

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

530.12:531.51

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. ВВОДНЫЙ ОБЗОР *)

С. В. Хокинг, В. Израэль

1.1. ИСТОРИЧЕСКАЯ ОСНОВА

Древним грекам представлялось самоочевидным, что существует преимущественная скорость (стандарт состояния покоя), которую приобретают все частицы, не подверженные действию каких-то внешних сил. Наличие этой преимущественной скорости приводит к концепции Абсолютного Пространства или, более точно, позволяет установить, что в разные моменты времени события произошли в одной и той же точке пространства. Настолько невысок был статус экспериментальных доказательств и таково было отношение к древнему учению, что этот взгляд устоял вплоть до конца XVI века, когда Галилей показал, что он ошибочен. Идеи и наблюдения Галилея были систематизированы Ньютоном в его законах механики. Первый из них гласил, что тело продолжает равномерно двигаться по прямой линии, если на него не действуют внешние силы. Это означало необходимость отказа от концепции Абсолютного Пространства, поскольку отсутствовал способ, с помощью которого можно было бы его измерять. Однако Галилей и Ньютон сохранили концепцию Абсолютного Времени, т. е. возможность установить совпадение во времени событий, имевших разное пространственное положение. Абсолютное Время было определено как время, появляющееся в ньютоновских законах движения. Оно могло измеряться хорошо отрегулированными часами, которые все согласовывались в пределах технических возможностей того периода. Абсолютное значение времени можно было задать, отсчитывая его от сотворения мира, которое по оценке архиепископа Ашера произошло в 4004 г. до н. э.

Ньютоновское представление о структуре пространства и времени оставалось неоспоримым до тех пор, пока в XIX веке, в основном усилиями Фарадея и Максвелла, не была развита электромагнитная теория. Максвелл показал, что электромагнитные волны должны распространяться со скоростью 186 000 миль в секунду — со скоростью света. Но что это означает, если абсолютно время, но не пространство? Скорость по отношению к чему? В попытке преодолеть этот парадокс было введено понятие светового эфира как среды, в которой распространяются электро-

*) General Relativity: An Einstein Centenary Survey/Ed. S. W. Hawking, W. Israel. — Cambridge; London; New York; Melbourne: University Press, 1979. — Ch. 1: Introductory Survey, pp. 1—23. — Перевод М. А. Васильева.

С. В. Хокинг — физик-теоретик, профессор Кембриджского университета, Великобритания; В. Израэль — физик-теоретик, профессор Альбертийского университета, Канада.

© Cambridge University Press, 1979.

© Перевод на русский язык гл. 1, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1981.

магнитные волны. По существу это было возвращение к абсолютному пространству. Однако в знаменитых сериях экспериментов Майкельсона и Морли не удалось обнаружить какое-либо движение Земли относительно системы отсчета, определяемой эфиром. Не ясно, знал ли Эйнштейн об эксперименте Майкельсона — Морли, когда в 1905 г., как ответ на парадокс, он предложил специальную теорию относительности (Холтон, 1972), в которой ни пространство, ни время не были абсолютными, а рассматривались как координаты (метки) на четырехмерном пространственно-временном континууме или многообразии. Структура пространства-времени характеризовалась метрикой Минковского, которая определяла истинное расстояние или истинный временной интервал между двумя событиями.

В специальной теории относительности пространственно-временная метрика является фиксированной величиной. Высочайшим вальсом гения Эйнштейна было осознание того, что ей можно придать динамическую роль. После ряда неудачных попыток в 1915 г. он пришел к общей теории относительности. В этой теории метрика пространства-времени не была больше плоской, как в специальной теории относительности, а искривлялась (искажалась) материей и энергией, содержащимися в пространстве-времени. Четыре года спустя, в 1919 г., экспедиция по наблюдению затмения подтвердила, что свет, проходящий вблизи Солнца, отклоняется на малый угол гравитационным полем. Человечество было поставлено перед фактом, что оно живет в искривленном мире.

Хотя общая теория относительности была признана важнейшей идейной революцией, обычно считалось, что она имеет небольшое практическое значение. При этом полагалось, что гравитационные поля никогда не могут быть настолько сильными, чтобы имело место значительное расхождение между предсказаниями этой теории и намного более простой ньютоновской теории. Первое доказательство ошибочности этой точки зрения появилось в начале 20-х годов с открытием Слайфера и Хаббла, которые обнаружили, что свет от удаленных галактик систематически смещен в красную сторону, т. е. в сторону больших длин волн. Чем дальше от нас была галактика, тем больше красное смещение. Это интерпретировалось как указание на то, что галактики удаляются от нас со скоростями, пропорциональными их расстоянию. Примерно в то же время Фридман обнаружил, что полевые уравнения общей теории относительности допускают решения, описывающие Вселенную, которая является однородной и изотропной в пространственных направлениях, но расширяющейся со временем. С тех пор дальнейшие наблюдения и теоретические исследования подтвердили, что по крайней мере в настоящую эпоху фридмановское решение является очень хорошим приближением к крупномасштабной структуре Вселенной.

Особенность фридмановских решений (которой в то время не придавалось слишком большого значения) состояла в том, что отвечающая им модель Вселенной в прошлом имела сингулярную эпоху, в которую вся материя была сконцентрирована в единственной точке. Казалось, что в реальной вселенной условия никогда не могли бы стать настолько экстремальными. Открытие родственного типа, значение которого также в свое время не было оценено по достоинству, было сделано Чандрасекхаром и Ландау в начале 30-х годов. Они показали, что в соответствии с ньютоновской теорией тяготения, для холодной звезды должна существовать максимальная масса порядка одной солнечной массы. С одной стороны, эта работа указывала на возможность существования очень плотных объектов в сильных гравитационных полях. С другой стороны, относительно легко было показать, что нелинейность полевых уравнений общей теории относительности только ухудшает положение и уменьшает

максимальную массу. Тогда возникает вопрос: что происходит со звездой с массой большей, чем максимальная, когда она исчерпает свое ядерное топливо и не сможет больше поддерживать свою температуру? Ответ был дан Оппенгеймером в 1939 г.: под действием собственной гравитации звезда будет коллапсировать к единственной точке. Большинство исследователей того времени, включая Эйнштейна и Эддингтона, не были склонны согласиться с этим. Действительно, в 1939 г. Эйнштейн написал работу, в которой утверждалось, что коллапсирующие объекты не могут существовать (Эйнштейн, 1939).

Очень немного было сделано в общей теории относительности в 40-х и 50-х годах. Это произошло отчасти потому, что большинство физиков занималось в первую очередь атомной и ядерной физикой. Отчасти также сыграло роль то, что общая теория относительности считалась теорией, необладающей большой физической важностью. Исключение составляла космология, но к ней относились как к области, в которой необузданные теоретические спекуляции не ограничены какими-либо реально возможными наблюдениями. Это отношение начало меняться в конце 50-х годов, когда новая техника сильно расширила возможности наблюдений. Знаменательной вехой явился первый Техасский симпозиум по релятивистской астрофизике. Он состоялся в 1963 г., вскоре после открытия квазаров, — очень удаленных и компактных объектов, излучающих мощные потоки света и радиоволн. С самого начала было ясно, что если квазары действительно находятся на таких расстояниях, как это казалось (и это было предметом некоторых разногласий), они, несомненно, должны содержать очень большие концентрации масс и сильные гравитационные поля и могут быть даже подобны гравитационно-коллапсирующим объектам, которые описал Оппенгеймер. Теперь в полной мере пробудился интерес к подобным объектам.

