержка расширения по времени внешнего наблюдателя может быть задана произвольно. Величина задержки, состав и кинетическая энергия вылетающего вещества задаются как начальные условия в сингулярности (сколь угодно близко к сингулярности). Задержавшееся ядро окружено полостью пониженной плотности (вакуолью) или в предельном случае — вакуумом.

Гипотезу «белых дыр» заманчиво (но не необходимо!) сопоставить с целым рядом не вполне еще выясненных астрофизических явлений, в частности с квазарами и взрывами ядер галактик.

Идея белой дыры отличается от идеи Джинса. Рассматривается одно пространство с односвязной топологией. Учитывается, что Вселенная в целом эволюционирует, расширяется, расширение начинается от сингулярности.

Внутри белой дыры в вакууме (вакуоли) сингулярность в простейшем сферически-симметричном случае шварцшильдовская, вне ее — фридмановская.

Сингулярность всюду — и вне белой дыры и внутри ее — пространственноподобна, т. е. существует система отсчета, в которой эта сингулярность одновременна. Однако из-за неоднородности сингулярности происходит задержка (по часам внешнего наблюдателя) расширения части вещества, и эта часть расширяется позднее для внешнего наблюдателя. При этом в зависимости от выбора длины шварцшильдовской сингулярности между задержавшимся веществом и внешним веществом задержка для внешнего наблюдателя может быть произвольно долгой.

Для вещества с нулевым давлением ( $P=0$ ) [Новиков (1964в)] построено точное решение в случае, когда в однородной изотропной Вселенной некоторая сферическая масса  $M$  заменяется «белой дырой» той же массы. В этом случае во внешней области сохраняется невозмущенное космологическое решение.

Если задержавшееся вещество имеет давление  $P \neq 0$ , в частности  $P = \epsilon/3$ , то при рассмотрении внутренней области вакуоли возник-

кают математические трудности, которые, однако, не являются принципиальными, не вызывают сомнений в существовании решения типа «белой дыры». Однако если во всей окружающей Вселенной  $P \neq 0$ , то внешнее решение возмущается. Действительно, без «белой дыры» в однородной Вселенной с  $P \neq 0$  масса внутри выделенного сопутствующего объема уменьшалась из-за адиабатического уменьшения энергии с расширением (см. гл. 1). В случае белой дыры центральное ядро не расширяется, масса его для внешнего наблюдателя не уменьшается. Кроме того, в решении есть разрыв давления на границе между невозмущенной Вселенной и вакуумным решением Шварцшильда. Разрыв давления приводит к истечению плазмы снаружи во внутреннюю область. «Белая дыра» вызывает аккрецию плазмы при любом соотношении между собственной массой дыры и массой, «вырванной» из космологического решения.

До сих пор существуют лишь грубые оценки эффекта, но полная картина явления не построена. Остается невыясненным, можно ли при учете аккреции использовать гипотезу «белой дыры» для объяснения астрофизических явлений.

Однако, помимо вопросов аккреции, существует другая сторона вопроса, связанная, во-первых, с тем, что в белой дыре в вакуоли вблизи шварцшильдовской особенности имеется весьма сильное анизотропное расширение пространства в отличие от изотропного расширения вне «белой дыры» в изотропной Вселенной; и, во-вторых, связанная с тем, что в гипотезе «белой дыры» далекий наблюдатель в течение всего времени задержки «видит» шварцшильдовскую сингулярность. В «белой дыре» под гравитационным радиусом  $r_g$  расположена так называемая  $T_+$ -область (см. ТТ и ЭЗ), в которой все частицы двигаются только от сингулярности к  $r_g$  и могут выходить из-под  $r_g$  к внешнему наблюдателю.

Первое обстоятельство — анизотропное расширение вблизи сингулярности — ведет, как показано в §§ 5 и 6 этой главы, к интенсивному спонтанному рождению частиц. Второе обстоятельство — то, что это происходит в расширяющейся  $T_+$ -области, — создает возможность выброса родившихся частиц из-под  $r_g$  к внешнему наблюдателю и, следовательно, может привести к спонтанному уменьшению массы «белой дыры». В действительности, как показано в работе Зельдовича, Новикова, Старобинского (1974), родившиеся частицы очень сильно меняют метрику пространства-времени под  $r_g$ . В результате в реальном случае горячей Вселенной родившиеся частицы оказываются «запертыми» в «белой дыре». Сначала, на самых ранних этапах расширения Вселенной, при  $t \ll r_g/c$ , частицы не выходят из-под  $r_g$  из-за давления окружающего газа горячей Вселенной, а позже, при  $t$  порядка  $r_g/c$  и  $t > r_g/c$ , из-за гравитационного самозамыкания — тяготение родившихся частиц не выпускает их наружу из-под  $r_g$ . На этапе  $t \ll r_g/c$  масса «белой дыры» уменьшается из-за того же эффекта адиабатического уменьшения

энергии, который имеет место для любого сопутствующего объема горячей Вселенной. На более позднем этапе «белая дыра» из-за истечения родившихся частиц может потерять лишь небольшую долю массы. Численные оценки см. в упомянутой выше работе Зельдовича, Новикова, Старобинского (1974).

