

*Упражнение 12.1.* Постройте выражение для плотности на основе анализа размерностей из  $c$ ,  $G$  и  $\hbar$ . Оцените численно эту «планковскую плотность», при которой становятся важными квантовые гравитационные эффекты.

*Ответ:*  $\rho \sim 10^{94}$  г/см<sup>3</sup>.

Пока сингулярность скрыта внутри горизонта событий, она не может влиять на внешний мир. Как говорят, сингулярность «причинно отключена» от окружающего мира. Мы можем продолжать использовать общую теорию относительности для описания наблюдаемой части Вселенной, хотя и эта теория нарушается внутри черной дыры.

Можно ожидать, что решения уравнений Эйнштейна, описывающих равновесные черные дыры, окажутся чрезвычайно сложными. В конце концов черные дыры могут образовываться из звезд с самыми различными распределениями масс, форм (мультипольные моменты), магнитных полей, моментов количества движения и т.д. Любопытно, однако, что самое общее решение для стационарной черной дыры известно в аналитической форме. Оно зависит только от трех параметров: массы  $M$ , момента количества движения  $J$  и заряда  $Q$  черной дыры. Вся остальная информация о начальном состоянии теряется, излучаясь в виде электромагнитных и гравитационных волн во время коллапса. Оставшиеся три параметра — это независимые и наблюдаемые величины, которые полностью характеризуют стационарную черную дыру<sup>1)</sup>. Эта ситуация отражена в афоризме Уилера: «У черной дыры нет волос».

Масса черной дыры поддается определению, например, посредством использования третьего закона Кеплера для спутников, находящихся в гравитационном поле вдали от черной дыры. Заряд можно наблюдать по кулоновским силам, действующим на пробный удаленный заряд. Момент количества движения доступен для наблюдения по неньютоновским гравитационным эффектам. Например, гироскоп, свободный от внешних воздействий, будет прецессировать относительно инерциальной системы на бесконечности (эффект Лензе-Тирринга).

## 12.2. ИСТОРИЯ ИДЕИ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Еще в 1795 г. Лаплас [344] обратил внимание на следствие закона тяготения Ньютона и ньютоновской корпускулярной теории света, согласно которому свет не может покинуть объект, обладающий достаточно большой массой и малым радиусом. Несмотря на столь раннее предсказание возможности существования черных дыр, эта идея не нашла много приверженцев даже после того, как была сформулирована общая теория относительности.

<sup>1)</sup> Полное обсуждение вопроса см. в [109].

В декабре 1915 г. почти одновременно с опубликованием Эйнштейном серии из четырех статей, где излагалась общая теория относительности, Карл Шварцшильд [515] вывел общее релятивистское решение для гравитационного поля, окружающего сферическую массу. Шварцшильд послал статью Эйнштейну, чтобы тот передал ее в Берлинскую академию. В ответе Шварцшильду Эйнштейн писал: «Я не ожидал, что можно было бы сформулировать точное решение проблемы. Ваше аналитическое рассмотрение проблемы представляется мне великолепным». Хотя значимость результата представлялась очевидной для обоих, ни Эйнштейн, ни Шварцшильд и никто другой в то время еще не осознавали, что решение Шварцшильда содержит полное описание внешнего поля сферической электрически нейтральной невращающейся черной дыры. Теперь мы называем такие черные дыры *шварцшильдовскими черными дырами*, в честь Шварцшильда.

Как мы указывали в гл. 3, Чандрасекар [112] открыл в 1930 г. существование верхнего предела массы полностью вырожденной конфигурации. Как почти сразу же понял Эддингтон [180], анализ Чандрасекара означал, что образование черных дыр — это неизбежный итог эволюции массивных звезд. Поэтому Эддингтон писал в январе 1935 г.: «Звезда, по-видимому, должна очень долго излучать и сжиматься, пока не достигнет радиуса в несколько километров, при котором тяготение станет достаточно сильным, чтобы удержать излучение, и звезда сможет, наконец, обрести покой». Однако, продолжая, он заявлял: «Я пришел к заключению, что это почти доведение до абсурда формулы релятивистского вырождения. Различные факторы могут сыграть свою роль, спасая звезду, но я хочу думать, что для нее имеется более надежная защита. Я полагаю, что должны существовать законы природы, не допускающие такого абсурдного поведения звезды».