В 1965 г. было сделано новое неожиданное открытие. Пензиас и Вильсон, занимаясь разработкой спутниковой системы связи, обнаружили, что в их микроволновом приемнике присутствует шум, который не может быть устранен или объяснен какими-либо источниками на Земле, в Солнечной системе или Галактике. В конце концов они поняли, что он имеет космологическое происхождение. Последующие измерения других исследователей показали, что он обладает спектром теплового излучения при температуре около 3 К. Это излучение было проинтерпретировано как след от плотной фазы Вселенной. В действительности оно было предсказано Гамовым с сотрудниками еще в 1948 г., хотя в то время немногие воспринимали их модель серьезно. Опиравшиеся на фридмановскую модель Вселенной вычисления Гамова и последующие их уточнения предсказывали, что приблизительно через сто секунд после начальной сингулярности около одной четверти изначальных протонов и нейтронов во Вселенной должно перейти в гелий и небольшое количество дейтерия. Соответствующие распространенности этих веществ представляются согласующимися с данными наблюдений, а объяснить такое большое количество гелия каким-то иным способом очень трудно.

Таким образом, становится ясным, что модели Фридмана являются хорошим приближением, по крайней мере начиная с первых ста секунд. А что можно сказать о более ранних временах? Действительно ли Вселенная имела сингулярное начало, в котором плотность была бесконечной? В моделях Фридмана предположение о пространственной изотропности означало, что относительное движение пары частиц должно быть чисто радиальным, а предположение о пространственной однородности исключало возможность существования градиентов давления. Не удивительно поэтому, что мировые линии всех частиц в прошлом должны были пересе-

каться в единственной точке. В реалистической модели, однако, можно было бы ожидать, что будут существовать некоторые поперечные скорости и неоднородности. При движении назад во времени они могли бы значительно возрастать и приводить к тому, что частицы миновали бы друг друга, образуя вместо сингулярности несингулярный «отскок». Это являлось причиной того, что начальной сингулярности в моделях Фридмана не придавалось слишком большого значения. Однако между 1965 и 1970 гг. Пенроуз и Хокинг доказали ряд теорем, которые совершенно окончательно показали, что сингулярность должна была существовать, если справедлива общая теория относительности. К этому заключению в 1969 г. пришли также Лифшиц, Халатников и Белинский.

Теоремы Пенроуза и Хокинга также показали, что сингулярность должна быть и при коллапсе выгоревшей звезды, даже если она не являлась в точности сферической (как предполагалось Оппенгеймером). Однако в этом случае, по-видимому, должно иметь место явление, которое было названо «космической цензурой»: сингулярность осуществляется в области пространства-времени, из которой ни свет, ни что-либо другое не могут вырваться в остальную часть Вселенной. Уилером, который являлся также вдохновителем большой работы над этим вопросом, такие области были названы «черными дырами». Стимулированный теоремой Израэля и более ранними результатами Дорошкевича, Зельдовича и Новикова, он предположил, что «черная дыра не имеет волос». Под этим он подразумевал, что черная дыра будет быстро приходить в стационарное состояние, которое определяется только тремя параметрами — массой, моментом количества движения и электрическим зарядом — и в остальном не зависит от особенностей тела, в результате коллапса которого образовалась черная дыра. Эти стационарные состояния будут описываться семейством решений Керра-Ньюмена. Позднее предположение об «отсутствии волос» было доказано объединенными усилиями Израэля, Картера, Хокинга и Робинсона. Этот результат имел существенное практическое значение, поскольку он означал, что можно предсказать структуру гравитационного поля произвольной черной дыры. Таким образом, стало возможным построение моделей астрофизических объектов, о которых предполагалось, что они содержат черные дыры, и сравнение их свойств с результатами наблюдений.

Поиск черных дыр был сильно стимулирован открытием быстро пульсирующих радиоисточников, или, как их называют, «пульсаров», сделанным в 1968 г. Они были истолкованы как вращающиеся нейтронные звезды — тела с массой порядка солнечной, но радиусом всего 10 км, которые в основном состоят из нейтронов, упакованных друг с другом так же плотно, как в атомных ядрах. Впервые на возможность существования нейтронных звезд указал Цвикки в 1934 г., а их теория была детально разработана Уилером и его школой. В нейтронных звездах гравитационный потенциал должен составлять значительную долю единицы. Таким образом, не будет слишком большой экстраполяцией предположение о существовании объектов, в которых потенциал достигает единицы, т. е. черных дыр. Конечно, по самому их определению, черные дыры не могут излучать никакого света (за исключением эффекта, который будет упомянут ниже), так что их нельзя наблюдать непосредственно. Однако они могут быть обнаружены по гравитационному влиянию на близлежащую материю.

В 1972 г. быстро флуктуирующий источник рентгеновских лучей, названный Cygnus X-1 (Лебедь X-1), был отождествлен с двойной системой, состоящей из нормальной звезды-гиганта с массой порядка пятнадцати солнечных масс и невидимого компаньона, масса которого по

оценкам составляет по меньшей мере четыре, а более вероятно, шесть солнечных масс. Это очень хорошо соответствовало модели, предложенной Шакурой и Сюняевым, а также Принглом и Рисом, в которой материя увлекается (перетекает) с нормальной звезды и падает по направлению к компаньону. Приближаясь к нему, материя будет развивать спиралеобразное движение и сильно нагреваться, испуская рентгеновские лучи. Для того чтобы эта модель работала, компаньон должен быть компактным объектом — таким, как белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра. Нижний предел в четыре солнечных массы, по-видимому, исключает первые две возможности и тем самым приводит к выводу, что Лебедь X-1, вероятно, содержит черную дыру. Существуют альтернативные модели, не включающие черную дыру, но все они представляются довольно искусственными. В течение того же периода, когда качественно новые явления, такие, как черные дыры, начали становиться доступными для наблюдений, имел место устойчивый прогресс в количественной проверке общей теории относительности внутри солнечной системы. Эйнштейновская теория победоносно прошла через эти испытания, но многие конкурирующие теории гравитации были исключены. Те же немногие, что остались, кажутся до некоторой степени надуманными.

Другой областью, к которой возрос экспериментальный интерес, было гравитационное излучение. В 1918 г. Эйнштейн показал, что в линейном приближении уравнения гравитационного поля допускают решения в виде волн, распространяющихся со скоростью света. В течение долгого времени существовали расхождения в вопросе о том, проявляются ли на самом деле гравитационные волны как-либо физически и уносят ли они энергию из системы, которая их излучила. Окончательно этот вопрос был разрешен в 1962 г. Бонди, Саксом, Ньюменом и Пенроузом, а также их сотрудниками, которые показали, что если система излучает гравитационные волны, то ее масса (измеренная на бесконечности) будет уменьшаться. Однако чрезвычайная слабость гравитационного взаимодействия делает крайне трудной задачей детектирование этих волн. Тем не менее их экспериментальный поиск был начат Вебером, использовавшим антенну, состоящую из подвешенных в вакууме массивных алюминиевых болванок. Хотя, как стало ясно сейчас, первые надежды на обнаружение гравитационных волн были слишком оптимистичными, имеется некоторая уверенность в том, что технические усовершенствования позволят это сделать в течение следующих двадцати лет.

Общая теория относительности является чисто классической теорией. Еще в 20-х и 30-х годах было обнаружено, что все остальные поля, по-видимому, управляются квантовыми законами. Парадоксально, но Эйнштейн, который сыграл важную роль в развитии квантовой теории, никогда не мог по-настоящему принять присущее ей качество неопределенности или случайности. Его ощущения были выражены в утверждении «Бог не играет в кости». Тем не менее это не остановило других в попытках проквантовать общую теорию относительности. В то время казалось, что это представляет скорее академический интерес. При этом считалось, что даже эффекты классической общей теории относительности должны быть очень малы, так что квантовые должны быть совершенно неизмеримыми. Положение изменилось, однако, когда было понято, что Вселенная, вероятно, имела сингулярное начало. Вблизи сингулярности сильные гравитационные поля могли создавать значительные количества частиц. В самом деле, в 1969 г. Зельдович обратил внимание на то, что рождение частиц в первоначально анизотропной и неоднородной Вселенной могло подавить анизотропности и неоднородности, обеспечив очень высокую степень изотропности Вселенной, наблюдаемой нами сегодня.