Но весьма существенно, что все изменения, связанные с родившимися частицами, приводят к тому, что они препятствуют взрыву задержавшегося ядра, если задержка много больше  $r_g/c$ . «Белая дыра» либо взрывается практически сразу при  $t < r_g/c$ , либо не взрывается никогда (за исключением крайне вырожденных начальных условий).

Итак, основной вывод заключается в том, что в горячей Вселенной «белая дыра» представляет собой массу родившихся вблизи шварцшильдской сингулярности частиц. Вещество, состоящее из этих частиц, расширяется, и для далекого наблюдателя внешняя граница вещества асимптотически изнутри приближается к  $r_g$ .

Для времени  $t \gg r_g/c$  какое-либо излучение или истечение вещества из «белой дыры» экспоненциально быстро затухает (несмотря на то, что приближение вещества к  $r_g$  идет с расширением!).

Таким образом, хотя «белая дыра» может существовать неограниченно долго, но для внешнего наблюдателя она приобретает черты «черной дыры» — происходит застывание процессов, стремление границы вещества к  $r_g$ . Однако качественным отличием является то, что этот объект возникает как результат взрыва (квантового) изнутри — от сингулярности к  $r_g$ , а не в результате гравитационного коллапса — падения к  $r_g$  первоначально разреженной материи.

Переходя от физической природы «белых дыр» к собственно космологии, отметим следующее.

В книгах Зельдовича и Новикова (1967б, 1971) показано, что если «белые дыры» и существуют, то в начале космологического расширения доля массы, заключенная в «белые дыры», составляла ничтожную долю массы всей материи. Действительно, в начале расширения вещество представляет собой ультрарелятивистский газ с  $P = \epsilon/3$ . В ходе расширения масса этого газа в любом выделенном сопутствующем объеме уменьшается из-за адиабатического охлаждения. Масса же, заключенная в «белых дырах», не уменьшается после их обособления (после момента  $t \approx \left(\frac{r_g}{c}\right)^*$ ). Чтобы к настоящему моменту суммарная масса, заключенная в «белых дырах», не была слишком велика и не влияла очень существенно на время расширения Вселенной, необходимо, чтобы в начале расширения доля массы в «белых дырах» была достаточно мала. В упомянутых выше работах показано, что эта доля  $\alpha$  (зависящая от момента времени) должна быть на ранний момент не более, чем  $\alpha < \frac{10^6}{z}$ ,  $z \gg 10^3$ .

\*) Считаем, что «белые дыры» не обладают релятивистскими скоростями peculiarного движения.

К моменту  $t$ , соответствующему  $r_g/c$ , для массы порядка  $10^9 M_\odot$  (порядка массы квазара), т. е. для  $t \approx 10^4$  сек, получаем,  $\alpha < 10^9$ .

В заключение подчеркнем, что в этом параграфе речь шла о гипотетических объектах. На существование таких объектов во Вселенной пока нет никаких серьезных указаний. Детальная теория показывает, что свойства «белых дыр» сложнее, чем ранее предполагалось; квазары и взрывы ядер галактик нуждаются в другом объяснении.

Вернемся к вопросу о локальной топологии. На уровне самых малых масштабов — в масштабе планковской длины  $l_{пл} = 10^{-33}$  см — можно ожидать больших флуктуаций метрики и сложной топологии. Выдвигается гипотеза Уилера (1960) о структуре пространства, напоминающей пенопласт, с неисчислимым количеством топологических ручек, связывающих разные близкие области, и т. п. Для таких масштабов что-либо утверждать и что-либо опровергать трудно. Однако мы твердо знаем, что макроскопически усредненная плотность энергии и все компоненты  $T_{ik}$  этой структуры равны нулю или ничтожно малы, если  $\Lambda \neq 0$ . Вводя «идею пенопласта», нужно одновременно вводить такие методы перенормировки, которые обеспечивают этот макроскопический результат. К этому нас обязывает наблюдение, опыт — высший критерий истины.

## § 14. Статистическая физика и тяготение

Статистическая физика систем, в которых тяготение играет существенную роль, имеет нетривиальные, необычные особенности. В прошлом, без должного учета этих особенностей, поверхностное применение термодинамики (т. е., по существу, статистики) в космологии приводило к совершенно неправильным выводам. Так, в частности, возникла пресловутая проблема «тепловой смерти Вселенной» и, как следствие неправильных предпосылок, — флуктуационная теория \*) нарушения термодинамики в космологическом масштабе.

Для понимания особенностей задачи рассмотрим основную величину — статистический интеграл  $Z = \int e^{-E/kT} dp dx$ , взятый по всему фазовому объему системы\*\*). Энергия системы представляет собой сумму кинетической энергии частиц и энергии их взаимодействия, в частности гравитационного взаимодействия.

\*) Не смешивать с флуктуационной теорией возникновения неоднородностей (см. раздел III).

\*\*\*) Через  $Z$ , как известно, выражается свободная энергия системы  $F = -kT \ln Z$ . Легко выразить с помощью  $Z$  и все другие величины: энергию  $S = -\frac{\partial F}{\partial T}$  и т. д.