Как видно из его заключительных замечаний, Эддингтон никогда не принимал результаты Чандрасекара о существовании верхнего предела массы холодной вырожденной звезды. И это несмотря на то, что Эддингтон одним из первых понял и оценил общую теорию относительности Эйнштейна! (Его книга [178] была первым учебником по общей теории относительности, появившимся на английском языке.) Действительно, Эддингтон в дальнейшем продолжал модифицировать уравнение состояния вырожденного релятивистского газа таким образом, чтобы существовали конечные равновесные состояния для звезд с произвольной массой<sup>1)</sup>.

Правда, не один лишь Эддингтон не верил в неизбежность коллапса как результата эволюции массивных звезд. Ландау в той же статье [337], где приводится простой вывод предела массы (см. разд. 3.4), признавал, что для звезд, превосходящих этот предел, «во всей квантовой теории не существует причины, которая предотвратила бы коллапс системы в точку».

<sup>1)</sup> Недавно Чандрасекар [118] высказал сожаление по поводу недалёковидности Эддингтона в отношении черных дыр, заявив: «Высочайший авторитет Эддингтона в те годы задержал развитие плодотворных идей в этих направлениях почти на тридцать лет».

Но вместо того, чтобы следовать трезвому совету, высказанному в начале его статьи («Представляется разумной попытка подойти к проблеме структуры звезд при помощи методов теоретической физики»), в конце ее Ландау отступает и заявляет: «Поскольку в действительности такие массы мирно существуют в виде [нормальных] звезд и отнюдь не проявляют таких абсурдных тенденций, приходится заключить, что все звезды тяжелее, чем  $1,5 M_{\odot}$ , содержат область, в которой нарушаются законы квантовой механики (и тем самым квантовой статистики)».

В 1939 г. Оппенгеймер и Снайдер [426] придали новый импульс дискуссии, рассчитав коллапс однородной сферы с газом при нулевом давлении в рамках общей теории относительности. Они нашли, что любая связь такой сферы с остальной частью Вселенной в конечном счете нарушается. Это был первый строгий расчет, продемонстрировавший образование черной дыры.

Черные дыры и проблема гравитационного коллапса, как правило, игнорировались до 60-х годов, даже дольше, чем нейтронные звезды. Однако в конце 50-х годов Уилер и его сотрудники начали серьезное изучение проблемы коллапса<sup>1)</sup>. В 1968 г. Уилер ввел термин «черная дыра» [611].

В 1963 г. Керр [311] нашел семейство точных беззарядовых решений вакуумных уравнений поля Эйнштейна. Обобщение на случай заряда было получено в дальнейшем Ньюменом и др. [419] как решение уравнений поля Эйнштейна — Максвелла. Связь этих результатов с черными дырами была понята позднее. Теперь мы знаем, что *геометрия Керра — Ньюмена*, описываемая этими решениями, дает единственное и полное описание внешних электромагнитного и гравитационного полей стационарной черной дыры.

В течение этого периода было открыто несколько важных свойств черных дыр и доказано несколько существенных теорем, имеющих к ним прямое отношение. Открытия квазаров в 1963 г., пульсаров в 1968 г. и компактных рентгеновских источников в 1962 г. стимулировали интенсивное теоретическое изучение черных дыр. Наблюдения за рентгеновским источником Суг X-1, входящим в двойную систему, в начале 70-х годов (см. разд. 13.5) дали первое правдоподобное свидетельство в пользу реального существования черных дыр в космосе.

Перейдем теперь от истории к обсуждению физики черных дыр. Начнем наше рассмотрение с обсуждения простейшей черной дыры с  $J = Q = 0$ .

### 12.3. ШВАРЦШИЛЬДОВСКИЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Повторим решение Шварцшильда, приведенное в уравнении (5.6.8):

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2M}{r} \right) dt^2 + \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2. \quad (12.3.1)$$

<sup>1)</sup> Результаты этих исследований приведены в книге [261].