Другой ситуацией, в которой надо ожидать сильных гравитационных полей, является гравитационный коллапс с образованием черной дыры. В 1969 г. Пенроуз предложил классический мысленный эксперимент, который показывал, что возможно извлечение энергии из вращающейся черной дыры. Волновой аналог этого процесса был назван «суперрадиацией»: падающие волны определенных мод будут усиливаться (вместо того, чтобы поглощаться) вращающейся черной дырой и уносить часть ее вращательной энергии. В 1971 г. Зельдович указал, что на квантовом уровне это усиление можно рассматривать как вынужденное излучение, и, следовательно, в этих модах должна существовать соответствующая интенсивность спонтанного излучения, вызванного вакуумными флуктуациями рассматриваемого поля. В 1973 г. это было подтверждено детальными вычислениями Унру. Почти в то же время Хокинг обнаружил, что даже если черная дыра не вращается, должно существовать дополнительное излучение во всех модах. Это излучение оказывается тепловым и в точности таким, как если бы черная дыра была обычным телом с температурой, обратно пропорциональной ее массе. Это исключительно хорошо соответствовало некоторым аналогиям между черными дырами и термодинамикой, обнаруженным ранее Бардиным, Картером, Хокингом и Бекенштейном. В частности, теперь стало ясно, что черные дыры должны обладать внутренней энтропией, которая пропорциональна площади горизонта событий, — границы черной дыры. Эту энтропию можно интерпретировать как отвечающую внутренним состояниям черной дыры, которые ненаблюдаемы извне черной дыры из-за теоремы об «отсутствии волос». Испущенное излучение может рассматриваться как протуннелировавшее из ненаблюдаемой области пространства-времени внутри черной дыры. Его случайный тепловой характер будет соответствовать тогда отсутствию информации о внутреннем поведении черной дыры.

Исследования по рождению частиц в космологии и черных дырах, описанные выше, были выполнены в полуклассическом приближении, в котором гравитационное поле описывается заданной некантованной метрикой, отвечающей искривленному пространству, а материальные поля рассматриваются квантовомеханически на фоне этой метрики. Однако успех с черными дырами снова пробудил интерес к попыткам проквантовать само гравитационное поле. Трудность состоит в том, что методы теории возмущений, имевшие успех при квантовании электродинамики и теории Янга — Миллса, по-видимому, не работают в гравитации. Одной возможностью является использование некоторого подхода вне рамок теории возмущений, отражающего тот факт, что гравитационное поле может обладать многими различными глобальными структурами. Другая — состоит во введении дополнительных полей и инвариантностей, которые могли бы обеспечить сокращение бесконечностей, появляющихся в теории возмущений. Многообещающим продвижением в этом направлении является супергравитация, которая была предложена в 1976 г. Феррарой, ван Ньютенхёйзенем и Фридманом и независимо Дезером и Зумино. Тем не менее положение с квантовой гравитацией все еще остается очень неясным, хотя большие усилия, прикладываемые в настоящее время, вселяют надежду, что в результате будет достигнут существенный прогресс.

В этом кратком историческом очерке мы не имели места для того, чтобы упомянуть работу многих людей, которые внесли важный вклад. В оставшихся разделах этой статьи мы попытаемся дать обзор некоторых из основных областей исследований в общей теории относительности за последние шестьдесят лет или около того. Это будет служить введением к последующим статьям.

1.2. ПОЛЕВЫЕ УРАВНЕНИЯ

В общей теории относительности пространство-время представляет собой четырехмерное многообразие M , на котором задана метрика g_{ab} . В окрестности точки $p \in M$ могут быть выбраны локальные координаты x^a («локально-инерциальные координаты»), такие, что в точке p компоненты g_{ab} будут принимать значения, отвечающие пространству Минковского: $g_{ab} = \text{diag}(1, 1, 1, -1)$ и $\partial g_{ab}/\partial x^c = 0$. Это означает, что локально пространство-время имеет ту же структуру, что и в специальной теории относительности, и тем самым предсказываются все экспериментально наблюдаемые эффекты специальной теории относительности такие, как растяжение времени и возрастание массы со скоростью. В частности, время, регистрируемое часами, определяется метрическим интервалом вдоль их мировой линии, а свет распространяется вдоль геодезических нулевой длины. Однако в большем масштабе могут иметь место значительные отклонения от метрики Минковского. Они интерпретируются, как описывающие гравитационное взаимодействие материи (энергии) в пространстве-времени. На этой стадии реализуется то, что называется «метрической» теорией гравитации (см. гл. 2, написанную Виллом). Чтобы теория была полной, необходимо снабдить ее полевыми уравнениями, связывающими метрику с распределением материи. Можно ожидать, что в эти уравнения материя будет входить только через ее тензор энергии-импульса, поскольку эксперименты, впервые выполненные Галилеем и впоследствии уточненные Этвешем, Дикке, Брагинским и Кройценом, показывают, что сила тяготения связана только с энергетическим содержанием тела. Если не вводить в пространстве-времени никакой дополнительной геометрической структуры, кроме самой метрики, и потребовать, чтобы полевые уравнения не содержали производных выше второго порядка, это однозначно приводит к уравнениям Эйнштейна (Эйнштейн, 1915; Гильберт, 1915)

$$R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R + \Lambda g_{ab} = 8\pi G T_{ab};$$

здесь R_{ab} — тензор Риччи для метрики g_{ab} , R — скалярная кривизна, T_{ab} — тензор энергии-импульса и G — ньютоновская гравитационная постоянная. «Космологический член» Λg_{ab} (Λ — постоянная) будет обсуждаться в следующем разделе. Связанными с ним эффектами в большинстве случаев можно пренебречь.

Сразу не очевидно, что эти совершенно геометрические полевые уравнения должны обладать требуемыми свойствами:

- 1) В пределе малых масс, больших расстояний и низких скоростей они должны воспроизводить результаты ньютоновской теории тяготения.
- 2) Они должны определять метрику по заданным начальным данным на некоторой пространственноподобной поверхности с точностью до произвола, связанного с возможностью осуществления координатных преобразований.

В своей основополагающей работе 1915 г. путем исследования линейного приближения к полевым уравнениям Эйнштейн убедительно продемонстрировал свойство 1). Отсюда и из следующего (пост-ньютоновского) приближения он получил три своих знаменитых теста общей теории относительности: гравитационное красное смещение, отклонение света Солнцем и смещение перигелия. Он показал также, что линеаризованное приближение согласуется со свойством 2), но более полное доказательство было дано позднее. В настоящее время мы можем показать, что соответствующим образом дифференцируемые начальные данные определяют един-

ственное решение в конечном временном интервале от начальной поверхности (см. гл. 4, написанную Фишером и Марсденом). Требования на дифференцируемость, однако, все еще являются более сильными, чем это кажется физически обоснованным. Кроме того, отсутствует доказательство существования решения при произвольном времени. Это последнее обстоятельство тесно связано с наличием сингулярностей, обсуждаемых ниже.

В своих первоначальных работах Эйнштейн принимал как дополнительный постулат, что малые изолированные незаряженные тела небольшой массы (пробные тела) двигаются вдоль геодезических, отвечающих метрике g_{ab} . В дальнейшем было показано, однако, что этот постулат является следствием локального сохранения тензора энергии-импульса, что в свою очередь вытекает из полевых уравнений. Для того чтобы анализировать движение тел, гравитационной массой которых нельзя пренебречь, необходимы приближенные схемы. Существуют два основных метода: приближение медленного движения и приближение быстрого движения. Первое было введено в 1938 г. Эйнштейном, Инфельдом и Хофманом для описания движения системы масс, являющихся по предположению точечными, в создаваемом ими переменном гравитационном поле. В этом подходе возмущения разлагаются в ряд по степеням скоростей, о которых предполагается, что по порядку величины они совпадают с квадратным корнем из энергии гравитационной связи. Последующая работа над вопросом о гравитационном коллапсе показала, что картина точечных масс, движущихся по времениподобным геодезическим, слишком идеализирована. Однако Чандрасекхаром схема была распространена на случай непрерывного распределения материи, а Д'Эасом — на случай черных дыр, которые являются наиболее близким приближением к точечным массам. В схеме быстрого движения разложение ведется по степеням энергии гравитационной связи, но она больше не предполагается связанной со скоростями, которые могут быть велики. Это значительно усложняет анализ различия между порядками величин, входящих в разложение по теории возмущений, и точность полученных результатов часто неясна.

В общей теории относительности тензор энергии-импульса удовлетворяет уравнению

$$T^a_b{}_{;b} = 0,$$

вытекающему из полевых уравнений. Эти соотношения выражают локальное сохранение энергии и импульса в локальных координатах Минковского. Однако кривизна метрики, вообще говоря, препятствует тому, чтобы, будучи проинтегрированными, они приводили к глобальным законам сохранения. Физическая причина этого состоит в том, что T^{ab} описывает только энергию и импульс материальных полей и не содержит вклада от гравитационного поля. В действительности не существует локально определенной величины, которая являлась бы мерой энергии и импульса гравитационного поля, поскольку последнее всегда может быть приведено к нулю выбором локально-инерциальных координат. Эта нелокализуемость гравитационной энергии вызвала большую путаницу на начальном этапе развития общей теории относительности. Один из методов преодоления этой трудности, предложенный Эйнштейном, состоит во введении для каждого данного набора координат x^a объекта, называемого псевдотензором t_a^b , который предполагается описывающим гравитационную энергию и импульс. Он удовлетворяет уравнениям

$$\frac{\partial}{\partial x^b} (t_a^b + T_a^b) = 0.$$

Эти уравнения можно проинтегрировать, чтобы получить глобальные законы сохранения. С помощью преобразования координат величину t_2^2 можно обратить в нуль в любой заданной точке. Эйнштейн показал, что тем не менее полные энергия и импульс будут неизменными при условии, что метрика соответствующим образом стремится к метрике Минковского на пространственной бесконечности. Дальнейшие исследования таких асимптотически-плоских пространств показали, что эти полные энергия и импульс, будучи измеренными на бесконечности, могут быть определены просто из асимптотической формы метрики на асимптотически-плоской пространственноподобной начальной гиперповерхности. Следует ожидать, что материальные поля будут давать положительный вклад в массу, измеренную на бесконечности. Напротив, поскольку гравитация имеет характер притяжения, можно ожидать, что гравитационная потенциальная энергия будет давать отрицательный вклад. Таким образом, не очевидно, что полная масса должна быть положительной. Тем не менее одним из основных недоказанных предположений общей теории относительности является то, что для несингулярных начальных данных она всегда положительна. Происходит, по-видимому, следующее: если рассмотреть последовательность наборов начальных данных, в которых материя концентрируется во все меньших и меньших областях, то образуется горизонт событий и материя коллапсирует в черную дыру с положительной массой прежде, чем отрицательная гравитационная потенциальная энергия превысит положительный вклад от материи.

Изучение проблемы начальных данных (проблемы Коши) показывает, что уравнения Эйнштейна образуют квазилинейную гиперболическую систему. Это означает, что гравитационные эффекты изменения в распределении материи распространяются вдоль бихарактеристик системы, которые в действительности являются нулевыми (световыми) геодезическими и совпадают с траекториями световых лучей. Другими словами, гравитационные возмущения распространяются со скоростью света. Тем не менее в течение долгого времени существовали расхождения в вопросе о том, уносят ли эти «гравитационные волны» энергию из ограниченной системы в асимптотически-плоском пространстве. На этот вопрос было трудно ответить, используя определение массы в терминах пространственноподобных поверхностей, потому что более поздние пространственноподобные поверхности будут пересекать гравитационные волны и, следовательно, определенная на них масса будет включать также энергию волн. Эта проблема была преодолена Бонди, Метцнером, Ван ден Бургом и Саксом в 1962 г. с помощью введения концепции массы, определенной на удаляющейся нулевой (светоподобной) поверхности. Они смогли показать, что масса, связанная со следующими друг за другом светоподобными поверхностями, уменьшается на положительную величину, которая является мерой гравитационного излучения, уходящего на бесконечность между светоподобными поверхностями. Однако все еще остается нерешенной проблема об установлении связи этой массы с той, которая определена на пространственноподобных поверхностях. Можно ожидать, что пространственноподобная масса будет совпадать с пределом нулевой массы, когда светоподобная поверхность выбирается в бесконечном прошлом. Другой, не выясненной до конца, проблемой является установление связи между уменьшением массы на бесконечности и движением тел, вызывающих гравитационное излучение. Можно было бы ожидать какого-то рода реакции излучения, как в электродинамике, но попытки получить это из приближенных схем, упоминавшихся выше, привели к противоречивым результатам.

1.3. КОСМОЛОГИЯ

Ньютоновская теория тяготения была сформулирована применительно к конечному набору тел — Солнечной системе. Однако при попытке применить ее ко всей Вселенной возникают проблемы: если материальное содержание Вселенной было конечно, то почему вся материя не собралась вместе, образовав одно большое тело? В то время, а в действительности вплоть до 20-х годов XX века, никто не рассматривал возможность, состоящую в том, что тела во Вселенной могут систематически сближаться или удаляться по отношению друг к другу. Поэтому Ньютон предположил, что Вселенная содержит бесконечное число тел, которые распределены однородно и покоятся друг относительно друга. Им предполагалось также, что они не будут падать по направлению друг к другу из-за отсутствия выделенной точки конденсации. Эта концепция бесконечной однородной статической Вселенной столкнулась с рядом проблем. Прежде всего будет бесконечным гравитационный потенциал и не будет хорошо определена действующая на тело сила тяготения. В попытке преодолеть эту трудность было сделано предположение, что ньютоновский закон притяжения может ослабляться на больших расстояниях. Этого можно было добиться путем добавления к уравнению Пуассона «космологического члена»:

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho + \Lambda\Phi,$$

где Φ — гравитационный потенциал, Λ — «космологическая постоянная» и ρ — плотность материи. Другая проблема, на которую впервые указал Халли и позднее Ольберс, в наши дни называется «парадоксом Ольберса». Она состояла в том, что если бы Вселенная существовала в своем теперешнем состоянии бесконечное время, то почти по каждому направлению взгляд упирался бы в поверхность некоторой звезды и, следовательно, небо должно было бы быть таким же ярким, как поверхность Солнца. Из-за конечности скорости света эту трудность можно было бы преодолеть, постулировав, что звезды находились в своих фиксированных положениях всегда, но светить они начали только в некоторый конечный момент времени в прошлом. Однако не было ясно, почему они должны были внезапно начать светить, не светив все предшествующее время.

Ньютоновская теория была подвергнута критике епископом Беркли в связи с тем, что она наделяла пространство его собственной структурой. Хотя в этом пространстве не было абсолютного стандарта покоя, так как были эквивалентны все равномерные прямолинейные движения, в нем имелись абсолютный нуль ускорения (в котором не действуют никакие внешние силы) и абсолютный нуль угловой скорости (в котором отсутствуют центробежные силы). Эта структура пространства будет существовать, даже если бы Вселенная не содержала никакой материи. Беркли утверждал, что такие абсолютные свойства пространства метафизичны и что надо говорить только о движении материи по отношению к другой материи во Вселенной. Идеи Беркли были возрождены Махом и сейчас обычно известны как «принцип Маха». Воззрения Маха оказали сильное влияние на Эйнштейна, и он верил, что общая теория относительности включает в себя принцип Маха. Однако это не так, потому что уравнения Эйнштейна допускают много решений, включая плоскую метрику Минковского, которая отвечает пространству, вообще не содержащему никакой материи. В действительности, сделав метрику динамическим полем, Эйнштейн устранил различие между материей и метрикой, которая характеризует структуру пространства-времени. С современной точки зрения можно сказать, что гравитон (возбуждение метрики) в той же мере яв-

ляется элементарной частицей, как и такие «кванты материи», как фотон или электрон.

Первая попытка Эйнштейна построить общерелятивистскую космологическую модель была сделана в 1917 г., когда Вселенная все еще считалась статической. Для того чтобы сбалансировать гравитационное притяжение материи во Вселенной, он ввел в полевые уравнения «космологический член» Λg_{ab} , который был аналогичен ньютоновскому космологическому члену. Однако если ньютоновская модель была бесконечна как в пространстве, так и во времени, эйнштейновская модель была бесконечна во времени, но ее пространственные сечения были конечны (но неограничены) и в действительности представляли собой трехмерные сферы. Эйнштейн полагал, что это единственная космологическая модель с положительным Λ , которая не является сингулярной. Однако в 1919 г. де Ситтер получил другое решение, в котором плотность материи была нулевой, а пробные частицы удалялись друг от друга со все возрастающими скоростями. Приблизительно в то же время начали накапливаться данные, указывающие на то, что близлежащие галактики удаляются от нас. Решение де Ситтера не являлось удовлетворительной космологической моделью, потому что оно не содержало материи. Но в 1922 г. Фридман показал, что уравнения Эйнштейна допускают пространственно изотропные, однородные решения, описывающие равномерное распределение расширяющейся материи. Этот класс решений соответствовал наблюдениям того времени, а в действительности и всем последующим измерениям крупномасштабной структуры Вселенной. Фридмановские модели были свободны от трудности, связанной с парадоксом Ольберса, поскольку расширение Вселенной приводило к красному смещению света от удаленных галактик и тем самым к уменьшению его интенсивности. Кроме того, они начинались с сингулярности в прошлом, отделенной от нас конечным интервалом времени. Эти модели не требовали введения космологического члена, чтобы сбалансировать гравитационное притяжение материи, потому что материя была нестационарна. Причина для введения космологического члена поэтому исчезла, и в настоящее время он обычно игнорируется. Измерения по удаленным галактикам устанавливают верхнюю границу для $|\Lambda|$ в 10^{-66} см⁻².

Хотя пространственно-однородные и изотропные фридмановские модели оказались очень удачными для описания крупномасштабной структуры Вселенной, они, очевидно, не отражают локальных иррегулярностей — таких, как звезды и галактики. Чтобы описать их, надо исследовать отклонения от моделей Фридмана. Впервые это было сделано в 1946 г. Лифшицем, который использовал линеаризованное приближение. Он обнаружил, что малые увеличения плотности будут нарастать, но только довольно медленно. Таким образом, трудно понять, почему Вселенная должна быть настолько однородной и изотропной в большом масштабе и при этом все же содержать начальные возмущения, которые были достаточно велики для того, чтобы к настоящей эпохе вырасти в галактики. Мы отсылаем читателя к гл. 9, написанной Дикке и Пиблсом. Класс отклонений от моделей Фридмана, который может быть проанализирован вне рамок линейного приближения, представляют собой анизотропные, но пространственно-однородные модели. Они были впервые рассмотрены Таубом, а впоследствии более детально изучены Мизнером. Наблюдаемая изотропия космического микроволнового фонового излучения (реликтового излучения) устанавливает чрезвычайно низкие ограничения сверху на какую-либо крупномасштабную анизотропию в настоящую эпоху. Возможные причины, предложенные для объяснения того, почему Вселенная должна быть настолько изотропной сейчас, даже если она

начиналась из хаотического состояния, включают рождение частиц в очень ранней Вселенной и нейтринную вязкость в несколько более позднюю эпоху. Мы отсылаем читателя к гл. 10 и 11, написанным Зельдовичем и Мак-Калумом.

Все модели Фридмана без космологического члена имеют сингулярное начало при конечном времени в прошлом. Если космологическая постоянная положительна и достаточно велика, оказывается возможным получить модель без сингулярности, в которой за фазой сжатия следует «отскок» и затем расширение. Однако довольно легко показать несовместимость этой модели с результатами наблюдений. Идея о том, что Вселенная и само время имели начало, принималась с большой неохотой. По этой причине Бонди, Гоулд и Хойл в 1948 г. предложили модель стационарного состояния. Это была фридмановская модель, в которой расстояние между соседними частицами возрастало экспоненциально со временем, так что скорость расширения была во все времена одной и той же. Чтобы поддерживалась постоянная величина плотности, по мере удаления частиц друг от друга с установившейся скоростью образовывалась новая материя. Это «непрерывное рождение» требовало либо нарушения локального сохранения энергии, либо введения поля с отрицательной плотностью энергии, рождение которого уравнивало бы рождение материи с положительной плотностью. Обе эти альтернативы представляются довольно нежелательными, потому что они могли бы допускать самопроизвольное возрастание скорости рождения. Тем не менее эта модель обладала той несомненно привлекательной чертой, что, не имея «начала мира», она в то же самое время избегала парадокса Ольберса за счет расширения и красного смещения света от удаленных галактик. Однако серии подсчетов радиоисточников в конце 50-х и начале 60-х годов показали, что она несовместима с результатами наблюдений: в прошлом было больше радиоисточников, чем сейчас.

Заключение о том, что Вселенная эволюционирует, было подкреплено в 1965 г. открытием реликтового излучения с тепловым спектром при температуре 3 К. Очень трудно объяснить это излучение, если не считать его остатком от ранней горячей плотной фазы Вселенной. Такая фаза будет осуществляться, если фридмановские модели являются хорошим приближением, начиная приблизительно с первых ста секунд после начальной сингулярности. Но была ли в действительности сингулярность, которая являлась началом Вселенной и самого времени? Этот вопрос был рассмотрен Лифшицем и Халатниковым (1963). Они построили приближение в виде степенного ряда к тому, что, как предполагалось ими, было наиболее общим решением с сингулярностью уравнений Эйнштейна. При этом они обнаружили, что это решение содержало на одну произвольную функцию меньше, чем самое общее решение. Отсюда эти авторы сделали вывод, что сингулярность не будет осуществляться в общем решении, а появляется только в решениях, обладающих некоторой специальной симметрией, как модели Фридмана. Однако позднее они выяснили, что их решение не было наиболее общим и что в действительности можно получить сингулярные решения с полным числом произвольных функций (Лифшиц и Халатников, 1970). Это говорило о том, что сингулярности возможны в общих решениях, но не отвечало на вопрос, не являются ли они при определенных условиях неизбежными. Более того, не является вполне ясной применимость разложения в степенной ряд, использовавшегося этими авторами.

Совершенно другой подход к вопросу о наличии сингулярностей был предложен Пенроузом (1965). Для того чтобы показать, что в определенных предположениях сингулярность неизбежна при гравитацион-

ном коллапсе звезды, он использовал глобальные геометрические конструкции. Эти глобальные методы были расширены и применены к космологии Хокингом и Герочем. Основная идея состояла в том, чтобы получить противоречие с предположением, что Вселенная свободна от сингулярностей, показав, что если это так, то, с одной стороны, должна существовать времениподобная геодезическая, которая максимизирует длину времениподобных кривых между некоторой парой точек, и, с другой стороны, времениподобная геодезическая может быть возмущена таким образом, чтобы получилась несколько более длинная кривая. Кульминацией этих исследований явилась теорема о сингулярностях Хокинга и Пенроуза (1970), применимая в общем случае. Эта и более ранние теоремы зависели не от конкретной природы материального содержания Вселенной, а только от некоторых естественных неравенств на тензор энергии-импульса, которые выражали то обстоятельство, что гравитация всегда должна иметь характер притяжения. Наблюдение реликтового излучения указывает, что Вселенная содержит достаточно материи, чтобы удовлетворять основному условию теоремы Хокинга — Пенроуза. Таким образом, по крайней мере согласно классической общей теории относительности, Вселенная должна содержать сингулярность, которая будет началом времени хотя бы для некоторой времениподобной или световой геодезической. Общность теоремы не позволяет заключить, что все времениподобные или световые геодезические имеют начало на конечном расстоянии в прошлом. Однако представляется вероятным, что в общих решениях это так. Эта теорема не доказывает также, что невозможность продолжения геодезических вызвана тем, что становится неограниченно большой кривизна. В самом деле, существуют некоторые примеры, в которых этого не происходит. Тем не менее кажется, что они представляют собой специальные случаи. Кроме того, Кларк (1975) показал, что, по крайней мере в определенных случаях, общее решение будет обладать сингулярностью кривизны. (За большими подробностями по глобальным методам и сингулярностям отсылаем читателя к гл. 5 и 12.)

1.4. ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС

Теоремы Пенроуза и Хокинга также означают, что сингулярность неизбежна при гравитационном коллапсе звезды, если он прошел определенную критическую стадию. Эта «точка, после которой нет возврата», осуществляется, когда гравитационное поле становится настолько сильным, что оно втягивает обратно всякий свет, испущенный звездой в дальнейшем. Она может быть охарактеризована появлением «замкнутой ловушечной поверхности» — пространственноподобной двумерной поверхности, такой, что и выходящие и входящие семейства ортогональных к ней световых геодезических, направленных в будущее, являются сходящимися. Это значит, что если представить себе, что эта поверхность излучила мгновенную вспышку света, то и выходящий и входящий волновые фронты будут уменьшающимися по площади. Воздействие всякой материи или кривизны пространства-времени, которые встретятся на пути волновых фронтов, выразится в том, что их площадь будет уменьшаться даже еще быстрее. Таким образом, выходящий волновой фронт сократится до нуля за конечное время (более точно, при конечном значении аффинного параметра). При этом он поймает внутри себя всю материю звезды, которая не может выйти за его пределы, потому что не может двигаться наружу быстрее, чем свет. Очевидно, что-то становится не так. В результате образуется сингулярность.

Космологическая сингулярность в прошлом достаточно плоха, потому что она означает, что был некоторый момент времени, до которого ничто не имело смысла и не мог быть задан ни один вопрос. Однако сингулярность в будущем такая, как предсказывается при гравитационном коллапсе, вселяет даже еще большее беспокойство, потому что означает, что для того беспомощного наблюдателя, который был настолько безрассуден чтобы последовать за коллапсом звезды, заканчивается само время. Вблизи предсказанной сингулярности гравитационное поле, по видимому, будет становиться очень сильным, и здесь можно ожидать появления пока неизвестных квантовых гравитационных эффектов. Таким образом, теоремы о сингулярностях показывают, что классическая общая теория относительности предсказывает свое собственное разрушение. Тем не менее кажется, что мы можем оказаться защищенными от полных эффектов разрушения, поскольку оно может всегда осуществляться в области пространства-времени — чёрной дыре, которая, по крайней мере классически, является невидимой для внешнего наблюдателя. Это предположение было названо Пенроузом «гипотезой космической цензуры». Без этого мы могли бы попадать в неожиданную ситуацию всякий раз, когда коллапсировала звезда в галактике.

Несмотря на значительные усилия, гипотеза космической цензуры остается недоказанной в рамках классической общей теории относительности. Проблема усложняется тем, что желательно избежать рассмотрения несущественных сингулярностей, вызванных плохим выбором координат, или материальных сингулярностей таких, как пересечение линий тока жидкости; последние не имеют никакого отношения к гравитации, а просто отражают неудачность феноменологического описания материального содержания. Тем не менее эта гипотеза подкрепляется вычислениями по теории возмущений и на вычислительных машинах, а также неудачей многочисленных попыток получить из нее противоречия. Поэтому обычно она принимается и представляет собой основу всех исследований по черным дырам.

Исходя из этой гипотезы и из предположения, что плотность энергии материи неотрицательна (что должно выполняться в классическом режиме), можно показать, что площадь поверхности горизонта событий — границы черной дыры — никогда не может уменьшаться со временем (Хокинг, 1971; более ранний вариант этого результата был получен Христодулу, 1970). Более того, когда две черные дыры сталкиваются и сливаются, образуя одну черную дыру, площадь горизонта событий вокруг конечной черной дыры больше, чем сумма площадей горизонтов исходных черных дыр. Следовательно, можно ожидать, что система, испытывающая гравитационный коллапс или содержащая сталкивающиеся черные дыры, в конце концов придет в состояние стационарной черной дыры с испусканием определенного количества гравитационного излучения. По «теореме об отсутствии волос», упомянутой выше, эти стационарные состояния описываются семейством решений Керра—Ньюмена, которые зависят только от трех параметров: массы, момента количества движения и электрического заряда (см. гл. 6). Реальная черная дыра, взаимодействующая с остальной частью Вселенной, не будет находиться точно в стационарном состоянии, но во многих случаях она может рассматриваться как малое отклонение от решения Керра. Замечательным свойством этих решений является то, что на их фоне уравнения теории возмущений могут быть решены разделением переменных (см. гл. 7). Это дает возможность проделать детальные расчеты многих процессов. Ситуацией, к которой неприменим подход, основанный на рассмотрении малых возмущений, является коллапс асимметричной звезды или столкно-

вление двух черных дыр. Хотелось бы знать, насколько велико гравитационное излучение, которое может быть испущено в этих случаях, поскольку они представляются наиболее вероятными его источниками, которые можно было бы обнаружить (см. гл. 3). Компьютерные расчеты осесимметричных столкновений указывают, что количество испущенного гравитационного излучения довольно мало (Смарт, 1977). Однако имеются аргументы в пользу того, что это количество может быть намного большим в более реалистичном неосесимметричном случае.

Наблюдательный поиск черных дыр существенно продвинулся вперед с запуском в 1971 г. спутника «Ухуру» с приемником рентгеновских лучей на борту. В настоящее время наилучшим кандидатом является Лебедь X-1, описанный выше, но имеется и ряд похожих систем, для которых данные наблюдений менее полны. «Ухуру» обнаружил также источники рентгеновских лучей, которые представляются находящимися в центрах шаровых скоплений звезд. Считается, что они могут быть черными дырами с массами порядка тысячи солнечных масс, на которые аккрецирует газ, теряемый звездами в скоплении. В большом масштабе кажется вероятным, что черные дыры в миллион солнечных масс или больше могут присутствовать в галактических ядрах и квазарах. Однако для этого нет еще достаточно прямых наблюдательных доказательств. Мы отсылаем читателя к гл. 8.

Как отмечалось выше, площадь горизонта событий черной дыры обладает тем свойством, что со временем она может только возрастать, а не уменьшаться. Это заставило Бекенштейна в 1972 г. выдвинуть предположение, что она может быть связана с термодинамической величиной — энтропией, которая измеряет степень беспорядка системы или недостаток информации о ней. Он указал, что «теорема об отсутствии волос» означает, что очень большое количество информации о звезде было безвозвратно потеряно, когда она сколлапсировала, образовав черную дыру. В связи с этим им было высказано утверждение, что площадь горизонта событий является мерой этой ненаблюдаемой информации, которая может рассматриваться как энтропия черной дыры. Другие аналогии между классическими черными дырами и термодинамикой были обнаружены Бардиным, Картером и Хокингом (1973). Однако имелось, по-видимому, неопреодолимое препятствие, связанное с приписыванием черной дыре конечной энтропии. Действительно, конечность энтропии означала бы, что черная дыра должна обладать конечной температурой и тем самым должна быть способной оставаться в равновесии с тепловым излучением той же температуры. Но это казалось невозможным, потому что черная дыра будет поглощать часть излучения, но по самому ее определению не сможет испустить что-либо взамен.

Этот парадокс оставался в силе до тех пор пока Хокинг (1974) не обнаружил, что применение квантовой механики к материальным полям на фоне геометрии, отвечающей метрике черной дыры, приводит к постоянной скорости рождения частиц и их излучения на бесконечность. Испущенные частицы будут обладать тепловым спектром с температурой, пропорциональной силе тяготения на поверхности черной дыры, которая является мерой напряженности гравитационного поля на горизонте событий и оказывается обратно пропорциональной массе черной дыры. Это излучение частиц будет позволять черной дыре оставаться в равновесии с тепловым излучением той же температуры.

Существует ряд различных способов объяснения теплового излучения от черных дыр, но, вероятно, наиболее легким для понимания является следующий. Из принципа неопределенности вытекает, что «пустое» пространство заполнено парами виртуальных частиц и анти-

частиц, которые вместе появляются в некоторой точке пространства-времени, расходятся, а затем снова сходятся и аннигилируют друг с другом. Они называются виртуальными, поскольку, в отличие от «реальных» частиц, не могут непосредственно наблюдаться с помощью детектора частиц. Однако связанные с ними косвенные эффекты были измерены в ряде экспериментов таких, как лэмбовский сдвиг и эффект Казимира. Если имеется черная дыра, то один член пары может упасть в нее, оставляя второго без партнера, с которым он мог бы проаннигилировать. Покинутая частица или античастица может последовать за своим напарником в черную дыру, но она может также ускользнуть на бесконечность, где появится как частица или античастица, испущенная черной дырой. Эквивалентно можно рассматривать того члена пары, который упал в черную дыру (например, частицу), как античастицу, движущуюся назад во времени и выходящую из черной дыры. При достижении ею точки, в которой впервые появилась пара частица-античастица, она будет рассеяна гравитационным полем в античастицу, двигающуюся вперед во времени и уходящую на бесконечность. Таким образом, можно считать испущенное излучение пришедшим изнутри черной дыры и протуннелировавшим квантовомеханическим образом через потенциальный барьер, созданный вокруг нее гравитационным полем, — барьер, который нельзя преодолеть классически. По «теореме об отсутствии волос» сведения внешнего наблюдателя об области, из которой пришло излучение, ограничено ее полной массой, моментом количества движения и электрическим зарядом. По этой причине черная дыра с равной вероятностью будет излучать всякую конфигурацию частиц с одной и той же полной энергией, моментом количества движения и зарядом (хотя не все эти конфигурации с равной вероятностью уходят на бесконечность, поскольку потенциальный барьер вокруг черной дыры зависит от энергий и моментов количества движения индивидуальных частиц и может отражать их обратно в черную дыру). Таким образом, черная дыра может излучить телевизионный приемник или даже самого Чарльза Дарвина, но число конфигураций, отвечающих таким экзотическим возможностям, очень мало. Подавляюще вероятным является излучение частиц, имеющих почти тепловой спектр. Тот факт, что излучение является тепловым, означает, что оно обладает дополнительной степенью случайности или неопределенности, кроме той, которая обычным образом связана с квантовой механикой. В классической механике можно делать определенные предсказания как о положении, так и о скорости частицы. В обычной квантовой механике можно с определенностью предсказать *либо* положение, *либо* скорость, но не то и другое вместе. Альтернативная возможность состоит в предсказании одной комбинации положения и скорости. Таким образом, способность делать определенные предсказания, грубо говоря, сокращается наполовину. Однако в случае частиц, излученных черной дырой, нельзя с определенностью предсказать ни положение, ни скорость. Все, что можно предсказать, это *вероятность* того, что частицы будут испущены в определенных модах. Это уменьшение возможности делать предсказания, по-видимому, должно быть связано с тем разрушением, которого можно ожидать в пространственно-временной сингулярности. Его можно истолковать таким образом, что новая случайная информация приходит в ту область Вселенной, которую мы наблюдаем, изнутри черной дыры.

Для черной дыры в одну солнечную массу предсказываемая температура приблизительно равна только 10^{-7} К, так что ее излучение будет совершенно пренебрежимым и утонет в трехградусном микроволновом фоне (реликтовом излучении). Однако могло также существовать семейство *намного* меньших «первичных черных дыр», которые могли образоваться

в результате коллапса неоднородностей на ранних горячих стадиях Вселенной. Черная дыра в 10^{15} г будет иметь радиус около 10^{-13} см и будет излучать энергию с мощностью около 6000 МВт, в основном γ -излучение, нейтрино и электрон-позитронные пары. Излученная энергия будет уравниваться потоком отрицательной энергии через горизонт событий в черную дыру. Следовательно, горизонт событий будет уменьшаться по площади, тем самым нарушая классический закон о том, что его площадь может только возрастать. Тем не менее будет по-прежнему справедливо обобщенное второе начало термодинамики, которое устанавливает, что сумма энтропии вне черной дыры и площади горизонта событий с некоторым множителем никогда не уменьшается.

Излучение от черных дыр было получено из полуклассического приближения, в котором метрика пространства-времени считается классической, а материальные поля рассматриваются квантово-механически на заданном пространственно-временном фоне (см. гл. 13). Это должно быть хорошим приближением для черных дыр, масса которых велика по сравнению с планковской массой, равной приблизительно 10^{-5} г. Однако такое описание становится несправедливым, когда масса черной дыры снижается до этой величины. Пока что нет хорошего теоретического подхода для описания конечной стадии черной дыры, но, по-видимому, существует три возможности:

1) Черная дыра могла полностью исчезнуть, оставив после себя только тепловое излучение, которое она испустила за время своего испарения.

2) Она могла оставить после себя неизлучающую черную дыру с массой порядка планковской.

3) Излучение энергии могло продолжаться неограниченно, образуя голую сингулярность отрицательной массы.

Третья возможность кажется неправдоподобной, поскольку она будет приводить к неустойчивым решениям. Вторая возможность кажется также довольно невероятной. Она означала бы, что могло существовать очень большое количество мертвых черных дыр планковской массы, которые могли бы обладать более высокой плотностью массы, чем это ограничивается космологическими наблюдениями. Наиболее естественной представляется первая возможность, состоящая в том, что черные дыры полностью исчезают. Если это верно, то должно иметь место несохранение барионного числа. Аргументом в пользу этого является следующее. Допустим, что звезда, состоящая в основном из барионов, коллапсирует, образуя черную дыру. Первоначально температура черной дыры будет очень низкой, так что большую часть своей энергии она будет излучать в виде частиц нулевой массы таких, как нейтрино, гравитоны и фотоны. Только когда масса черной дыры упадет приблизительно до 10^{15} г, температура станет достаточно высокой, чтобы испускалось значительное количество барионов и антибарионов. Даже если бы на этой стадии существовал некоторый механизм, обеспечивающий преимущественное излучение барионов над антибарионами (ни один такой механизм неизвестен), было бы слишком поздно, потому что оставшейся энергии будет недостаточно для того, чтобы излучить исходное количество барионов. Таким образом, если черная дыра полностью исчезает, то будет нарушаться обычный закон сохранения барионного числа.

Единственная надежда на наблюдение теплового излучения от черных дыр, по-видимому, будет существовать в том случае, если имелось значительное количество первичных черных дыр с массами меньшими, чем 10^{17} г. Так или нет, зависит от условий в ранней Вселенной, о которых известно немного. Измерения космического фона γ -лучей

в районе 100 МэВ устанавливают верхний предел приблизительно в 200 штук на кубический световой год для средней плотности черных дыр с массами около 10^{15} г. Чтобы улучшить этот результат, надо попытаться обнаружить индивидуальные черные дыры по всплескам очень быстрого излучения, которое они будут производить в конце своей жизни. Это может потребовать очень больших детекторов γ -излучения в космосе.

1.5. КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

Таким образом, исследования по классической общей теории относительности и даже по квантовой теории на заданном пространственно-временном фоне, описанные в этой главе, являются довольно хорошо понятыми и полными. Как редакторы, мы достаточно уверены, что статьи по этим вопросам, помещенные в настоящей книге, в течение некоторого времени будут оставаться полными обзорами и что будущее развитие только дополнит их, не изменив того, что мы уже знаем. Этого нельзя сказать о трех статьях по квантовой гравитации Де Витта, Вайнберга и Хокинга. В настоящее время не ясно, какую форму примет последовательная квантовая теория гравитации и даже существует ли такая теория вообще. Тем не менее объем исследований, продолжающихся в этой области, очень велик, и здесь имеется некоторый прогресс.

Существует ряд различных подходов к квантованию гравитации. Некоторые из них описаны в трех статьях, помещенных в этой книге. Вслед за успешным использованием фейнмановских диаграмм в квантовой электродинамике было естественно попытаться применить аналогичную технику к гравитации. Однако наивное применение правил Фейнмана приводило к результатам, которые нарушали унитарность всякий раз, когда в фейнмановских диаграммах присутствовала замкнутая гравитонная петля. Фейнман, Де Витт, Фаддеев и Попов показали, что эта потеря унитарности является результатом калибровочной свободы, которая имеется в общей теории относительности. Последняя отвечает тому обстоятельству, что одна и та же геометрия может описываться многими различными метриками в различных координатных системах. Унитарность можно восстановить с помощью введения поправочного члена, который может быть описан дополнительными фейнмановскими диаграммами, содержащими замкнутые петли «фиктивных» частиц или «духов».

Даже с фиктивными частицами, замкнутые петли приводят к трудностям, потому что, как обычно в теории поля, они расходятся. Существует три типа расходимостей, которые ведут себя как четвертая степень, вторая степень и логарифм параметра обрезания. Первые два из них не приводят ни к каким проблемам, поскольку они могут быть отброшены без введения какого-то произвола. Однако это не так для логарифмического члена: остаются неопределенными множители перед некоторыми функциями внешних параметров фейнмановских диаграмм. В других полевых теориях, таких, как квантовая электродинамика или теория Янга — Миллса, неопределенную величину можно включить в переопределение (перенормировку) константы связи, становящейся в этом случае функцией энергии, при которой она измеряется. Однако этот прием не будет работать в общей теории относительности из-за того, что в ней нет безразмерной константы связи. В настоящее время существует несколько различных взглядов на то, как быть с этой трудной проблемой. Одна школа настаивает на традиционных правилах Фейнмана, но пытается ввести дополнительные материальные поля, которые сократят приводящие к трудностям логарифмические расходимости. Особенно обещающим продвижением в этом направлении является супергравитация, в которой гравитационное поле взаимодействует с другими полями, что позволяет избежать расходимостей.

тон связан со всеми остальными физическими полями — бозонными и фермионными — определенными преобразованиями суперсимметрии. Было показано, что эти теории не содержат логарифмических расходимостей в однопетлевом и, вероятно, также в двухпетлевом приближении по теории возмущений на фоне плоского пространства (то же самое справедливо для чистой гравитации, но не для гравитации, взаимодействующей с обычной — несуперсимметричной — материей). Кажется, однако, что в этой теории, вероятно, будут расходимости в трехпетлевом приближении. Кроме того, в ней имеют место однопетлевые расходимости для возмущений на фоне топологически нетривиальных метрик.

В подходе второй школы также используется теория возмущений на фоне плоского пространства. Представители этого направления не стремятся добиться сокращения всех логарифмических расходимостей, а скорее пытаются найти критерий для определения неопределенных величин, к которым эти расходимости приводят. Один из подходов в рамках этого направления описан в статье Вайнберга. Он рассматривает (в формальном смысле) общую теорию относительности в пространстве размерности $2 + \varepsilon$. Показывает, что если неопределенные величины в этой теории имеют некоторые конкретные значения, то теория приобретает особенно простую форму при высоких энергиях. Затем им приводятся аргументы в пользу того, что это требование «асимптотической безопасности» должно также фиксировать неопределенные величины, даже когда $\varepsilon = 2$, т. е. при размерности, равной четырем.

Третья школа отстаивает ту точку зрения, что теория возмущений на фоне плоского пространства обречена на провал и что нельзя надеяться на получение последовательной теории квантовой гравитации, не учитывая многих других топологий, которыми может обладать гравитационное поле. Некоторый успех в этом направлении уже был достигнут при определении энтропии, связанной с черными дырами, на основе формулировки в терминах интеграла по путям, в которой квантуется само гравитационное поле. Соответствующие результаты находятся в поразительном согласии с результатами полуклассического приближения. Тем не менее намного большее еще должно быть сделано, для того чтобы показать, что этот подход ведет к удачной теории. Более детально этот вопрос освещен в гл. 15.

1.6. БУДУЩИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

В настоящее время мы, по-видимому, хорошо понимаем основные качественные черты классической общей теории относительности. Пока готовилась эта глава, было сделано сообщение о результате, который эффективно разрешает один из наиболее нетривиальных вопросов — предположение о положительности энергии. Остающейся теперь основной глобальной проблемой является гипотеза космической цензуры, которая служит основой всей работы по черным дырам. С другой стороны, в количественном отношении многое остается незавершенным. Мы до сих пор не имеем надежных оценок того, насколько велико гравитационное излучение, которое будет испускаться при гравитационном коллапсе, или каким образом силы реакции излучения видоизменяют движение тел в сильных гравитационных полях. Вероятно, в будущем классическая общая теория относительности, как электродинамика, станет в основном «вспомогательной дисциплиной» для астрофизиков. Главные области интереса будут, видимо, концентрироваться вокруг моделей квазаров на основе черных дыр и процессов в ранней Вселенной.

В настоящее время громадный интерес вызывает проблема объединения гравитации и квантовой механики в последовательную теорию. Конечная надежда состоит в том, чтобы найти Теорию Великого Объединения, которая будет включать все частицы и все взаимодействия. Тогда осуществилась бы заветная мечта последних лет жизни Эйнштейна, но в форме, заметно отличающейся от той, которую он себе представлял.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Лифшиц Е. М., Халатников И. [М.—1963, УФН, т. 80, с. 391; 1970, Phys. Rev. Lett., v. 24, p. 76.
 Bardeen J., Carter B., Hawking S. W. — 1973, Commun. Math. Phys., v. 31, p. 161.
 Christodoulou D. — 1970, Phys. Rev. Lett., v. 25, p. 1596.
 Clarke C.J.S. — 1975, Comm. Math. Phys., v. 41, p. 65.
 Einstein A. — 1915, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss., S. 778, 779, 844; 1939, Ann. Math. (Princeton), v. 40, p. 922.
 Hawking S. W. — 1971, Phys. Rev. Lett., v. 26, p. 1344; 1974, Nature, v. 248, p. 30.
 Hawking S. W., Penrose R. — 1970, Proc. Roy. Soc. Ser. A, v. 314, p. 529.
 Hilbert D. — 1915, Nachr. Ges. Wiss. Gottingen, S. 395.
 Holton G. — 1972, Am. J. Phys., v. 37, p. 968.
 Penrose R. — 1965, Phys. Rev. Lett., v. 14, p. 57.
 Smarr L. — 1977, Ann. N.Y. Acad. Sci., v. 302, p. 569.